

УДК 528.8(477.87)+502.17:620.9

**ЗАСТОСУВАННЯ ГІС ТЕХНОЛОГІЙ ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА
НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ МІСЦЯ РОЗТАШУВАННЯ ВЕС НА
ПРИКЛАДІ «ПОЛОНІНА РУНА» ТУР'Є-РЕМЕТІВСЬКОЇ ОТГ**

В. Ю. Пересоляк, кандидат наук з державного управління, доцент

Ужгородський національний університет

E-mail: v.peresolyak@gmail.com;

ORCID: 0000-0002-6255-1559

І. П. Радиш, кандидат технічних наук, доцент

E-mail: ihor.radysh@uzhnu.edu.ua;

ORCID: 0000-0003-0187-4183

І. В. Крильо, магістр, викладач

Природничо-гуманітарний фаховий коледж

E-mail: ihor.krylo@uzhnu.edu.ua

Ужгородський національний університет

У сучасних умовах розвитку відновлюваної енергетики, до якої відноситься і вітроенергетика найважливішим завданням є мінімізація екологічного впливу вітроелектростанцій (ВЕС) на навколишнє середовище в контексті декарбонізації галузей економіки. Використання геоінформаційних систем (ГІС) дозволяє ефективно аналізувати та моделювати вплив щодо розміщення ВЕС враховуючи: екологічні, ландшафтні, економічні, кліматичні та соціальні фактор, які впливають на сталий розвиток територій. У статті розглядається застосування геоінформаційних систем (ГІС) для оцінки впливу на навколишнє середовище місця розташування вітроелектростанції (ВЕС), яка планується будувати на території урочища «Полонина Руна» Тур'є-Реметівської сільської територіальної громади Ужгородського району Закарпатської області.

Дослідження передбачає збір та обробку просторових даних, включаючи рельєф, швидкість та напрямок вітру, наявність природоохоронних територій та місць проживання чутливих видів флори та фауни. За допомогою ГІС проводитиметься аналіз візуального та шумового впливу, оцінка ризиків для біорізноманіття та здоров'я населення, а також моделювання альтернативних варіантів розміщення вітрогенеруючих турбін станції.

Результати оцінки сприяють прийняттю обґрунтованих проектних рішень щодо вибору місця розташування ВЕС, знижуючи негативний екологічний вплив та забезпечуючи баланс між сталим розвитком вітрової енергетики в регіоні зі збереженням навколишнього природного середовища.

Ключові слова: вітроенергетика, оцінка впливу на довкілля, геоінформаційні системи, просторове планування, сталий розвиток територій, відновлювані джерела енергії, декарбонізація, викиди CO₂.

Вступ. У сучасних умовах глобального потепління та зростаючої потреби у відновлюваних джерелах енергії вітроенергетика займає важливе місце серед екологічно чистих технологій. Вітроелектростанції (ВЕС) сприяють зменшенню викидів парникових газів та зниженню залежності від традиційних енергоресурсів. Проте їх розміщення може мати значне вплив на навколишнє середовище, зокрема на біорізноманіття, ландшафт, шумове забруднення та якість життя місцевого населення.

Для оцінки впливу ВЕС на довкілля важливо використовувати **у** новітні методи аналізу, серед яких особливе місце займають геоінформаційні системи (ГІС). ГІС-технології дозволяють проводити просторовий аналіз, моделювати потенційний вплив вітрових турбін, оцінювати альтернативні варіанти їх розташування та мінімізувати екологічні ризики.

Україна має сприятливі умови для розвитку вітроенергетики:

- землі, вільні від промислових, житлових та сільськогосподарських угідь інтенсивного використання для будівництва вітрових електростанцій (ВЕС);
- висока потужність заводів, здатних виробляти сучасні вітрові турбіни, особливо в перспективних для використання ВЕС регіонах;

- багаторічні дані спостережень та наявність висококваліфікованих кадрів для будівництва високотехнологічних споруд, таких як ВЕС.

