

ВИЗНАЧЕННЯ ФОТОЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ГЕОІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Отримано 07 лист. 2025 р.; рекомендовано до публікації 09 груд. 2025 р.
Доступно онлайн 31 груд. 2025 р.

Матях С. В.¹, Аушева Н. М.²,
Кардашов О. В.³, Бондаренко Д. В.⁴

Автор для кореспонденції: Матях Сергій,
e-mail: renewable@ukr.net

¹ канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-1707-3519>

² д-р. техн. наук., проф.
<https://orcid.org/0000-0003-0816-2971>

³ аспірант
<https://orcid.org/0000-0003-1767-7846>

⁴ канд. техн. наук
<https://orcid.org/0000-0002-5629-930X>

^{1,4} Інститут відновлюваної енергетики НАН України, України, м. Київ, Україна

^{2,3} Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Анотація. У роботі представлено результати досліджень щодо визначення потенціалу фотоенергетики для територіальних громад України з використанням геоінформаційних технологій. Для тестування вибрано 25 територіальних громад для впровадження СЕС з різним географічним положенням, групами по п'ять із п'яти областей України. Проведено формування вхідної вибірки даних обмежувальних ділянок, яка складається з сільськогосподарських угідь, лісових насаджень, водних об'єктів, забудованих територій та територій з природоохоронним статусом. Вхідна вибірка обмежувальних ділянок була оброблена ГІС-засобами, і був сформований векторний шар доступних ділянок для розміщення СЕС.

Визначено порогові значення для фільтрації шару доступних ділянок за категоріями мінімальних коридорів, 40 м, та мінімальної площі ділянки, 0,15 гГа. Порівняння значень доступної площі до (113 413,4 км²) та після фільтрації (103 419,6 км²) за цими категоріями продемонструвало різницю в 2% відносно загальної досліджуваної площі України. На основі даних про доступні для впровадження СЕС території та даних щодо річної інсоляції розраховано показники фотоенергетичного потенціалу вибраних територіальних громад України.

Ключові слова: сонячна енергія, географічний потенціал, геоінформаційні системи (ГІС), просторовий аналіз, сонячний енергетичний потенціал територіальних громад.

Перелік використаних позначень та скорочень

IEA – Міжнародне енергетичне агентство

BESS – системи накопичення енергії на основі акумуляторів

СЕС – сонячна електростанція

ФЕМ – фотоелектричний модуль

Вступ

Енергетична стратегія України до 2050 року, затверджена розпорядженням Кабміну від 21 квітня 2023 року, передбачає підвищення стійкості Енергетичної системи України та надійності енергозабезпечення за рахунок децентралізації генерації електроенергії по всій території країни, що тісно пов'язане з розвитком відновлюваної енергетики [1–3]. Зміни законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України [4], спрямовані на реформування електроенергетичної галузі за багатьма аспектами функціонування та розвитку енергетичного ринку України, зокрема малої розподіленої генерації. Крім економічних

переваг, системи розподіленої генерації електричної енергії можуть виконувати балансувальну функцію.

У звіті «Empowering Ukraine Through a Decentralised Electricity System» Міжнародного енергетичного агентства (IEA) представлено шлях до побудови стійкої, гнучкої та децентралізованої енергосистеми України. IEA розглядає сучасну кризу української енергетики, що виникла і поглиблюється внаслідок слабкості її централізованої моделі під час воєнних дій рф, як можливість побудувати нову архітектуру енергетики, засновану на розподілених енергоресурсах – сонячній, вітровій енергетиці, біоенергетиці, системах накопичення енергії (BESS) і

мікромережах [5]. Для цього до 2030 року Україна має реалізувати п'ять ключових напрямів:

- розвиток розподіленої генерації, особливо проєктів сонячної та біоенергетики;
- впровадження систем накопичення енергії на основі акумуляторів BESS (Battery Energy Storage System) для балансування енергосистеми;
- формування місцевих енергетичних спільнот та мікромереж;
- стимулювання prosumerів – споживачів, які одночасно виробляють енергію;
- реформа ринку електроенергії для інтеграції децентралізованих ресурсів у системні послуги.

На сьогодні сонячна електроенергетика в Україні завдяки державній підтримці та міжнародним інвестиціям характеризується суттєвим зростанням попиту на впровадження СЕС різного призначення, потужності та підпорядкування. Особливий інтерес до створення систем електрогенерації з використанням сонячної енергії виявляють фізичні особи та офіційні представники територіальних громад.

Постановка завдання. Розробка методів визначення енергетичного потенціалу та придатних для впровадження фотоенергетичного обладнання площ територіальних громад, визначених із застосуванням ГІС-технологій.

Метою роботи є визначення потенціалу фотоенергетики територіальних громад України із залученням геоінформаційних систем для використання під час розробки й впровадження розподілених децентралізованих енергосистем.

Методи дослідження: програмне забезпечення для ГІС-аналізу ArcGIS Pro.

Результати досліджень

Для розрахунку фотоенергетичного потенціалу для встановлення СЕС використовуються не лише показники надходження сонячної радіації, а також площа, доступна для будівництва станцій та коефіцієнт потужності СЕС, який залежить від типу та розташування фотоелектричних модулів (ФЕМ), відстані між рядами панелей тощо.

Середньорічна кількість сумарної сонячної радіації, що потрапляє на 1 м² поверхні на території України – від 1070 кВт·год/м² в її північній частині до 1400 кВт·год/м² і вище на півдні країни [6]

Для визначення теоретично досяжного потенціалу сонячної енергетики областей необхідно визначити обсяги потенційно доступних площ для монтажу фотоелектричного обладнання. До переліку земель, на яких можна будувати сонячні станції, вводяться обмеження стосовно цільового значення земель за якими вилучаються такі:

- площі сільськогосподарських угідь,
- площі лісових угідь,

- площі водних ресурсів,
- площі забудованих земель,
- площі природоохоронних зон.

Аналіз останніх досліджень

У дослідженнях [7, 8] розглянуто вибір локацій для СЕС з використанням критеріїв землекористування шляхом виокремлення ділянок, на які діє заборона встановлення генерувального обладнання, і, в разі потреби, додавання навколо ділянок буферних зон. На відміну від вітроенергетики, буферні зони для сонячної енергетики застосовують обмежено через менший екологічний вплив. Окремо можуть встановлюватися обмеження для природоохоронних територій, зокрема шляхів міграції птахів, щоб знизити ризик зіткнень з фотопанелями та зберегти рідкісні види, як зазначається у дослідженні [9], де для природоохоронних об'єктів визначено буферні зони 500–2500 м. Для аеропортів у роботі [10] рекомендовано відступ 3500 м, що обґрунтовується потенційними відблесками від панелей і ризиками для пілотів під час зльоту та посадки. Отже, міжнародна практика обмежує буферні зони для СЕС переважно інтервалом 0–500 м, тоді як поодинокі специфічні ситуації зумовлюють відступи 1–10 км.

Поширена проблема виникнення залишкових вузьких полігональних переходів між ділянками шириною менше порогового значення після поелементного просторового утворення масок придатності, що не відповідають вимогам мінімальної робочої ширини для розміщення рядів ФЕМ і сервісних проїздів, вирішується виконанням операцій ерозії та дилатації з утворенням буферних зон на прикладі дослідження [11]. У цьому дослідженні за даними супутникових зображень Landsat застосовувалася фільтрація пікселів зі зв'язністю до 9 сусідніх пікселів і виконувалося морфологічне розширення кластерів із застосуванням до цього растрового зображення з аналізом за круговим ядром радіусом в 1 піксель, що становить 30 м, за допомогою чого було усунуто вузькі переходи між ділянками. Додатково авторами дослідження [11] на векторному шарі було відфільтровано полігони площею менше 4 га у вигляді порогового значення площі ділянки. За аналогією до морфологічних операцій ерозії та дилатації в роботах [12] було виконано векторну побудову буферних зон для усунення вузьких переходів та ізольованих ділянок геометрії шару. Згідно з даними Національної лабораторії відновлювальної енергетики США (NREL) для практичної реалізації СЕС потужності від 1 МВт рекомендовано порогове значення площі 2 га [13].

Порядок визначення доступних площ для встановлення СЕС

Для визначення теоретично досяжного потенціалу сонячної енергетики для території України першим кроком є визначення географічного потенціалу галузі, тобто виокремлення доступної території для розміщення генерувальних установок.

Було визначено групу обмежувальних зон, що є частиною земель зі складу: сільськогосподарських угідь, лісових угідь, водних об'єктів, забудованих земель, земель з природоохоронним статусом. Для кожної зони було взято вхідні дані у вигляді растрових зображень, або безпосередньо векторних шейпфайлів, доступних для аналізу без попередньої конвертації. Процес обробки вхідних даних з різних джерел є специфічним для кожного з об'єктів вхідної вибірки даних.

Векторні шари забудованих земель та водних об'єктів було отримано з відкритого ресурсу ArcGIS Online [14, 15]. Шар природоохоронних об'єктів України було

отримано з відкритого ресурсу Protected Planet [16]. Векторний шар водних об'єктів було отримано шляхом об'єднання в єдиний шейпфайл двох вхідних векторних шарів, де векторний шар [14] містить великі водні об'єкти України, а шар [17] містить водні об'єкти України у форматі лінійних об'єктів. Для шару [14] з великими водними об'єктами було створено буферну зону 500 м, оскільки він зображує, наприклад, такі річки, як Десна та Дніпро, для яких характерні весняні паводки. Для шару [17] з іншими малими водними об'єктами – малими річками, іригаційними каналами, озерами, струмками – було створено буферну зону з рівномірним відступом від лінійних об'єктів шару на 50 м (рис. 1).

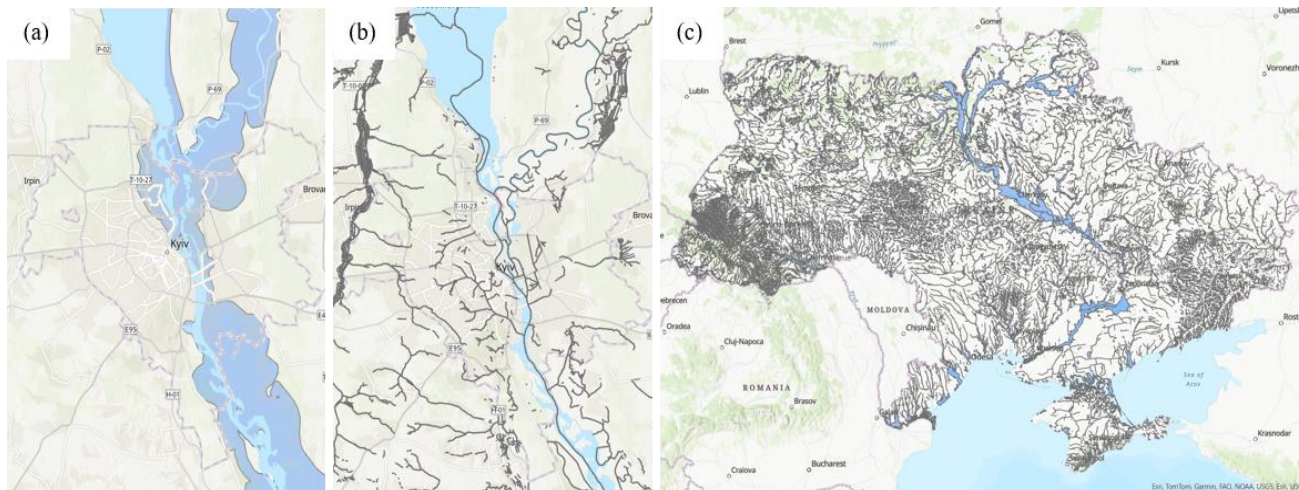


Рис. 1. Великі водні об'єкти (а); малі водні об'єкти (б); об'єднаний шар водних об'єктів з буферними зонами (с)

Вхідними даними для сільськогосподарських угідь та лісових насаджень є растрові шари у форматі GeoTIFF, де кожному пікселю зображення відповідає значення на проміжку $[0,100]$ – якщо цільовий об'єкт повністю покриває площу пікселя, він зображується білим кольором, і приймає значення 100, навпаки, якщо об'єкт повністю відсутній на площі пікселя, він позначається чорним кольором та приймає значення 0. Усі інші проміжні значення пікселів зображення n проміжку $0 < n < 100$ визначають неповне покриття цільовим об'єктом з різною насиченістю.

Для сільськогосподарських угідь було взято растрове зображення з ресурсу CORINE Land Monitoring Service. [18]. Растр було очищено від шуму шляхом опрацювання за допомогою інструмента Majority Filter ПЗ ArcGIS Pro [19] – коли значення більшості з 8 сусідів пікселя відрізняються від поточного пікселя, його значення замінюється на значення більшості. Наступним кроком було виокремлено сільськогосподарські угіддя з неперервного растра за пороговим значенням 61 так, що всі пікселі зі значеннями менше за порогове відкидалися. Растрове зображення з вирізаними сільськогосподарськими угіддями було конвертовано у векторний шар для подальшого аналізу.

Вхідні дані для лісових насаджень було отримано з порталу GlobalForestWatch [20] у вигляді растрових

зображень, що містять дані супутникового аналізу щільності покриття деревами території України. Формат растрового зображення лісових насаджень є аналогічним растру сільськогосподарських угідь і має аналогічний принцип виокремлення цільового об'єкта. Під час обробки растр було класифіковано за 10 групами, що розподілялися за густиною покриття пікселів лісовими насадженнями, після чого проміжний класифікований растр було бінаризовано за пороговим значенням 50 для пікселя, тим самим очищено від ділянок, що не належать областям лісових насаджень. Проміжний растровий шар лісових насаджень, аналогічно растру сільськогосподарських угідь, було конвертовано у векторний шейпфайл. Водночас отримані растрові зображення і, як наслідок, векторні шари СГ угідь та лісових насаджень неunikнено містять залишкові ділянки відповідних територій у тих зонах, де оригінальним растровим зображенням відділялися краї об'єктів, тобто на переходах між білим та чорним кольором. Цей факт зумовлює виникнення великої кількості вузьких коридорів на краях полів або лісів, а також виокремлення ділянок розріджених дерев, що можуть утворити некоректну форму полігонів під час конвертації у векторний шар, або утворити помилки геометрії у вигляді ділянок нульової площі, дірки у цілісних полігонах або острівні ділянки. Результат утворення векторних шарів сільськогосподарських угідь та лісових насаджень демонструється на рис. 2.

