

**КОНСТРУКТИВНА ГЕОГРАФІЯ І ГЕОЕКОЛОГІЯ**

УДК 621.3

DOI:<https://doi.org/10.25128/2519-4577.26.1.12>

**Ігор ХОЛОШИН**, кандидат геолого-мінералогічних наук, доцент кафедри географії та методики навчання, ORSID: <https://orcid.org/0000-0002-2174-5605>

*Криворізький державний педагогічний університет*

50086, проспект Університетський, 54, м. Кривий Ріг, Україна

**Мирослав СИВИЙ**, доктор географічних наук,  
професор кафедри географії та методики її навчання,

ORSID: <https://orcid.org/0000-0002-3150-4848>

*Тернопільський національний педагогічний університет імені Володимира Гнатюка,*  
46015, вул. М.Кривоноса, 2, м. Тернопіль, Україна

**Наталя ПАНТЕЛЄЄВА**, асистент кафедри географії та методики навчання,

ORSID: <https://orcid.org/0000-0001-6787-2266>

*Криворізький державний педагогічний університет*

50086, проспект Університетський, 54, м. Кривий Ріг, Україна

**Сергій ЯРКОВ**, кандидат географічних наук, доцент кафедри географії та методики навчання, ORSID: <https://orcid.org/0000-0002-5331-1238>

*Криворізький державний педагогічний університет*

50086, проспект Університетський, 54, м. Кривий Ріг, Україна

**Олена ЛАКОМОВА**, кандидат географічних наук, доцент кафедри географії та методики навчання, ORSID: <https://orcid.org/0000-0002-7798-2263>

*Криворізький державний педагогічний університет*

50086, проспект Університетський, 54, м. Кривий Ріг, Україна

### **ІНТЕГРАЛЬНА ГЕОІНФОРМАЦІЙНА ОЦІНКА ТЕРИТОРІЇ ДНІПРОПЕТРОВСЬКОЇ ОБЛАСТІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПОТЕНЦІАЛУ РОЗМІЩЕННЯ ОБ'ЄКТІВ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ**

*У статті представлено результати інтегральної геоінформаційної оцінки території Дніпропетровської області з метою визначення просторово оптимальних зон для розміщення об'єктів сонячної енергетики різного рівня. Як ключові критерії було використано показники інсоляції, морфометричні характеристики рельєфу (крутість схилів), доступність інженерної та транспортної інфраструктури, а також просторове поширення територій з обмеженим режимом землекористування.*

*Отримані результати можуть бути використані як інформаційно-аналітична основа для просторового планування розвитку сонячної енергетики, підготовки інвестиційних проєктів і підтримки прийняття управлінських рішень у сфері відновлюваної енергетики регіону.*

**Ключові слова:** просторове моделювання, багатокритеріальний аналіз, QGIS, фактори придатності, інтегральна карта потенціалу.



**Ihor KHOLOSHIN**, candidate of Geology-Msneralological Sciences,  
Associate professor of Head of department of geography and its teaching methods,

ORSID: <https://orcid.org/0000-0002-2174-5605>

*State Pedagogical University, Kryvyi Rih,*

50086, Universytetskyi Ave 54, Kryvyi Rih, Ukraine

**Myroslav SYVYI**, Doctor of Geographical Sciences,  
Professor, Department of Geography and Methods of Teaching,

ORSID: <https://orcid.org/0000-0002-3150-4848>

*Ternopil Volodymyr Hnatiuk National Pedagogical University,*  
46015, M. Kryvonos St., 2, Ternopil, Ukraine

Natalia PANTELEEVA, assistant of the department of geography and its teaching methods,

ORSID: <https://orcid.org/0000-0001-6787-2266>

State Pedagogical University, Kryvyi Rih,

50086, Universytetskyi Ave 54, Kryvyi Rih, Ukraine

Sergiy YARKOV, candidate of geography sciences, assistant of the department of geography and its teaching methods, ORSID: <https://orcid.org/0000-0002-5331-1238>

State Pedagogical University, Kryvyi Rih,

50086, Universytetskyi Ave 54, Kryvyi Rih, Ukraine

Olena LAKOMOVA, candidate of geography sciences, assistant of the department of geography and its teaching methods, ORSID: <https://orcid.org/0000-0002-7798-2263>

State Pedagogical University, Kryvyi Rih,

50086, Universytetskyi Ave 54, Kryvyi Rih, Ukraine

## INTEGRAL GEOINFORMATION ASSESSMENT OF THE TERRITORY OF DNIPROPETROVSK REGION TO DETERMINE THE POTENTIAL FOR LOCATION OF SOLAR ENERGY FACILITIES

*The article presents the results of an integrated geoinformation assessment of the territory of the Dnipropetrovsk region in order to determine spatially optimal zones for the placement of solar energy facilities of various levels. The research methodology is based on the use of GIS tools and multi-criteria analysis, which combines natural, infrastructure and limiting factors. The key criteria used were insolation indicators, morphometric characteristics of the terrain (steepness of slopes), accessibility of engineering and transport infrastructure, as well as the spatial distribution of territories with limited land use regime.*

*The Dnipropetrovsk region has a complex of natural and climatic conditions (favorable insolation, flat terrain), a developed infrastructure network (roads and power lines), which makes it promising for the placement of both large centralized photovoltaic projects and small and medium-power sites for the needs of local communities. However, there are practically no studies assessing the potential for the placement of solar energy facilities in the region.*

*In addition, in the context of post-war reconstruction of Ukraine and the imperatives of energy independence, the issue of optimizing spatial planning for renewable energy is becoming particularly relevant. The use of scientifically based spatial models to determine the suitability of territories allows minimizing land use conflicts, increasing the economic efficiency of investments in photovoltaic generation, and contributing to the achievement of the country's strategic energy goals.*

*Based on the results of the calculations, an integrated potential map was formed, on the basis of which territories with high, medium, and low levels of suitability for the location of solar power plants were identified. Areas with high potential tend mainly to the central and southern regions of the region, where favorable solar radiation indicators, relatively flat terrain, and better accessibility to power grids are combined. Territories with low potential are confined mainly to the northern regions and areas with difficult natural conditions or a significant concentration of limiting factors.*

*The results obtained can be used as an information and analytical basis for spatial planning of solar energy development, preparation of investment projects and support for making management decisions in the field of renewable energy in the region. Prospects for further research are related to the detailing of the spatial model through the use of higher spatial resolution data, the involvement of socio-economic and land cadastral indicators, as well as taking into account auxiliary technical and economic parameters (proximity to substations, network capacity, connection cost). A separate direction is the adaptation of the developed methodology for the local level (communities, territorial clusters) and the creation of interactive GIS services to support decision-making in the field of renewable energy development.*

**Keywords:** spatial modeling, multi-criteria analysis, QGIS, suitability factors, integral potential map.



**Постановка науково-практичної проблеми, актуальність і новизна дослідження.** Розвиток відновлюваних джерел енергії є ключовим чинником забезпечення енергетичної безпеки та сталого розвитку регіонів. Серед відновлюваних технологій особливе місце посідає сонячна енергетика, яка завдяки стрімкому зниженню вартості фотоелектричних елементів та підвищенню їх ефективності дедалі більше інтегрується в національні енергетичні стратегії. У світовому масштабі тенденція до збільшення частки сонячної генерації зумовлює необхід-

ність науково обґрунтованого визначення просторових зон найвищої придатності з урахуванням природно-кліматичних, технічних та соціально-економічних чинників, що є складною багатокритеріальною задачею, котра потребує застосування сучасних геоінформаційних та аналітичних методів [5, 14, 16].

Актуальність таких досліджень для України зумовлена значними ресурсними та технологічними можливостями країни щодо розвитку сонячної енергетики, насамперед у південних та центральних регіонах, де спостері-

гається високий рівень сонячної інсоляції та сприятливі умови рельєфу [9, 15]. Сьогодні, на рівні областей України питання оцінки потенціалу під сонячну генерацію досліджувалися як у загальних оглядових роботах із застосуванням геоінформаційних технологій [13, 18], так і в окремих регіональних кейсах із застосуванням методів багатокритеріального прийняття рішень [8].