За різними оцінками, промисловий потенціал вітроенергетики в Україні становить близько 500 млрд кВт/год на рік [1]. На основі досвіду більшості європейських країн з впровадження вітроелектростанцій в Україні може бути збільшено виробництво електричної енергії шляхом використання більш потужних вітроустановок та введення в експлуатацію нових потужностей наземних вітрових електростанцій до 17455 ГВт/год у 2030 році (загальною потужністю 6,214 ГВт) [16]. Відповідно до Розпорядження Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання [17] передбачає будівництво вітрових електростанцій загальною потужністю 16 000 мВт, тому важливість вибору майданчиків та розвитку будівництва вітроелектростанцій не змінилася. У грудні 2024 року компанія Elementum Energy успішно закрила угоду із придбання вітроенергетичного проєкту потужністю 200мВт в західній частині України. Очікувана щорічна генерація нових ВЕС становитиме близько 700 ГВт·год, що еквівалентно річному споживанню електроенергії близько 600 тисяч людей.

Вітроенергетика відіграє провідну роль у процесі декарбонізації української економіки. Крім того, вітрові електростанції замінюють традиційну енергетику, яка спалює викопне паливо для виробництва електроенергії. Завдяки вітроенергетичним технологіям викиди CO₂ в атмосферу вдалося скоротити на 835 мільйонів тон.

Популяризація малих вітрових турбін має швидкий і відчутний вплив на національну економіку. Встановлення малих вітрових турбін може широко використовуватися не тільки для виробництва електроенергії, але й для полегшення механічних процесів (млини, глибинні насоси, відкачування води зі свердловин, насоси тощо).

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сфері оцінки впливу розташування вітроелектростанцій (ВЕС) на навколишнє середовище за допомогою геоінформаційних систем (ГІС) проведено низку досліджень, які

підкреслюють важливість комплексного підходу до планування та реалізації проектів відновлюваної енергетики.

Окремі еколого-економічні та технічні аспекти використання енергії вітру розглядали у своїх працях такі науковці, як Ю.І. Башинська, В.Г. Дідик, С.О. Кудря, О.М. Суходоля та інші. В юридичній науці питання правового регулювання відносин у вітроенергетиці досліджували у своїх працях О.В. Сушик, Х.А. Григор'єва, К.М. Караханян, М.М. Кузьміна, Е.Ю. Рибнікова, Ю.М. Рудь, Т.Є. Харитонova, І.Є. Чумаченко, В.Ю. Пересоляк, М. Лопушанська та інші запропонували методику оцінки впливу на довкілля об'єктів відновлюваної енергетики, апробовану на прикладі ВЕС «Полонина Руна» Тур'є-Реметівської сільської територіальній громаді Ужгородського району Закарпатської області. Ця методика охоплює всі етапи життєвого циклу проекту та враховує екологічні, економічні та соціальні аспекти впливу. Використання ГІС дозволяє детально аналізувати просторові дані та моделювати потенційні ризики для довкілля.

Мета дослідження полягає застосування ГІС-технологій для оцінки впливу місця розташування вітроелектростанцій (ВЕС) на навколишнє середовище з врахування таких факторів: екологічних, ландшафтних, економічних, кліматичних, соціальних та спеціальних досліджень нормативно - правових вимог до будівництва і функціонування вітрових електростанцій з акцентом їхнього впливу на довкілля в системі управління природними ресурсами.

Матеріали та методи досліджень. Методи дослідження для дослідження тематики застосовувалися: картографічного аналізу, просторового аналізу, моделювання, візуалізації, логічного узагальнення та представлення інформації. А саме: для творення та аналізу планово-картографічних матеріалів, що представляють просторові дані в графічному вигляді – метод картографічного аналізу; для взаємовідносин між проєктними об'єктами та існуючими, такі як відстань, напрямок, суміжність, взаємопроникнення - метод просторового аналізу; для прогнозування впливу на навколишнє середовище та екологічних особливостей території - метод моделювання; для створення та презентації

результатів аналізу для широкого кола користувачів - метод представлення інформації.

Результати та їх обговорення. Для еколого-ефективного використання вітрової енергії необхідна вичерпна інформація про її характеристики. При аналізі вітроенергетичного потенціалу регіону складається вітроенергетичний кадастр.

Вітроенергетичний кадастр - це об'єктивний, надійний і необхідний набір кількісних даних, що характеризує вітер як джерело енергії. Заснований на довгострокових спостереженнях, вітроенергетичний кадастр представляє всі характеристики вітру в табличній або графічній формі.

Основним джерелом вихідних даних для вітроенергетичних кадастрів є організація спостережень за швидкістю вітру з використанням опорної мережі гідрометеорологічних станцій [13]. Такі спостереження проводяться певну кількість разів на добу, охоплюють період у кілька десятиліть і надають вихідні дані для аналізу. Перевагою таких спостережень є те, що вони збираються уніфіковано.