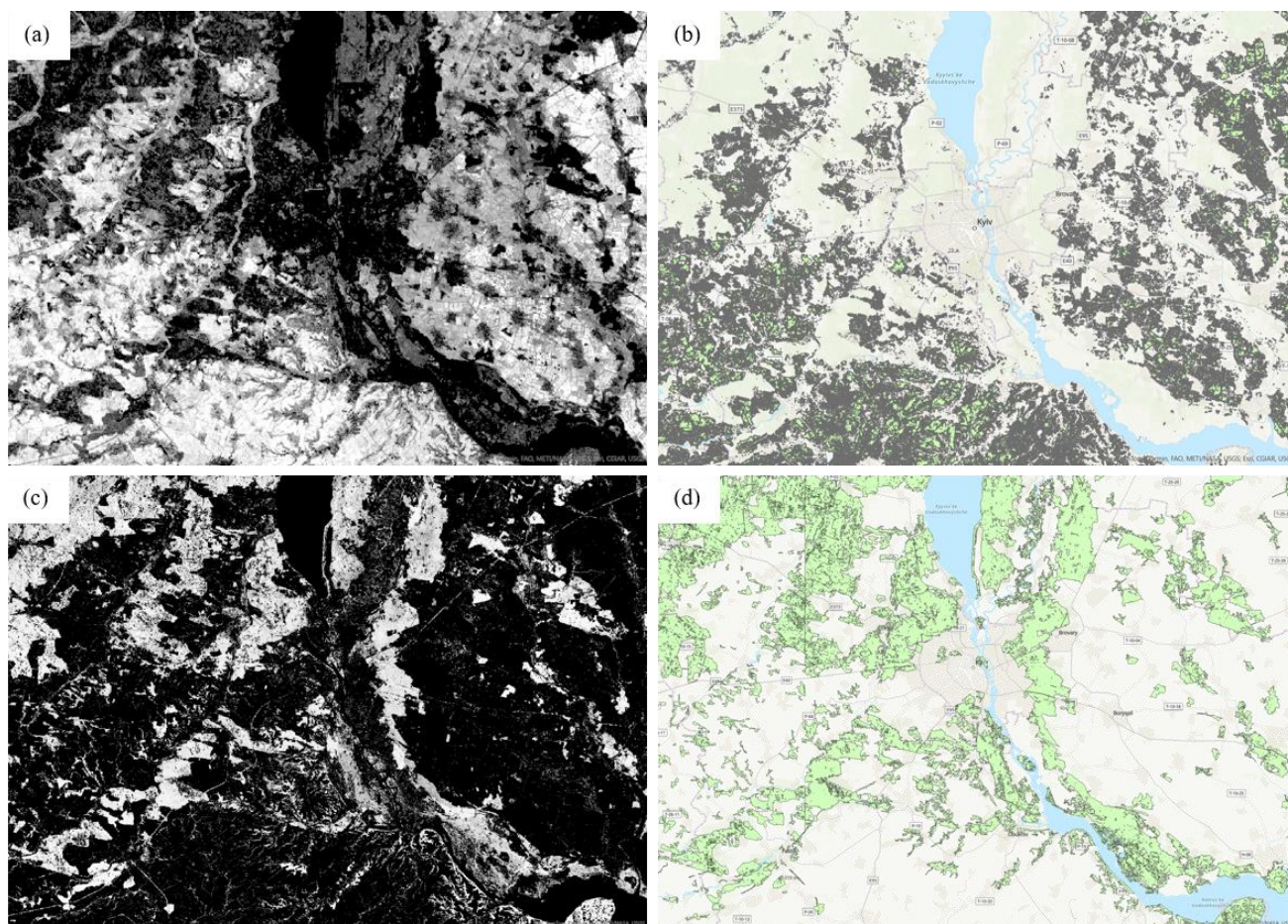


Рис. 2. Шари сільськогосподарських угідь: а – растровий шар до обробки; б – векторний шар після обробки. Шари лісових насаджень: с – растровий шар до обробки; д – векторний шар після обробки

З аналізу растрових зображень можна зробити такі висновки про характер розміщення обмежувальних зон: лісові угіддя здебільшого сконцентровані на півночі України, в Карпатах, Кримських горах та вздовж русл річок, а сільськогосподарські угіддя, хоч і розташовані на всій території України, збільшують свою концентрацію на сході, півдні та в центральній частині України, і обидва шари при об'єднанні утворюють відносно рівномірний розподіл обмежувальної території для розміщення СЕС за усією площею досліджуваної території.

Таким чином усі вхідні шари було приведено до формату векторних шейпфайлів. Над сформованою вибіркою шарів було виконано операцію об'єднання та розчинення (Union, Dissolve) засобами ПЗ ArcGIS Pro [19] для отримання єдиного векторного шару обмежувальних ділянок (рис. 3).

Шар доступних для розміщення зон було отримано шляхом виконання операції симетричної різниці (Symmetrical Difference), засобами ПЗ ArcGIS Pro [19], між територією адміністративних кордонів України та шаром обмежувальних ділянок (рис. 4).



Рис. 3. Обмежувальні ділянки для розміщення СЕС в Україні

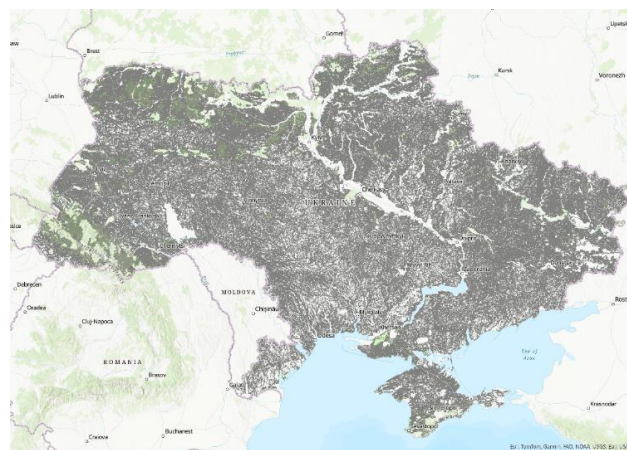


Рис. 4. Доступні ділянки для розміщення СЕС в Україні

Оскільки отриманий векторний шар доступних ділянок містить велику кількість вузьких переходів між ділянками та помилок геометрії полігонів, що виражається переважно в острівних залишкових мікро-ділянках, такі об'єкти реально не є придатними для розміщення СЕС, тому було виконано процес очищення векторного шару. Спершу шар було очищено від вузьких переходів та мікроділянок виконанням послідовних операцій ерозії та дилатації. Так, було спочатку виконано розрахунок буферної зони відстанню 40 м з від'ємним значенням від зовнішніх контурів векторного шару, за допомогою чого було очищено шар від небажаних ділянок, і від новоутвореного проміжного шару було знову розраховано буферну зону відстанню 40 м з додатним значенням. Розмір буферної зони оцінювався з розрахунку на мінімально придатну глибину одного ряду СЕС з розмі-

щенням супутнього устаткування, крім безпосередньо фотопанелей.

Отриманий шар також було розподілено за адміністративними одиницями України різних рівнів. Так, було послідовно накладено сітку за межами адміністративних областей України, районів та територіальних громад для можливості здійснювати локальний аналіз території на різних рівнях. У такий спосіб кандидатні ділянки було агреговано в цільні набори в межах кожної територіальної громади, району та адміністративної області України (рис. 5).

Отже, згідно з виконаним розподілом, представленим на рис. 5, було отримано зведену статистику кількості доступної території в квадратних кілометрах для сонячної енергетики за межами адміністративних областей України, де показано географічний потенціал до та після постобробки векторного шару доступної території:

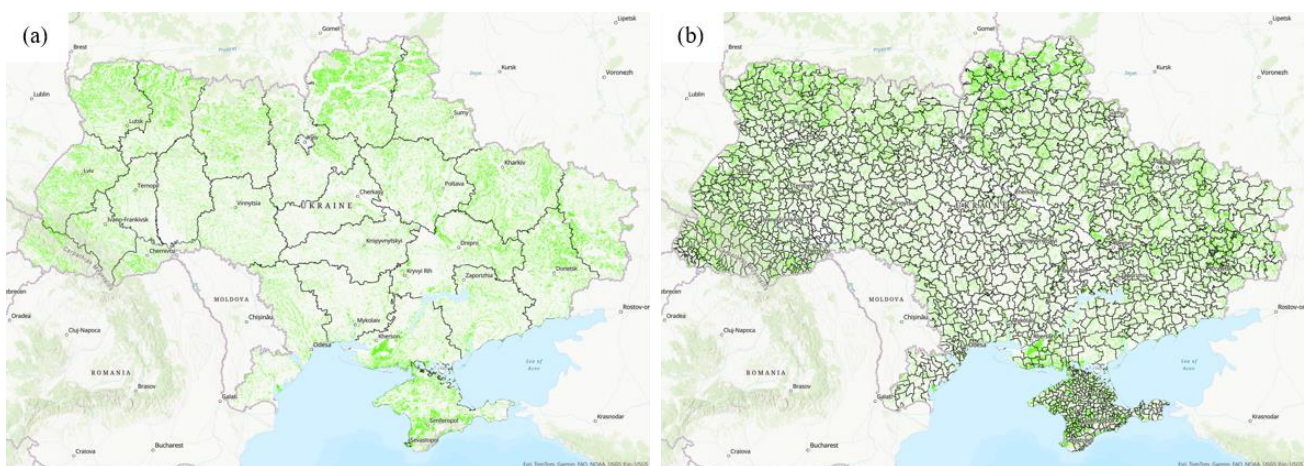


Рис. 5. Карта теоретично доступних ділянок для розміщення СЕС згідно з розподілом за: а – адміністративними областями України; б – територіальними громадами

Для створення тестової вибірки даних за окремими громадами було взято по п'ять громад з п'яти областей України – Чернігівської, Харківської, Миколаївської, Львівської та Черкаської (табл. 1).

Таблиця 1. Перелік тестових територіальних громад для визначення теоретичного потенціалу фотоенергетики

№ зп	Територіальна громада	Область приналежності
1	Березнянська	Чернігівська
2	Городнянська	Чернігівська
3	Понорницька	Чернігівська
4	Сухополов'янська	Чернігівська
5	Яблунівська	Чернігівська
6	Безлюдівська	Харківська
7	Дворічанська	Харківська
8	Наталинська	Харківська
9	Нововодолазька	Харківська
10	Шевченківська	Харківська
11	Баштанська	Миколаївська

№ зп	Територіальна громада	Область приналежності
12	Березнегуватська	Миколаївська
13	Галицинівська	Миколаївська
14	Мостівська	Миколаївська
15	Врадіївська	Миколаївська
16	Боринська	Львівська
17	Дрогобицька	Львівська
18	Моршинська	Львівська
19	Сокальська	Львівська
20	Стрийська	Львівська
21	Бабанська	Черкаська
22	Чорнобаївська	Черкаська
23	Катеринопільська	Черкаська
24	Шрамківська	Черкаська
25	Жашківська	Черкаська

Нижче наведено розміщення вибраних громад на карті України (рис. 6) та на картах областей (рис. 7–11).