Дніпропетровська область має комплекс природно-кліматичних умов (сприятлива інсоляція, рівнинний рельєф), розвинуту інфраструктурну мережу (автомобільні дороги та лінії електропередачі), що робить її перспективною для розміщення як великих централізованих фотоелектричних проєктів, так і майданчиків малої та середньої потужності для потреб місцевих громад. Але при цьому, досліджень з оцінкою потенціалу розміщення об'єктів сонячної енергетики в регіоні фактично немає.

Крім того, в умовах післявоєнного відновлення України та імперативів енергетичної незалежності питання оптимізації просторового планування відновлюваної енергетики набуває особливої актуальності. Використання науково обґрунтованих просторових моделей для визначення придатності територій дозволяє мінімізувати конфлікти землекористування, підвищити економічну ефективність інвестицій у фотоелектричну генерацію та сприяти досягненню стратегічних енергетичних цілей країни.

**Метою дослідження** є розробка та застосування методики багатокритеріального геоінформаційного аналізу в середовищі *QGIS* для оцінювання потенціалу територій Дніпропетровської області щодо розміщення сонячних електростанцій (СЕС) з урахуванням природних, технічних та інфраструктурних чинників.

**Методика дослідження** визначення просторово оптимальних територій області для розміщення СЕС базувалася на поєднанні інструментів геоінформаційного геопросторового аналізу в середовищі *QGIS* з методами багатокритеріального прийняття рішень (MCDM). Зважаючи на важливість цієї частини дослідження, охарактеризуємо її більш детально.

На сьогодні, найпоширенішим MCDM-методом у дослідженнях вибору місць розміщення СЕС є аналітичний ієрархічний процес. Його застосування зафіксовано у численних кейс-дослідженнях для різних регіонів світу, зокрема в Туреччині, Ірані, Індії, країнах Близького Сходу та Африки [6, 7, 17, 19, 20]. Він дозволяє формалізувати експертні судження щодо відносної важливості критеріїв та інтегрувати їх у ГІС-середовище шляхом зваженого

сумування растрових шарів.

На рисунку 1 наведено алгоритм методики дослідження, який базується на інтеграції різнорідних просторових факторів у єдину аналітичну модель, що дозволило отримати карту придатності території Дніпропетровської області для встановлення фотоелектричних станцій. В основі її розробки були враховані результати аналогічних попередніх досліджень у різних регіонів світу. Це дало можливість розробити власну блок-модель методики багатокритеріального геоінформаційного аналізу з використанням інструментів *QGIS*.

На першому етапі були визначені основні просторові фактори, які визначають придатність територій до розміщення сонячних електростанцій. Аналіз літератури свідчить, що незалежно від регіону дослідження, до ключових належать показники сонячної радіації (GHI або DNI), морфометричні характеристики рельєфу (ухил і експозиція), типи землекористування та земного покриву, відстань до ліній електропередач і транспортної інфраструктури, а також екологічні обмеження, пов'язані з природоохоронними територіями та водними об'єктами [19]. Саме ці фактори найчастіше визначають технічну та економічну доцільність розміщення сонячних електростанцій.

Основою вибору факторів (критеріїв) в даному дослідженні став їх прямиий або опосередкований вплив на потенційну ефективність та реалізацію проєктів сонячної енергетики в географічному просторі Дніпропетровської області.

Перший із таких факторів – **інсоляція (рівень сонячного випромінювання)**, який визначає кількість сонячної енергії, доступної для перетворення на електричну. Від величини глобального випромінювання залежить максимальна потужність і вироблення енергії сонячними панелями, тому її просторовий розподіл є базовим критерієм придатності території для СЕС. Це узгоджується з практикою геопросторового аналізу придатності, де інсоляція розглядається як ключовий фактор продуктивності сонячних установок [11, 12].

Другий фактор – **рельєф місцевості (схилі)**. Ухил поверхні впливає на технічну доцільність монтажу обладнання й орієнтацію панелей відносно сонця. Площі з великим ухилом (понад 5°) є менш придатними через підвищені витрати на підготовку площадок і зниження ефективності світловловлювання, тому аналіз топографії та схилів є звичною практикою у геопросторовому аналізі розміщення СЕС [2, 3].

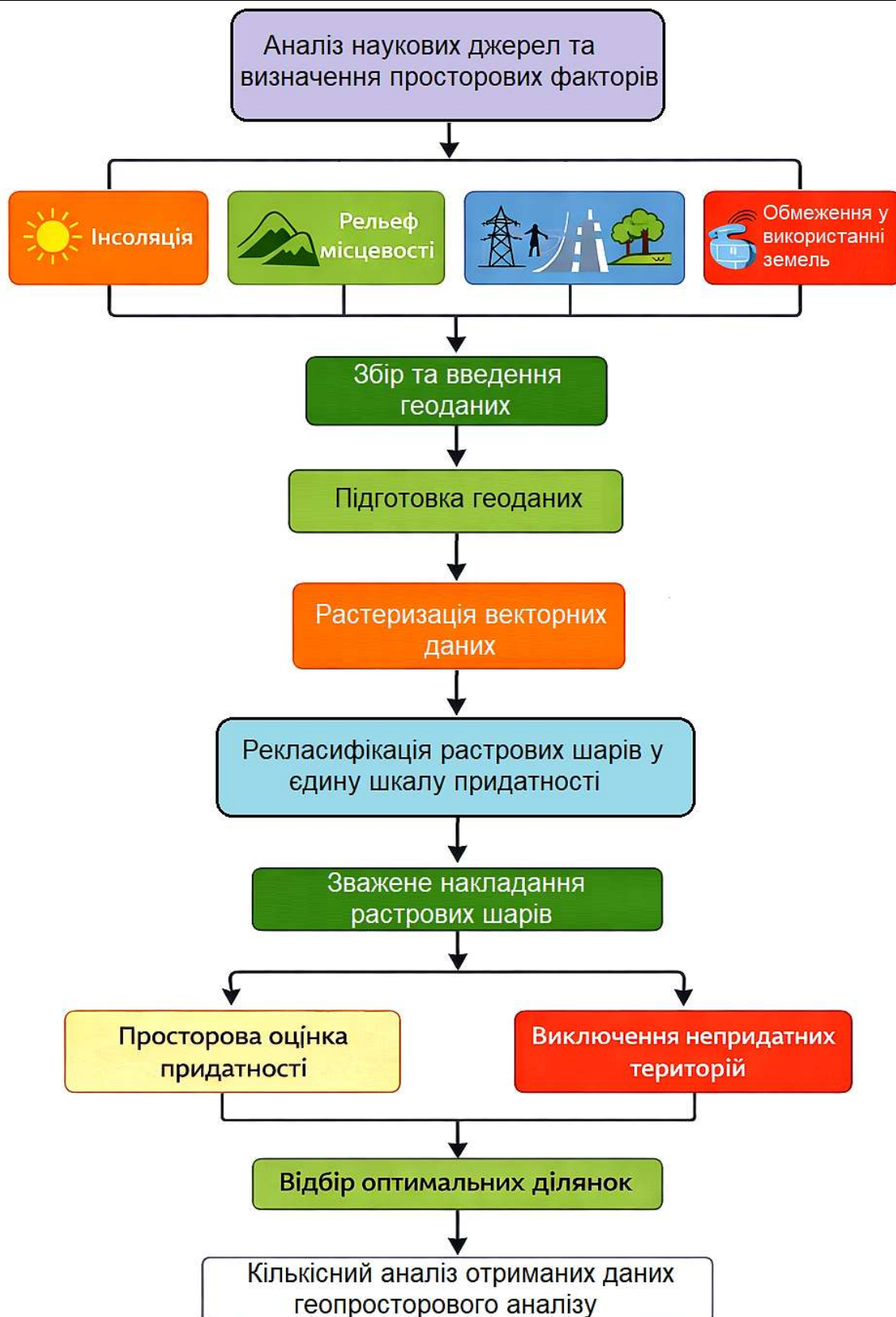


Рис. 1. Алгоритм методики геоінформаційної оцінки потенціалу території Дніпропетровської області щодо розміщення сонячних електростанцій

Для територій зі складним рельєфом окремі автори рекомендують локальне моделювання інсоляції на основі цифрових моделей рельєфу з використанням модулів *GRASS GIS*,

зокрема *r.sun*, що дозволяє врахувати затінення та локальні особливості поверхні [11]. Але враховуючи той факт, що рельєф Дніпропетровської області характеризується переважно низь-

корівнинною формою з невеликими ухилами, такі розрахунки не мають сенсу.

