

<https://doi.org/10.15407/knit2024.01.031>  
УДК: 621.311.243, 528.85, 551.58

Н. М. КУССУЛЬ<sup>1,2</sup>, зав. кафедри, д-р техн. наук, проф.

ORCID: 0000-0002-9704-9702

E-mail: nataliia.kussul@gmail.com

С. Ю. ДРОЗД<sup>1,2</sup>, студент магістратури

ORCID: 0000-0002-5149-5520

E-mail: soft.drozd.13@gmail.com

<sup>1</sup> Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України  
Проспект Академіка Глушкова 40, к. 4/1, Київ-187, Україна, 03680

<sup>2</sup> Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»  
Проспект Берестейський 37, Київ, Україна, 03056

## ГЕОПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ПОТЕНЦІАЛУ ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ ДЛЯ РОЗМІЩЕННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ЗА СУПУТНИКОВИМИ ДАНИМИ

Зміни клімату зумовлюють актуальність використання відновлюваної енергетики в усьому світі. Зелена угода визначає політику розвитку енергетики в Європі до 2030 року. Особливо важливе значення цей виклик має в Україні у контексті повоєнного відновлення енергетичної інфраструктури. Тому актуальною проблемою є аналіз придатності територій України для встановлення великих сонячних електростанцій (сонячних ферм) та оптимізація їхнього розміщення. Дане дослідження спрямоване на визначення придатності територій України для розміщення сонячних електростанцій за допомогою супутникових даних про особливості клімату та рельєфу. Серед факторів, які визначають придатність територій для розміщення сонячних ферм, найбільший вплив мають кліматичні показники, включаючи дані про сумарне глобальне горизонтальне сонячне випромінювання (GHI), накопичену температуру вище 25 °C на висоті 2 м, середньорічну швидкість вітру та карту накопичених річних опадів з набору даних ERA5-Land. В даному дослідженні для визначення придатності територій також використовувалися карти рельєфу, що містять інформацію про висоти, схили та затіненість місцевості з проекту Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Придатність територій визначається шляхом геопросторового аналізу методом зважених сум. За результатами досліджень побудовано карту придатності, яка відображає розподіл зон із різними коефіцієнтами придатності (від 0 до 1). Виявлено, що більша частина території України сприятлива для розміщення сонячних електростанцій. Майже половина країни (більш ніж 48 %) має середні показники придатності (0.3...0.4). Кращі умови для розміщення сонячних ферм спостерігаються у південних областях України. Отриману карту придатності територій використано для аналізу оптимальності розміщення вже побудованих найбільших сонячних електростанцій України. Для отримання локації цих енергетичних об'єктів ми використовували дані з Wikimapia. Загалом всі проаналізовані нами великі сонячні електростанції України розміщені в оптимальних територіях. Також дослідження показало, що деякі області, такі як Одеська, Полтавська, Харківська, Запорізька, Дніпропетровська, Донецька і Луганська, мають хороші показники придатності (0.3...0.4), проте використовуються не повністю. Ці області мають великий потенціал для майбутньої побудови потужних і продуктивних сонячних електростанцій.

**Ключові слова:** сонячні електростанції, придатність територій, супутникові дані, клімат, рельєф, геопросторовий аналіз, метод зважених сум.

Цитування: Куссуль Н. М., Дрозд С. Ю. Геопросторовий аналіз потенціалу територій України для розміщення сонячних електростанцій за супутниковими даними. *Космічна наука і технологія*. 2024. **30**, № 1 (146). С. 31–43. <https://doi.org/10.15407/knit2024.01.031>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

## ВСТУП

Війна в Україні призвела до серйозних деструктивних наслідків, зокрема у сфері енергетики. За повідомленнями Національної енергетичної компанії Укренерго станом на травень 2023 р. Україна втратила близько 27 ГВт встановлених потужностей енергогенерації [10]. Найбільше постраждали внаслідок конфлікту енергетичні об'єкти у східній та південній частинах України. Наприклад, Запорізька АЕС потрапила під окупацію, а Каховську ГЕС було повністю зруйновано. Відчутних негативних наслідків зазнала й альтернативна енергетика, зокрема з експлуатації було виведено близько половини сонячних електростанцій.

Відновлення енергетичної інфраструктури є критично важливим для повернення благополуччя та розвитку країни. Враховуючи орієнтацію на Європейську інтеграцію України, важливо не просто відновити ресурси, а розвиватись в контексті Європейської зеленої угоди. А значить, необхідно відмовлятися від використання викопного палива на користь відновлюваних джерел енергії. Крім того, побудова звичних джерел електроенергії, таких як ГЕС, ТЕС, а особливо АЕС, потребує значних затрат матеріальних, фінансових та людських ресурсів. Разом з тим будівництво сонячних електростанцій може бути швидким і відносно доступним за рахунок використання сучасних технологій та стандартизованих компонентів.

Побудова сонячних електростанцій має кілька ключових переваг, що сприяють відновленню та розвитку країни. Зокрема, сонячні електростанції є екологічно чистими відновлюваними джерелами енергії, не вимагають споживання палива та не призводять до шкідливих викидів у атмосферу. Завдяки своїй гнучкості та модульній структурі, сонячні електростанції можуть встановлюватися на різних територіях, включаючи зруйновані області після війни. Вони можуть функціонувати незалежно від централізованої електричної мережі, забезпечуючи місцеве населення та промислові підприємства електроенергією. Крім того, сонячні електростанції можуть допомогти знизити залежність

від імпорту енергії та покращити енергетичну безпеку країни.

Однак успішне використання сонячної енергії вимагає правильного вибору місця для розміщення сонячних станцій. Оптимальне розташування панелей сонячної енергії дозволяє максимізувати виробництво електроенергії і забезпечити оптимальну ефективність системи. Некоректний вибір місця може призвести до зниження продуктивності та недовикористання повного потенціалу сонячної енергії.

Для визначення оптимальних територій для розміщення сонячних станцій корисним джерелом є дані дистанційних вимірювань. Використання супутникових даних дозволяє здійснити швидкий та ефективний аналіз великої кількості інформації про потенційні місця розташування сонячних станцій. Відтак за допомогою супутникових даних можна отримати інформацію про кліматичні умови, рельєф, сонячне випромінювання та інші параметри, які впливають на продуктивність сонячних панелей. При комбінованому аналізі цих даних [6, 11, 14, 18, 25], можна визначити найкращі місця для ефективного встановлення сонячних станцій, щоб максимізувати виробництво сонячної електроенергії.

У даній роботі ми аналізуємо придатність територій України для встановлення ефективних сонячних електростанцій. Використовуючи дані супутникових спостережень про кліматичні та рельєфні особливості країни, ми прагнемо визначити оптимальні зони для побудови сонячних станцій, що забезпечуватимуть максимальний виробіток електроенергії. Подібні дослідження в Україні уже виконувались [22, 27], проте вони враховували не всі фактори і не надають алгоритму визначення придатності всієї території для розміщення сонячних ферм.

