

<https://doi.org/10.26565/2075-1893-2026-43-03>
УДК: 911.3:620.92:528.8(477.41)

Олександр Гарбар*

д. біол. наук, професор, завідувач кафедри екології та географії;

e-mail: o.v.harbar@gmail.com;

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4357-4525>;

Діана Гарбар*

к. біол. наук, доцент, доцент кафедри зоології, біологічного моніторингу та охорони природи;

e-mail: harbar-d@zu.edu.ua;

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5739-3114>;

*Житомирський державний університет імені Івана Франка, вул. Велика Бердичівська, 40, м. Житомир, 10008, Україна.

Геоінформаційний аналіз вітроенергетичного потенціалу Житомирської області

Метою цієї роботи є проведення комплексної геоінформаційної оцінки вітроенергетичного потенціалу Житомирської області з використанням сучасних ГІС-технологій та даних дистанційного зондування, ідентифікація придатних територій на основі багатокритеріального аналізу обмежень та розробка рекомендацій щодо їх раціонального використання в енергетичній галузі, що забезпечить баланс між енергетичною доцільністю та екологічною безпекою.

Основний матеріал. У роботі обґрунтовано вибір критеріїв оцінки, що включають технічні параметри (швидкість вітру, близькість до електромереж) та екологічні детермінанти (відстань до об'єктів ПЗФ, лісових масивів та шляхів міграції авіафауни). У дослідженні проаналізовано територіальний розподіл вітрових ресурсів Житомирщини в контексті сучасних викликів енергетичної безпеки України. Попри помірні вітрові характеристики регіону, доведено доцільність розвитку вітроенергетики як альтернативи конфліктному освоєнню ландшафтів Карпатського регіону. На основі багатокритеріального аналізу (WLC) ідентифіковано найбільш перспективні зони для розміщення ВЕС. Встановлено, що загальна площа високопридатних територій становить 264,41 га, які локалізовані переважно у південній частині області (Бердичівський та Житомирський райони) та на лесових островах Словечансько-Овруцького кряжу. Особливу увагу приділено верифікації результатів через зіставлення з наявними інвестиційними планами громад (зокрема Барашівської ТГ).

Висновки. У процесі дослідження розроблено серію тематичних карт, що візуалізують придатність територій за ступенем перспективності для будівництва ВЕС. Визначено, що лідерами за площею високопридатних земель є Краснопільська, Ружинська та Вчорайшенська громади. Сформовані результати мають прикладне значення для суб'єктів господарювання при виборі стартових майданчиків, органів місцевого самоврядування — для просторового планування громад, а також для освітнього процесу при вивченні прикладних аспектів картографії та сталого розвитку регіону.

Ключові слова: геоінформаційне моделювання, вітроенергетичний потенціал, Житомирська область, просторові обмеження, відновлювані джерела енергії, картографування, територіальна громада.

Як цитувати: Гарбар О., Гарбар Д. Геоінформаційний аналіз вітроенергетичного потенціалу Житомирської області. *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2026. Вип. 43. С. 26–35. <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2026-43-03>

In cites: Harbar O., Harbar D. (2026). Geoinformation analysis of wind energy potential in Zhytomyr region. *The problems of continuous geographical education and cartography*, (43), 26–35. <https://doi.org/10.26565/2075-1893-2026-43-03> (in Ukrainian)

Вступ. Постановка проблеми. Трансформація енергетичного сектору України в напрямку декарбонізації та розбудови розподіленої генерації набула критичного значення в умовах воєнного стану. Вітроенергетика є ключовим компонентом енергетичної незалежності, проте її розвиток часто супроводжується конфліктами ландшафтно-екологічного характеру. Зокрема, гостро постає проблема забудови вітровими електростанціями (ВЕС) високогірних хребтів Карпат, що спричиняє деградацію унікальних екосистем та викликає спротив науковій спільноті.

У цьому контексті Житомирська область виступає як перспективна альтернативна територія для «лагідного» впровадження вітрової генерації електроенергії. Регіон володіє значними територіальними ресурсами та розвинутою мережею ліній електропередач (ЛЕП), що дозволяє інтегрувати потужності ВЕС без критичного впливу на вразливі ландшафти. Використання геоінформаційних систем (ГІС) для ідентифікації оптимальних локацій є практичним інструментом зниження інвестиційних ризиків та врахування екологічних обмежень (шляхів міграції птахів, меж ПЗФ).

Вихідні передумови. Фундаментальні засади розвитку відновлюваної енергетики в Україні закладені у працях С. Кудрі [1, 4]. Зокрема, автор проводить комплексний аналіз енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), наголошуючи на важливості інтеграції різних видів генерації для забезпечення стабільності енергосистеми. Важливим доробком є «Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України» [1], який став першою спробою картографічної візуалізації ресурсів ВДЕ на національному рівні. Проте, війна внесла значні корективи в енергетичну ландшафтну карту: близько 71% вітроенергетичних потужностей опинилися в зоні окупації або активних бойових дій (Херсонська, Запорізька області), що робить дослідження потенціалу внутрішніх регіонів, таких як Житомирщина, питанням національної безпеки. Питання малої вітроенергетики, як інструменту енергетичної автономії громад, розкрито у праці М. Шихайлова [7], що є особливо актуальним для сільських територій Житомирської області.