Третій компонент – **наявність інфраструктури**, зокрема транспортних шляхів і ліній електропередач (ЛЕП). Їхня доступність визначає можливість підключення потенційних СЕС до існуючої енергетичної мережі та зменшує транспортні й організаційні витрати при будівництві й обслуговуванні [14]. Аналіз мережі ЛЕП і доріг включається до моделей просторового зваженого сумування разом із природними показниками для вибору оптимальних ділянок.

Четвертий компонент стосується **обмежень у використанні земель**, що включає природоохоронні території, водоохоронні зони, прибережні смуги тощо. Такі локації підлягають мінімізації або виключенню з розгляду як непридатні для розміщення інженерних об'єктів з огляду на екологічні, юридичні та містобудівні вимоги. Тому формування маски обмежень є обов'язковим кроком у геоінформаційному аналізі придатності території.

Застосування цих чотирьох груп критеріїв забезпечило **комплексний просторовий підхід**, де природні, інфраструктурні й нормативні аспекти поєднуються в єдину модель оцінки придатності територій для розміщення СЕС. Такий підхід відповідає сучасним міжнародним практикам багатокритеріального геопросторового аналізу для відновлюваної енергетики [8, 16].

На другому етапі здійснювався збір та підготовка даних. До аналізу були залучені рас-

трові та векторні шари, зокрема цифрова модель рельєфу (*SRTM*), дані сонячної радіації (*PVGIS*), шари землекористування, а також об'єкти інфраструктури: лінії електропередачі та мережа автомобільних доріг області. В таблиці 1 наведено джерела геоданих, що були використані в дослідженні та посилання на них.

Усі використані дані, за виключенням ліній електропередач, територіально відносилися до всієї України, тому після їх завантаження у *QGIS*, було проведено вилучення з шару загальнодержавних даних, геоданих, що відносяться до території Дніпропетровської області. Для цього використовувалися інструменти *Вирізати область з растру* (для растрових даних) і *Перетин* (для векторних даних). Стосовно карти ліній електропередачі, вона була отримана при проведенні операції *векторизації* растрової карти.

Усі дані були приведені до єдиної проєкції та просторової роздільної здатності. Для розрахунків використана рівноплощинна система координат *ETRS89 / LAEA Europe - EPSG: 3035*. Картографічний матеріал, для найкращої візуалізації, будувався в *WGS 84 / Pseudo-Mercator - EPSG:3857*. Растрові шари були приведені до однакової просторової роздільної здатності з використанням інструменту *Вирівняти растру*.

Цифровий рельєф місцевості був перетворений у растрову карту схилів завдяки інструменту *Slope*.

Таблиця 1

**Джерела використаних геоданих, та посилання на них**

Геодані	Джерело	Посилання
Сонячна радіація	Global Solar Atlas	<a href="https://globalsolaratlas.info/download/ukraine">https://globalsolaratlas.info/download/ukraine</a>
Рельєф	NASA Earthdata Search	<a href="https://search.earthdata.nasa.gov/">https://search.earthdata.nasa.gov/</a>
Лінії електропередач	UkrMap	<a href="http://ukrmap.org.ua/Pages/Ukraine_elektroenergetika.html">http://ukrmap.org.ua/Pages/Ukraine_elektroenergetika.html</a>
Дорожня мережа	OpenStreetMap	<a href="https://download.geofabrik.de/">https://download.geofabrik.de/</a>
Землекористування	OpenStreetMap	<a href="https://download.geofabrik.de/">https://download.geofabrik.de/</a>

На наступному етапі досліджень, з використанням інструменту *Растеризація (вектор в растр)*, було проведено перетворення векторних шарів (мережа автомобільних дороги та лінії електропередачі) у растрові зі встановленням роздільної здатності растрових шарів (сонячна радіація, схил, земельні ресурси).

Приведення всіх шарів до одного стандарту здійснювалося завдяки операції рекласифікації растрових шарів у єдину шкалу придатності. Це дозволило забезпечити порівнюваність різних факторів незалежно від їхньої

фізичної природи. Наприклад, сонячна радіація вимірюється у kWh/m<sup>2</sup>/день; відстань – у метрах; ухил – у градусах, тому ці показники не можна додавати напряму.

Усі критерії на цьому етапі були приведені в шкалу придатності від нуля до 5 балів. Для кожного фактору було встановлено діапазони значень, які відображають ступінь сприятливості території (від несприятливих до найбільш сприятливих умов). Відповідним інтервалам надавалися уніфіковані бальні оцінки за порядковою шкалою, де мінімальні бали відпо-

відали обмежувальним або малопридатним умовам, а максимальні – оптимальним умовам розміщення СЕС. Межі інтервалів і відповідні бальні оцінки встановлювалися на основі аналізу порогових значень з наукових джерел та з урахуванням їх статистичного розподілу у межах Дніпропетровської області.

В таблиці 2 наведено бальну оцінку критеріїв, як була використана в дослідженні. Рек-

ласифікація виконувалася за допомогою інструменту *Raster Calculator QGIS* шляхом побудови логічних масок для кожного інтервалу значень з подальшим множенням на відповідний бал придатності та сумуванням результатів. У результаті всі критерії отримали єдину бальну шкалу від 1 до 5, залежно від їх кількісних показників.

Таблиця 2

**Бальна оцінка критеріїв придатності території до розміщення СЕС**

Критерії	Б а л и				
	5	4	3	2	1
Інсоляція (kWh/m <sup>2</sup> /день)	більше 3,48	3,43 – 3,48	3,43 – 3,405	3,43 – 3,37	менше 3,37
Крутизна схилів, градус	менше 5	-	-	-	більше 5
Відстань до ЛЕП та доріг, метри	менше 1000	-	1000 – 5000 м	-	більше 10000 м

Оскільки використані просторові фактори мають різний ступінь впливу на доцільність розміщення сонячних електростанцій, їхній внесок у підсумкову оцінку території не є рівнозначним. У зв'язку з цим у процесі багатокритеріального аналізу було застосовано експертно-аналітичний підхід із елементами методу аналізу ієрархій. Його основою є вагові коефіцієнти, які демонструють міру впливу фактору на технічну можливість будівництва,

економічну ефективність та нормативну допустимість розміщення об'єктів.

Розмір вагових коефіцієнтів визначалися експертним шляхом на основі аналізу наукових джерел, рекомендацій міжнародних енергетичних організацій, логіки функціонування сонячної енергетики та географічних особливостей Дніпропетровської області. В таблиці 3 наведено приклади вагових коефіцієнтів з різних літературних джерел і для об'єктів з різним географічним положенням.

Таблиця 3

**Узагальнені ваги критеріїв вибору місць розміщення сонячних електростанцій за даними наукових досліджень**

Автори	Регіон дослідження	Інсоляція	Ухил рельєфу	Відстань до ЛЕП	Відстань до доріг
Charabi Y., Gastli A. [7]	Оман	0,30	0,20	0,15	0,15
Uyan M. [17]	Туреччина	0,25	0,25	0,15	0,15
Al Garni H. Z., Awasthi [6]	Саудівська Аравія	0,35	0,15	0,20	0,20
Sánchez-Lozano et al. [16]	Іспанія	0,28	0,18	0,18	0,18
Yousefi-Sahzabi et al. [19]	Іран	0,27	0,20	0,15	0,15
Perovych I. et al. [15]	Україна	0,30	0,15	0,15	0,15
Kurbatova T. S. et al [13]	Україна	0,32	0,18	0,15	0,15
узагальнені	Дніпропетровська область	0,35	0,15	0,15	0,15

Аналіз вагових коефіцієнтів, запропонованих різними авторами, свідчить про домінуючу роль показників сонячної радіації, які в більшості досліджень отримують найбільшу вагу (0,25–0,35). Морфометричні характеристики рельєфу, зокрема ухил, розглядаються як другорядні, але обов'язкові критерії, що впливають на технічну реалізованість проєктів. Враховуючи той фактор, що рельєф Дніпропетровської області переважно хвилясто-рівнинний (висоти 100-200 м) і, як результат, схили більше 5° мають обмежене поширення, його вплив був

прирівняний до інфраструктурного фактору (близькість до ЛЕП і доріг). Останні чинники мають стабільні, помірні значення ваг, що відображає необхідність балансу між економічною доцільністю та екологічною безпекою розміщення сонячних електростанцій.