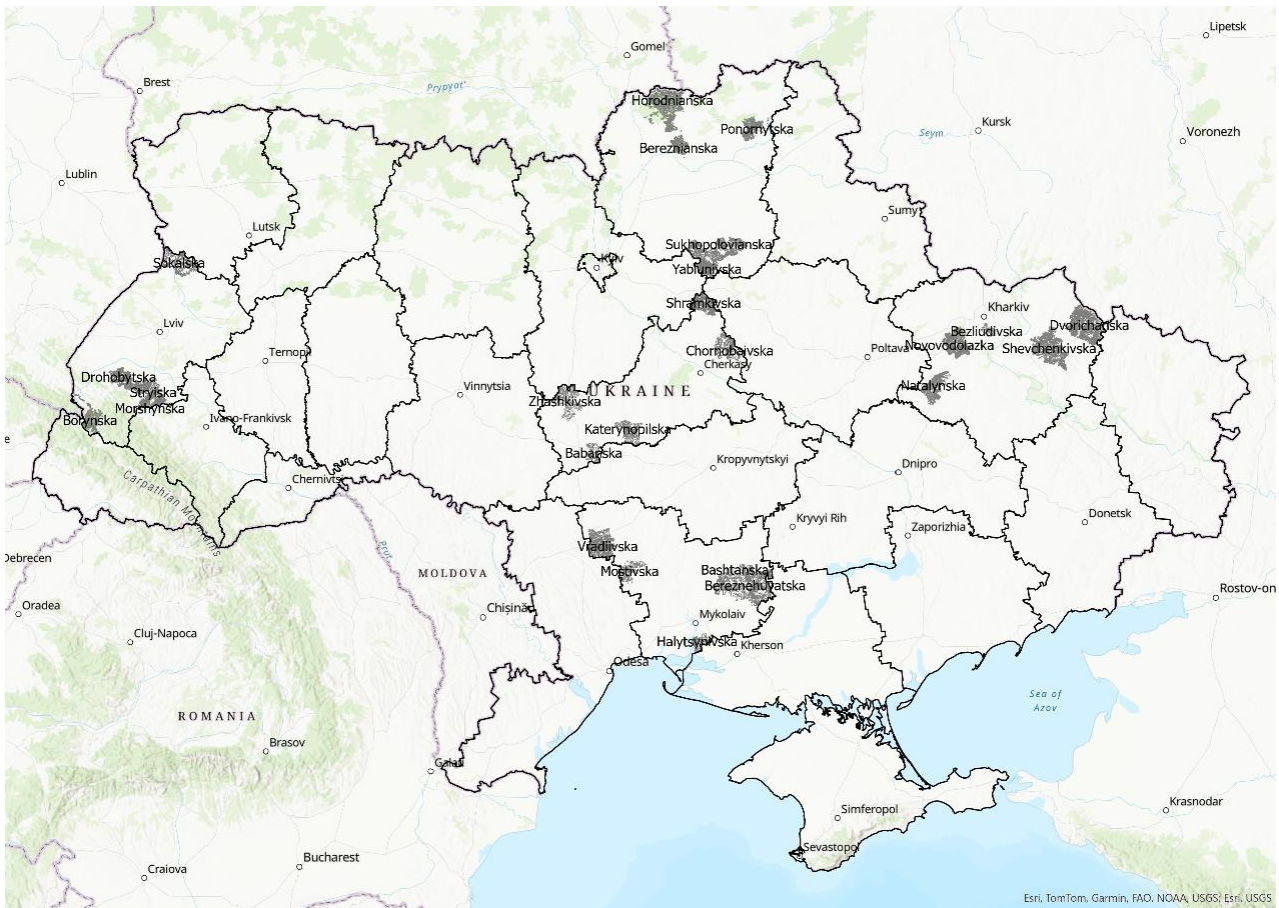


Рис. 6. Розташування територіальних громад на території України

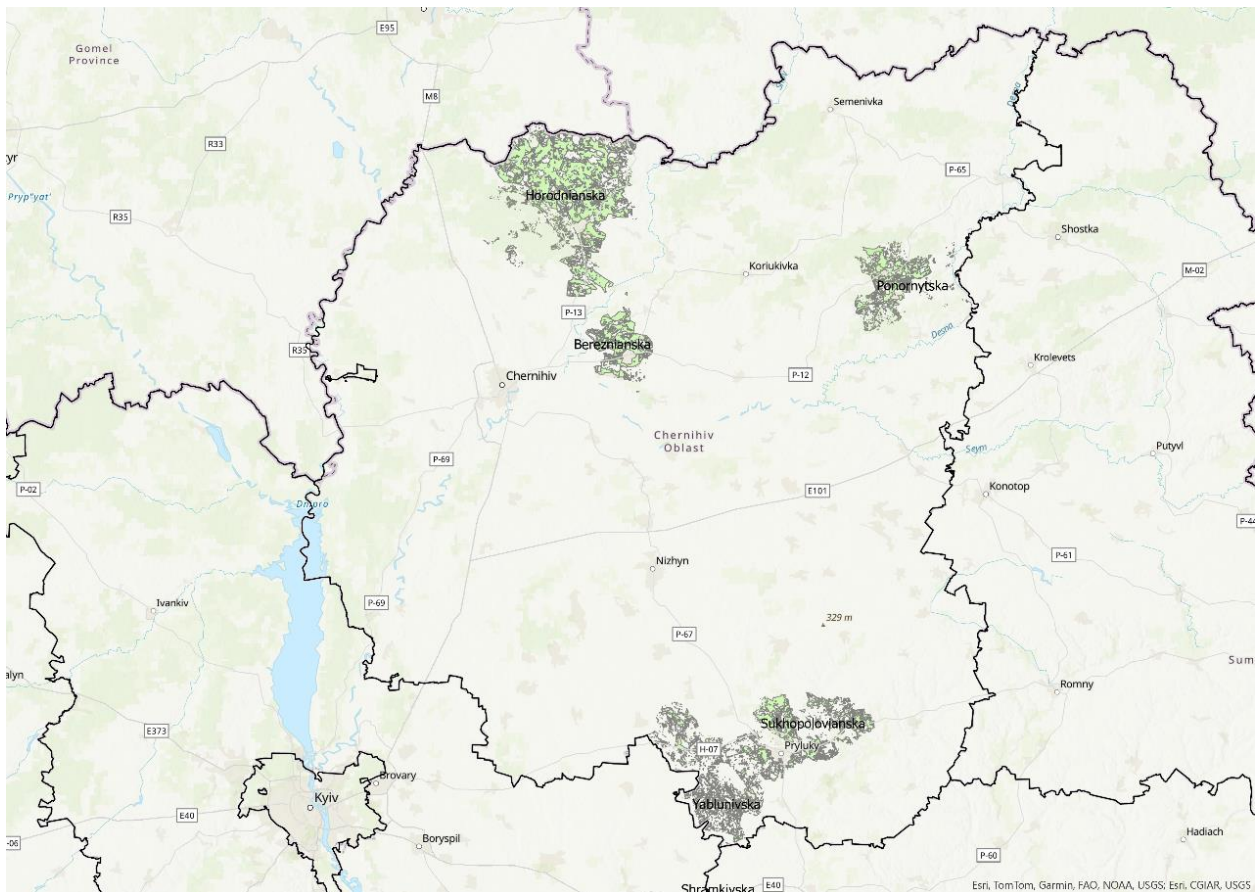


Рис. 7. Територіальні громади Чернігівської області

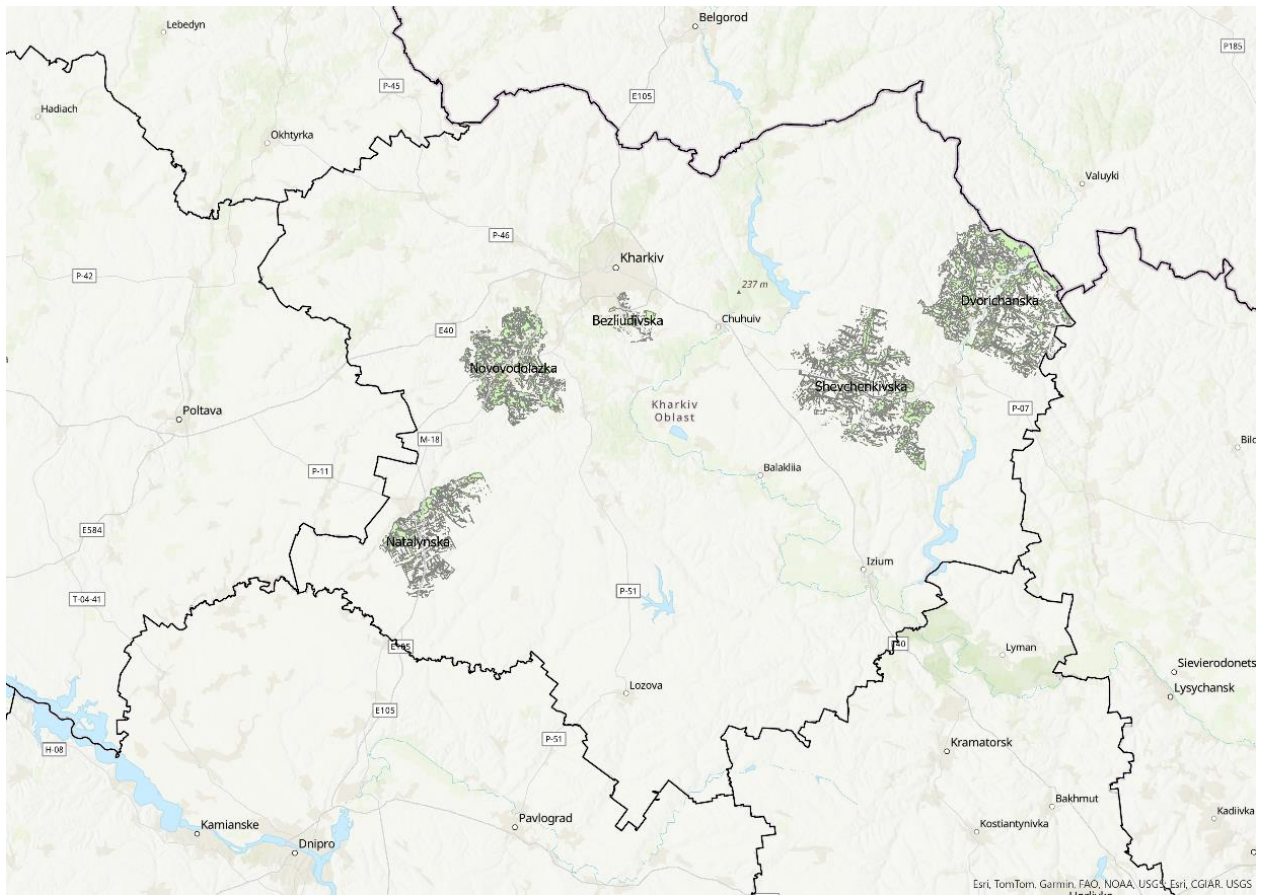


Рис. 8. Територіальні громади Харківської області

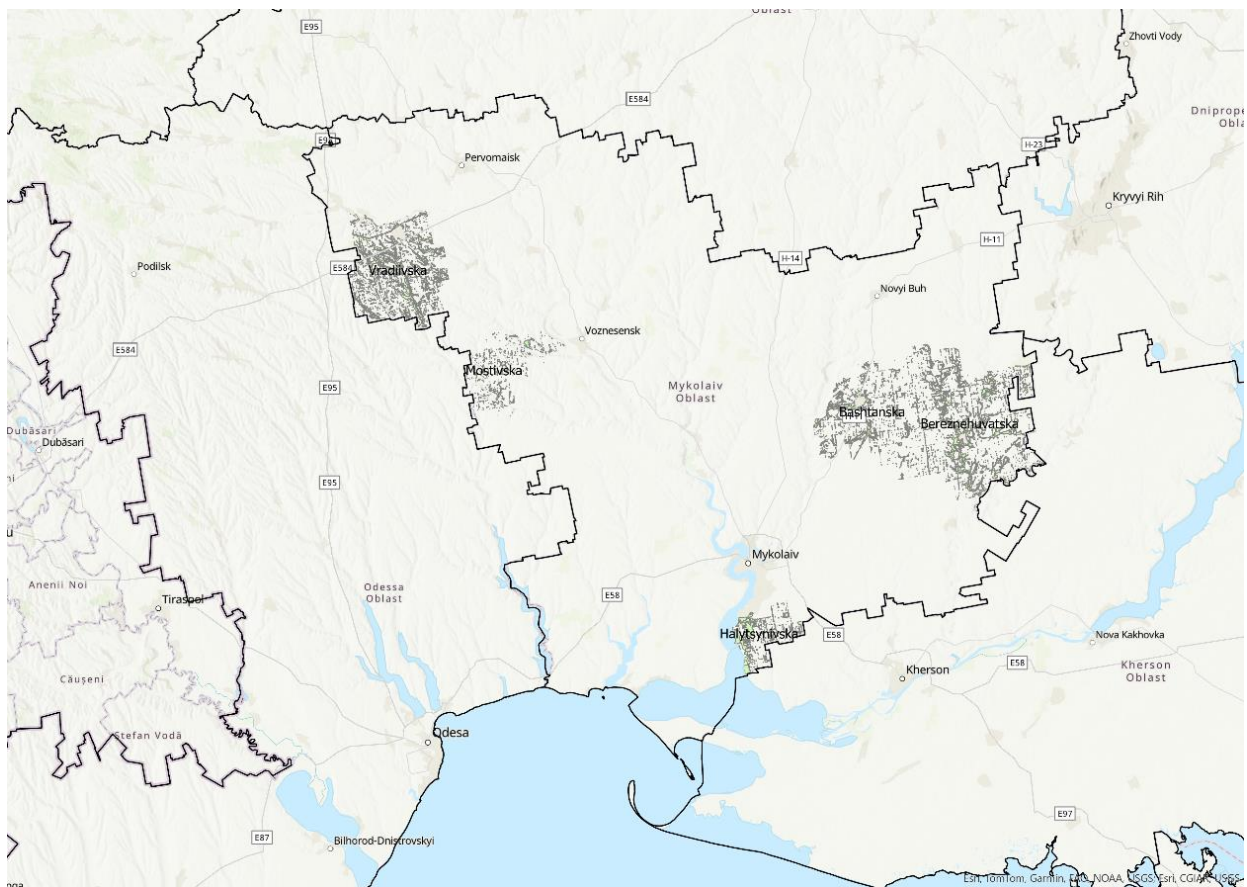


Рис. 9. Територіальні громади Миколаївської області

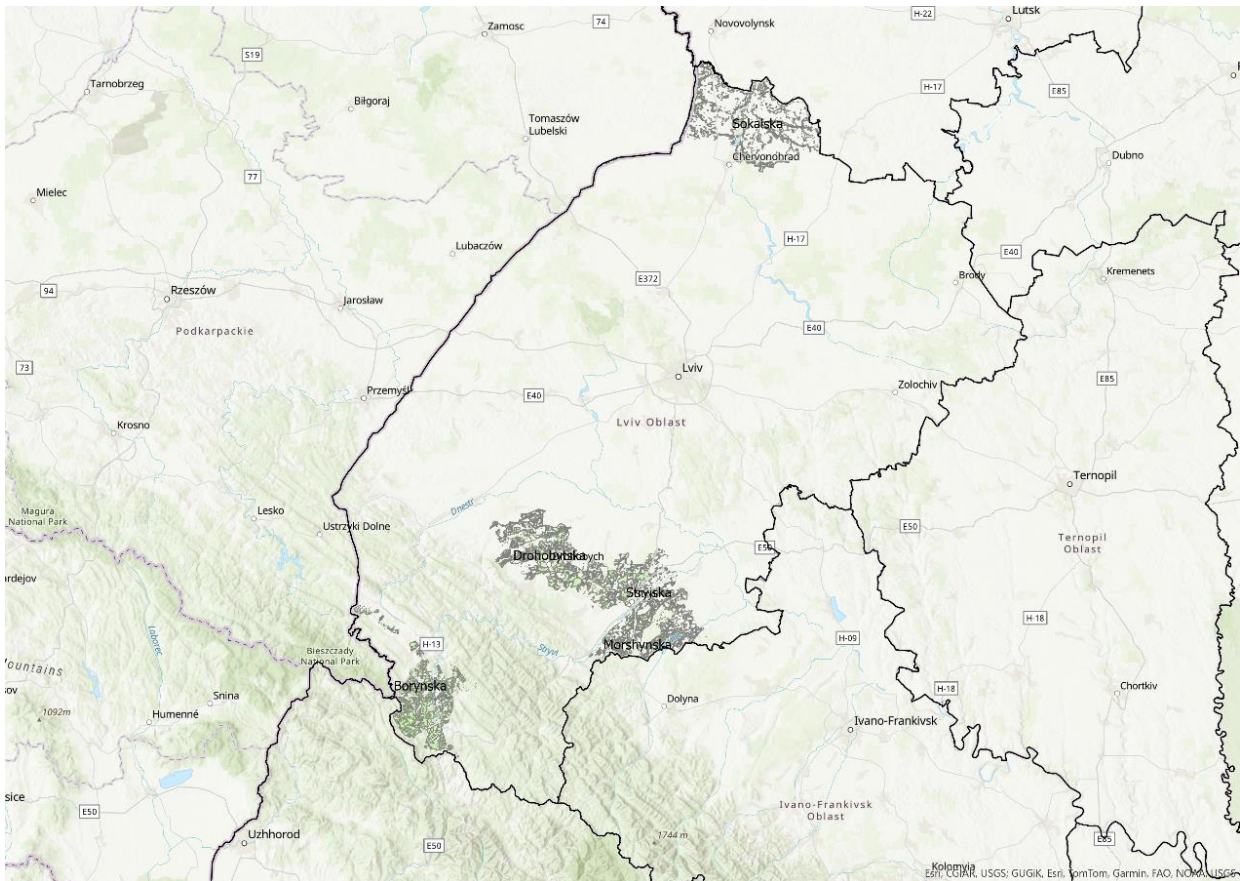


Рис. 10. Територіальні громади Львівської області

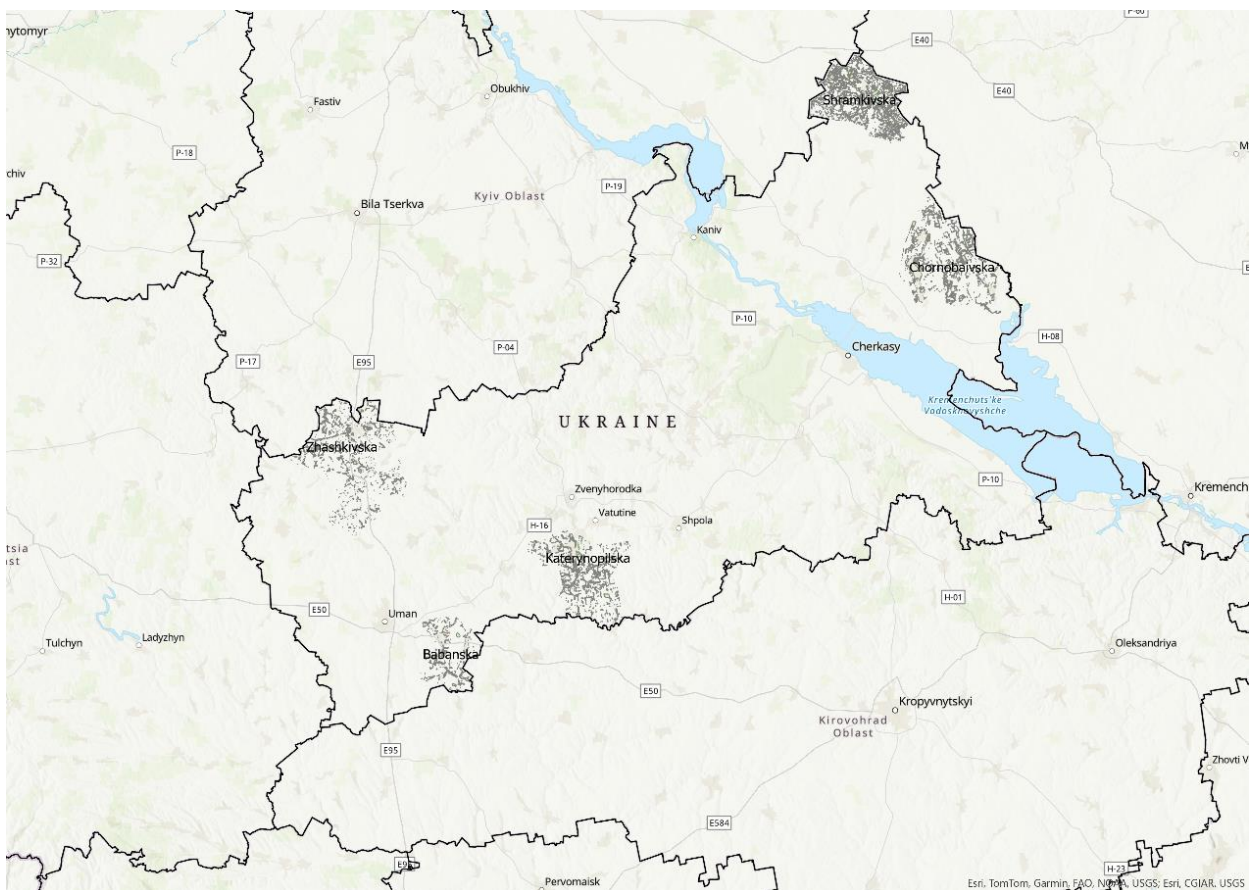


Рис. 11. Територіальні громади Черкаської області

У підсумку отримано значення площ, доступних для встановлення СЕС для вибраних територіальних громад (табл. 2).