Екологічна складова та оцінка впливу на довкілля (ОВД) займають вагомe місце в обґрунтуванні перспектив розвитку вітрової енергетики. Дослідники [6] звертають увагу на ризики для авіафауни та хіроптерофауни. Основними чинниками негативного впливу вважаються прямі зіткнення, руйнування біотопів та бар'єрний ефект, що змінює маршрути міграції. Зокрема, дослідження, проведені в США, підтверджують, що популяції мігруючих кажанів є найбільш вразливими в період з кінця літа до осені. Водночас, екологічний аналіз доводить відсутність негативного впливу на домашню худобу, а акустичне навантаження, за даними аме-

риканських та канадських дослідників, часто переоцінюється через ефект «ноцебо» – психологічне неприйняття об'єкта, що спричиняє суб'єктивні симптоми дискомфорту [3]. За умови дотримання санітарних розривів (понад 500–1000 м) рівень інфразвуку від турбін стає невідмінним від фонових значень природного середовища.

Методологія просторового вибору майданчиків під будівництво ВЕС з використанням ГІС в Україні розроблялась Н. Москальчук та Я. Адаменко [5]. Їхній підхід передбачає триетапний алгоритм: кліматичну оцінку, врахування геопросторових обмежень (орографічних, технічних, екологічних) та фінальне ранжування.

Попри значний масив теоретичних знань, існують суттєві прогалини, котрим присвячується дана стаття. У роботах Ю. Богатова та співавторів [2] Житомирська область розглядається як лідер за потенціалом біомаси (деревини), але її вітрові ресурси часто ігноруються через відносно нижчі швидкості вітру порівняно з морським узбережжям. Проте поява сучасних висотних ВЕУ (висота осі 120–150 м) вимагає перегляду цих оцінок саме для Полісся. На відміну від Карпат, де будівництво ВЕС на хребтах стикається з катастрофічним впливом на ландшафт, Житомирщина має рівнинний характер. Проте північна частина області насичена водно-болотними угіддями міжнародного значення (Рамсарські угіддя, Поліський заповідник, що потребує пошуку компромісних ділянок переважно у центральній та південній частинах області. Найнові дослідження здебільшого базуються на застарілих кліматичних нормах. Не вирішеною залишається задача оцінки впливу сучасних змін циркуляції атмосфери на сезонну стабільність вітрового потоку в регіоні.

Метою роботи є проведення комплексної геоінформаційної оцінки вітроенергетичного потенціалу Житомирської області з використанням сучасних ГІС-технологій та даних дистанційного зондування, ідентифікація придатних територій на основі багатокритеріального аналізу обмежень та розробка рекомендацій щодо їх раціонального використання в енергетичній галузі, що забезпечить баланс між енергетичною доцільністю та екологічною безпекою.

Виклад основного матеріалу. Аналіз вітроенергетичного потенціалу Житомирської області проведено на основі алгоритмів багатокритеріального оверлейного аналізу, який передбачає такі основні етапи: визначення конкретних критеріїв та обмежень для вибору місця розташування; збір даних, пов'язаних із заданими критеріями; проведення просторового аналізу з використанням кількох методів, таких як аналіз поверхні, геометричні операції та операції з відстанню; застосування просторової підтримки рішень за допомогою методу багатокритеріального аналізу рішень (MCDA) з використанням методу аналізу ієрархій (АНП); ви-

значення найперспективніших потенційних місць розташування вітроенергетичних установок за допомогою карт придатності місця розташування.

Збір даних. У цьому дослідженні використано вісім шарів даних з кількох джерел, наведених у таблиці 1.

Більшість цих наборів даних було отримано з відкритого проекту OpenStreetMap. Цифрова модель рельєфу (SRTM) була отримана з геопорталу Earthdata (<https://urs.earthdata.nasa.gov>). Дані про середню швидкість вітру були отримані з порталу Global Wind Atlas (<https://globalwindatlas.info>). Дані про важливі для птахів території (IBA) отримано з порталу Birdlife International (<https://www.birdlife.org>).

Визначення критеріїв. Під час планування дослідження було визначено два типи критеріїв: критерії оцінки для аналізу придатності ділянки та обмеження для виключення невідповідних місць. Критерії оцінки включають середню швидкість вітру (C1), відстань до ліній електропередач (C2), відстань до доріг (C3), відстань до населених пунктів (C4) та ухил (C5), тоді як критерії обмежень, застосовані в цьому дослідженні, є виключенням таких місць: об'єкти природно-заповідного фонду, водойми, ліси та важливі орнітологічні території (IBA) (табл. 1., рис. 1. - 2.).

Середня швидкість вітру. Середня швидкість вітру в певному місці має вирішальне значення для ефективної роботи вітрових турбін. Як результат, вітровий потенціал та швидкість вважаються основним критерієм практично у всіх дослідженнях [8; 12]. Щоб почати виробляти електроенергію, вітрової турбіні потрібна мінімальна швидкість вітру 3 м/с. Вона досягне своєї номінальної потужності при швидкості від 12 до 13 м/с; номінальне значення потужності – це генеруюча здатність турбіни. Вітрові турбіни відключають вироблення електроенергії при швидкостях понад 25 м/с, щоб захистити себе від можливого пошкодження [9].

Відстань до ліній електропередач. Вартість проекту значно зменшується, коли електроенергія постачається споживачам через існуючі лінії

електропередач. Отже, вітрові електростанції слід розташовувати поблизу існуючих ліній електропередач, однак також слід підтримувати мінімальну безпечну відстань 250 м або достатню відстань між вітровими турбінами та повітряними лініями електропередачі, що залежить від напруги ліній електропередачі та дорівнює довжині падіння турбіни [8; 13].

Відстань до дорожньої мережі. Відстань до доріг є важливим економічним фактором, і розташування вітрової електростанції має бути доступним з існуючої дорожньої мережі, щоб уникнути будівництва нової автомагістралі. Крім того, витрати на будівництво та технічне обслуговування будуть значно зменшені, якщо транспортні засоби зможуть легко добиратися до місця розташування. Основні проблеми, які слід враховувати під час роботи з вітровими турбінами, включають падіння льоду та частин турбін. Щоб мінімізувати потенційну кількість аварій та смертельних випадків, спричинених падінням льоду та частинами турбін, необхідно дотримуватися мінімальної безпечної дистанції 500 м [10].