Обмеження у використанні земель застосовувалися не як зважений критерій, а у вигляді жорсткої маски, що дозволило повністю виключити непридатні території.

Отримані вагові коефіцієнти було використано у процедурі зваженого накладання рас-

трових шарів для розрахунку інтегрального показника потенціалу територій. Зважене накладання критеріїв було реалізовано в *QGIS* шляхом обчислення інтегрального показника придатності за допомогою *Raster Calculator*. В результаті була отримана карта потенціалу розміщення СЕС у регіоні.

Для виключення обмежувальних земель (території природно-заповідного фонду, водохоронні зони та лісові масиви) вони були об'єднані і далі інтегровані у вигляді бінарної маски. Після виконання багатокритеріального аналізу з растрового шару потенціалу вони були виключені з формуванням фінальної карти придатності.

Отримані дані були класифіковані на зони високого, середнього та низького потенціалу, а також піддані кількісному аналізу. Так, для оцінки розподілу зон інтегрального потенціалу за адміністративними районами був використаний метод зональної статистики шляхом попереднього формування бінарних растрів

кожного класу та підрахунку кількості пікселів у межах відповідних адміністративно-територіальних одиниць. Площа зон у межах адміністративних районів визначалася на основі показника *count* зональної статистики, що відобразила кількість пікселів відповідного класу в межах полігону, з подальшим перерахунком у площі та відносні частки. Коректність результатів перевірялася шляхом контролю покриття території зонами, зіставлення сумарної площі класів із площею адміністративних районів та візуальної верифікації просторового розподілу показників.

**Результати досліджень (виклад основного матеріалу).** Дніпропетровська область розташована в центральній-східній частині України на південь від середньої широти. Адміністративно вона поділена на сім районів: Дніпровський, Кам'янський, Криворізький, Нікопольський, Павлоградський, Самарівський та Синельниківський (рис. 2).

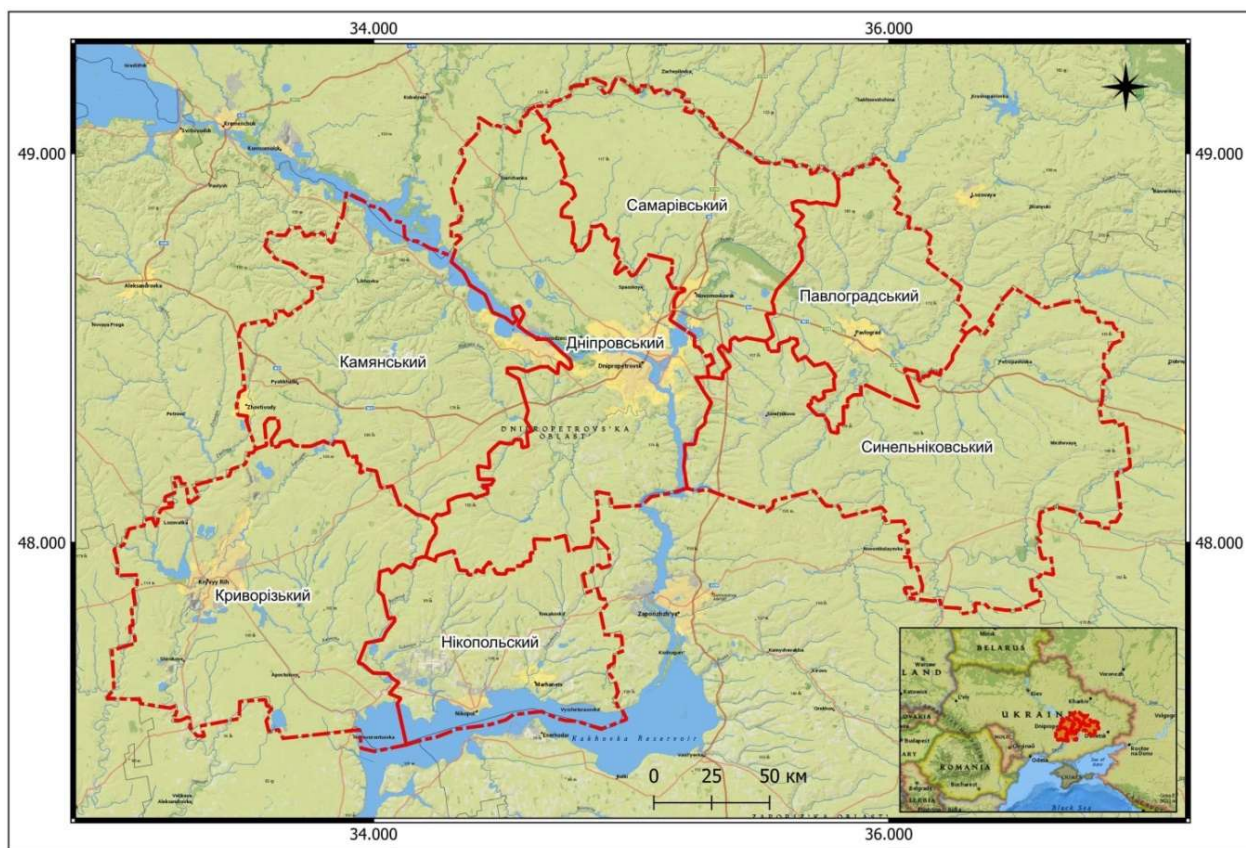


Рис. 2. Адміністративна карта Дніпропетровської області (дана карта і всі наступні виконані авторами у середовищі *QGIS*)

Таке просторове позиціонування забезпечує сприятливі кліматичні умови для експлуатації сонячних електростанцій. За даними метеорологічних спостережень та моделей сонячної радіації, більша частина території області ха-

рактеризується високими середньорічними показниками інсоляції, які роблять регіон сприятливим для розвитку сонячної енергетики. Зокрема, середньорічна сума глобальної сонячної радіації в області часто перевищує 1300–1450

кВт год/м<sup>2</sup> на рік (сумарне значення по горизонтальній поверхні), що є високим показником у порівнянні з іншими регіонами України [1]. Середньодобові значення сонячної інсоляції в літній період можуть досягати 5–6 кВт год/м<sup>2</sup> на день і більше. Це показник має найбільший вплив на розташування об'єктів СЕС різного рівня.

Просторовий розподіл сонячної радіації в межах Дніпропетровської області є відносно рівномірним, проте спостерігається тенденція до поступового зростання сумарної сонячної радіації у напрямку з північного заходу на південний схід області. Як результат, найвищі

значення інсоляції характерні для південних і південно-східних районів області (Нікопольський, Криворізький, Синельниківський), тоді як дещо нижчі – для північних та північно-західних територій (рис. 3А).

Область характеризується переважно плоским рівнинним рельєфом з невеликими локальними підвищеннями, і є частиною Придніпровської низовини. Загальна топографія області визначається як маловисотна, із середніми абсолютними висотами, що коливаються в межах приблизно 50–200 метрів над рівнем моря, без виражених гірських чи сильно крутих форм рельєфу (рис.4А).