Головною метою нашого дослідження є пошук територій, де сонячні електростанції матимуть найвищий потенціал виробництва енергії. Крім того, ми хочемо проаналізувати доречність вибору та дати оцінку оптимальності розміщення уже побудованих сонячних електростанцій на території України для визначення загальної ефективності сонячної енергетики в країні.

## 1. ДАНІ

**1.1. Аналіз впливу ключових геологічних та кліматичних чинників на продуктивність сонячних електростанцій.** Продуктивність сонячних ферм є результатом взаємодії кількох ключових геологічних та кліматичних факторів. Наукові дослідження показують, що особливо важливими чинниками, які впливають на ефективність збору сонячної енергії, є сонячна активність [20], температура повітря [2, 5, 15, 21, 23], кількість опадів та вологість повітря [19, 20, 22], сила вітру [2, 8, 9, 15, 19, 20] та рельєф місцевості [3, 11].

Сонячна активність, яка вимірюється як глобальна сонячна інсоляція на горизонтальній поверхні (GHI), визначає кількість сонячної енергії, що досягає земної поверхні. Висока сонячна активність забезпечує більшу кількість сонячної енергії для збору сонячними панелями і сприяє вищій виробничій потужності сонячних електростанцій. Тому місця з вищою сонячною активністю можуть мати більшу пріоритетність при виборі місця для встановлення великих сонячних ферм.

Наступним важливим фактором, що впливає на продуктивність сонячних електростанцій, є температура повітря. Висока температура може негативно вплинути на здатність сонячних панелей перетворювати сонячне випромінювання на електричну енергію, адже підвищення температури призводить до збільшення провідності напівпровідникових матеріалів, які використовуються у фотоелектричних елементах [7]. Збільшення провідності напівпровідникових матеріалів, у свою чергу, спричиняє збільшення потоку носіїв заряду в елементах, але також зменшує генеровану напругу. У результаті ефективність продукування електроенергії зменшується.

Зменшення ефективності сонячних панелей спостерігається при збільшенні температури фотоелектричної панелі понад 25 °C (77 °F) і описується температурним коефіцієнтом [12, 13]. Цей коефіцієнт показує, наскільки вихідна потужність зменшується при збільшенні температури на кожен градус вище контрольної температури, яка зазвичай становить 25 °C. Тому оптимальними регіонами для сонячних ферм є ті, де температура підтримується на рівні нижче 25 °C.

Іншим чинником, що впливає на продуктивність сонячних електростанцій, є опади та вологість повітря. Дощ та сніг можуть блокувати пряме сонячне випромінювання, яке потрапляє на сонячні панелі, зменшуючи ефективність вироблення електроенергії. Крім того, вологе повітря розсіює сонячне світло і зменшує його проникнення через атмосферу, що також призводить до зменшення продуктивності сонячних панелей.

Вітер може мати як позитивний, так і негативний ефект на сонячну електростанцію. З одного боку, сильні вітри створюють механічне навантаження на сонячні панелі. Вони викликають вібрації та напруження, які можуть призвести до пошкоджень структури електростанції. З іншого боку, вітер сприяє охолодженню сонячних електростанцій, що допомагає зменшити негативний вплив високої температури навколишнього середовища та забезпечує оптимальну робочу температуру для сонячних панелей. Оскільки за умови використання надійного кріплення для панелей шкідливий ефект вітрів можна мінімізувати, у даному дослідженні ми розглядаємо вітер, перш за все, як позитивний чинник на продуктивність сонячних електростанцій.

З боку геологічних факторів, значний вплив на ефективність збору сонячної енергії мають такі параметри рельєфу, як наявність схилів, висота та затіненість місцевості.

Оптимальний нахил сонячних панелей дозволяє максимально використовувати потенційну сонячну енергію. Проте під крутими схилами рельєфу розташувати панелі під правильним кутом може бути вкрай складно. Некоректна, або не достатньо коректна, орієнтація панелей призводить до зменшення кількості сонячного випромінювання, що потрапляє на фотоелементи, і, відповідно, знижує продуктивність вироблення електроенергії.

Висота місцевості також впливає на продуктивність сонячних панелей. Сонячні батареї більш ефективні на великих висотах [4], де вони краще піддаються впливу прямого сонячного випромінювання за рахунок меншого атмосферного бар'єру, порівняно з рівнем моря.

Важливим фактором продуктивності сонячних електростанцій є ступінь їхньої затіненості.

Наявність дерев, будівель або інших перешкод, які кидають тінь на панелі, може призводити до зниження виробництва електроенергії.

Таким чином, ідеальна територія для ефективного використання сонячних панелей має мати сприятливий клімат, що включає високий рівень прямого сонячного випромінювання (GHI), помірні температури, достатній, але не надто сильний вітер та низькі опади. При цьому рельєф такої місцевості повинен мати м'який схил або бути рівниною з оптимальним нахилом, достатньою висотою місцевості та незначною затіненістю від об'єктів.

Для проведення нашого дослідження, спрямованого на визначення найбільш придатних зон для розміщення сонячних електростанцій на території України, ми вирішили розробити кліматичні та рельєфні карти.

**1.2. Побудова кліматичних карт України.** Для побудови карт клімату ми використовували погодинні дані з набору глобальних даних ERA5-Land з роздільною здатністю 9 км, наданих Copernicus Climate Data Store. Цей набір містить всі необхідні в рамках нашого дослідження параметри для аналізу клімату, доступні від 1950 року: дані про сонячне випромінювання, температуру на висоті 2 м, східну ( $u$ ) та північну ( $v$ ) складові вітру на висоті 10 м, загальну кількість опадів, зокрема дощу та снігу.

Для забезпечення коректної оцінки клімату та врахування його змін в часі ми не використовували надто старі дані, а обмежилися використанням даних з 2015 по 2022 роки. Це дозволило нам забезпечити актуальність результатів нашого дослідження.

Для оцінки розподілу прямого сонячного випромінювання по території України ми виконали розрахунки щорічних накопичених значень глобального горизонтального сонячного випромінювання (GHI) окремо за кожен рік періоду 2015—2022 рр., які потім використано для побудови усередненої карти для всього періоду (рис. 1). Такий підхід дозволяє нам отримати точнішу карту розподілу сонячної енергії та визначити області з найбільшим потенціалом для використання сонячних електростанцій.