Відстань до населених пунктів. Розташування вітрових електростанцій поблизу житлових районів негативно впливає на навколишнє середовище. Ці наслідки можуть включати шум, мерехтливі тіні, відбиття світла або ландшафтні ефекти [11]. Тому вітрові електростанції слід планувати якомога далі від населених пунктів. Буферна відстань, що розглядається в цьому дослідженні, становить 2000 м.

Ухил. Ухил є основним фактором при виборі відповідного місця розташування вітрової електростанції або турбіни. Чим більший ухил схилу тим більшими будуть затрати на будівництво. Більш круті схили унеможливають використання такого обладнання, як крани та вантажівки, для встановлення вітрових турбін. Багато досліджень вважають схили крутіші за 15% економічно непридатними [8; 14].

Землекористування та охоронні території. Вітрову електростанцію не слід розташовувати на певних типах земель, таких як ліси, природоохоронні

Таблиця 1 / Table 1

Використані дані та їх джерела Input data and their sources

Назва шару даних	Тип критерію	Формат файлу	Роздільна здатність / Масштаб	Джерело даних
Середньорічна швидкість вітру на висоті 50 м (AGL)	Ваговий	Растровий	292 м	Global Wind Atlas
Лінії електропередач	Ваговий	Векторний	1:50 000	OpenStreetMap
Мережа автомобільних доріг	Ваговий	Векторний	1:50 000	OpenStreetMap
Населені пункти	Ваговий	Векторний	1:50 000	OpenStreetMap
Рельєф (Цифрова модель рельєфу, DEM)	Ваговий	Растровий	292 м	Earthdata
Землекористування	Обмежувальний	Векторний	1:50 000	OpenStreetMap
Водні об'єкти	Обмежувальний	Векторний	1:50 000	OpenStreetMap
Території, важливі для охорони птахів (IBAs)	Обмежувальний	Векторний	1:50 000	BirdLife International

ні території, археологічні та історичні пам'ятки та зони рекреації. Тому перераховані типи землекористування, а також території в межах 500-метрового буферу від цих зон не враховуються в аналізі придатності вітрових електростанцій та класифікуються як непридатні території [8].

Водойми та водно-болотні угіддя. Водно-болотні угіддя є непридатними місцями для розміщення вітрових електростанцій, оскільки вони блокуватимуть потік води та будуть дорогими у будівництві. Отже, локації в межах 200-метрового буферу від водойм вважаються неприйнятними для