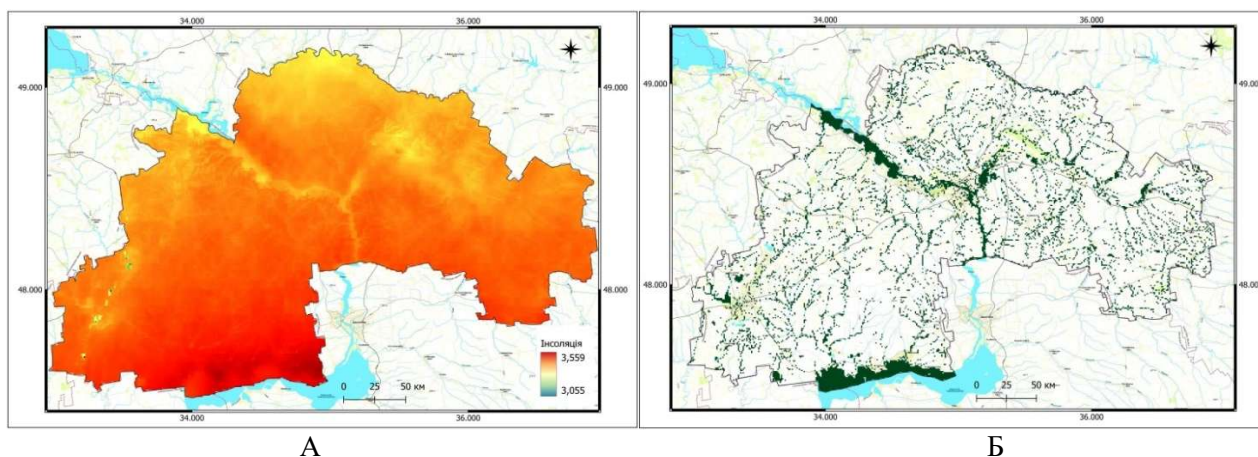


Рис. 3. Карта середньодобової інсоляції (А) та розташування обмежувальних земель (Б) на території Дніпропетровської області

Як можна побачити з карти схилу рельєфу Дніпропетровської області (рис. 4Б), більша частина території має схил менше 5°. Відсутність виражених пагорбів дозволяє легко встановлювати фотоелектричні модулі з необхідним орієнтуванням без масштабних земляних робіт та знижує ризики затінення панелей уранці та ввечері, що в цілому позитивно впливає на щоденну ефективність вироблення енергії. То-

му рельєф регіону не має суттєвого впливу на просторове планування об'єктів сонячної енергетики і відноситься до вторинних показників.

Проте для підвищення точності просторової оцінки до структури критеріїв було включено показник крутизни схилів, що дозволяє врахувати локальні варіації рельєфу, оптимізуючи орієнтацію й продуктивність майбутніх об'єктів СЕС.

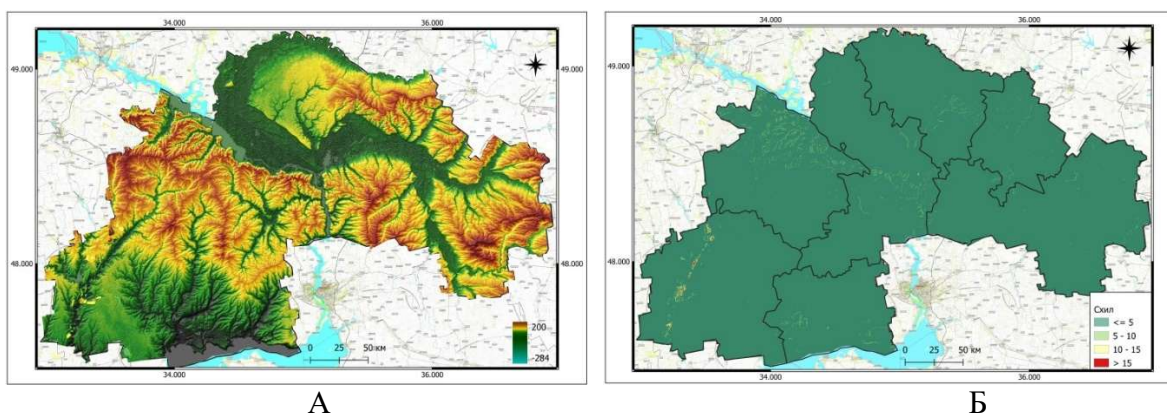


Рис. 4. Цифрова модель місцевості (А) та карта схилу рельєфу (Б) Дніпропетровської області

Дніпропетровська область має розвинену транспортну інфраструктуру, що включає магістральні автомобільні траси державного значення, які сполучають область з іншими регіонами України та регіональні і місцеві дороги, що забезпечують доступ до сільських територій [4].

Дорожня мережа забезпечує логістичну доступність до майданчиків будівництва СЕС. Це: перевезення великогабаритного обладнання (сонячні панелі, конструкції кріплення, трансформатори) та техніки для земляних робіт, монтаж та регулярне обслуговування об'єктів тощо.

В розрахунках відстаней від доріг, нами були враховані лише автомобільні мережі державного значення (європейські, міжнародні, національні, регіональні та територіальні дороги – рис. 5А), оскільки тільки вони гарантовано

забезпечують логістику без додаткових капіталовкладень на покращення якості дорожнього покриття, на відміну від місцевих доріг.

Це один важливий інфраструктурний показник – це система електричних мереж, яка включає магістральні та розподільчі лінії електропередач. Наявність потужної енергетичної інфраструктури є важливим фактором для вибору оптимальних майданчиків під сонячні електростанції, оскільки вона безпосередньо впливає на технічну можливість, економічну доцільність і строки підключення нових об'єктів до існуючої мережі.

Для Дніпропетровської області, в цілому, характерна широка мережа високовольтних та середньовольтних ліній електропередачі (рис. 5Б). Виключення складає північна частина регіону, в якій кількість ЛЕП обмежена.

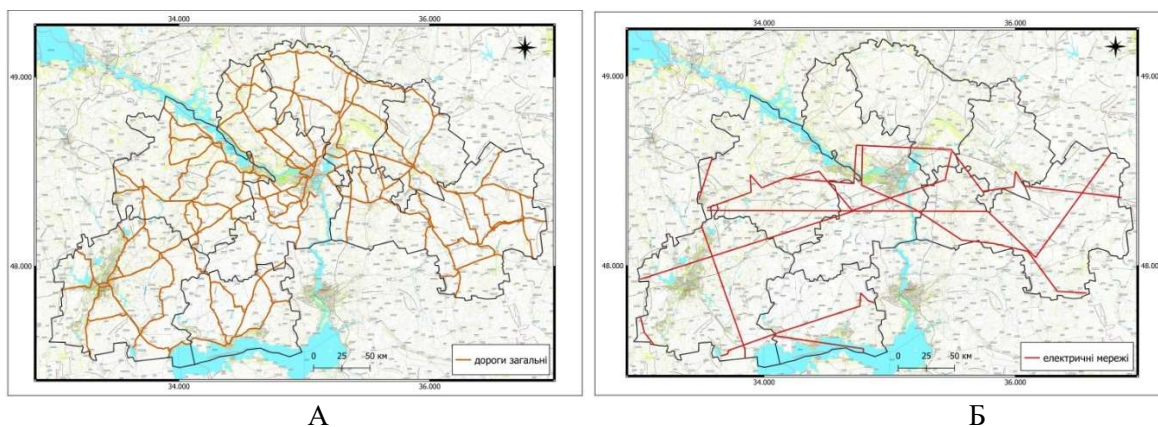


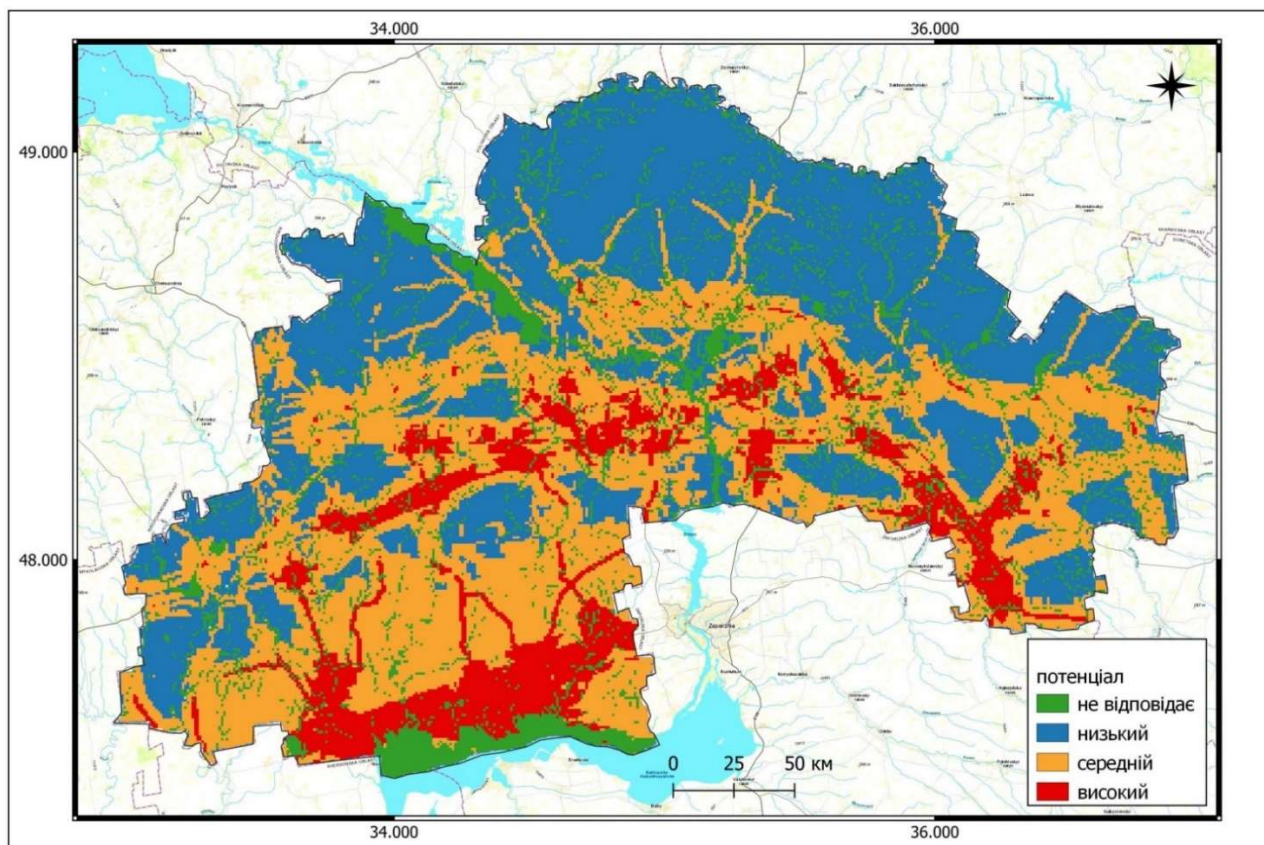
Рис. 5. Карти мережі автомобільних доріг державного значення (А) та електричних мереж (Б) Дніпропетровської області