Таблиця 2. Значення площ, доступних для встановлення СЕС для вибраних територіальних громад

№ зп	Територіальна громада	Площа земель громади	Площа земель, доступних для встановлення СЕС, км ²	Площа земель, доступних для встановлення СЕС, %	Область
1	Березнянська	352,5548432	123,7597414	35	Чернігівська
2	Городнянська	1187,566831	519,0755766	44	Чернігівська
3	Понорницька	523,8603459	116,6252264	22	Чернігівська
4	Сухополов'янська	894,9849508	219,2058624	24	Чернігівська
5	Яблунівська	283,0733307	52,48113866	19	Чернігівська
6	Безлюдівська	137,7176145	20,12493586	15	Харківська
7	Дворічанська	1111,570804	380,8299315	34	Харківська
8	Наталинська	502,4601864	141,6553759	28	Харківська
9	Нововодолазька	579,8273677	252,7712058	44	Харківська
10	Шевченківська	977,4874451	273,5951647	28	Харківська
11	Баштанська	760,599375	77,12212057	10	Миколаївська
12	Березнегуватська	1263,065334	170,4755188	13	Миколаївська
13	Галичинівська	285,3310131	53,06562873	19	Миколаївська
14	Мостівська	428,7262527	20,80351684	5	Миколаївська
15	Врадіївська	800,4100037	140,4392765	18	Миколаївська
16	Боринська	639,4001415	153,9915605	24	Львівська
17	Дрогобицька	421,5730617	153,3754488	36	Львівська
18	Моршинська	121,5266996	38,40075856	32	Львівська
19	Сокальська	676,5581559	104,8893553	16	Львівська
20	Стрийська	551,9076237	140,894566	26	Львівська
21	Бабанська	275,4496744	20,50430102	7	Черкаська
22	Чорнобаївська	639,5702946	57,71067337	9	Черкаська
23	Катеринопільська	442,2097084	47,67012113	11	Черкаська
24	Шрамківська	421,0335885	89,34158354	21	Черкаська
25	Жашківська	726,3979819	42,09279464	6	Черкаська

Проте вказані в таблиці значення доступної території не визначають загальну теоретично доступну територію для розміщення СЕС, оскільки аналіз географічного потенціалу не враховує технічну доступність до існуючої енергетичної розподільчої мережі, економічну доцільність розміщення, та доцільність розміщення з погляду середньорічного просторового розподілу сонячної радіації, що сумарно суттєво обмежуватиме придатну для розміщення СЕС територію.

Порядок визначення досяжного потенціалу фотоенергетики територіальних громад:

1. Для розрахунку площі ФЕМ, яка може бути встановленою на відповідній площі поверхні землі, необхідно визначити коефіцієнт відношення площі затінення горизонтальної поверхні до площі встановлених ФЕМ (табл. 3). Відповідно, площа встановлених ФЕМ буде

$$S_{\text{ФЕМ}} = k * S_{\text{дост}},$$

де $S_{\text{ФЕМ}}$ – площа встановлених ФЕМ, k – коефіцієнт відношення площі затінення горизонтальної поверхні до площі встановлених ФЕМ, $S_{\text{дост}}$ – площа поверхні землі, доступна для встановлення ФЕМ.

Таблиця 3. Коефіцієнт відношення площі затінення горизонтальної поверхні до площі встановлених ФЕМ

№ зп	Область	Коефіцієнт відношення площі затінення горизонтальної поверхні до площі встановлених ФЕМ
1	Вінницька	0,386931
2	Волинська	0,371025
3	Дніпропетровська	0,402424
4	Донецька	0,402424
5	Житомирська	0,371025
6	Закарпатська	0,402424
7	Запорізька	0,417529
8	Івано-Франківська	0,402424
9	Київська	0,371025
10	Кіровоградська	0,402424
11	Луганська	0,402424
12	Львівська	0,386931

№ зп	Область	Коефіцієнт відношення площі горизонтальної поверхні до площі встановлених ФЕМ
13	Миколаївська	0,43227
14	Одеська	0,43227
15	Полтавська	0,386931
16	Рівненська	0,402424
17	Сумська	0,371025
18	Тернопільська	0,386931
19	Харківська	0,371025
20	Херсонська	0,43227
21	Хмельницька	0,386931
22	Черкаська	0,386931
23	Чернівецька	0,402424
24	Чернігівська	0,354679
25	АР Крим	0,460742

Оцінка теоретично досяжної потужності, зважаючи на те, що площа генерації 1 кВт сучасними ФЕМ становить приблизно 5 м² (табл. 4).

Таблиця 4. Теоретично досяжна потужність встановлених ФЕМ

№ зп	Територіальна громада	Теоретично досяжна потужність встановлених ФЕМ, МВт
1	Березнянська	8753,066053
2	Городнянська	37 066,04186
3	Понорницька	8175,299699
4	Сухополов'янська	15 236,75382
5	Яблунівська	3815,206349
6	Безлюдівська	1532,900416
7	Дворічанська	28 044,59934
8	Наталинська	10 439,81681
9	Нововодолазька	18 931,48048
10	Шевченківська	20 309,64867
11	Баштанська	6575,683599
12	Березнегуватська	14 195,61172
13	Галицинівська	4686,919812
14	Мостівська	1853,254342
15	Врадіївська	12 455,75212
16	Боринська	11 875,3854
17	Дрогобицька	11 744,62342
18	Моршинська	3009,438171
19	Сокальська	8377,006641
20	Стрийська	11 104,61445
21	Бабанська	1492,121014
22	Чорнобаївська	4454,454601

№ зп	Територіальна громада	Теоретично досяжна потужність встановлених ФЕМ, МВт
23	Катеринопільська	3764,304106
24	Шрамківська	6842,263287
25	Жашківська	3372,792493

Для оцінки теоретично досяжної річної фотоелектричної генерації необхідно взяти показники середньорічної генерації з 1 кВт ФЕМ для областей України, до яких належать відповідні громади.

Результати представлено в табл. 5.

Таблиця 5. Показники середньорічної генерації з 1 кВт ФЕМ для областей України

№ зп	Територіальна громада	Теоретично досяжна річна генерація, МВт·год
1	Березнянська	9 985 497,753
2	Городнянська	42 284 940,56
3	Понорницька	9 326 381,896
4	Сухополов'янська	17 382 088,76
5	Яблунівська	4 352 387,403
6	Безлюдівська	1 839 633,789
7	Дворічанська	33 656 323,67
8	Наталинська	12 528 824,15
9	Нововодолазька	22 719 669,73
10	Шевченківська	24 373 609,37
11	Баштанська	9 422 297,029
12	Березнегуватська	20 340 892,03
13	Галицинівська	6715887,399
14	Мостівська	2 655 528,147
15	Врадіївська	17 847 847,22
16	Боринська	13 634 129,98
17	Дрогобицька	13 484 002,14
18	Моршинська	3 455 135,964
19	Сокальська	9 617 641,325
20	Стрийська	12 749 207,85
21	Бабанська	1 834 562,786
22	Чорнобаївська	5 476 751,932
23	Катеринопільська	4 628 211,898
24	Шрамківська	8 412 562,711
25	Жашківська	4 146 848,37

Результуючі показники теоретично досяжного потенціалу фотоенергетики для вибраних територіальних громад України наведено в табл. 6.

Таблиця 6. Теоретично досяжний потенціал фотоенергетики для вибраних територіальних громад України

№ зп	Територіальна громада	Теоретично досяжна площа для встановлення ФЕМ, км ²	Теоретично досяжна площа встановлених ФЕМ, км ² ФЕМ	Теоретично досяжна потужність встановлених ФЕМ, МВт	Теоретично досяжна річна генерація, МВт·год
1	Березнянська	123,7597414	43,76533	8753,066053	9 985 497,753
2	Городнянська	519,0755766	185,3302	37 066,04186	42 284 940,56
3	Понорницька	116,6252264	40,8765	8175,299699	9 326 381,896
4	Сухополов'янська	219,2058624	76,18377	15 236,75382	17 382 088,76
5	Яблунівська	52,48113866	19,07603	3815,206349	4 352 387,403
6	Безлюдівська	20,12493586	7,664502	1532,900416	1 839 633,789
7	Дворічанська	380,8299315	140,223	28 044,59934	33 656 323,67
8	Наталинська	141,6553759	52,19908	10 439,81681	12 528 824,15
9	Нововодолазька	252,7712058	94,6574	18 931,48048	22 719 669,73
10	Шевченківська	273,5951647	101,5482	20 309,64867	24 373 609,37
11	Баштанська	77,12212057	32,87842	6575,683599	9 422 297,029
12	Березнегуватська	170,4755188	70,97806	14 195,61172	20 340 892,03
13	Галицинівська	53,06562873	23,4346	4686,919812	6 715 887,399
14	Мостівська	20,80351684	9,266272	1853,254342	2 655 528,147
15	Врадіївська	140,4392765	62,27876	12 455,75212	17 847 847,22
16	Боринська	153,9915605	59,37693	11 875,3854	13 634 129,98
17	Дрогобицька	153,3754488	58,72312	11 744,62342	13 484 002,14
18	Моршинська	38,40075856	15,04719	3009,438171	3 455 135,964
19	Сокальська	104,8893553	41,88503	8377,006641	9 617 641,325
20	Стрийська	140,894566	55,52307	11 104,61445	12 749 207,85
21	Бабанська	20,50430102	7,460605	1492,121014	1 834 562,786
22	Чорнобаївська	57,71067337	22,27227	4454,454601	5 476 751,932
23	Катеринопільська	47,67012113	18,82152	3764,304106	4 628 211,898
24	Шрамківська	89,34158354	34,21132	6842,263287	8 412 562,711
25	Жашківська	42,09279464	16,86396	3372,792493	4 146 848,37

Висновки

Під час дослідження було проаналізовано актуальні практики визначення географічного потенціалу для сонячної енергетики, встановлено основні обмежувальні ділянки для СЕС, критерії та доконечні випадки застосування буферних зон для обмежувальних ділянок. Було визначено набір відкритих джерел для формування вхідної вибірки даних обмежувальних ділянок. До вхідної вибірки обмежувальних ділянок було занесено такі об'єкти, як сільськогосподарські угіддя, лісові насадження, водні об'єкти, забудовані території й території з природоохоронним статусом. Розрізнену вхідну вибірку даних, що складалася з растрових зображень та векторних шарів, було приведено до єдиного типу векторних шарів. Вхідні растрові шари сільськогосподарських угідь та лісових насаджень було категоризовано за пороговими значеннями 61 і 50, відповідно, з проміжку [0,100]. У такий спосіб було вилучено з зображення ділянки, що не належать виокремленим об'єктам, після

чого було утворено векторні шари за залишковими ділянками після процесу фільтрації. Вибірку векторних шарів обмежувальних ділянок було об'єднано в єдиний векторний шар, після чого знайдено симетричну різницю з адміністративними межами України. У підсумку було отримано векторний шар доступних для розміщення ділянок.

Векторний шар доступних ділянок було відфільтровано за пороговим значенням площі в 0,15 га, та очищено від вузьких коридорів відстанню до 40 м. Після чого було виконано розподіл отриманої території за категоріями адміністративного поділу України – за межами адміністративних областей, районів та територіальних громад. У межах України процес фільтрації продемонстрував різницю в оцінці географічного потенціалу у 2 % між відфільтрованою та невідфільтрованою вибіркою ділянок.

Застосування геоінформаційних технологій дало змогу отримати значення площ, доступних для встановлення СЕС для вибраних територіальних громад.

Внаслідок виконання роботи визначено теоретично-досяжний потенціал фотоенергетики для впровадження СЕС на встановлених площах 25 вибраних територіальних громад з різним географічним положенням, групами по п'ять із п'яти областей України.

ПОСИЛАННЯ

1. Bondarenko, D., Matiakh, S., Surzhyk T., & Sheiko, I. (2025). Actual pathways for solar energy development based on the materials of the scientific and practical conference «renewable energy and energy efficiency in the 21st century» 2025. *Vidnovluvana Energetika*, (3(82), 82–88. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3\(82\).82-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3(82).82-88)
2. Bondarenko, D., Matiakh, S., Surzhyk T., Sheiko, I., & Kravchenko M. (2024). Development trends of solar power engineering based on the materials of the scientific and practical conference «renewable energy and energy efficiency in the 21. *Vidnovluvana Energetika*, (3(78), 76–83. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).76-83](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).76-83)
3. Bondarenko, D., Matiakh, S., Surzhyk, T., Sheiko, I. (2024). Photovoltaic Thermal Solar Collector for Autonomous and Energy Cluster Modes. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control*, vol. 552. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6_16
4. Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та "зеленої" трансформації енергетичної системи України/ Закон України № 3220-IX. ВВР. 2023. № 82. с. 301. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-IX#Text>
5. Енергетична незалежність через децентралізацію: нова дорожня карта IEA до 2030 року <https://100re.org.ua/energetychna-nezalezhnist-cherez-decentralizaciyu-nova-dorozhnya-karta-iea-do-2030-roku/>
6. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії / С. О. Кудря: Підручник. Київ: Національний технічний університет України («КПІ»), 2012. 495 с.
7. Sofia Spyridonidou, Dimitra G. Vagiona, A systematic review of site-selection procedures of PV and CSP technologies, *Energy Reports*, Volume 9, 2023, Pp/ 2947–2979. ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.132>.
8. Ranjgar, B., Niccolai, A., & Leva, S. (2025). Where Can Solar Go? Assessing Land Availability for PV in Italy Under Regulatory Constraints. *Solar*, 5(3), 40. <https://doi.org/10.3390/solar5030040>
9. Taoufik et al. (2021), *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – екологічні буфери (орнітологія)* https://epj.min-pan.krakow.pl/pdf-133474-66008?filename=66008.pdf&utm_source=chatgpt.com
10. Fotsing Metegam, Isabelle Flora. Site suitability analysis for integrating large-scale hybrid photovoltaic and concentrated solar power plants in Cameroon using Monte Carlo, analytic hierarchy process, and geographic information system methods”, *Energy Conversion and Management: X*, Volume 25, 2025, 100871, ISSN 2590-1745, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100871>.
11. Zhang, X., Xu, M., Wang, S., Huang, Y., & Xie, Z. (2022). Mapping photovoltaic power plants in China using Landsat, random forest, and Google Earth Engine. *Earth System Science Data*, 14, 3743–3755. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3743-2022>
12. Mierzwiak, M., & Całka, B. (2017). Multi-criteria analysis for solar farm location suitability. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 104, 20–32. <https://doi.org/10.1515/rgg-2017-0012>
13. Dowling, Z. (2024, June). Community Planning for Solar: Conducting a solar resource and infrastructure assessment (NREL/SR-7A40-90070). National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/90070.pdf>
14. Esri. "UKR_water_areas_dcw" [Feature Server]. Available at: https://services2.arcgis.com/ZODjAzAQ2B0f85zi/arcgis/rest/services/UKR_water_areas_dcw/FeatureServer (Accessed: 21 September 2024)
15. Esri. "UKR_COD_AB_2024" [Feature Server]. "ukr_admbnda_adm4_sspe_20240416". Available at: https://services-eu1.arcgis.com/fppoCYaq7HfVfBIV/arcgis/rest/services/UKR_COD_AB_2024/FeatureServer (Accessed: 26 September 2024)
16. Protected Planet. Available at: <https://www.protectedplanet.net/> (Accessed: 15 September 2024)
17. Esri. "Ukrainian_Waterways" [Feature Server]. "gis_osm_waterways_free_1". April 11, 2023. Available at: https://services5.arcgis.com/SaBe5H MtmbqSWlu/arcgis/rest/services/Ukrainian_Waterways/FeatureServer (Accessed: 22 September 2024)
18. CORINE Land Cover 2018 (raster 100 m), Europe, 6-yearly – version 2020_20u1, May 2020, <https://doi.org/10.2909/960998c1-1870-4e82-8051-6485205ebbac>
19. Esri Inc. (2024). *ArcGIS Pro (Version 3.4.0) [Computer software]*. Redlands, CA: Esri Inc..
20. GlobalForestWatch. Available at: <https://www.globalforestwatch.org/> (Accessed: 28 October 2024)