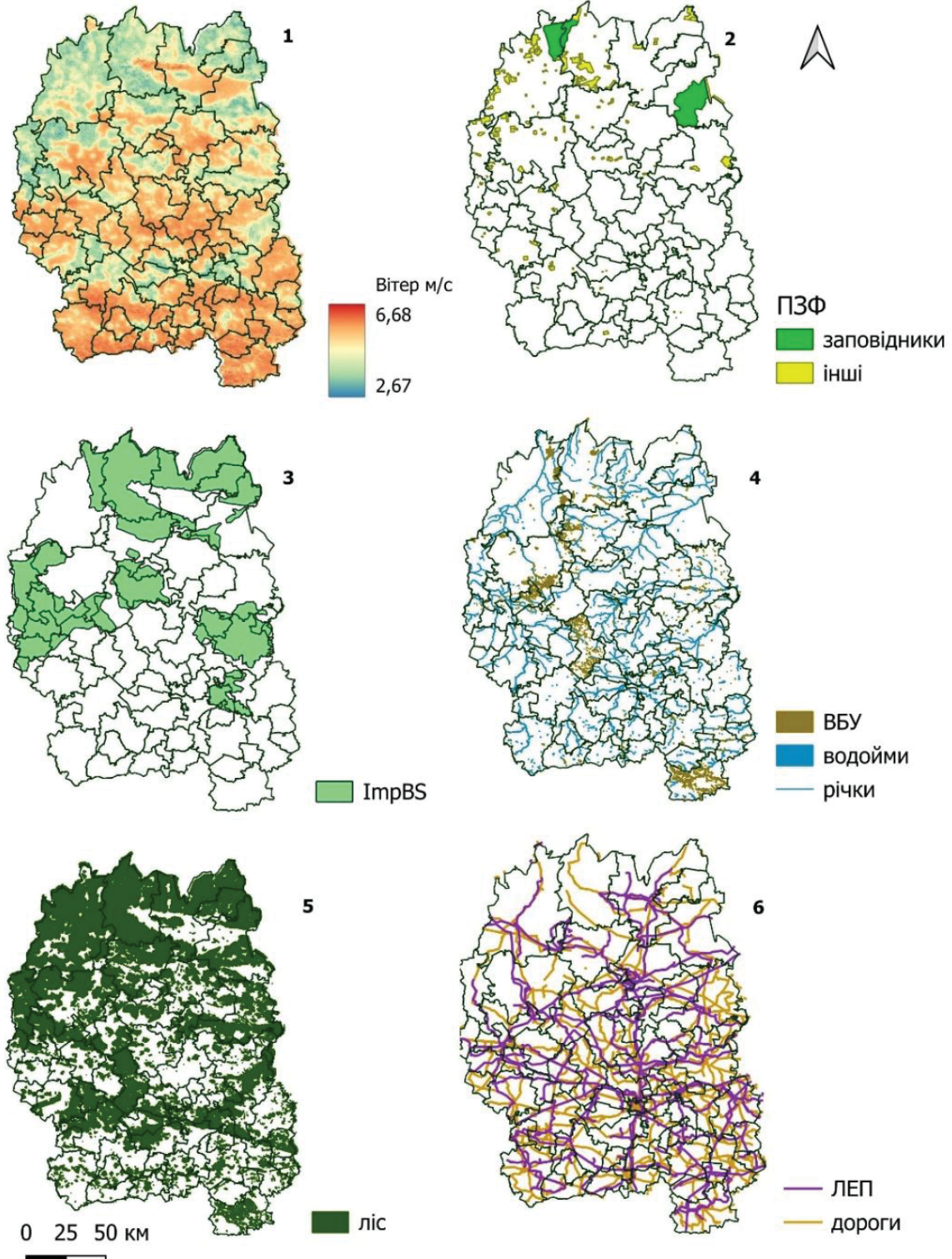


Рис. 1. Критерії, використані для аналізу: 1 – середня швидкість вітру на висоті 50 м; 2- об'єкти ПЗФ; 3 – важливі для птахів території (ImpBS); 4 – водойми та водно-болотні угіддя; 5 – ліси; 6 – лінії електропередач та дороги
Fig. 1. Criteria used for the analysis: 1 – average wind speed at 50m height; 2 – nature conservation areas; 3 – important bird areas (IBAs); 4 – water bodies and wetlands; 5 – forests; 6 – power lines and roads

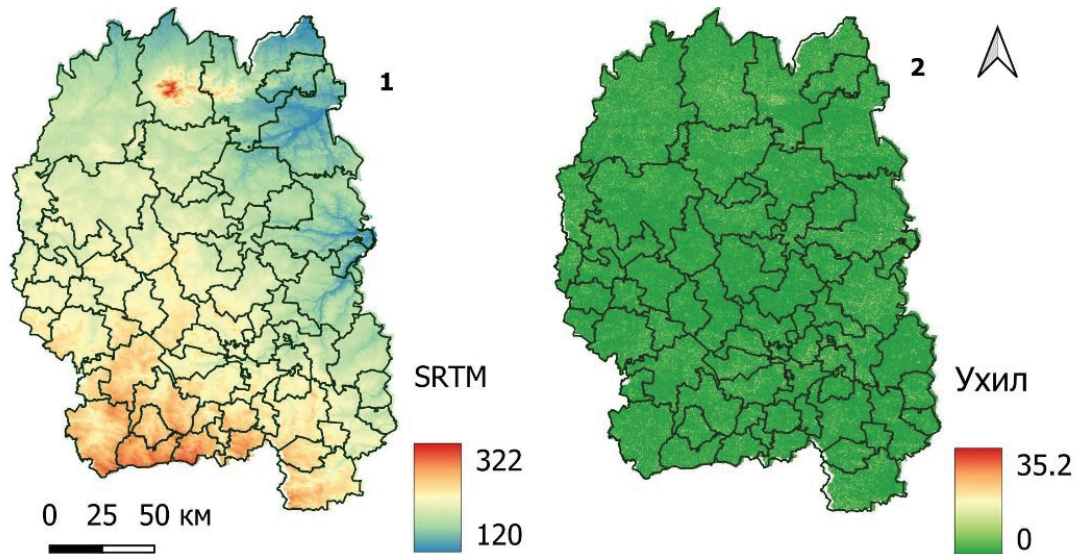


Рис. 2. Висота над рівнем моря (за даними SRTM) (1) та ухил території Житомирської області (2)
 Fig. 2. Elevation above sea level (based on SRTM data) (1) and terrain slope of the Zhytomyr region (2)

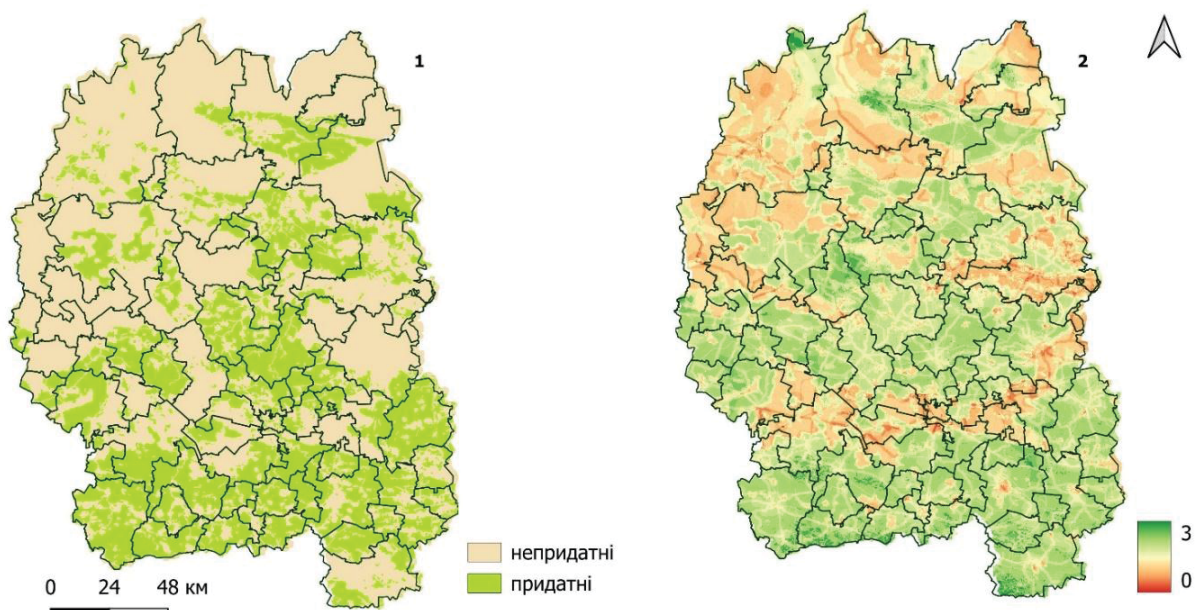


Рис. 3. Карта обмежень (1) та карта зважених за критеріями факторів (2)
 Fig. 3. Constraint map (1) and weighted factor map (2)

розміщення та виключаються з аналізу придатності [12].