Просторові обмеження в дослідженні встановлювалися на основі офіційних даних про об'єкти природно-заповідного фонду Дніпропетровської області, серед яких природний заповідник «Дніпровсько-Орільський» та численні ландшафтні, ботанічні та гідрологічні заказники (Кільченський, Урочище Яцево, Балка Цегляна, Нікопольські заплави, Балка Бандурка тощо), що разом займають близько 2 % площі області. Ці території, а також водоохоронні та санітарно-охоронні зони навколо водних об'єктів і інфраструктурних ліній території є категорично непридатними для розміщення наземних СЕС без погоджень чи змін статусу, оскільки законодавство України забороняє будівництво інфраструктури на об'єктах природно-заповідного фонду та у встановлених охоронних зонах. Вони були представлені у вигляді масок (див. рис. 3Б), що дозволило виключати їх з потенційних зон розміщення СЕС.

На рисунку 6 представлено результати інтегральної просторової оцінки потенціалу те-

риторії Дніпропетровської області для розміщення об'єктів сонячної енергетики. Межі класів визначалися на основі статистичного розподілу значень растру та логіки інтерпретації інтегрального показника придатності. Територію класифіковано за чотирма категоріями придатності: території, що не відповідають умовам розміщення (обмежувальні зони); зони з низьким, середнім та високим потенціалом.

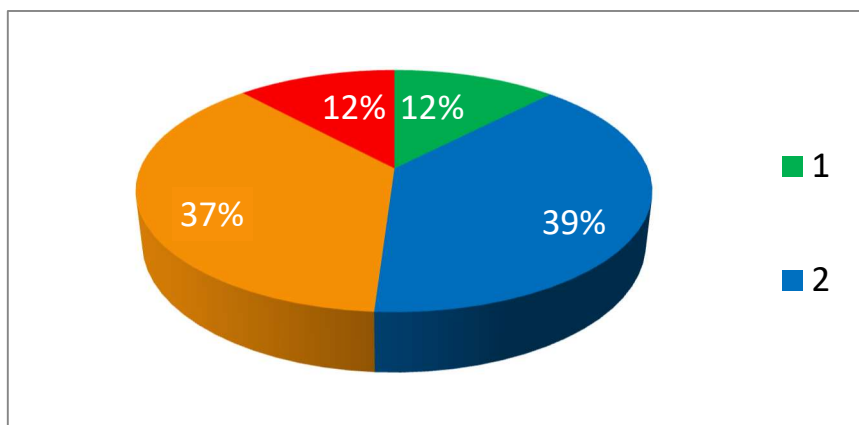
Зони високого потенціалу (червоний колір) мають чітко виражений просторовий характер і зосереджені переважно у південній, південно-східній та центральній частинах області. Вони тяжіють до районів із сприятливішими показниками інсоляції, рівнинним рельєфом та кращою доступністю інженерної інфраструктури і формують два майже суцільні пояси підвищеної придатності: один на півдні області (тут та території колишніх кар'єрів побудовані дві найбільші в Україні сонячні електростанції, зокрема Покровська та Нікопольська потужністю 240 та 200 МВт, відповідно) об'єктів з



**Рис. 6. Карта результатів інтегральної просторової оцінки потенціалу території Дніпропетровської області для розміщення об'єктів сонячної енергетики**

Зони середнього потенціалу (помаранчевий колір) поширені найбільш широко та формують перехідні смуги між територіями високої та низької придатності. Вони охоплюють значні площі центральної та західної частин області й можуть розглядатися як резервні території для розміщення СЕС за умови додаткового техніко-економічного обґрунтування.

Зони низького потенціалу (синій колір) переважають у північних і північно-східних районах області, де сумарний вплив природних і інфраструктурних факторів є менш сприятливим. Такі території характеризуються гіршими умовами інсоляції, менш вигідним рельєфом або віддаленістю від ключових елементів енергетичної та транспортної інфраструктури.



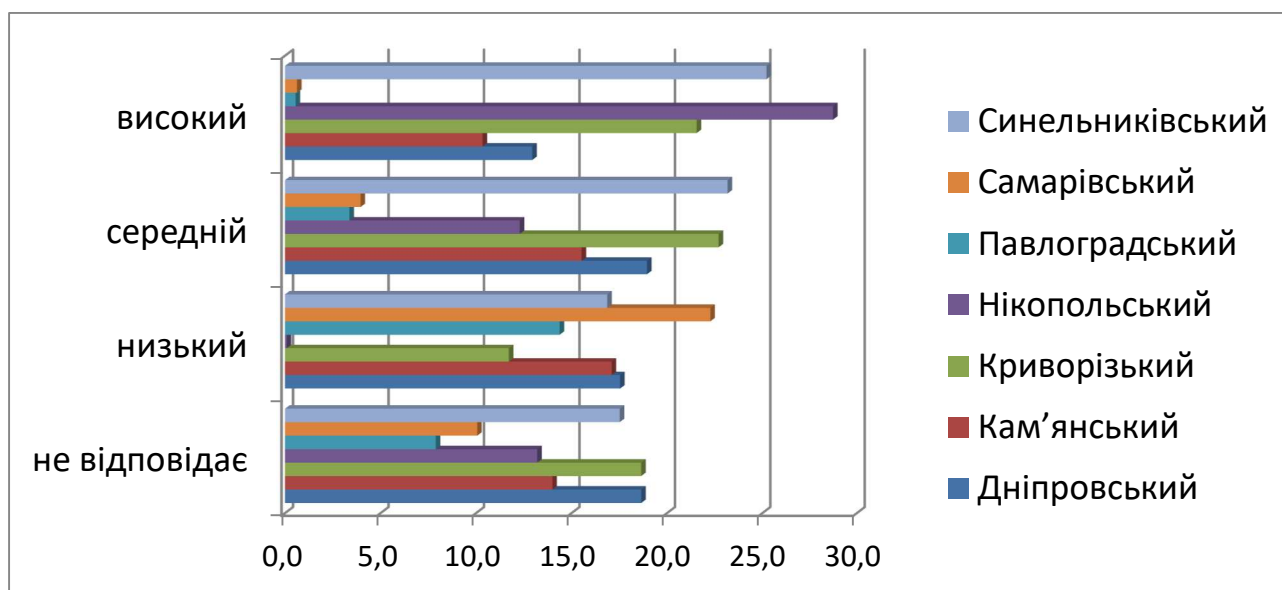
**Рис. 7. Співвідношення площ зон з різним потенціалом для розміщення об'єктів сонячної енергетики в Дніпропетровській області (умовні позначення відповідають рисунку 6)**

Аналіз пікселів растрового зображення продемонстрував, що на території області домінують зони з середнім (37%) и низьким (39%) потенціалом. території, території, що не відповідають умовам розміщення та зони високого потенціалу займають по 12%. Таким чином можна зробити висновки, що для збільшення потенціалу території області необхідно покращувати інфраструктурне забезпечення цього напрямку: створення під'їзних шляхів та допоміжних ліній електропередачі.