Як видно з рис. 1, кількість накопиченого сонячного випромінювання рівномірно зростає з півночі на південь. Найменше прямого сонячного світла локалізовано у північно-західних регіонах. Центральна Україна піддається середньому впливу сонячної радіації (1000... 1250 кВт×год/м<sup>2</sup>). Найбільше сонячного випромінювання (понад 1250 кВт×год/м<sup>2</sup>) зосереджено у південній та східній частинах України, зокрема максимум досягається на півострові Крим, менше у Миколаївській, Херсонській, Одеській, Запорізькій та Донецькій областях, що свідчить про високу потенційну придатність цих зон для розміщення сонячних електростанцій.

Для оцінки розподілу температур, що можуть негативно позначатися на продуктивності роботи сонячних ферм, з доступних погодинних даних про температуру на висоті 2 м ми відібрали значення, що перевищують 25 °C (зважаючи на температурний коефіцієнт). Потім для кожного року періоду 2015—2022 рр. окремо обчислювались накопичені за рік сумарні значення цих температур, які також усереднювались для побудови остаточної карти (рис. 2). Таким чином ми визначаємо території, де температурний ефект може мати найбільший негативний вплив на сонячні панелі. Як видно з рис. 2, найбільш гарячою зоною є степова Україна, зокрема південні та східні регіони, особливо Крим, Херсонська, Запорізька області. У центральній Україні температури відносно помірні. Низькі температури спостерігаються в західній Україні та у зоні Кримських гір, а найхолоднішою зоною є Карпатські гори (Закарпатська область).

Додатково до аналізу температурних зон інформація про швидкість вітру допомагає нам отримати глибше розуміння кліматичних характеристик різних областей України. Оскільки ERA5-Land не надає безпосередню інформацію про швидкість вітру, для побудови карти вітрів ми розраховуємо її самостійно як квадратний корінь з суми квадратів східної та північної складових вітру, доступних у наборі даних ERA5-Land:

$$wind_{speed} = \sqrt{u\_wind^2 + v\_wind^2}, \quad (1)$$

Для кожного року (2015—2022 рр.) ми обчислюємо середньорічну швидкість вітру та усе-

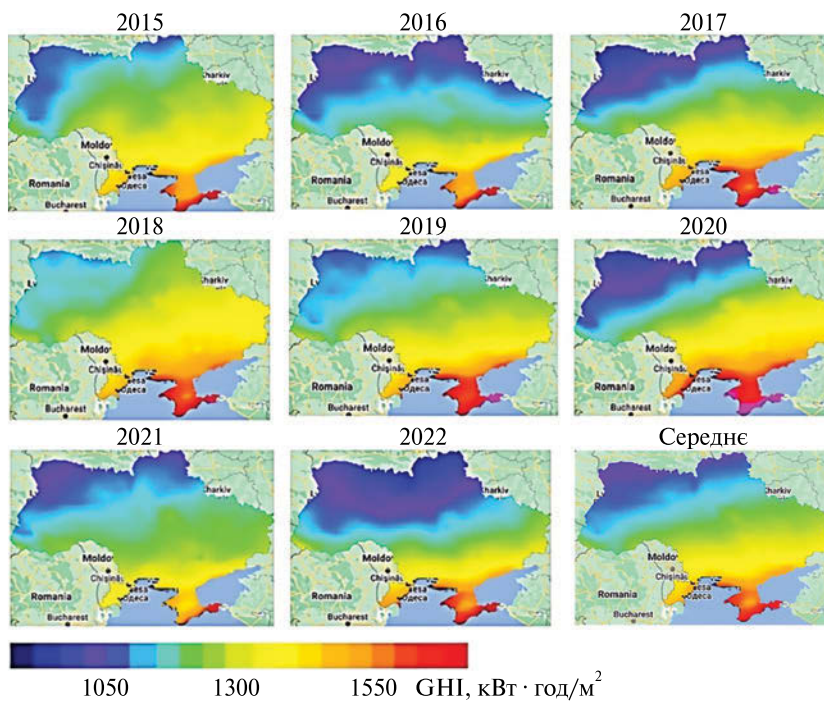


Рис. 1. Щорічні значення накопиченого глобального горизонтального сонячного випромінювання (GHI) у 2015—2022 рр. та середнє за цей період

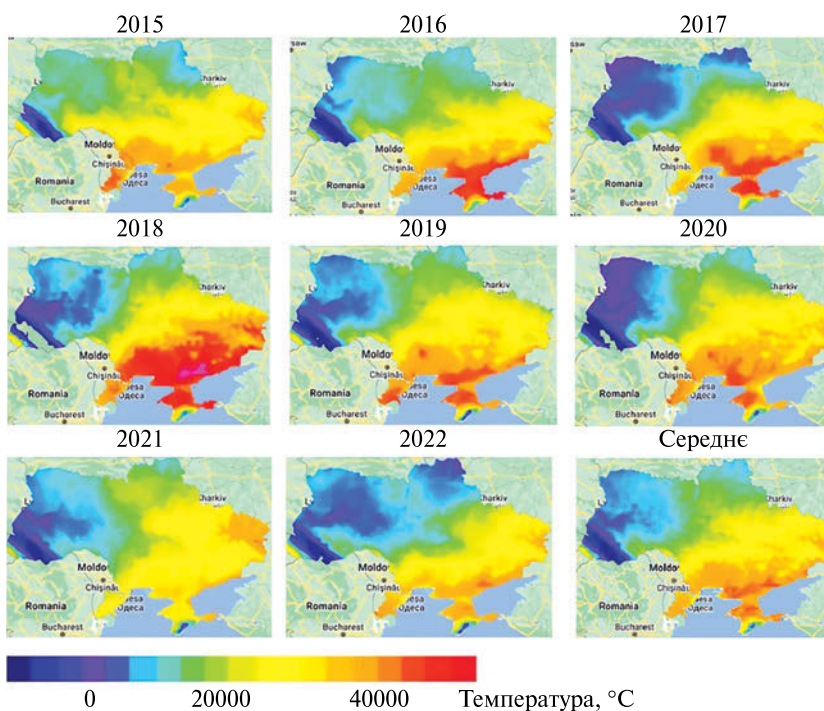


Рис. 2. Щорічні значення накопичених температур, вищих за 25 °C у 2015—2022 рр. та середнє за цей період