Важливі території для птахів. Для уникнення суттєвого впливу на птахів з аналізу виключаються площі важливих для птахів територій (ІВА) та території в межах 300-метрового буферу від ІВА [12].

Створення карти обмежень. Карта обмежень (рис. 3.1.) – це карта досліджуваної території, яка представляє придатні та непридатні місця для розміщення вітрових електростанцій на основі топологічних та екологічних факторів. Цю карту було створено для визначення територій, які не слід включати до аналізу придатності.

Спочатку всі шари даних обмежень були трансформовані у проекційну систему WGS 1984 UTM zone 35N для забезпечення можливості вимірювань у метрах. Потім до них було застосовано інструмент створення буферних зон в Q-GIS для встановлення 1000-метрового буфера від заповідників та 400 м від інших природоохоронних територій, 300-метрового буфера від ІВА, 400-метрового буфера від водойм та 1000-метрового від водно-болотних угідь. А також 400-метрового буфера від лісів і 1000-метрового буфера від сельбищних територій. Після цього дані були растровані і перекласифіковані у двійковий формат де 0 вказує на непридатні ді-

лянки, а 1 вказує на придатні ділянки. Пізніше всі двійкові шари були помножені, щоб отримати остаточно карту обмежень.

Створення карти зважених за критеріями факторів. Карта зважених за критеріями факторів (рис. 3.2.) вказує на придатність майданчиків для розміщення вітрової електростанції на основі технічних та економічних факторів. Дані критеріїв оцінки спочатку були підготовлені за допомогою методів просторового аналізу перед створенням карти зважених за критеріями факторів.

Для створення цієї карти використано такі шари: середня швидкість вітру (C1), відстань до ліній електропередач (C2), відстань до дорожньої мережі (C3), відстань до населених пунктів (C4). Спочатку всі шари даних були трансформовані у проекційну систему WGS 1984 UTM zone 35N для забезпечення можливості вимірювань у метрах. Після цього до них було застосовано інструмент визначення растрових відстаней на основі евклідової відстані. Це дозволило обчислити відстані до різних точок досліджуваної області від дорожньої мережі, ліній електропередач та населених пунктів. Шар ухилу (C5) був створений на основі DEM (SRTM).

Оскільки кожен з цих критеріїв має окремий діапазон значень, для їх інтеграції в один шар використано уніфіковану шкалу: всі критерії були згруповані в чотири класи (нові значення растра), від 1 до 4, де 4 вказує на найбільшу придатність, а 1 – на найменшу придатність. Отже, вищі значення після інтеграції растрів будуть вказувати на вищу придатність території.

Просторова підтримка рішень. Просторовий аналіз можна розглядати як частину інфраструктури підтримки рішень. Існує багато методів багатокритеріального аналізу рішень (MCDA) для визначення ваг критеріїв, однак метод аналізу ієрархій (АНР) є найбільш уживаним методом встановлення ваг критеріїв при оцінці вибору місця для відновлюваної енергетики, і численні дослідження довели його надійність [12]. Попарні порівняння є основою АНР, який використовується для визначення відносної важливості кожного критерію.

Значення попарного порівняння були визначені з використанням інформації з попередніх досліджень [8; 10; 12]. Ці дослідження враховували думки експертів у галузі розвитку вітроенергетики та відповідну літературу.

Згідно з цими даними, швидкість вітру має найбільшу вагу - 53,9%, а отже, має найбільший вплив на кінцевий результат. Також високу вагу (23,7%) має відстань до ліній електропередач. Відстані до дорожньої мережі та населених пунктів мають ваги 9% та 7,8% відповідно. І останній критерій ухил те-

риторії має найнижчу вагу - 5,7%.

Карта придатності. Остаточна карта придатності (рис. 4.) була створена шляхом множення растрів зважених критеріїв та обмежень. Растр зважених критеріїв був створений з комбінації перекласифікованих карт за допомогою рівняння зваженого накладання, таким чином, щоб отримати індекс придатності Sl кожного місця l наступним чином [12]:

$$Sl = \sum_{i=1}^n w_i x_i$$

де: Sl - інтегральний показник придатності конкретної ділянки (пікселя); w_i - вага (значущість) i -го критерію; x_i - стандартизоване значення i -го критерію; n - загальна кількість критеріїв.