При цьому слід відзначити, що, як показує порівнювальний аналіз з показниками інших областей України, навіть зони з низьким

потенціалом у Дніпропетровській області є більш привабливими для будівництва об'єктів фотоелектричної генерації різного рівня, ніж більшість територій північних і західних областей країни.

Якщо аналізувати потенціал територій за адміністративним поділом області (рис. 8; таблиця 4), то можна відмітити, що понад  $\frac{3}{4}$  від загальної площі зон з високим потенціалом припадає на Нікопольський (28%), Синельниківський (25%) і Криворізький (22%) райони, в той час як в Самарівському і Павлоградському районах менше 1%.



**Рис. 8. Розподіл (у %) територій з різним потенціалом придатності для будівництва сонячних електростанцій серед адміністративних районів Дніпропетровської області**

Самарівський, Дніпровський, Кам'янський і Синельниківський райони мають найбільші площі зон з низьким потенціалом (понад 2000 км<sup>2</sup> в кожному з районів).

Якщо врахувати площі кожного з районів

Дніпропетровської області, то слід відзначити, що більше третини Нікопольського району займають зони з високим потенціалом і майже 50% - середнім (рис. 9).

Таблиця 4

**Розподіл площ зон з різним потенціалом для розміщення об'єктів сонячної енергетики на території районів Дніпропетровської області**

Райони	не відповідає		низький потенціал		середній потенціал		високий потенціал	
	км <sup>2</sup>	%	км <sup>2</sup>	%	км <sup>2</sup>	%	км <sup>2</sup>	%
Дніпровський	730	12,9	2180	38,6	2251	39,8	492	8,7
Кам'янський	548	11,2	2125	43,3	1844	37,8	393	8,0
Криворізький	730	12,8	1456	25,5	2696	47,3	819	14,4
Нікопольський	517	16,8	11	0,4	1460	47,4	1092	35,5
Павлоградський	309	12,3	1787	71,0	401	15,9	21	0,8
Самарівський	394	10,8	2767	75,7	470	12,9	24	0,7
Синельниківський	686	10,6	2096	32,3	2752	42,4	958	14,8

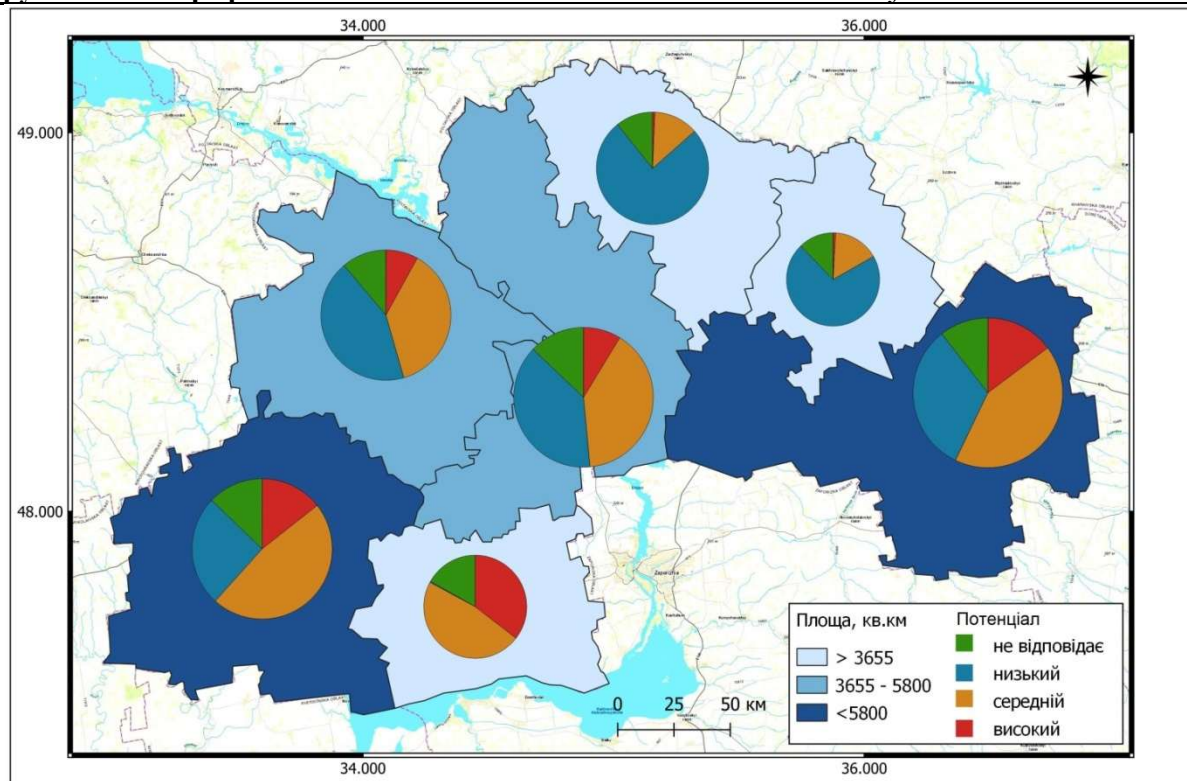


Рис. 9. Карта розподілу площ зон з різним потенціалом для розміщення об'єктів сонячної енергетики в межах кожного з районів Дніпропетровської області

Майже 50 % території Криворізького і Синельниківського районів припадає на зони середнього потенціалу, в той час як частина зон з високим потенціалом не перевищує 15% від загальної площі районів. В Самарівському і Павлоградському районах домінують зони з низьким потенціалом (відповідно 76% і 71%), а зони з високим потенціалом фактично відсутні. Кам'янський та Дніпровський райони мають проміжний потенціал між цими двома групами районів за перспективами будівництва СЕС.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження розроблено та апробовано методику інтегральної геоінформаційної оцінки території Дніпропетровської області з метою визначення просторово - оптимальних зон для розміщення об'єктів сонячної енергетики. На основі багатокритеріального аналізу, що поєднує показники інсоляції, морфометричні характеристики рельєфу, доступність інженерної та транспортної інфраструктури, а також систему територіальних обмежень, сформовано інтегральну карту потенціалу.

Отримані результати засвідчили суттєву просторову диференціацію території області за рівнем придатності для розміщення сонячних електростанцій. Зони з високим потенціалом тяжіють переважно до центральних і південних районів області, де поєднуються сприятливі показники сонячної радіації, відносно рівнинний

рельєф і краща доступність електромереж. Території з низьким потенціалом приурочені головним чином до північних районів та ділянок зі складними природними умовами або значною концентрацією обмежувальних факторів.

**Перспективи використання результатів дослідження** полягають у можливості використання отриманої карти потенціалу як інформаційно-аналітичної основи для регіонального та місцевого планування розвитку сонячної енергетики, попереднього відбору інвестиційно привабливих майданчиків, обґрунтування схем розміщення об'єктів відновлюваної енергетики та коригування документів просторового планування.

**Перспективи подальших досліджень** пов'язані з деталізацією просторової моделі за рахунок використання даних вищої просторової роздільної здатності, залучення соціально-економічних і земельно-кадастрових показників, а також врахування допоміжних техніко-економічних параметрів (наближення до підстанцій, потужність мереж, вартість підключення). Окремим напрямом є адаптація розробленої методики для локального рівня (громади, територіальні кластери) та створення інтерактивних ГІС-сервісів підтримки прийняття рішень у сфері розвитку відновлюваної енергетики.