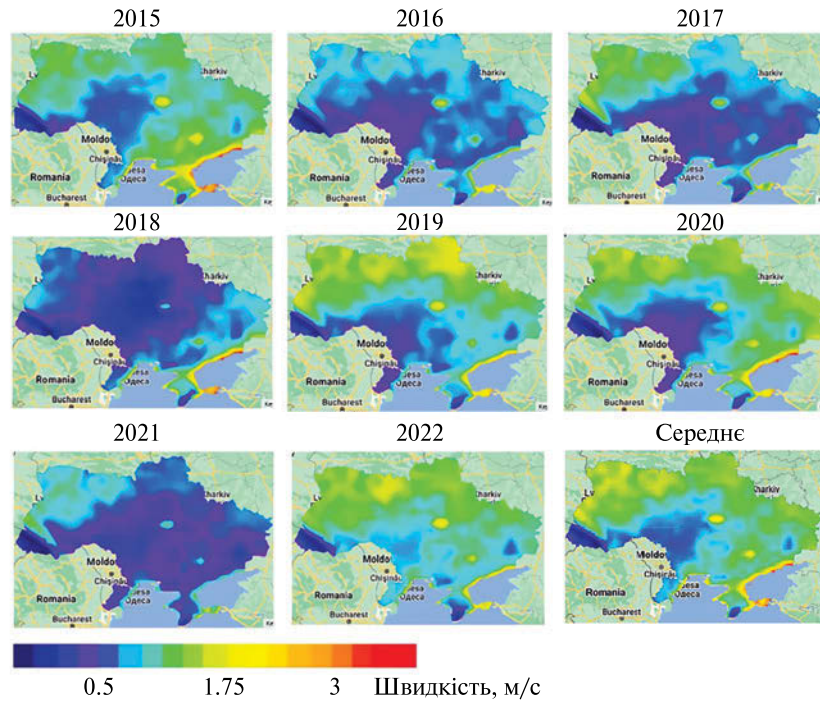


Рис. 3. Щорічні значення середньої швидкості вітру у 2015—2022 рр. та середнє за цей період

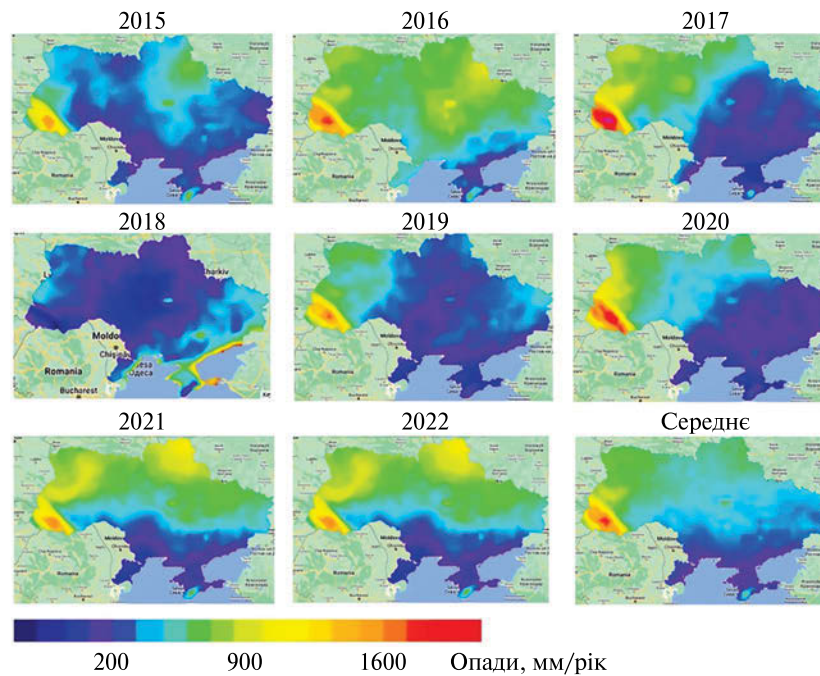


Рис. 4. Щорічні значення накопичених за рік опадів у 2015—2022 рр. та середнє за цей період

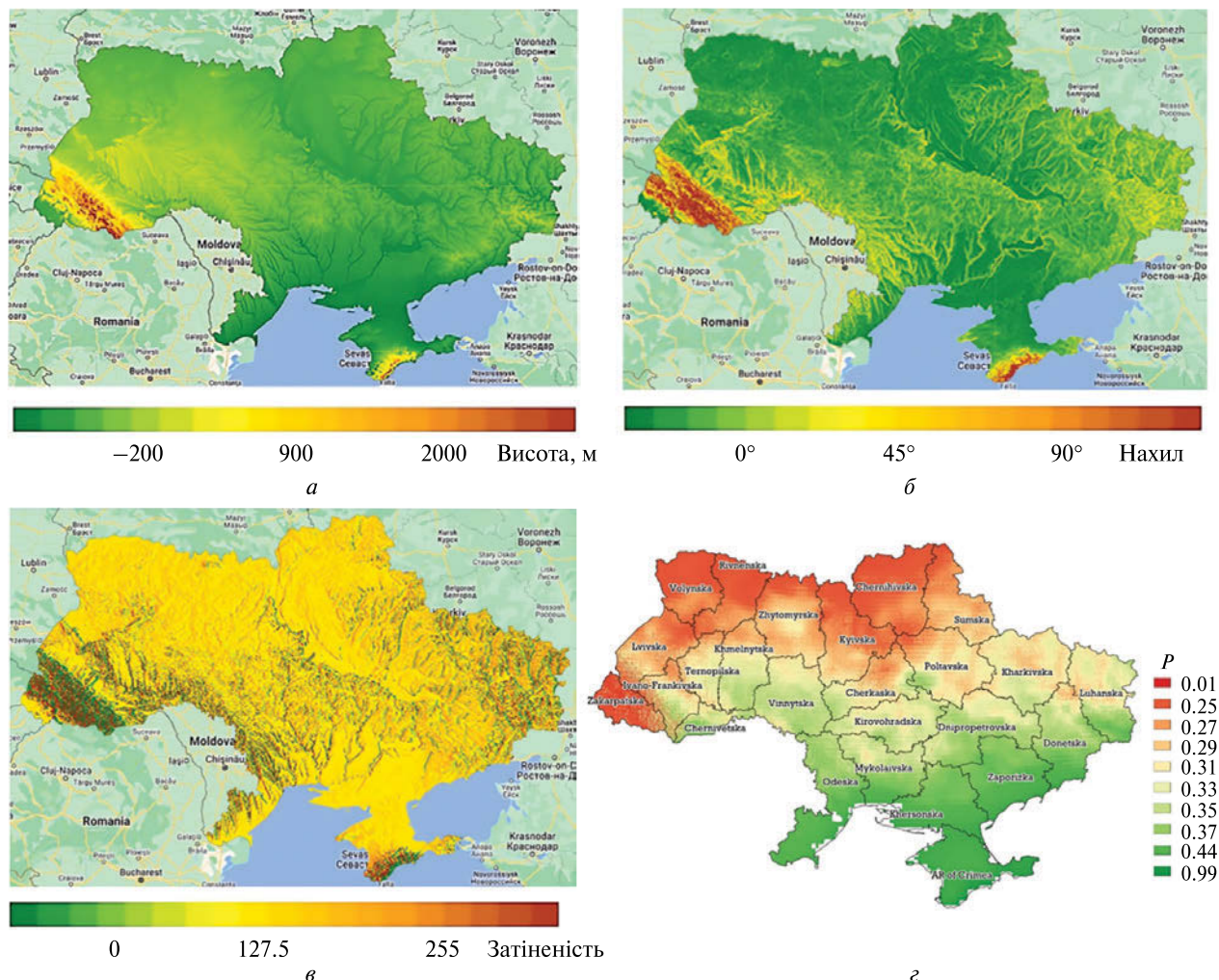


Рис. 5. Карти висот (а), схилів місцевості (б), затіненості (в) та потенціалу  $P$  територій України для розміщення сонячних електростанцій (г)

реднені значення для всього періоду (рис. 3). Видно, що найсильніші вітри зосереджені біля узбережжя Азовського моря на півострові Крим та в Донецькій і Запорізькій областях. Для основної території України характерні вітри середньої швидкості (1...2 км/год), а найслабші вітри спостерігаються у Закарпатській, Вінницькій, Одеській областях та біля Кримських гір.