DETERMINATION OF THE PHOTOVOLTAIC POTENTIAL OF TERRITORIAL COMMUNITIES OF UKRAINE USING GEOINFORMATION SYSTEMS

Received Nov. 07, 2025; accepted Dec. 09, 2025
Available online Dec. 31, 2025

**Matiakh S.¹, Ausheva N.²,
Kardashov O.³, Bondarenko D.⁴**

Author for correspondence: Matiakh Sergii,
e-mail: renewable@ukr.net

¹ Cand. of Tech. Sciences
<https://orcid.org/0000-0002-1707-3519>

² Dr. of Tech. Sciences, Professor
<https://orcid.org/0000-0003-0816-2971>

³ Postgraduate student (Eng.)
<https://orcid.org/0000-0003-1767-7846>

⁴ Cand. of Tech. Sciences
<https://orcid.org/0000-0002-5629-930X>

^{1,4} Institute of Renewable Energy, NAS of
Ukraine, Kyiv, Ukraine

^{2,3} National Technical University of Ukraine "Ihor
Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv,
Ukraine

Abstract. *The study presents the results of research aimed at determining the photovoltaic potential of the territorial communities of Ukraine using geoinformation technologies. For testing purposes, 25 territorial communities were selected for the implementation of solar power plants (SPP), grouped in sets of five across five regions of Ukraine with different geographical conditions.*

An input dataset of restrictive land areas was formed, consisting of agricultural lands, forest plantations, water bodies, built-up areas, and territories with environmental protection status. The input dataset of restrictive areas was processed using GIS tools, resulting in the creation of a vector layer of available land plots suitable for the placement of SPP.

Threshold values were defined for filtering the layer of available areas into two categories: a minimum corridor width of 40 meters and a minimum plot area of 0.15 hectares. A comparison of the available area before filtering (113,413.4 km²) and after filtering (103,419.6 km²) according to these categories demonstrated a difference of approximately 2% relative to the total study area of Ukraine. Based on the data on territories suitable for SPP deployment and annual solar irradiation, indicators of the photovoltaic potential of the selected territorial communities of Ukraine were calculated.

Keywords: *solar energy, geographic potential, geographic information systems (GIS), spatial analysis, solar energy potential of territorial communities.*

List of Symbols and Abbreviations

IEA – International Energy Agency

BESS – Battery Energy Storage Systems

SPP – Solar Power Plant

PV Module – Photovoltaic Module

Introduction

The Energy Strategy of Ukraine until 2050, approved by the Cabinet of Ministers' Resolution of April 21, 2023, envisions enhancing the resilience of the Ukrainian Energy System and ensuring a reliable energy supply through the decentralization of electricity generation across the entire territory of the country, which is closely linked to the development of renewable energy sources [1-3]. Amendments to the laws of Ukraine concerning the restoration and "green" transformation of the national energy system [4] are aimed at reforming the electric power sector in multiple aspects of its operation and development of the national energy market, including small-scale distributed generation. In addition to economic advantages, distributed power generation systems can also perform a balancing function.

In the report "Empowering Ukraine Through a Decentralised Electricity System" by the International Energy Agency (IEA), a pathway toward building a resilient, flexible, and decentralized energy system in Ukraine is presented. The IEA views the current crisis of Ukraine's energy sector—arising and deepening due to the vulnerability of its centralized model during the military aggression of the Russian Federation—as an opportunity to construct a new energy architecture based on distributed energy resources, including solar, wind, and bioenergy, as well as battery energy storage systems (BESS) and microgrids [5]. To achieve this, Ukraine must implement five key strategic pathways by 2030:

- development of distributed generation, particularly solar and bioenergy projects;

- implementation of battery energy storage systems (BESS) for balancing the power system;
- establishment of local energy communities and microgrids;
- promotion of prosumers — consumers who simultaneously produce energy;
- reform of the electricity market to enable the integration of decentralized resources into system services.

At present, solar power generation in Ukraine, supported by state initiatives and international investments, is characterized by a significant increase in demand for the deployment of solar power plants (SPPs) of various types, capacities, and ownership structures. Particular interest in establishing electricity generation systems based on solar energy is demonstrated by individual households as well as official representatives of territorial communities.

Problem Statement. The development of methods for determining the energy potential and identifying areas suitable for the deployment of photovoltaic equipment within the territorial communities, defined through the application of GIS technologies.

The aim of this study is to determine the photovoltaic potential of the territorial communities of Ukraine using geoinformation systems, with the purpose of supporting the development and implementation of distributed decentralized energy systems.

Research Methods: GIS analysis software ArcGIS Pro.

Research Results

In calculating the photovoltaic potential for the installation of solar power plants (SPPs), not only the indicators of incoming solar radiation are taken into account, but also the area available for plant construction and the power coefficient of SPPs, which depends on the type and configuration of photovoltaic modules (PVs), the distance between panel rows, and other design factors.

The average annual total solar radiation incident on 1 m² of surface across Ukraine ranges from approximately 1070 kWh/m² in the northern regions to 1400 kWh/m² and higher in the southern parts of the country [6].

To determine the theoretically attainable solar energy potential of the regions, it is necessary to assess the extent of areas that are potentially available for the installation of photovoltaic equipment. The list of land categories suitable for the construction of solar power plants is subject to restrictions based on land use designation, which excludes the following categories:

- areas of agricultural land,
- areas of forest land,
- areas of water resources,
- areas of built-up land,
- areas of protected natural zones.

Analysis of Recent Studies

Studies [7, 8] examine the selection of suitable locations for solar power plants (SPPs) using land-use criteria by identifying areas where the installation of generation equipment is prohibited and, where necessary, adding buffer zones around such areas. Unlike wind energy, buffer zones for solar energy are applied to a limited extent due to its lower environmental impact.

Additional restrictions may be established for protected natural areas, particularly for bird migration corridors, in order to reduce the risk of collisions with photovoltaic panels and to preserve rare species, as noted in study [9], where buffer zones of 500–2,500 m were defined for environmental protection sites. For airports, study [10] recommended a setback distance of 3,500 m, justified by potential glare from panels and associated risks for pilots during takeoff and landing.

Thus, in most cases, international practice limits buffer zones for SPPs to a range of 0–500 m, while specific exceptional circumstances may require setback distances on the order of 1–10 km.

A common issue that arises during the formation of spatial suitability masks is the appearance of residual narrow polygonal transitions between areas with widths below the threshold value. These zones do not meet the minimum operational width requirements for the placement of photovoltaic module (PV) rows and service passages. This problem can be addressed through the application of erosion and dilation operations with the creation of buffer zones, as demonstrated in study [11].

In that study, based on Landsat satellite imagery, pixel filtering was applied using connectivity to nine neighboring pixels, followed by morphological expansion of clusters across the entire raster image using a circular kernel with a radius of one pixel (equivalent to 30 meters). This approach effectively eliminated narrow transitions between adjacent areas. Additionally, the authors of [11] applied a filtering step to the vector layer to remove polygons with an area smaller than 4 hectares, establishing a threshold value for the minimum plot area.

Similarly, in studies [12], vector-based buffer construction was employed to eliminate narrow connections and isolated geometry fragments within the layer, analogous to morphological erosion and dilation operations. According to data from the U.S. National Renewable Energy Laboratory (NREL), for the practical deployment of solar power plants (SPPs) with a capacity of 1 MW or more, a threshold land area of 2 hectares is recommended [13].

Procedure for Determining Available Areas for the Installation of Solar Power Plants (SPP)

To assess the theoretically attainable solar energy potential across the territory of Ukraine, the first step is to determine the geographical potential of the sector — that is, to identify the areas available for the placement of power generation facilities.

A set of restrictive zones was identified, comprising land categories that include agricultural areas, forested lands, water bodies, built-up areas, and lands with environmental protection status. For each zone, input data were obtained in the form of raster images or directly as vector shapefiles, both suitable for analysis without prior format conversion. The processing workflow for input data from various sources is specific to each object within the input dataset.

The vector layers of built-up areas and water bodies were obtained from the open-access resource ArcGIS Online [14–15]. The layer of protected areas of Ukraine was acquired

from the open database Protected Planet [16]. The vector layer of water bodies was created by merging two input vector layers into a single shapefile: layer [14], which contains large water bodies of Ukraine, and layer [17], which represents water bodies in the form of linear features. For layer [14], representing major water bodies such as the Desna and Dnipro rivers, a 500-meter buffer zone was created, considering the characteristic seasonal flooding of these rivers. For layer [17], containing smaller hydrological features—minor rivers, irrigation canals, lakes, and streams—a buffer zone with a uniform offset of 50 meters from the linear features of the layer was generated (Fig. 1):

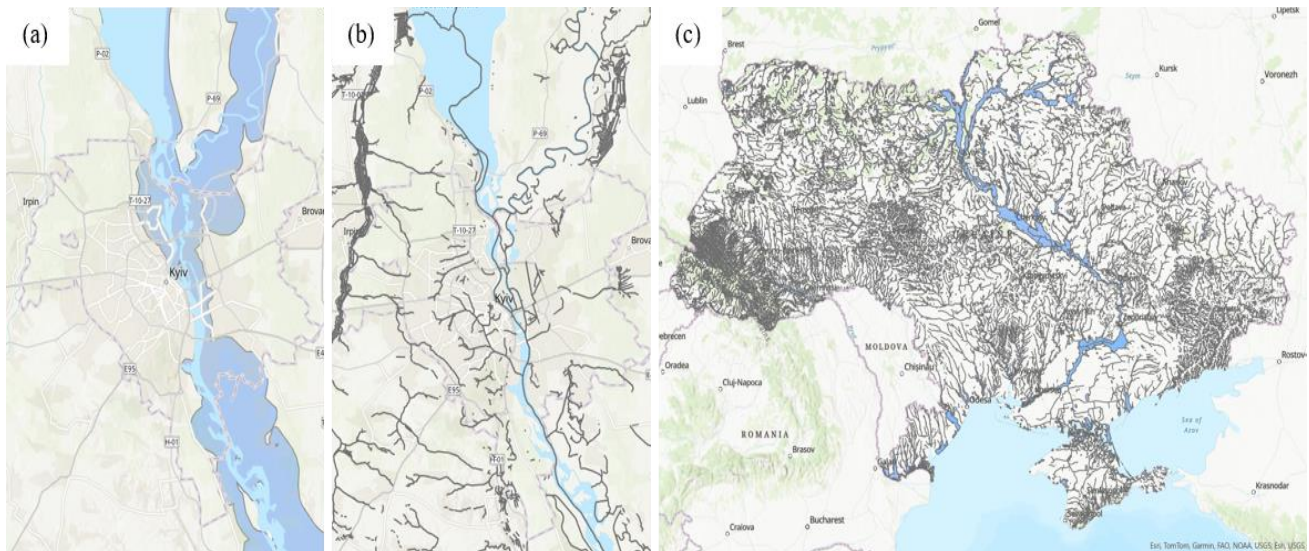


Fig. 1. Large water bodies (a); small water bodies (b); combined layer of water bodies with buffer zones (c)

The input data for agricultural lands and forest plantations consist of raster layers in GeoTIFF format, where each pixel of the image corresponds to a value within the range [0, 100]. If the target object fully occupies the pixel area, it is displayed in white and assigned a value of 100; conversely, if the object is completely absent within the pixel, it is displayed in black and assigned a value of 0. All intermediate pixel values within the range $0 < n < 100$ represent partial coverage of the target object, with varying degrees of intensity.

For agricultural lands, a raster image was obtained from the CORINE Land Monitoring Service [18]. The raster was denoised using the Majority Filter tool in ArcGIS Pro [19]. In this process, when the majority value among the eight neighboring pixels differs from that of the central pixel, the pixel value is replaced with the majority value. The next step involved extracting agricultural lands from the continuous raster using a threshold value of 61, whereby all pixels with values below the threshold were excluded. The resulting raster image, containing only the extracted agricultural lands, was then converted into a vector layer for subsequent analysis.