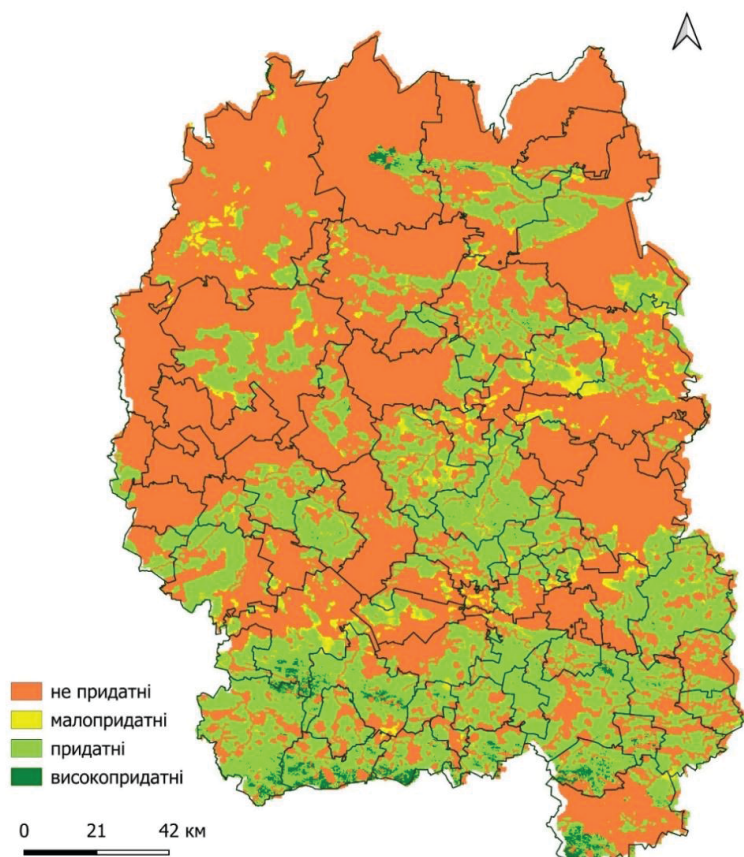


Рис. 4. Карта придатності території Житомирської області для розвитку вітрової енергетики
Fig. 4. Suitability map of the Zhytomyr region for wind energy development

На заключному етапі використовуються згенеровані карти зважених критеріїв та критеріїв обмежень. Індекс придатності кожного місця на карті зважених критеріїв множиться на бінарний бал (0 для непридатних районів та 1 для придатних районів) кожного місця на карті обмежень. Це дозволяє вибрати лише ті місця, які придатні для розвитку вітрової енергетики.

Всі місця з балом 0 були вилучені з результуючої карти а ті, що мали бал вищий нуля, були

Таблиця 2 / Table 2

Площі високопридатних для будівництва ВЕС територій
Areas of high-suitability territories for wind farm construction

№	Район	ТГ	Площа високопридатних територій, га
1	Бердичівський	Краснопільська	48,13
2	Бердичівський	Ружинська	38,31
3	Бердичівський	Вчорайшенська	29,15
4	Житомирський	Любарська	28,62
5	Житомирський	Чуднівська	22,73
6	Житомирський	Романівська	22,35
7	Бердичівський	Райгородоцька	22,35
8	Коростенський	Словечанська	20,81
9	Бердичівський	Семенівська	10,93
10	Бердичівський	Андрушівська	7,07
11	Коростенський	Овруцька	2,74
12	Коростенський	Олевська	2,50
13	Житомирський	Андрушківська	2,46
14	Житомирський	Попільнянська	2,31
15	Бердичівський	Швайківська	1,29
16	Житомирський	Волицька	0,86
17	Звягельський	Барашівська	0,77
18	Житомирський	Вільшанська	0,43
19	Житомирський	Черняхівська	0,34
20	Житомирський	Брусилівська	0,26

згруповані в три класи: «високо придатні», «придатні» та «менш придатні». Зазвичай у подібних дослідженнях виділяють ще і четвертий клас - «надзвичайно придатні». Однак для території Житомирської області не характерні швидкості вітру, притаманні цьому класу придатності.

Високопридатні для розвитку вітрової енергетики території. Дані про площі високопридатних територій за ОТГ наведено в табл. 2.

Просторовий розподіл цих територій представлено на карті (рис. 5.). Отриманий результат свідчить, що на території Житомирської області площа придатних для розвитку вітрової енергетики територій становить 264,41 га (табл. 2.). При цьому можна виділити два найбільш придатних регіони. Перший з них - північ Коростенського району (лесова частина Словечансько-Овруцького краю в межах Словечанської та Овруцької ТГ) площею 23,55 Га (табл. 2.).

Другий регіон - південна частина області в межах Бердичівського району і окремих ТГ Житомирського району (Чуднівська, Романівська та



Рис. 5. Високопридатні для розвитку вітрової енергетики території Житомирської області
 Fig. 5. High-suitability areas for wind energy development in the Zhytomyr region

Любарська ТГ). Тут зосереджена переважна більшість територій, придатних для розвитку вітрової енергетики загальною площею 237,59 га (табл. 2.).

Отже, Житомирська область характеризується середнім вітроенергетичним потенціалом, що зумовлено достатньо низькими середніми значеннями швидкості вітру, рівнинним рельєфом переважної частини території, значними площами лісів та ін. Однак у південній частині області (переважно Бердичівський район) складаються достатньо сприятливі фізико-географічні, соціальні та економічні умови для розвитку цього виду альтернативної енергетики.

Висновки. Результати проведеного геоінформаційного аналізу дозволили комплексно оцінити вітроенергетичний потенціал Житомирської області. Встановлено, що регіон володіє достатнім ресурсом для розбудови об'єктів розподіленої генерації, проте просторове розміщення таких об'єктів вимагає жорсткої верифікації через значну кількість ландшафтних та інфраструктурних обмежень. За результатами моделювання, загальна площа високопридатних територій для будівництва ВЕС становить 264,41 га. Невелика площа цих ділянок відносно загальної території області пояснюється застосуванням суворого екологічного та соціального фільтрування, що робить ідентифіковані майданчики максимально готовими до практичного освоєння з мінімальними ризиками.

На основі отриманих картографічних даних та їх кількісного аналізу встановлено просторову структуру вітроенергетичного потенціалу області. Основний масив високопридатних площ зосереджено у південній частині області (Бердичівський та Житомирський райони). Найбільш перспективними є Краснопільська (48,13 га), Ружинська (38,31 га) та Вчорайшенська (29,15 га) територіальні

громади. Високий бал придатності цих ділянок зумовлений оптимальним поєднанням швидкості вітру та відсутності «вето-факторів» (водних об'єктів, лісів, зон ПЗФ). Невеликий північний кластер (Коростенський район): локалізований переважно на лесових масивах Словечансько-Овруцького кряжу. Тут пріоритетною є Словечанська ТГ (20,81 га), де підвищені відмітки рельєфу компенсують загальну залісеність території. Локальні ділянки також виявлені у межах Барашівської ТГ (Звягельський район). У цьому випадку результати моделювання добре корелюють із практичними даними інвестиційного планування, зокрема з проектом ВЕС «Бараші» (за даними Єдиного реєстру з ОВД), що підтверджує верифікацію обраних критеріїв оцінки.