При побудові карт опадів ми обчислюємо накопичені дощові та снігові опади протягом року. Карти щорічних накопичених опадів, а також усереднені значення для всього періоду 2015—2022 рр. представлено на рис. 4. Видно, що найбільша кількість річних опадів випадає

на території Карпатських гір. Також районами з великою кількістю опадів є області північно-західної України та зона Кримських гір. Найбільш посушливими є південні та східні області.

**1.3. Побудова рельєфних карт України.** Для побудови карт, що відображають особливості рельєфу територій України, ми використали цифровий набір даних рельєфу Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Ці дані надають глобальну модель рельєфу земної поверхні з просторовою роздільною здатністю 90 м і охоплюють навіть непрохідні ділянки землі. Набір містить інформацію про висоти (рис. 5, а), але за допомогою вбудованих функцій у хмарному середовищі

GEE (Google Earth Engine) можна також обчислити нахил (Slope, рис. 5, б) та затіненість місцевості (Hillshade, рис. 5, в), що надають додаткову корисну інформацію для нашого дослідження.

При обчисленні крутизни схилів місцевості алгоритм у GEE визначає кут нахилу поверхні в кожній точці цифрової моделі рельєфу. Величина схилу вимірюється в градусах і представляє кут нахилу поверхні до горизонту. Значення 0 відповідає горизонтальній поверхні, а вищі значення вказують на відповідний нахил (від 1° до 90°). З рис. 5, б можна спостерігати, що основна частина України має відносно рівний рельєф без крутих схилів. Нерівна місцевість переважає в основному в зоні Карпатських та Кримських гір. Незначні схили рівномірно поширені по всій території країни, за винятком північної частини (зони Полісся), частково Херсонської області та півострова Крим.

Величина затіненості (Hillshade) представляє інтенсивність тіней на рельєфі і вимірюється в діапазоні від 0 (найглибша тінь) до 255 (найсвітліший області без тіней). У середовищі GEE при обчисленні Hillshade для кожної точки на поверхні розраховується напрямок освітлення, а потім визначається кут між напрямком світла та нормаллю до поверхні. Цей кут використовується для визначення інтенсивності тіней. З рис. 5, в видно, що в Україні найбільш тінисті місцевості зосереджуються у гірських зонах (Карпати та Кримські гори), а також вздовж південно-західного кордону країни, менш тінисті місцевості рівномірно поширені по центральній Україні. Найменш затіненими територіями є північно-західна Україна та Херсонська область, що логічно узгоджується з картою схилів, адже тіні утворюються за рахунок нерівностей рельєфу.

**1.4. Отримання даних про розміщення найбільших електростанцій України.** На основі кліматичних та рельєфних карт ми хочемо не лише оцінити потенціал територій України для побудови ефективних сонячних електростанцій, але й проаналізувати та оцінити оптимальність розміщення вже побудованих найбільших об'єктів сонячної енергетики України.

Для отримання даних про розміщення найбільших сонячних електростанцій України ми

використали відкриті карти, надані середовищем Wikimapia (<https://wikimapia.org/>).

Wikimapia є онлайн-картографічною платформою, яка дозволяє користувачам створювати, редагувати та розглядати географічну інформацію про різні об'єкти на мапі. Таким чином, використання Wikimapia дозволило нам отримати доступ до актуальної інформації про найпотужніші об'єкти сонячної енергетики України і їхнє розташування.

Для досліджень були завантажені векторні полігони 230 найбільших сонячних електростанцій України. Ці полігони відображають форму об'єктів, містять інформацію про географічні координати, назву та тип електростанцій (solar farm, solar array тощо).

За допомогою отриманого набору ми можемо провести геопросторовий аналіз і здійснити оцінку адекватності розміщення найбільших сонячних електростанцій України, а також визначити території, потенціал яких використовується недостатньо.

## 2. МЕТОДОЛОГІЯ

Для визначення оптимальних територій для розміщення сонячних панелей за допомогою супутникових даних про клімат та рельєф України ми пропонуємо використати метод зважених сум. Основна ідея цього методу полягає в тому, що різні параметри, які впливають на придатність території, враховуються з різною вагою в залежності від сили та характеру (позитивний чи негативний) впливу цих параметрів на продуктивність сонячних панелей.

Спочатку ми нормалізуємо всі дані, масштабуючи їх до діапазону від 0 до 1. Це допомагає порівнювати значення різних параметрів, що мають різні одиниці вимірювання. Для нормалізації кожного параметра ми використовуємо формулу

$$\text{normalized}_{\text{value}} = \frac{\text{value} - \min_{\text{value}}}{\max_{\text{value}} - \min_{\text{value}}} \quad (2)$$

де  $\text{normalized}_{\text{value}}$  — нормалізоване значення параметра,  $\text{value}$  — початкове значення параметра,  $\min_{\text{value}}$  — мінімальне значення параметра в межах усієї території,  $\max_{\text{value}}$  — максимальне значення параметра у межах усієї території.



Наступним кроком після нормалізації ми переходимо до визначення вагових коефіцієнтів для кожної складової. Вагові коефіцієнти для GHI [16, 26], температури [16] та сили вітру [16] ми встановили шляхом аналізу кореляційних залежностей між цими параметрами та продуктивністю сонячних панелей, використовуючи результати наявних досліджень. Через відсутність подібних досліджень для кількості опадів та рельєфу ваги для цих параметрів були встановлені шляхом експертної оцінки. Визначені ваги для кожного параметра наведено у табл. 1.