The input data for forest plantations were obtained from the Global Forest Watch portal [20] in the form of raster

images containing satellite-derived information on tree cover density across the territory of Ukraine. The raster format of forest plantations is analogous to that of agricultural land and follows a similar principle for extracting the target object. During processing, the raster was classified into ten groups according to the density of pixel coverage by forest vegetation. The intermediate classified raster was then binarized using a threshold value of 50, thereby excluding pixels that did not belong to forested areas. The resulting intermediate raster layer of forest plantations, similar to that of agricultural lands, was converted into a vector shapefile. However, the raster images obtained—and, consequently, the vector layers of agricultural lands and forest plantations—inevitably contained residual areas corresponding to edge zones in the original rasters, i.e., transitions between white and black pixels. This led to the formation of numerous narrow corridors along field or forest boundaries, as well as the delineation of sparse tree clusters that could generate irregular polygon geometries during vector conversion. Such artifacts may result in geometry errors such as zero-area polygons, holes within continuous features, or isolated fragments. The results of the vectorization of agricultural and forest land layers are illustrated in Fig. 2:

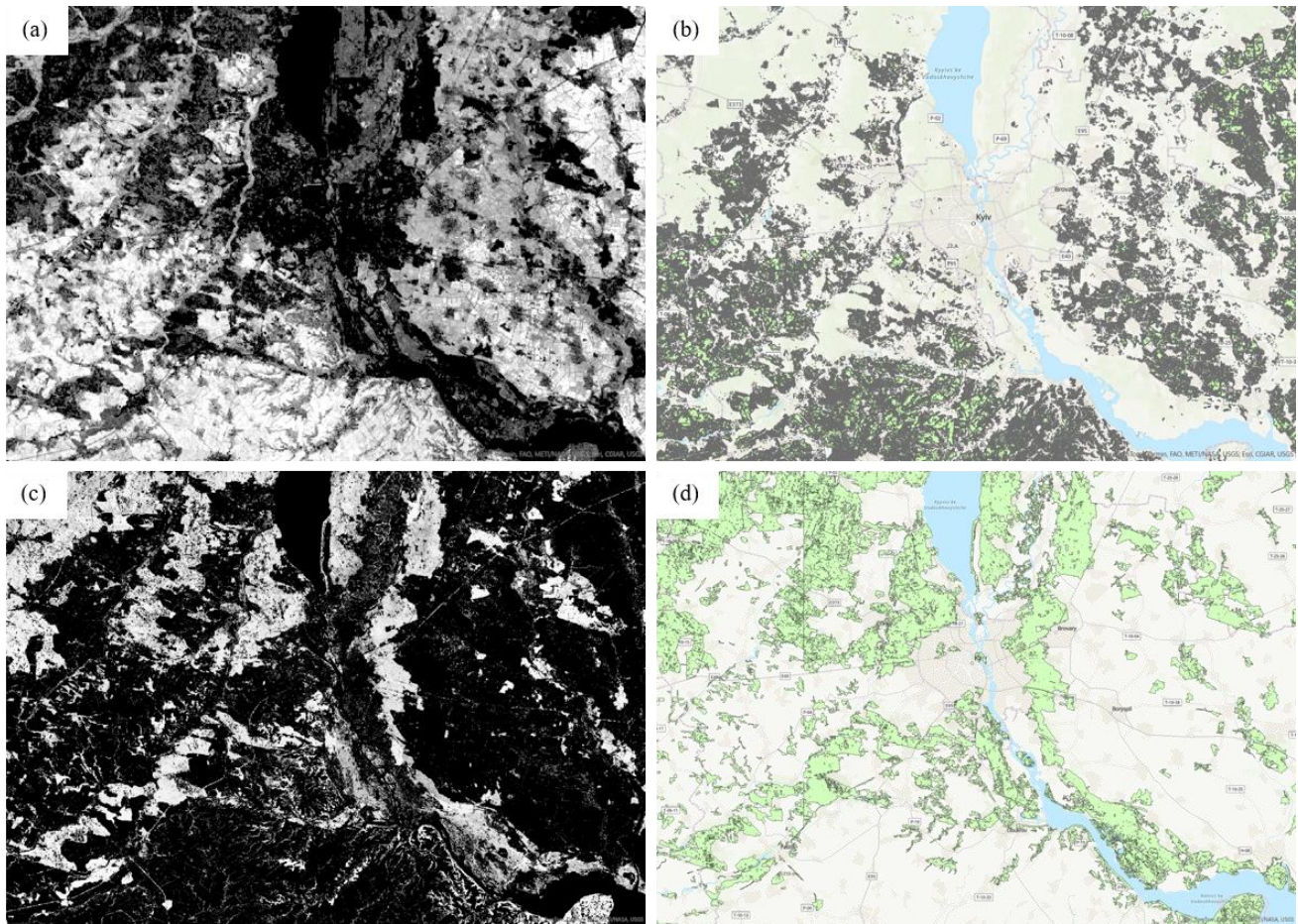


Fig. 2. Agricultural land layers: (a) – raster layer before processing, (b) – vector layer after processing; forest plantation layers: (c) – raster layer before processing, (d) – vector layer after processing

From the analysis of the raster images, the following conclusions can be drawn regarding the spatial distribution of the restrictive zones: forest areas are primarily concentrated in the northern regions of Ukraine, as well as in the Carpathian Mountains, the Crimean Mountains, and along river valleys, whereas agricultural lands, though present throughout the entire territory of Ukraine, show increased concentration in the eastern, southern, and central regions. When combined, both layers form a relatively uniform distribution of restricted areas for the placement

of solar power plants (SPP) across the overall study area. Thus, all input layers were converted into vector shapefile format. The resulting dataset of layers was then processed using the Union and Dissolve operations in ArcGIS Pro [19] to produce a single vector layer of restrictive areas (Fig. 3). The layer of available areas for solar power plant (SPP) deployment was obtained by performing the Symmetrical Difference operation in ArcGIS Pro [19] between the territory of Ukraine's administrative boundaries and the restrictive areas layer (Fig. 4):



Fig. 3. Restrictive areas for the placement of solar power plants in Ukraine



Fig. 4. Available plots for solar power plants in Ukraine

Since the resulting vector layer of available areas contained a large number of narrow transitions between polygons and geometric errors, primarily expressed as isolated residual micro-areas, such objects were deemed unsuitable for the placement of solar power plants (SPPs). Therefore, a vector layer cleaning process was carried out. Initially, the layer was refined to remove narrow connections and micro-areas by performing sequential erosion and dilation operations. Specifically, a buffer zone of 40 meters with a negative offset was first calculated from the external boundaries of the vector layer, effectively eliminating unwanted fragments. Then, from the newly created intermediate layer, another buffer zone of 40 meters with a positive offset was generated to restore the layer boundaries. The chosen buffer width of 40 meters was estimated based on the minimum feasible depth of a single SPP row, allowing for the installation of auxiliary equipment in addition to the photovoltaic panels themselves.

The resulting layer was also spatially segmented according to the administrative divisions of Ukraine at various hierarchical levels. Specifically, a grid overlay was successively applied along the boundaries of administrative regions (oblasts), districts (raions), and territorial communities to enable localized territorial analysis at multiple administrative scales. As a result, the candidate areas were aggregated into integrated datasets within the boundaries of each territorial community, district, and administrative region of Ukraine (Fig. 5).

Thus, based on the spatial distribution presented in Figure 5, a summary of the available land area (in km²) suitable for solar energy development was obtained for each administrative region of Ukraine. The results illustrate the geographical potential of solar energy both before and after the post-processing of the vector layer representing available territory.

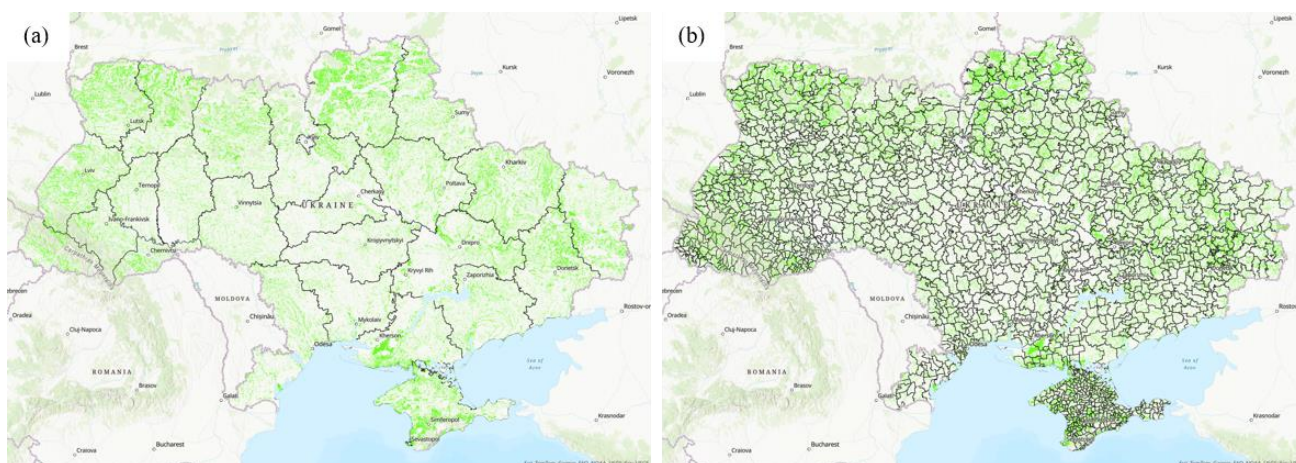


Fig. 5. Map of theoretically available sites for the location of solar power plants according to the distribution by: (a) administrative regions of Ukraine, (b) territorial communities

To create a test data sample for individual communities, five territorial communities were selected from each of five regions of Ukraine — Chernihiv, Kharkiv, Mykolaiv, Lviv, and Cherkasy — as presented in Table 1:

Table 1. List of test territorial communities to determine the theoretical potential of photovoltaics

No	Territorial Community	Region
1	Bereznianska	Chernihiv
2	Horodnianska	Chernihiv
3	Ponornytska	Chernihiv
4	Sukhopolovianska	Chernihiv
5	Yablunivska	Chernihiv
6	Bezliudivska	Kharkiv
7	Dvorichanska	Kharkiv
8	Natalynska	Kharkiv
9	Novovodolazka	Kharkiv
10	Shevchenkivska	Kharkiv
11	Bashtanska	Mykolaiv

No	Territorial Community	Region
12	Berezhnevuvatska	Mykolaiv
13	Halytsynivska	Mykolaiv
14	Mostivska	Mykolaiv
15	Vradiivska	Mykolaiv
16	Borynska	Lviv
17	Drohobytska	Lviv
18	Morshynska	Lviv
19	Sokalska	Lviv
20	Stryiska	Lviv
21	Babanska	Cherkasy
22	Chornobaivska	Cherkasy
23	Katerynopilska	Cherkasy
24	Shramkivska	Cherkasy
25	Zhashkivska	Cherkasy

The spatial distribution of the selected communities across the territory of Ukraine is presented below (Fig. 6), along with their locations on the regional maps (Figs. 7–11).