Отримані результати дозволяють сформулювати ряд практичних рекомендацій. Органам місцевого самоврядування зазначених громад рекомендується розглянути можливість включення цих ділянок до містобудівної документації як земель енергетики.

Компактність виявлених зон дозволяє громадам пропонувати конкретні інвестиційні лоти з уже врахованими екологічними обмеженнями. Суб'єктам господарювання у сфері відновлюваної енергетики варто розглядати ці 264,41 га земель як «пріоритетні стартові майданчики» для встановлення одиничних потужних ВЕУ або малих вітропарків кластерного типу. Це дозволить уникнути тривалих процедур погодження в конфліктних зонах (Карпати, прибережні смуги).

Подальші дослідження доцільно зосередити на моделювання вітрового потоку на висотах 100–120 м (замість 50 м), що може значно розширити площу придатних територій за рахунок використання сучасних технологій вітрогенерації.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ:

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України / за ред. С. О. Кудрі. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. С. 82.
2. Богатов Ю. М., Захарків І. В., Іщенко О. П. Енергетичний потенціал та оцінка ефективності використання відновлюваних джерел енергії. Київ : НУБіП України, 2017. 210 с.
3. Вплив вітряних електростанцій на навколишнє середовище [Електронний ресурс]. URL: <https://alternative-energy.com.ua/vpliv-vitryanih-elektrostantsij-na-navkolishn%D1%94-seredovishhe/> (дата звернення: 11.03.2026).
4. Кудря С. О. Відновлювані джерела енергії. Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.
5. Москальчук Н. М., Адаменко Я. О. Вибір майданчика для розташування вітроелектростанцій на підставі ГІС-підходу. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2019. Т. 29, № 6. С. 71–75.
6. Чилирецький П., Паславська А. Посібник з оцінки впливу вітроелектростанцій на птахів (адаптований переклад з польської). Київ, 2019. 24 с.
7. Шихайлов М. О. Проблеми та розвиток малої вітроенергетики в Україні. *Промелектро*. 2004. № 5. С. 51–56.
8. Ayodele T. R., Ogunjuyigbe A. S. O., Odigie O., Munda J. L. A multi-criteria GIS based model for wind farm site selection using interval type-2 fuzzy analytic hierarchy process: The case study of Nigeria. *Appl. Energy*. 2018. Vol. 228. P. 1853–1869. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.051>
9. Li G., Zhi J. Analysis of Wind Power Characteristics. *Comprehensive Energy Systems*. Vol. 2. Academic Press, 2016. P. 37–85. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849895-8.00002-6>
10. Moradi S., Yousefi H., Noorollahi Y., Rosso D. Multi-criteria decision support system for wind farm site selection and sensitivity analysis: Case study of Alborz Province, Iran. *Energy Strateg. Rev.* 2020. Vol. 29. 100478. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2020.100478>
11. O'Sullivan C. Blog: Draft Revised Wind Energy Development Guidelines. *IWEA Blog*. 2020. URL: <https://windenergyireland.com/latest-news/3180-blog-draft-revised-wind-energy-development-guidelines> (дата звернення: 11.03.2026).

12. Sánchez-Lozano J. M., García-Cascales M. S., Lamata M. T. GIS-based on-shore wind farm site selection using Fuzzy Multi-Criteria Decision Making methods, evaluating the case of Southeastern Spain. *Appl. Energy*. 2016. Vol. 171. P. 86–102. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.030>
13. Tercan E. Land suitability assessment for wind farms through best-worst method and GIS in Balıkesir province of Turkey. *Sustain. Energy Technol. Assess.* 2021. Vol. 47. 101491. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2021.101491>
14. Zalhaf A. S., Elboshy B., Kotb K. M., Han Y., Almaliki A. H., Aly R., Elkadeem M. R. A High-Resolution Wind Farms Suitability Mapping Using GIS and Fuzzy AHP Approach: A National-Level Case Study in Sudan. *Sustainability*. 2021. Vol. 14(1). 358. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/su14010358>

Конфлікт інтересів: автори засвідчують, що, незважаючи на те, що один із авторів статті є членом редакційної колегії цього журналу, процес рецензування, прийняття рішення щодо публікації та редагування проводилися незалежно, без його участі чи впливу. Будь-які потенційні конфлікти інтересів були повністю усунені шляхом зовнішнього контролю процесу.

Стаття надійшла до редакції 25.02.2026

Стаття рекомендована до друку 02.04.2026

Опубліковано 30.05.2026

Harbar Oleksandr – Doctor of Biological Sciences, Professor, Head of the Department of Ecology and Geography, Zhytomyr Ivan Franko State University; e-mail: o.harbar@gmail.com; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4357-4525>

Harbar Diana – PhD in Biological Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Zoology, Biological Monitoring and Nature Protection, Zhytomyr Ivan Franko State University; e-mail: harbar-d@zu.edu.ua; ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-5739-3114>

GEOINFORMATION ANALYSIS OF WIND ENERGY POTENTIAL IN ZHYTOMYR REGION

The purpose of this article is to conduct a comprehensive geoinformation assessment of the wind energy potential in the Zhytomyr region using advanced GIS technologies and remote sensing data. The research focuses on identifying suitable areas through multi-criteria analysis of constraints and developing recommendations for their rational utilization within the energy sector, ensuring a balance between economic feasibility and environmental safety.