Після встановлення вагових коефіцієнтів, ми обчислюємо зважену суму шляхом множення значень нормалізованих параметрів на їхні вагові коефіцієнти і підсумовування отриманих значень. Формула для обчислення зваженої суми у нашому дослідженні має вигляд

$$w_s = 0.8 \times \text{GHI} - 0.4 \times \text{Temperature} + 0.2 \times \text{Wind}_{\text{speed}} - 0.3 \times \text{Precipitation} + 0.3 \times \text{Elevation} - 0.2 \times \text{Slope} - 0.4 \times \text{Hillshade}, \quad (3)$$

де  $w_s$  — зважена сума, GHI — накопичене за рік глобальне горизонтальне сонячне випромінювання, Temperature — накопичена за рік активна температура вище 25 °C,  $\text{Wind}_{\text{speed}}$  — середня швидкість вітру, Precipitation — накопичені за рік опади, Elevation — висота, Slope — схил, Hillshade — затіненість.

Ця формула враховує вагові коефіцієнти для кожного параметра, які були вказані в таблиці. Параметри з позитивними коефіцієнтами (наприклад, GHI, Wind speed, Elevation) вважаються бажаними для підвищення продуктивності сонячних панелей, тоді як параметри з від’ємними коефіцієнтами (наприклад, Temperature, Precipitation, Slope, Hillshade) вважаються небажаними і можуть негативно впливати на продуктивність.

Після обчислення зваженої суми ми нормалізуємо результати для отримання карти придатності територій в інтервалі 0...1, де 0 позначає території з найгіршими кліматичними та геологічними характеристиками, а 1 — найбільш придатні території для ефективного розміщення сонячних електростанцій.

Зауважимо, що метод зважених сум — це найпростіший спосіб врахування різних факторів на

основі експертних оцінок. Основним викликом при використанні цього методу є визначення вагових коефіцієнтів факторів впливу. Для зменшення суб’єктивності оцінок в умовах не стохастичної невизначеності ми плануємо удосконалити цей метод шляхом використання нечіткої логіки [24].

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ

**3.1. Аналіз потенціалу територій України для розвитку сонячної енергетики.** Як результат нашого дослідження на рис. 5, з представлено карту, що відображає придатність територій для ефективного розміщення сонячних електростанцій. Видно, що сприятливими зонами для розвитку сонячної енергетики є території південної України, що охоплюють Одеську, Херсонську, Миколаївську, Запорізьку області та особливо півострів Крим, де умови для розміщення продуктивних сонячних ферм найкращі, навіть не зважаючи на наявність гір.

Також придатними територіями для встановлення сонячних електростанцій є частини центральної та східної України, а саме Чернівецька, Вінницька, Дніпропетровська, Донецька та частково Луганська області.

Найменш сприятливими з точки зору кліматичних та рельєфних факторів є регіони північної України (зокрема Полісся) та Закарпатська область. Такий результат можна пояснити тим, що ці області характеризуються вологим кліматом з великою річною кількістю опадів у вигляді дощу і снігу, що зменшують доступність сонячного світла. Крім того, більшість з цих регіонів розташовані у низовинах, за винятком

Таблиця 1. Вагові коефіцієнти для параметрів клімату та рельєфу

Параметр	Коефіцієнт
GHI	0.85
Temperature (>25 °C)	-0.4
Wind speed	0.3
Precipitation	-0.3
Elevation	0.2
Slope	-0.2
Hillshade	-0.4

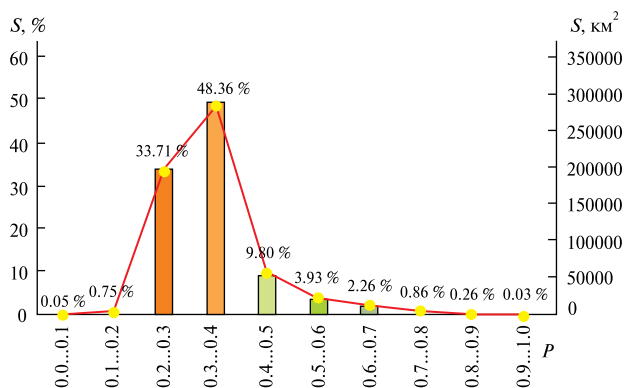


Рис. 6. Розподіл площ S України по класах потенціалу P територій для встановлення ефективних сонячних електростанцій

Закарпатської області, що також зменшує досяжність прямого сонячного випромінювання та шкідливо впливає на продуктивність сонячних електростанцій. У свою чергу, Карпатські гори, розташовані у Закарпатській області, не лише непридатні для розміщення сонячних ферм через особливості рельєфу, але ще й несприятливо впливають на формування підходяшого для сонячних електростанцій клімату.

Для кількісної оцінки потенціалу територій України для встановлення ефективних сонячних ферм ми розподілили всі пікселі з карти на рис. 5, з на 10 класів, що відповідають десяти інтервалам з кроком 0.1. Ми обчислили площу,

що належить кожному з класів. З гістограми на рис. 6 видно, що найбільша частина України (більш ніж 288484 км<sup>2</sup>, або 48.36 %) має потенціал у межах 0.3...0.4, що відповідає середньому діапазону для побудови ефективних сонячних електростанцій.

Наступний за площею клас придатності території відповідає інтервалу 0.2...0.3 (близько 201118 км<sup>2</sup>, або 33.71 %). Потенціал (0.4...0.5) мають 58484 км<sup>2</sup> територій. Сумарна площа територій з придатністю менше 0.2 становить всього 4761 км<sup>2</sup>, тоді як площа територій з придатністю понад 0.5 становить 43748 км<sup>2</sup>, тобто площа сприятливих територій більша від площі несприятливих майже в 10 разів.

Таким чином, кліматичні та рельєфні умови у більшій частині України сприятливі для встановлення ефективних сонячних ферм.

**3.2. Оцінка коректності розміщення вже встановлених сонячних електростанцій на території України.** Для оцінки оптимальності розміщення вже встановлених найбільших сонячних електростанцій (230 об'єктів) на території України ми використали інформацію про розташування сонячних ферм з Wikimapia та обчислили кількість сонячних ферм, розміщених у межах класів, визначених у попередньому підрозділі.