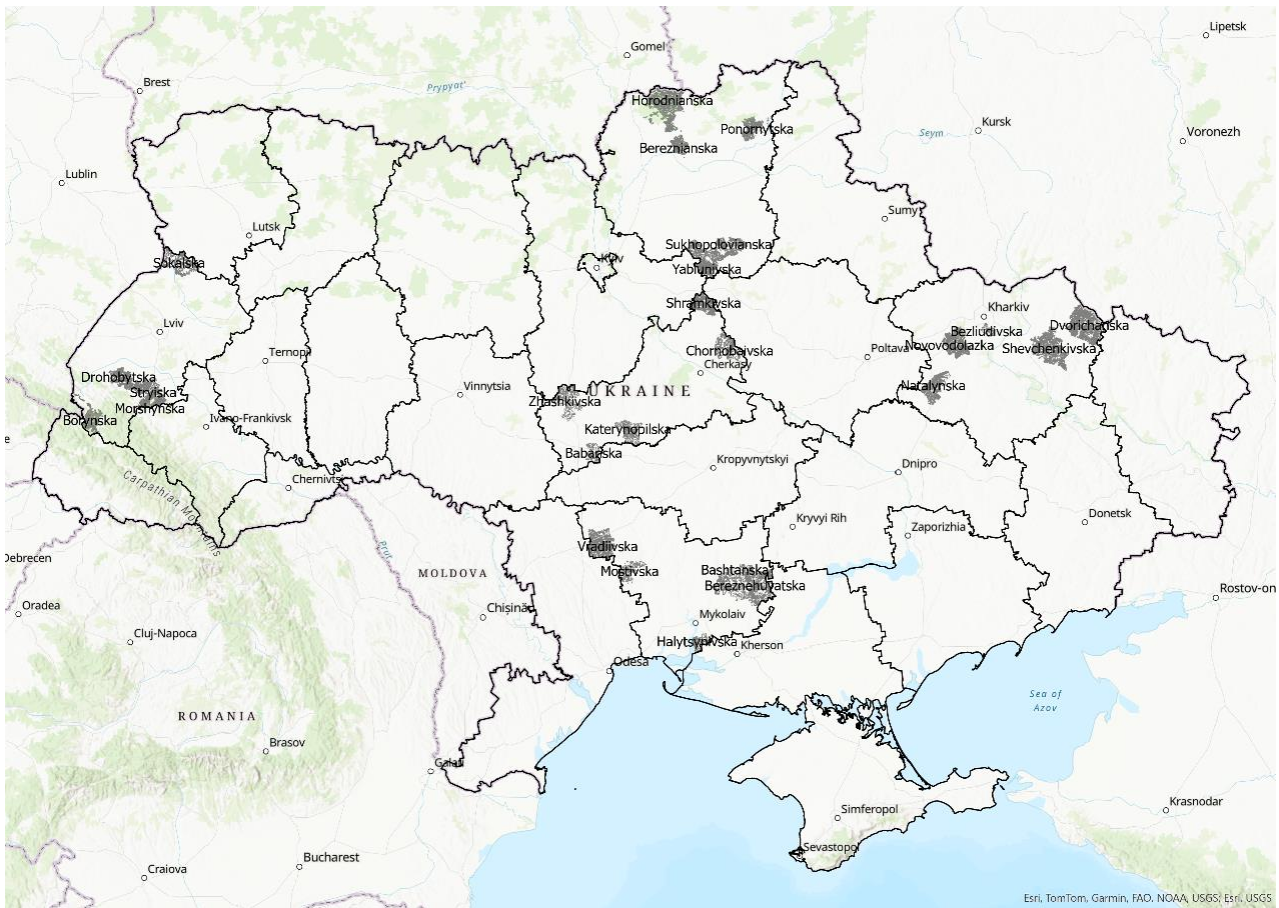


Fig. 6. Location of territorial communities on the territory of Ukraine

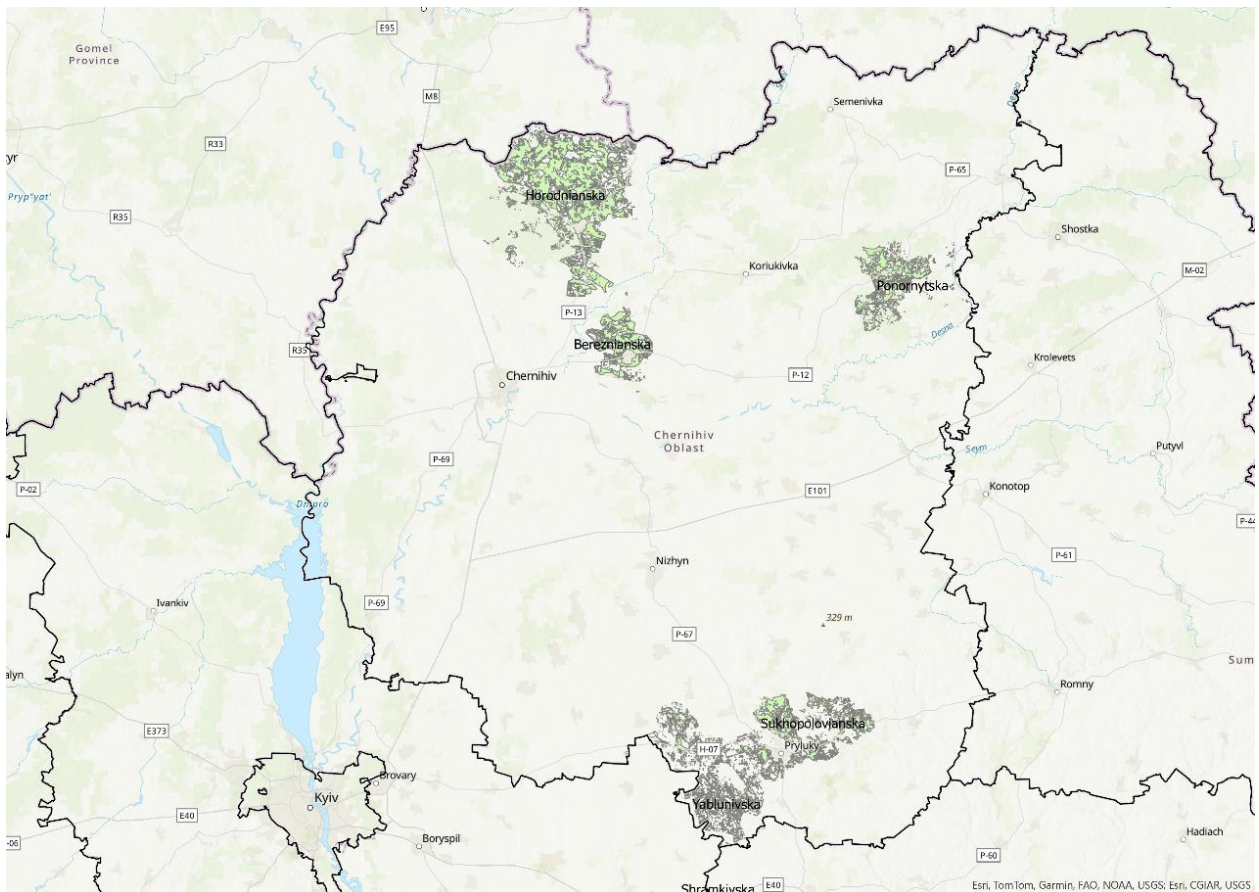


Fig. 7. Territorial communities of Chernihiv region

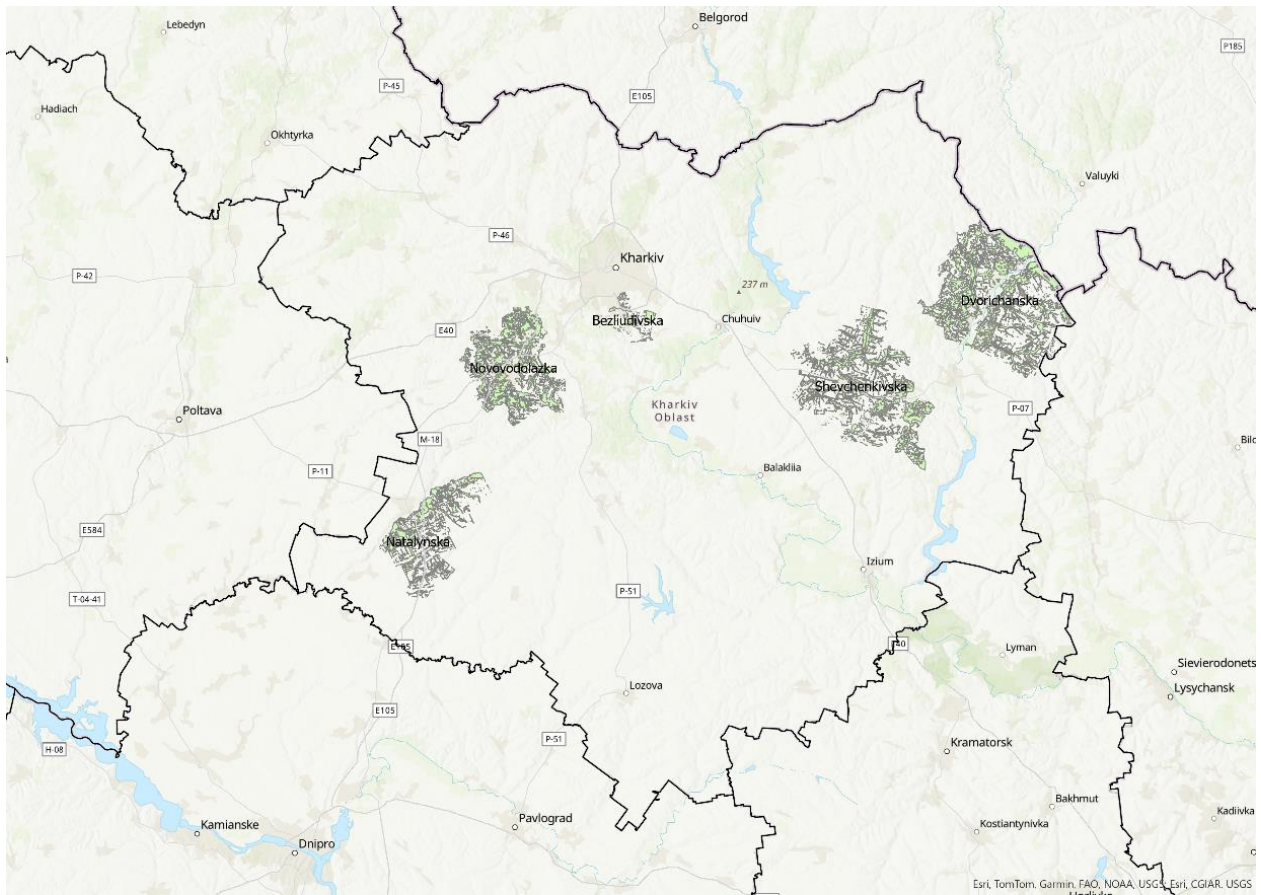


Fig. 8. Territorial communities of Kharkiv region

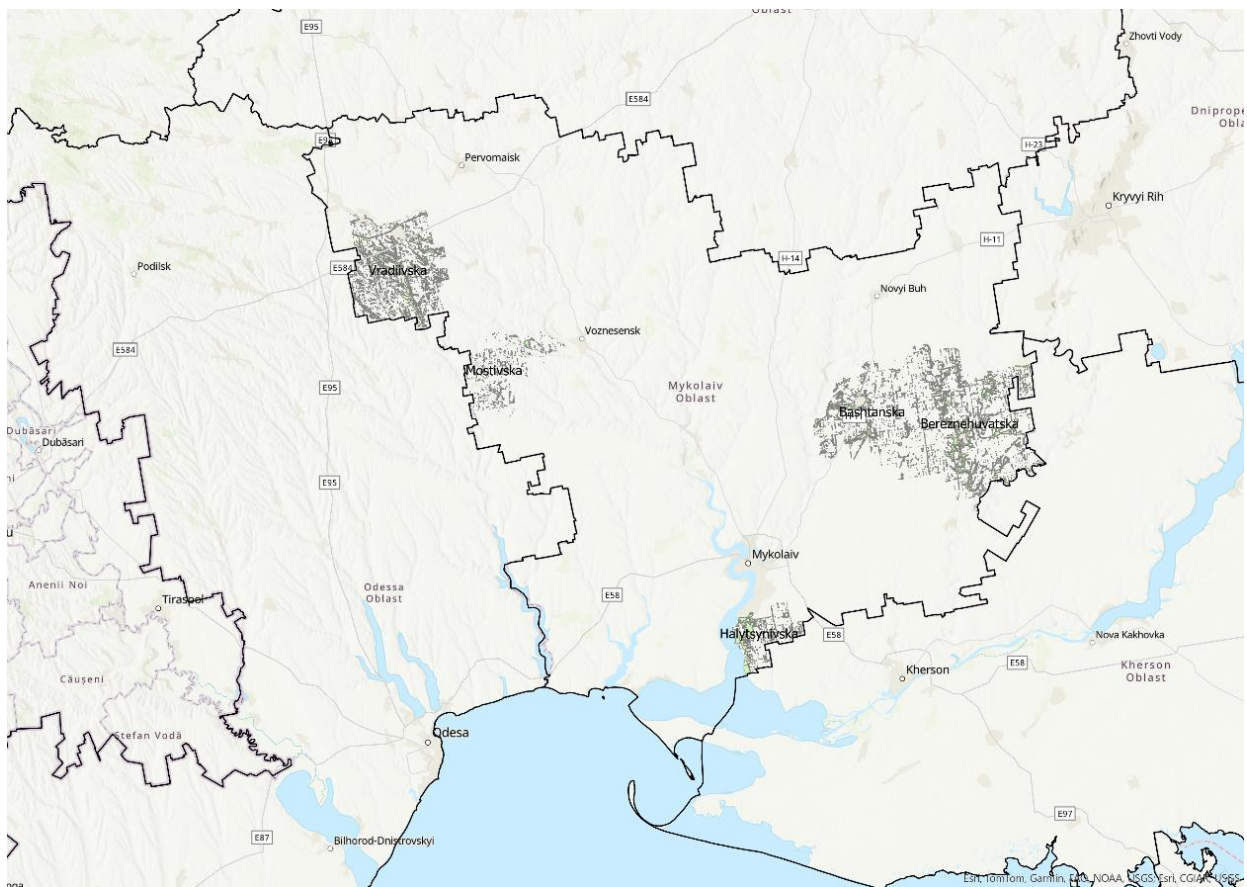


Fig. 9. Territorial communities of Mykolaiv region

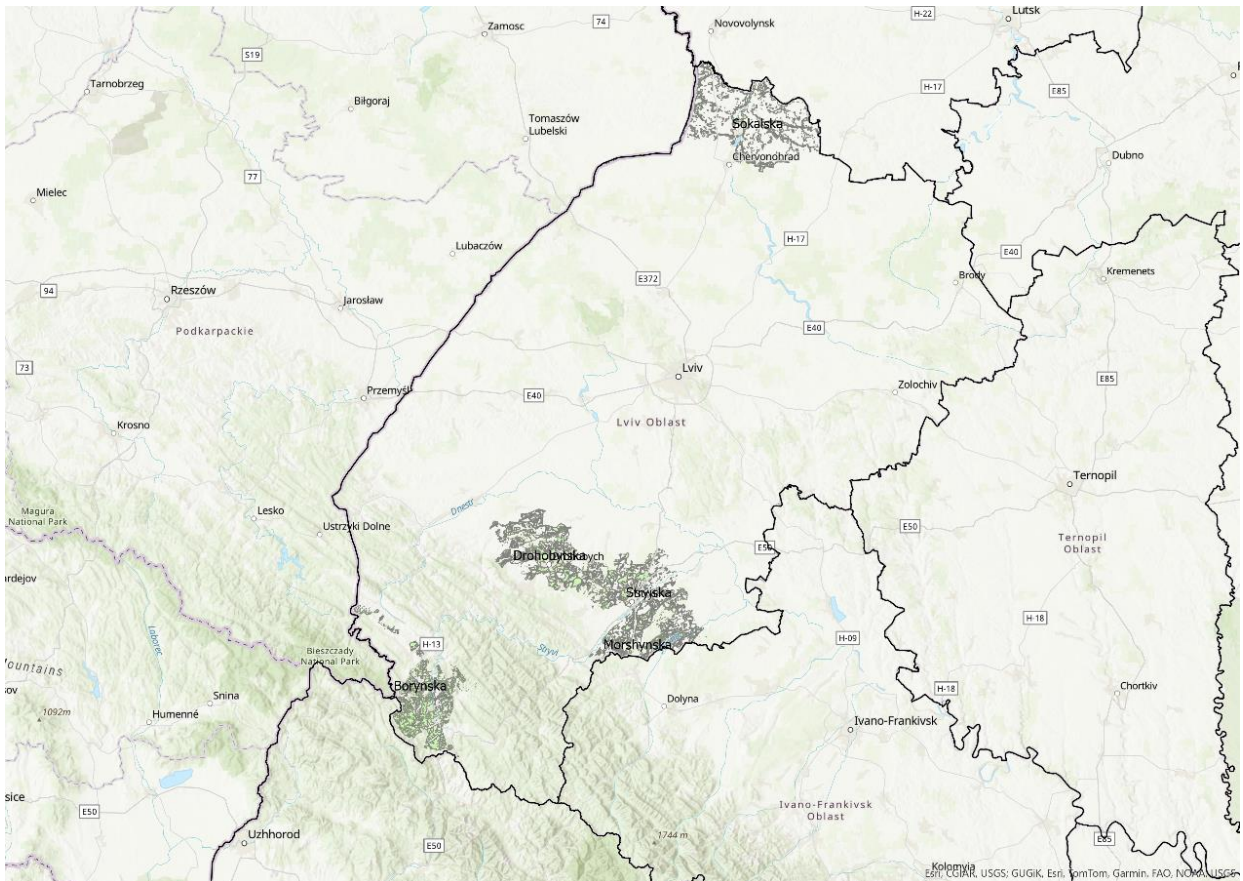


Fig. 10. Territorial communities of Lviv region

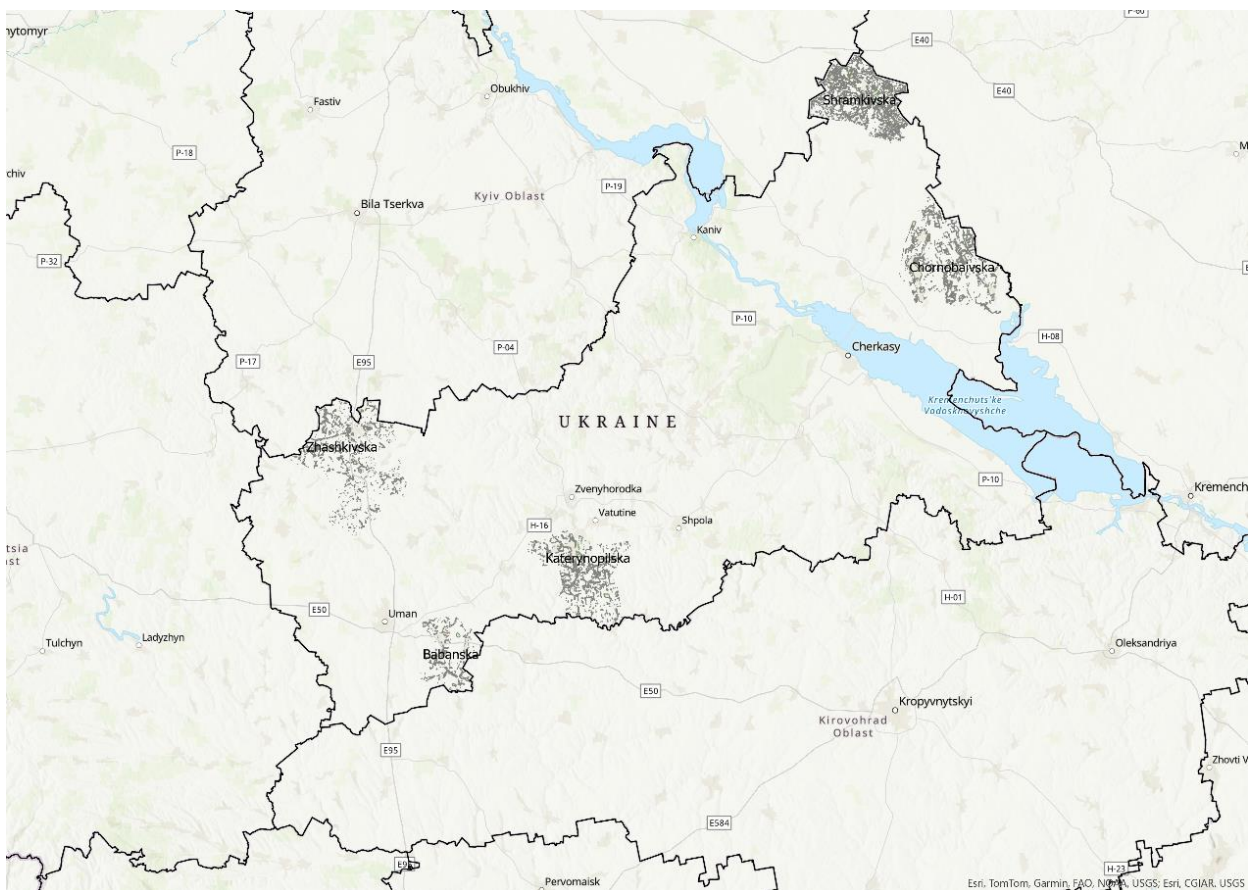


Fig. 11. Territorial communities of Cherkasy region

As a result, the values of areas available for the installation of solar power plants (SPPs) were obtained for the selected territorial communities (Table 2).