The main material. The paper substantiates the selection of evaluation criteria, including technical parameters (wind speed, proximity to power grids) and environmental determinants (distance to protected areas, forest massifs, and avian migration routes). The study analyzes the spatial distribution of wind resources in Zhytomyr region within the context of Ukraine's current energy security challenges. Despite the region's moderate wind characteristics, the development of wind energy is argued to be a viable alternative to the contentious exploitation of landscapes in the Carpathian region. Based on Weighted Linear Combination (WLC) analysis, the most promising zones for wind farm localization were identified. It was established that the total area of highly suitable land amounts to 264.41 hectares, primarily concentrated in the southern part of the region (Berdychiv and Zhytomyr districts) and on the loess plateaus of the Slovechansko-Ovruch ridge. Particular attention is paid to the verification of results by comparing them with existing municipal investment plans (notably those of the Barashivka territorial community).

Conclusions and further research. In the course of the research, a series of thematic maps were developed, visualizing the suitability of territories for wind farm construction. It was determined that the leaders in terms of high-suitability land area are the Krasnopil, Ruzhyn, and Vchoraishe communities. The formulated results have practical significance for business entities in choosing starter sites, local self-government bodies for spatial planning of communities, and for the educational process in studying applied aspects of cartography and sustainable regional development.

Keywords: *geoinformation modeling, wind energy potential, Zhytomyr region, spatial constraints, renewable energy sources, mapping, territorial community.*

REFERENCES:

1. Kudria, S. O. (Ed.). (2020). *Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh dzherel enerhii Ukrainy* [Atlas of renewable energy potential of Ukraine]. Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine. [in Ukrainian].
2. Bohatov, Yu. M., Zakharkiv, I. V., & Ishchenko, O. P. (2017). *Enerhetychnyi potentsial ta otsinka efektyvnosti vykorystannia vidnovliuvanykh dzherel enerhii* [Energy potential and assessment of the efficiency of using renewable energy sources]. NUBiP of Ukraine. [in Ukrainian].
3. *Vplyv vitrianykh elektrostantsii na navkolishnie seredovishche* [Impact of wind power plants on the environment]. (n.d.). <https://alternative-energy.com.ua/vplyv-vitrianykh-elektrostanczij-na-navkolishn%D1%94-seredovishhe/> [in Ukrainian].
4. Kudria, S. O. (2020). *Vidnovliuvani dzherel enerhii* [Renewable energy sources]. Institute of Renewable Energy of the NASU. [in Ukrainian].
5. Moskalchuk, N. M., & Adamenko, Ya. O. (2019). Vybir maidanchyka dlia roztashuvannia vitroelektrostantsii na pidstavi HIS-pidkhotu [Site selection for wind power plants based on the GIS approach]. *Scientific Bulletin of UNFU*, 29(6), 71–75. [in Ukrainian].
6. Chyliaretskyi, P., & Paslavska, A. (2019). *Posibnyk z otsinky vplyvu vitroelektrostantsii na ptakhiv* [Manual for assessing the impact of wind power plants on birds]. [in Ukrainian].

7. Shykhailov, M. O. (2004). Problemy ta rozvytok maloi vitroenerhetyky v Ukraini [Problems and development of small wind energy in Ukraine]. *Problemy ta rozvytok maloi vitroenerhetyky v Ukraini*, (5), 51–56. [in Ukrainian].
8. Ayodele, T. R., Ogunjuyigbe, A. S. O., Odigie, O., & Munda, J. L. (2018). A multi-criteria GIS based model for wind farm site selection using interval type-2 fuzzy analytic hierarchy process: The case study of Nigeria. *Applied Energy*, 228, 1853–1869. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.07.051> [in English].
9. Li, G., & Zhi, J. (2016). Analysis of Wind Power Characteristics. In I. Dincer (Ed.), *Comprehensive Energy Systems* (Vol. 2, pp. 37–85). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-849895-8.00002-6> [in English].
10. Moradi, S., Yousefi, H., Noorollahi, Y., & Rosso, D. (2020). Multi-criteria decision support system for wind farm site selection and sensitivity analysis: Case study of Alborz Province, Iran. *Energy Strategy Reviews*, 29, 100478. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100478> [in English].
11. O'Sullivan, C. (2020). *Blog: Draft Revised Wind Energy Development Guidelines*. IWEA Blog. <https://windenergyireland.com/latest-news/3180-blog-draft-revised-wind-energy-development-guidelines> [in English].
12. Sánchez-Lozano, J. M., García-Cascales, M. S., & Lamata, M. T. (2016). GIS-based on-shore wind farm site selection using Fuzzy Multi-Criteria Decision Making methods, evaluating the case of Southeastern Spain. *Applied Energy*, 171, 86–102. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.03.030> [in English].
13. Tercan, E. (2021). Land suitability assessment for wind farms through best-worst method and GIS in Balıkesir province of Turkey. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47, 101491. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101491> [in English].
14. Zalhaf, A. S., Elboshy, B., Kotb, K. M., Han, Y., Almaliki, A. H., Aly, R., & Elkadeem, M. R. (2021). A High-Resolution Wind Farms Suitability Mapping Using GIS and Fuzzy AHP Approach: A National-Level Case Study in Sudan. *Sustainability*, 14(1), 358. <https://doi.org/10.3390/su14010358> [in English].

Conflict of Interest: The authors certify that, although one of the authors of the article is a member of the editorial board of this journal, the peer review, publication decision, and editorial processes were conducted independently, without their participation or influence. Any potential conflicts of interest were fully mitigated through external oversight of the process.

The article was received by the editors 25.02.2026

The article is recommended for printing 02.04.2026

Published 30.05.2026