Результати геопросторового аналізу представлено на рис. 7. Видно, що найбільші сонячні електростанції розміщуються рівномірно на пів-

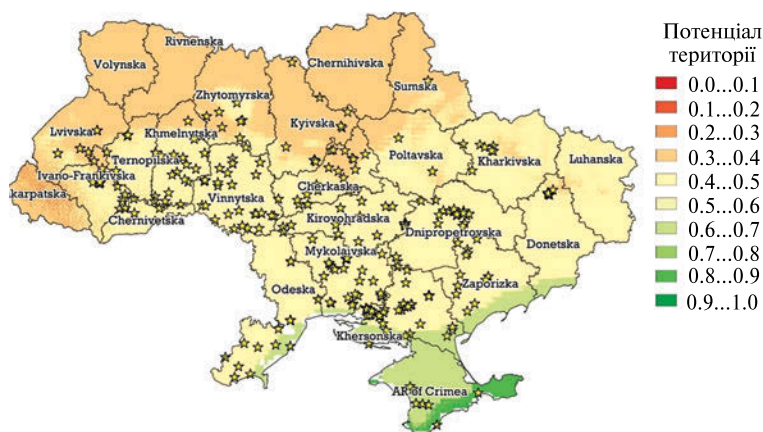


Рис. 7. Геопросторовий розподіл найбільших сонячних електростанцій по зонах з різним потенціалом території

дні, у центральній та західній Україні. На півночі України великих сонячних електростанцій немає, що швидше за все спричинено врахуванням несприятливих кліматичних особливостей. Однак потенціал деяких областей використовується недостатньо. Наприклад, у Полтавській області, де придатність територій становить 0.3...0.4, практично немає сонячних електростанцій. Схожа ситуація спостерігається у Донецькій, Луганській, Харківській, Тернопільській та Кіровоградській областях. Перспективними (коефіцієнт перевищує 0.4) та недостатньо експлуатованими є території Запорізької та Одеської областей. Тому в майбутньому варто звернути увагу на ці області і розглянути можливості встановлення там сонячних електростанцій, щоб використати високий потенціал цих територій.

З табл. 2 видно, що основна частина (166 об'єктів) досліджуваних сонячних електростанцій розташована на території з коефіцієнтом придатності 0.3...0.4. Частка електростанцій в діапазонах 0.2...0.3 та 0.4...0.5 є трохи меншою — 40 та 13 об'єктів відповідно. На територіях, абсолютно непридатних для встановлення сонячних електростанцій (коефіцієнт менше 0.2), великих сонячних ферм не було виявлено. В оптимальних зонах, де коефіцієнт перевищує 0.5, з 230 досліджених сонячних ферм розташовано лише 11. Те, що зони високої придатності пустують, можна пояснити тим, що їх в основному займають Кримські гори, і це ускладнює встановлення там сонячних панелей.

Отже, розташування сонячних електростанцій на території України можна вважати задовільним, зважаючи на те, що більшість територій

країни характеризується середнім коефіцієнтом придатності у межах 0.3...0.4.

## ВИСНОВКИ

У ході досліджень на основі супутникових даних про кліматичні та рельєфні особливості України було побудовано карту придатності територій для розміщення ефективних сонячних електростанцій. Виявлено, що основна площа країни (48.36 %) має середній коефіцієнт придатності 0.3...0.4. Площа сприятливих територій (з коефіцієнтом придатності понад 0.4) переважає над площею територій з непридатними для розміщення сонячних ферм кліматичними та рельєфними умовами.

Найкращі показники придатності для ефективного добування сонячної енергії характерні для зони південної України (Одеська, Херсонська, Миколаївська, Запорізька, Донецька області) та півострова Крим. Найгірші умови для отримання сонячної енергії спостерігаються на заході України та в зоні Полісся.

При аналізі оптимальності розміщення вже встановлених найбільших сонячних електростанцій України було виявлено, що основна їхня частина (166) розташована в зоні з середньою придатністю (коефіцієнт 0.3...0.4), 53 досліджені електростанції припадає на зони з придатністю 0.2...0.3 чи більшою від 0.4, ще 11 сонячних ферм розміщуються у зонах, де коефіцієнт придатності перевищує 0.5. В абсолютно непридатних для отримання сонячної енергії зонах великих сонячних електростанцій немає, що свідчить про адекватність вибору території для їхнього розміщення.

Деякі області України з хорошими показниками придатності (0.3...0.4), такі як Одеська, Полтавська, Харківська, Запорізька, Дніпропетровська, Донецька, Луганська, недостатньо експлуатовані та мають високий потенціал для встановлення потужних і продуктивних сонячних станцій у майбутньому.

Таким чином, наше дослідження надає цінну інформацію про придатність територій України для встановлення сонячних електростанцій, що може сприяти розвитку сталої та екологічно чистої енергетики в Україні. У майбутньому пла-

Таблиця 2. Розподіл кількості найбільших сонячних електростанцій по класах придатності територій

<i>P</i>	Кількість СЕС	<i>P</i>	Кількість СЕС
0.0...0.1	—	0.5...0.6	7
0.1...0.2	—	0.6...0.7	1
0.2...0.3	40	0.7...0.8	1
0.3...0.4	166	0.8...0.9	2
0.4...0.5	13	0.9...1.0	—

нується продовжити дослідження, і для визначення оптимальних зон розміщення сонячних електростанцій в Україні врахувати землекористування і інфраструктуру регіонів [17].

Дослідження підтримано проектом Міністерства освіти і науки України «Інформаційні технології геопросторового аналізу розвитку сільських територій і громад» (грант № РН/27-2023).