Table 2. The value of areas available for the installation of solar power plants for selected territorial communities

No	Territorial Community	Territorial community area	Available area for SPP installation (km ²)	Available area for SPP installation (%)
1	Bereznianska	352.5548432	123.7597414	35%
2	Horodnianska	1,187.566831	519.0755766	44%
3	Ponornytska	523.8603459	116.6252264	22%
4	Sukhopolovianska	894.9849508	219.2058624	24%
5	Yablunivska	283.0733307	52.48113866	19%
6	Bezliudivska	137.7176145	20.12493586	15%
7	Dvorichanska	1,111.570804	380.8299315	34%
8	Natalynska	502.4601864	141.6553759	28%
9	Novovodolazka	579.8273677	252.7712058	44%
10	Shevchenkivska	977.4874451	273.5951647	28%
11	Bashtanska	760.599375	77.12212057	10%
12	Berezhniovatska	1,263.065334	170.4755188	13%
13	Halytsynivska	285.3310131	53.06562873	19%
14	Mostivska	428.7262527	20.80351684	5%
15	Vradiivska	800.4100037	140.4392765	18%
16	Borynska	639.4001415	153.9915605	24%
17	Drohobytska	421.5730617	153.3754488	36%
18	Morshynska	121.5266996	38.40075856	32%
19	Sokalska	676.5581559	104.8893553	16%
20	Stryiska	551.9076237	140.894566	26%
21	Babanska	275.4496744	20.50430102	7%
22	Chornobaivska	639.5702946	57.71067337	9%
23	Katerynopilska	442.2097084	47.67012113	11%
24	Shramkivska	421.0335885	89.34158354	21%
25	Zhashkivska	726.3979819	42.09279464	6%

The values of available territory presented in the table, however, do not represent the total theoretically accessible area for the deployment of solar power plants (SPPs). This is because the analysis of geographical potential does not account for factors such as technical accessibility to the existing power distribution network, economic feasibility of site development, or suitability in terms of the spatial distribution of annual solar radiation. Collectively, these factors significantly constrain the territory that is practically suitable for SPP installation.

Procedure for Determining the Achievable Photovoltaic Potential of Territorial Communities:

To calculate the area of photovoltaic modules (PVs) that can be installed on a given land surface, it is necessary to determine the coefficient of the ratio between the shaded horizontal surface area and the area of installed PV modules (Table 3). Accordingly, the area of the installed PV modules is calculated as:

$$S_{PVM} = k * S_{AV},$$

where S_{PVM} - the area of the installed photovoltaic modules, k - the coefficient representing the ratio of the shaded horizontal surface area to the area of the installed PV modules,

S_{AV} - the land surface area available for the installation of PV modules.

Table 3. Ratio of the area of the horizontal surface shading to the area of the installed PV modules

No	Region	Coefficient of the Ratio of Horizontal Surface Area to the Area of Installed Photovoltaic Modules (PVs)
1	Vinnytsia	0.386931
2	Volyn	0.371025
3	Dnipropetrovsk	0.402424
4	Donetsk	0.402424
5	Zhytomyr	0.371025
6	Zakarpattia	0.402424
7	Zaporizhzhia	0.417529
8	Ivano-Frankivsk	0.402424
9	Kyiv	0.371025
10	Kirovohrad	0.402424
11	Luhansk	0.402424

No	Region	Coefficient of the Ratio of Horizontal Surface Area to the Area of Installed Photovoltaic Modules (PVs)
12	Lviv	0.386931
13	Mykolaiv	0.43227
14	Odesa	0.43227
15	Poltava	0.386931
16	Rivne	0.402424
17	Sumy	0.371025
18	Ternopil	0.386931
19	Kharkiv	0.371025
20	Kherson	0.43227
21	Khmelnyskyi	0.386931
22	Cherkasy	0.386931
23	Chernivtsi	0.402424
24	Chernihiv	0.354679
25	AR of Crimea	0.460742

Estimation of the theoretically achievable power output is based on the assumption that the generation area required for producing 1 kW of electricity using modern photovoltaic modules (PVs) is approximately 5 m² (Table 4).

Table 4. Theoretically achievable power of installed PV systems

No	Territorial Community	Theoretically Achievable Power Capacity of Installed Photovoltaic Modules (MW)
1	Bereznianska	8,753.066053
2	Horodnianska	37,066.04186
3	Ponornytska	8,175.299699
4	Sukhopolovianska	15,236.75382
5	Yablunivska	3,815.206349
6	Bezliudivska	1,532.900416
7	Dvorichanska	28,044.59934
8	Natalynska	10,439.81681
9	Novovodolazka	18,931.48048
10	Shevchenkivska	20,309.64867
11	Bashtanska	6,575.683599
12	Berezhnuevatska	14,195.61172
13	Halytsynivska	4,686.919812
14	Mostivska	1,853.254342
15	Vradiivska	12,455.75212
16	Borynska	11,875.3854
17	Drohobyska	11,744.62342
18	Morshynska	3,009.438171
19	Sokalska	8,377.006641
20	Stryiska	11,104.61445
21	Babanska	1,492.121014

No	Territorial Community	Theoretically Achievable Power Capacity of Installed Photovoltaic Modules (MW)
22	Chornobaivska	4,454.454601
23	Katerynopilska	3,764.304106
24	Shramkivska	6,842.263287
25	Zhashkivska	3,372.792493

To estimate the theoretically achievable annual photovoltaic generation, it is necessary to use the indicators of the average annual electricity generation per 1 kW of installed PV capacity for the regions of Ukraine to which the respective communities belong.

The results are presented in Table 5.

Table 5. Indicators of average annual generation from 1 kW of PV for regions of Ukraine

No	Territorial Community	Theoretically Achievable Annual Generation (MWh)
1	Bereznianska	9,985,497.753
2	Horodnianska	42,284,940.56
3	Ponornytska	9,326,381.896
4	Sukhopolovianska	17,382,088.76
5	Yablunivska	4,352,387.403
6	Bezliudivska	1,839,633.789
7	Dvorichanska	33,656,323.67
8	Natalynska	12,528,824.15
9	Novovodolazka	22,719,669.73
10	Shevchenkivska	24,373,609.37
11	Bashtanska	9,422,297.029
12	Berezhnuevatska	20,340,892.03
13	Halytsynivska	6,715,887.399
14	Mostivska	2,655,528.147
15	Vradiivska	17,847,847.22
16	Borynska	13,634,129.98
17	Drohobyska	13,484,002.14
18	Morshynska	3,455,135.964
19	Sokalska	9,617,641.325
20	Stryiska	12,749,207.85
21	Babanska	1,834,562.786
22	Chornobaivska	5,476,751.932
23	Katerynopilska	4,628,211.898
24	Shramkivska	8,412,562.711
25	Zhashkivska	4,146,848.37

Результуючі показники теоретично досяжного потенціалу фотоенергетики для вибраних територіальних громад України наведено в табл. 6.

Table 6. Theoretically achievable potential of photovoltaics for selected territorial communities of Ukraine

No	Territorial Community	Theoretically Achievable Area for the Installation of Photovoltaic Modules (km ²)	Theoretically Achievable Area of Installed Photovoltaic Modules (km ² PV)	Theoretically Achievable Power Capacity of Installed Photovoltaic Modules (MW)	Theoretically Achievable Annual Generation (MWh)
1	Bereznianska	123.7597414	43.76533	8,753.066053	9,985,497.753
2	Horodnianska	519.0755766	185.3302	37,066.04186	42,284,940.56
3	Ponornytska	116.6252264	40.8765	8,175.299699	9,326,381.896
4	Sukhopolovianska	219.2058624	76.18377	15,236.75382	17,382,088.76
5	Yablunivska	52.48113866	19.07603	3,815.206349	4,352,387.403
6	Bezliudivska	20.12493586	7.664502	1,532.900416	1,839,633.789
7	Dvorichanska	380.8299315	140.223	28,044.59934	33,656,323.67
8	Natalynska	141.6553759	52.19908	10,439.81681	12,528,824.15
9	Novovodolazka	252.7712058	94.6574	18,931.48048	22,719,669.73
10	Shevchenkivska	273.5951647	101.5482	20,309.64867	24,373,609.37
11	Bashtanska	77.12212057	32.87842	6,575.683599	9,422,297.029
12	Berezhniovatska	170.4755188	70.97806	14,195.61172	20,340,892.03
13	Halytsynivska	53.06562873	23.4346	4,686.919812	6,715,887.399
14	Mostivska	20.80351684	9.266272	1,853.254342	2,655,528.147
15	Vradiivska	140.4392765	62.27876	12,455.75212	17,847,847.22
16	Borynska	153.9915605	59.37693	11,875.3854	13,634,129.98
17	Drohobytska	153.3754488	58.72312	11,744.62342	13,484,002.14
18	Morshynska	38.40075856	15.04719	3,009.438171	3,455,135.964
19	Sokalska	104.8893553	41.88503	8,377.006641	9,617,641.325
20	Stryiska	140.894566	55.52307	11,104.61445	12,749,207.85
21	Babanska	20.50430102	7.460605	1,492.121014	1,834,562.786
22	Chornobaivska	57.71067337	22.27227	4,454.454601	5,476,751.932
23	Katerynopilska	47.67012113	18.82152	3,764.304106	4,628,211.898
24	Shramkivska	89.34158354	34.21132	6,842.263287	8,412,562.711
25	Zhashkivska	42.09279464	16.86396	3,372.792493	4,146,848.37

Conclusions

In the course of this study, current practices for determining the geographical potential of solar energy were analyzed, and the main restrictive zones for solar power plants (SPP), as well as the criteria and conditions for applying buffer zones to such areas, were identified. A set of open data sources was determined for the formation of the input dataset of restrictive areas. The input dataset of restrictive areas included such land categories as agricultural lands, forest plantations, water bodies, built-up areas, and environmentally protected territories. The heterogeneous input dataset, consisting of raster images and vector layers, was converted into a unified format of vector layers. The input raster layers for agricultural lands and forest plantations were categorized using threshold values of 61 and 50, respectively, within the range [0,100]. This process excluded areas not belonging to the designated land categories, after which vector layers were generated from the residual regions following filtering. The resulting collection of vector layers representing restrictive areas was then

merged into a single vector layer, and a symmetric difference operation was performed with the administrative boundaries of Ukraine, resulting in a final vector layer of areas available for solar power plant deployment.

The vector layer of available areas was filtered using a minimum area threshold of 0.15 hectares and refined to remove narrow corridors up to 40 meters wide. Subsequently, the processed territory was classified according to the administrative division of Ukraine, encompassing administrative regions (oblasts), districts (raions), and territorial communities. Across the territory of Ukraine, the filtering process revealed a 2% difference in the assessment of geographical potential between the filtered and unfiltered datasets of available areas. The application of geoinformation technologies made it possible to determine the areas suitable for the installation of solar power plants (SPP) for the selected territorial communities.

As a result of the study, the theoretically achievable photovoltaic potential for the deployment of solar power plants

(SPP) was determined for the designated areas of 25 selected territorial communities, grouped by five communities from each of five regions of Ukraine, representing different geographical conditions.

REFERENCES

- Bondarenko, D., Matiakh, S., Surzhyk T., & Sheiko, I. (2025). Actual pathways for solar energy development based on the materials of the scientific and practical conference "Renewable energy and energy efficiency in the 21st century" 2025. *Vidnovluvana Energetika*, (3(82), 82-88. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3\(82\).82-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3(82).82-88)
- Bondarenko, D., Matiakh, S., Surzhyk T., Sheiko, I., & Kravchenko M. (2024). Development trends of solar power engineering based on the materials of the scientific and practical conference "Renewable energy and energy efficiency in the 21". *Vidnovluvana Energetika*, (3(78), 76-83. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).76-83](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).76-83)
- Bondarenko, D., Matiakh, S., Surzhyk, T., Sheiko, I. (2024). Photovoltaic Thermal Solar Collector for Autonomous and Energy Cluster Modes. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 552. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6_16
- On amendments to some laws of Ukraine regarding restoration and "green" transformation of the energy system of Ukraine. Law of Ukraine No. 3220-IX. VVR 2023. No. 82. p. 301. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-IX#Text>
- Energy Independence through Decentralization: The IEA's New Roadmap to 2030 <https://100re.org.ua/energetychna-nezalezhnist-cherez-decentralizacziyu-novadorozhnya-karta-iea-do-2030-roku/>
- Kudria, S. Non-traditional and renewable sources of energy. Textbook. Kyiv: National Technical University of Ukraine ("KPI"), 2012. 495 p.
- Sofia Spyridonidou, Dimitra G. Vagiona, A systematic review of site-selection procedures of PV and CSP technologies, *Energy Reports*, Volume 9, 2023, Pages 2947-2979, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.01.132>.
- Ranjgar, B., Niccolai, A., & Leva, S. (2025). Where Can Solar Go? Assessing Land Availability for PV in Italy Under Regulatory Constraints. *Solar*, 5(3), 40. <https://doi.org/10.3390/solar5030040>
- Taoufik et al. (2021), *Gospodarka Surowcami Mineralnymi — environmental buffers (ornitology)* https://epj.min-pan.krakow.pl/pdf-133474-66008?filename=66008.pdf&utm_source=chatgpt.com
- Fotsing Metegam, Isabelle Flora. Site suitability analysis for integrating large-scale hybrid photovoltaic and concentrated solar power plants in Cameroon using Monte Carlo, analytic hierarchy process, and geographic information system methods, *Energy Conversion and Management*: X, Volume 25, 2025, 100871, ISSN 2590-1745, <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2025.100871>.
- Zhang, X., Xu, M., Wang, S., Huang, Y., & Xie, Z. (2022). Mapping photovoltaic power plants in China using Landsat, random forest, and Google Earth Engine. *Earth System Science Data*, 14, 3743–3755. <https://doi.org/10.5194/essd-14-3743-2022>
- Mierzwiak, M., & Całka, B. (2017). Multi-criteria analysis for solar farm location suitability. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, 104, 20–32. <https://doi.org/10.1515/rgg-2017-0012>
- Dowling, Z. (2024, June). Community Planning for Solar: Conducting a solar resource and infrastructure assessment (NREL/SR-7A40-90070). National Renewable Energy Laboratory. <https://www.nrel.gov/docs/fy24osti/90070.pdf>
- Esri. "UKR_water_areas_dcw" [Feature Server]. Available at: https://services2.arcgis.com/ZO-djAzAQ2B0f85zi/arcgis/rest/services/UKR_water_areas_dcw/FeatureServer (Accessed: 21 September 2024)
- Esri. "UKR_COD_AB_2024" [Feature Server]. "ukr_admbnda_adm4_sspe_20240416". Available at: https://services-eu1.arcgis.com/fppo-CYaq7HfVfBlV/arcgis/rest/services/UKR_COD_AB_2024/FeatureServer (Accessed: 26 September 2024)
- Protected Planet. Available at: <https://www.protectedplanet.net/> (Accessed: 15 September 2024)
- Esri. "Ukrainian Waterways" [Feature Server]. "gis_osm_waterways_free_1". April 11, 2023. Available at: https://services5.arcgis.com/SaBe5HMTmbnqSWlu/arcgis/rest/services/Ukrainian_Waterways/FeatureServer (Accessed: 22 September 2024)
- CORINE Land Cover 2018 (raster 100 m), Europe, 6-yearly - version 2020_20u1, May 2020, <https://doi.org/10.2909/960998c1-1870-4e82-8051-6485205ebbac>
- Esri Inc. (2024). *ArcGIS Pro (Version 3.4.0) [Computer software]*. Redlands, CA: Esri Inc.
- GlobalForestWatch. Available at: <https://www.global-forestwatch.org/> (Accessed: 28 October 2024)