## Література:

1. Кудря, С. О., Яценко, Л. В., Душина, Г. П., Шинкаренко, Л. Я., & Довга, В. Т. (2008). Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України.
2. Куссуль, Н. М., & Дрозд, С. Ю. (2024). Геопросторовий аналіз потенціалу територій України для розміщення сонячних електростанцій за супутниковими даними. *Космічна наука і технологія*, 30(1), 31-43.
3. Перович Л. М., Кереуш Д. (2017) Технологія вибору оптимального місця розташування сонячних електростанцій з використанням дистанційного зондування Землі та ГІС-технологій. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*.
4. Холошин І. В., Сивий М. Я., Пантелєєва Н. Б., Ганчук О. В. (2024) Геопросторовий моніторинг мережі автомобільних доріг Дніпропетровської області. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: географія*. Том 56 / 1. DOI:<https://doi.org/10.25128/2519-4577.24.1.10>.
5. Холошин І.В., Бондаренко О.В., Ганчук О.В., Мантуленко С.В., Варфоломєєва І.М. (2025) Геопросторовий аналіз у географічних дослідженнях. Прага: Oktan Print, DOI 10.46489/GAUGD-25-38.
6. Al Garni, H. Z., & Awasthi, A. (2017). Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied energy*, 206, 1225-1240.
7. Charabi, Y., & Gastli, A. (2011). PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. *Renewable Energy*, 36(9), 2554-2561.
8. Butenko, O. & Zvyaschenko, K. & Buravchenko, K. & Nikitin, A. (2019) Optimization of the process of selecting the location of solar power plants using GIS analysis. *Control, navigation and communication systems. Collection of scientific papers*, 1(53), 17-21.
9. Davybidia, L., & Kasiyanchuk, D. (2022, October). GIS-Based Site Suitability Assessment for Solar Plants in Ivano-Frankivsk Region. In *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2022»* (Vol. 2022, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.
10. Drozd, S., & Kussul, N. (2024). Solar energy potential mapping in Ukraine through integration of GIS, remote sensing, and fuzzy logic. *European journal of remote sensing*, 57(1), 2362390.
11. Hofierka, J., & Suri, M. (2002, September). The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. In *Proceedings of the Open source GIS-GRASS users conference* (Vol. 2002, pp. 51-70).
12. Huld, T., Müller, R., & Gambardella, A. (2012). A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar energy*, 86(6), 1803-1815.
13. Kurbatova T. S., Shumilova I. V., Yurchenko S. O. (2021) Spatial analysis of solar energy potential in southern regions of Ukraine using GIS technologies *Ukrainian Geographical Journal*, 2, 45–54.
14. Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International journal of geographical information science*, 20(7), 703-726.
15. Perovych I., Kryshenyk N., Kravets O. (2017) GIS-based assessment of solar energy potential in Ukraine *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 86, 85–94.
16. Sánchez-Lozano, J. M., Teruel-Solano, J., Soto-Elvira, P. L., & García-Cascales, M. S. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. *Renewable and sustainable energy reviews*, 24, 544-556.
17. Uyan, M. (2013). GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 11-17.
18. Yankiv-Vitkovska, L., Peresunko, B., Wyczałek, I., & Papis, J. (2020). Site selection for solar power plant in Zaporizhia city (Ukraine). *Geodesy and Cartography*, 69(1), 97-116.
19. Yousefi-Sahzabi A., Sasaki K., Yousefi H., Pirasteh S., Sugai Y. (2018) GIS-based multi-criteria decision analysis for solar power plant site selection in Iran: A fuzzy logic approach *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 4147–4156.
20. Vasudevan, V., Gundabattini, E., & Gnanaraj, S. D. (2024). Geographical Information System (GIS)-based solar photovoltaic farm site suitability using multi-criteria approach (MCA) in Southern Tamilnadu, India. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 105(1), 81-99.

## Reference:

1. Kudria, S. O., Yatsenko, L. V., Dushyna, H. P., Shynkarenko, L. Ya., & Dovha, V. T. (2008). Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України [Atlas of renewable energy potential of Ukraine]. Інститут відновлюваної енергетики НАН України.
2. Kussul, N. M., & Drozd, S. Yu. (2024). Геопросторовий аналіз потенціалу території України для розміщення сонячних електростанцій за супутниковими даними [Geospatial analysis of the potential of the territories of Ukraine for the placement of solar power plants based on satellite data]. *Космічна наука і технологія*, 30(1), 31-43.
3. Perovych, L. M., & Kereush, D. (2017). Технологія вибору оптимального місця розташування сонячних електростанцій з використанням дистанційного зондування Землі та ГІС-технологій [Technology of choosing the optimal location of solar power plants using remote sensing and GIS technologies]. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*.
4. Kholoshyn, I., Syvyi, Ya., Pantelieieva, N., & Hanchuk, O. (2024). Геопросторовий моніторинг мережі автомобільних доріг Дніпропетровської області [Geospatial monitoring of the road network of the Dnipropetrovsk region]. *Наукові записки Тернопільського національного педагогічного університету імені Володимира Гнатюка. Серія: географія*, 56(1). <https://doi.org/10.25128/2519-4577.24.1.10>
5. Kholoshyn, I. V., Bondarenko, O. V., Hanchuk, O. V., Mantulenko, S. V., & Varfolomeieva, I. M. (2025). Геопросторовий аналіз у географічних дослідженнях [Geospatial analysis in geographical research]. Oktan Print.
6. Al Garni, H. Z., & Awasthi, A. (2017). Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied energy*, 206, 1225-1240.
7. Charabi, Y., & Gastli, A. (2011). PV site suitability analysis using GIS-based spatial fuzzy multi-criteria evaluation. *Renewable Energy*, 36(9), 2554-2561.
8. Butenko, O. & Zvyaschenko, K. & Buravchenko, K. & Nikitin, A. (2019) Optimization of the process of selecting the location of solar power plants using GIS analysis. *Control, navigation and communication systems. Collection of scientific papers*, 1(53), 17-21.

9. Davybidia, L., & Kasiyanchuk, D. (2022, October). GIS-Based Site Suitability Assessment for Solar Plants in Ivano-Frankivsk Region. In *International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2022»* (Vol. 2022, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.
10. Drozd, S., & Kussul, N. (2024). Solar energy potential mapping in Ukraine through integration of GIS, remote sensing, and fuzzy logic. *European journal of remote sensing*, 57(1), 2362390.
11. Hofierka, J., & Suri, M. (2002, September). The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications. In *Proceedings of the Open source GIS-GRASS users conference* (Vol. 2002, pp. 51-70).
12. Huld, T., Müller, R., & Gambardella, A. (2012). A new solar radiation database for estimating PV performance in Europe and Africa. *Solar energy*, 86(6), 1803-1815.
13. Kurbatova T. S., Shumilova I. V., Yurchenko S. O. (2021) Spatial analysis of solar energy potential in southern regions of Ukraine using GIS technologies *Ukrainian Geographical Journal*, 2, 45–54.
14. Malczewski, J. (2006). GIS-based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International journal of geographical information science*, 20(7), 703-726.
15. Perovych I., Kryshenyk N., Kravets O. (2017) GIS-based assessment of solar energy potential in Ukraine *Geodesy, Cartography and Aerial Photography*, 86, 85–94.
16. Sánchez-Lozano, J. M., Teruel-Solano, J., Soto-Elvira, P. L., & García-Cascales, M. S. (2013). Geographical Information Systems (GIS) and Multi-Criteria Decision Making (MCDM) methods for the evaluation of solar farms locations: Case study in south-eastern Spain. *Renewable and sustainable energy reviews*, 24, 544-556.
17. Uyan, M. (2013). GIS-based solar farms site selection using analytic hierarchy process (AHP) in Karapinar region, Konya/Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28, 11-17.
18. Yankiv-Vitkovska, L., Peresunko, B., Wyczałek, I., & Papis, J. (2020). Site selection for solar power plant in Zaporizhia city (Ukraine). *Geodesy and Cartography*, 69(1), 97-116.
19. Yousefi-Sahzabi A., Sasaki K., Yousefi H., Pirasteh S., Sugai Y. (2018) GIS-based multi-criteria decision analysis for solar power plant site selection in Iran: A fuzzy logic approach *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 4147–4156.
20. Vasudevan, V., Gundabattini, E., & Gnanaraj, S. D. (2024). Geographical Information System (GIS)-based solar photovoltaic farm site suitability using multi-criteria approach (MCA) in Southern Tamilnadu, India. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 105(1), 81-99.

Надійшла до редакції 15.02.2026 р.

Прийнята до друку 13.03.2026 р.

Опублікована 02.04.2026 р.