## REFERENCES

1. Butenko O., Zvyaschenko K., Buravchenko K., Nikitin A. (2019). Optimization of the process of selecting the location of solar power plants using GIS analysis. *Systemy upravlinnya, navigatsii ta zv'yazku. Zbirnyk naukovykh prats*, **1**(53), 17–21 [in Ukrainian]
2. Chandra S., Agrawal S., Chauhan D. S. (2018). Effect of Ambient Temperature and Wind Speed on Performance Ratio of Polycrystalline Solar Photovoltaic Module: an Experimental Analysis. *Int. Energy J.*, **18**, 171–179.
3. Charabi Y., Gastli A. (2011). PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. *Renewable Energy*, **36**, 2554–2561.
4. Chitturi S., Sharma E., Elmenreich W. (2018). Efficiency of photovoltaic systems in mountainous areas. *2018 IEEE Int. Energy Conf. (ENERGYCON)*, 1–6.
5. Dubey S., Sarvaiya J. N., Seshadri B. (2013). Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its Effect on PV Production in the World — A Review. *Energy Procedia*, **33**, 311–321.
6. Effat H. A. (2013). Selection of Potential Sites for Solar Energy Farms in Ismailia Governorate, Egypt using SRTM and Multicriteria Analysis. *Int. J. Adv. Remote Sensing and GIS*, **2**, 205–220.
7. Fazelpour F., Vafaeipour M., Rahbari O., Shirmohammadi R. (2013). Considerable parameters of using PV cells for solar-powered aircrafts. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **22**, 81–91.
8. Gokmen N., Hu W., Hou P., Chen Z., Sera D., Spataru S. V. (2016). Investigation of wind speed cooling effect on PV panels in windy locations. *Renewable Energy*, **90**, 283–290.
9. Goossens D., Kerschaever E. V. (1999). Aeolian dust deposition on photovoltaic solar cells: the effects of wind velocity and airborne dust concentration on cell performance. *Solar Energy*, **66**, 277–289.
10. Generation as of May lost 27 GW of installed capacity. *Ukrinform*. (2023). URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3714703-generacia-stanom-na-traven-vtratil-27-gvt-vstanovlenoi-potuznosti-ukrenergo.html> (Last accessed: 19.07.2023).
11. Heo J., Moon H., Chang S., Han S., Lee D. (2021). Case study of solar photovoltaic power-plant site selection for infrastructure planning using a BIM-GIS-based approach. *Appl. Sci.*, **11**(18), 8785.
12. Ibrahim A., Fudholi A., Sopian K., Othman M. Y., Ruslan M. H. (2014). Efficiencies and improvement potential of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) system. *Energy Conversion and Management*, **77**, 527–534.
13. Idoko L., Anaya Lara O., McDonald A. S. (2018). Enhancing PV modules efficiency and power output using multi-concept cooling technique. *Energy Reports*, **4**, 357–369.
14. Imamverdiyev N. S. (2021). Site selection for solar photovoltaic system installation using analytical hierarchy process model in Azerbaijan. *J. Belarusian State Univ. Geography and Geology*, № 1, 75–92.
15. Kaldellis J. K., Kapsali M., Kavadias K. A. (2014). Temperature and wind speed impact on the efficiency of PV installations. Experience obtained from outdoor measurements in Greece. *Renewable Energy*, **66**, 612–624.
16. Kim G. G., Choi J. H., Park S. Y., Bhang B. G., Nam W. J., Cha H. L., Park N., Ahn H. K. (2019). Prediction Model for PV Performance with correlation analysis of environmental variables. *IEEE J. Photovoltaics*, **9**, 832–841.
17. Kussul N. N., Lavreniuk N. S., Shelestov, A. Y., Yailymov B., Butko I. (2016). Land cover changes analysis based on deep machine learning technique. *J. Automation and Inform. Sci.*, **48**, 42–54.
18. Mahtta R., Joshi P. K., Jindal A. K. (2014). Solar power potential mapping in India using remote sensing inputs and environmental parameters. *Renewable Energy*, **71**, 255–262.
19. Mekhilef S., Saidur R., Kamalisarvestani M. (2012). Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, **16**, 2920–2925.
20. Mohammadi K., Goudarzi N. (2018). Study of inter-correlations of solar radiation, wind speed and precipitation under the influence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) in California. *Renewable Energy*, **120**, 190–200.
21. Muhsin N., Ali W., Alzubaidy Z. (2021). The effect of temperature and other conditions on efficiency of solar panels. *J. Adv. in Electrical Devices*, **6**(03), 8–14.

22. Mustafa R. J., Gomaa M. R., Al-Dhaifallah M., Rezk H. (2020). Environmental impacts on the performance of solar photovoltaic systems. *Sustainability*, **12**(2), 608.
23. Razak A. B., Irwan Y. M., Leow W. Z., Irwanto M., Safwati I., Zhafarina M. (2016). Investigation of the effect temperature on photovoltaic (PV) panel output performance. *Int. J. Adv. Sci., Engineering and Inform. Technol.*, **6**, 682–688.
24. Shelestov A. Y., Kussul N. N. (2008). Using the fuzzy-ellipsoid method for robust estimation of the state of a grid system node. *Cybernetics and Systems Analysis*, **44**, 847–854.
25. Shorabeh S. N., Firozjaei M. K., Nematollahi O., Firozjaei H. K., Jelokhani-Niaraki M. (2019). A risk-based multi-criteria spatial decision analysis for solar power plant site selection in different climates: A case study in Iran. *Renewable Energy*, **143**, 958–973.
26. Vilanova A., Kim B., Kim C. K., Kim H. (2020). Linear-gompertz model-based regression of photovoltaic power generation by satellite imagery-based solar irradiance. *Energies*, **13**(4), 781.
27. Yeliseieva O. K., Khazan P. V. (2016). Economic and statistical analysis of solar energy in Ukrainian regions. *Statystyka Ukrainy*, **4**, 51–58 [in Ukrainian]

Стаття надійшла до редакції 19.07.2023

Після доопрацювання 15.11.2023

Прийнято до друку 15.11.2023

Received 19.07.2023

Revised 15.11.2023

Accepted 15.11.2023

N. M. Kussul<sup>1,2</sup>, Head of Department, Dr. Sci. in Tech., Professor

ORCID:0000-0002-9704-9702

E-mail: nataliia.kussul@gmail.com

S. Yu. Drozd<sup>1,2</sup>, master student

ORCID: 0000-0002-5149-5520

E-mail:sofi.drozd.13@gmail.com

<sup>1</sup> Space Research Institute of National Academy of Sciences of Ukraine and State Space Agency of Ukraine  
40, Glushkov Ave., build. 4/1, Kyiv 187, 03680 Ukraine

<sup>2</sup> National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”  
37, Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03056 Ukraine

## GEOSPATIAL ANALYSIS OF THE POTENTIAL OF THE TERRITORIES OF UKRAINE FOR THE LOCATION OF SOLAR POWER PLANTS BASED ON SATELLITE DATA

Climate change necessitates the relevance of renewable energy utilization worldwide. The Green Deal defines the energy development policy in Europe until 2030. This challenge holds particular significance for Ukraine in the context of post-war energy infrastructure recovery. Therefore, an important issue is the analysis of the suitability of Ukrainian territories for the installation of large-scale solar power plants (solar farms) and the optimization of their placement. This research aims to determine the suitability of Ukrainian territories for solar power plant placement using satellite data on climate and terrain characteristics. Among the factors determining the suitability of the territory for solar farms, the greatest impact lies in climatic indicators, including data on the total global horizontal solar irradiation (GHI), accumulated temperature above 25 °C at a height of 2 meters, average annual wind speed, and map of accumulated annual precipitation from the ERA5-Land dataset. In this study, terrain maps containing information on elevations, slopes, and terrain shading from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) project were also used to determine the suitability of the territories. The suitability of the territories is determined through geospatial analysis using weighted sums. Based on the research results, a suitability map was constructed, depicting the distribution of zones with different suitability coefficients (ranging from 0 to 1). It was found that a significant portion of Ukraine's territory is favorable for the placement of solar power plants. Over 48 % of the country has moderate suitability values (0.3...0.4). The obtained suitability map was used to analyze the optimal placement of already constructed major solar power plants in Ukraine. Data from Wikimapia was utilized to determine the locations of these energy facilities. Overall, all the analyzed large-scale solar power plants in Ukraine were situated in optimal territories. The research also revealed that certain regions, such as Odesa, Poltava, Kharkiv, Zaporizhzhia, Dnipro, Donetsk, and Luhansk, have good suitability values (0.3...0.4) but are not fully utilized. These areas have significant potential for the future construction of powerful and productive solar power plants.

**Keywords:** solar power plants, suitability of territories, satellite data, climate, relief, geospatial analysis, method of weighted sums.