Середньорічна швидкість вітру є першою характеристикою загального рівня вітроенергетики. Ця величина може бути використана для визначення ефективності вітрової турбіни в конкретному секторі або в регіоні в цілому. Слід зазначити, що швидкість вітру залежить від рельєфу місцевості, особливо від шорсткості поверхні, наявності або відсутності елементів затінення і висоти над рівнем землі на обраній ділянці. Ці умови сильно відрізняються від станції до станції. Тому для порівняння їх потрібно перетворити в середню швидкість вітру. Ці умови зазвичай називають відкритою, рівнинною місцевістю і висотою 0 метрів над землею.

Енергетичні ресурси зазвичай оцінюються на основі потенційних, технічних та економічних ресурсів. Технічні ресурси вітрової енергії розглядаються як частина потенційних ресурсів, які можуть бути використані за допомогою наявних технічних засобів. Технічні ресурси вітрової енергії - це частина потенційних ресурсів, які можуть бути використані за допомогою наявних технічних засобів і визначаються з урахуванням неминучих втрат при

використанні енергії вітру. Згідно з теорією ідеальної вітрової турбіни, лише частина енергії, що використовується і перетворюється, тобто проходить через поперечний переріз вітрової турбіни, є корисною роботою. Максимальна кількість корисної енергії оцінюється, як коефіцієнт використання енергії вітру (КВЕВ) обмежений константою 0,593. Найкращі моделі вітрогенераторів сьогодні утримують цей параметр в діапазоні КВЕВ- 0,45-0,48.

Слід зазначити, що сучасні конструкції вітрових турбін не повністю використовують весь діапазон швидкостей вітру. При мінімальних швидкостях вітру кількість виробленої електроенергії нижче мінімальної робочої потужності вітрогенератора, що недостатньо для подолання сил тертя компонентів вітрогенератора. Тільки в діапазоні від мінімальної робочої до проектної швидкості вітрогенератор може використовувати свою встановлену потужність, а енергія вітру може бути використана з найбільшою вигодою. Якщо швидкість вітру продовжує збільшуватися до максимальної робочої швидкості, вихідна потужність вітрогенератора підтримується на рівні, встановленому контролером. Якщо швидкість вітру перевищує максимальну робочу швидкість, вітрогенератор вимикається і робота зупиняється, щоб запобігти технічним поломкам .

Сучасні вітрогенератори - це великі технологічні споруди (мегаватні вітрогенератори мають діаметр 60-120 м і висоту вежі 60-100 м і більше), побудовані з використанням новітніх розробок в аеродинаміці, електротехніці, електроніці та комп'ютерних технологіях. Наразі встановлена потужність вітрової турбіни становить 1 кВт, а її вартість - 800-1000 доларів США. У майбутньому очікується зниження цього показника до 600 дол. США.

Оцінки вітроенергетичного потенціалу для вузької території ґрунтуються на загальних кліматичних картах, що охоплюють країну або регіон, і вимірах метеорологічних станцій, розташованих за десятки, а в деяких випадках і сотні кілометрів від досліджуваної території, тому можуть бути отримані дуже приблизні результати, які, звичайно, описують лише поточний процес циркуляції і фонове вітрове поле. Для отримання більш точних оцінок необхідно враховувати навколишні ландшафтні умови і топографію на відстані

кількох кілометрів від досліджуваної ділянки. Тільки такі кабінетні методи можуть оцінити потенціал активності місцевих повітряних течій на малих висотах.

При виборі майданчиків для енергетичних об'єктів необхідно враховувати ряд різних параметрів, таких як метеорологічні спостереження, топографічні дані та плани місцевого економічного розвитку [7,11].

Території з наступними характеристиками можуть бути придатними для будівництва ВЕС:

- оптимальна середньорічна швидкість вітру;
- відсутність висотних перешкод із підвітряної сторони;
- не допускається наявність нерівностей рельєфу, будівель і споруд, рослинності в певній близькості до вітрогенератора;
- ділянка на вершині нагір'я має бути пласка з відлогими схилами або ділянка має бути розміщена на рівнині, мілководді чи острові;
- не допускається присутність локальних форм рельєфу, які впливають на явища „підтискання” і пришвидшення вітрового потоку (серед них вузькі долини і плоскі вершин височин;
- гірська тунелеподібна ущелина, яка має орієнтацію в просторі паралельно переважним напрямкам вітрів (Рис.1).



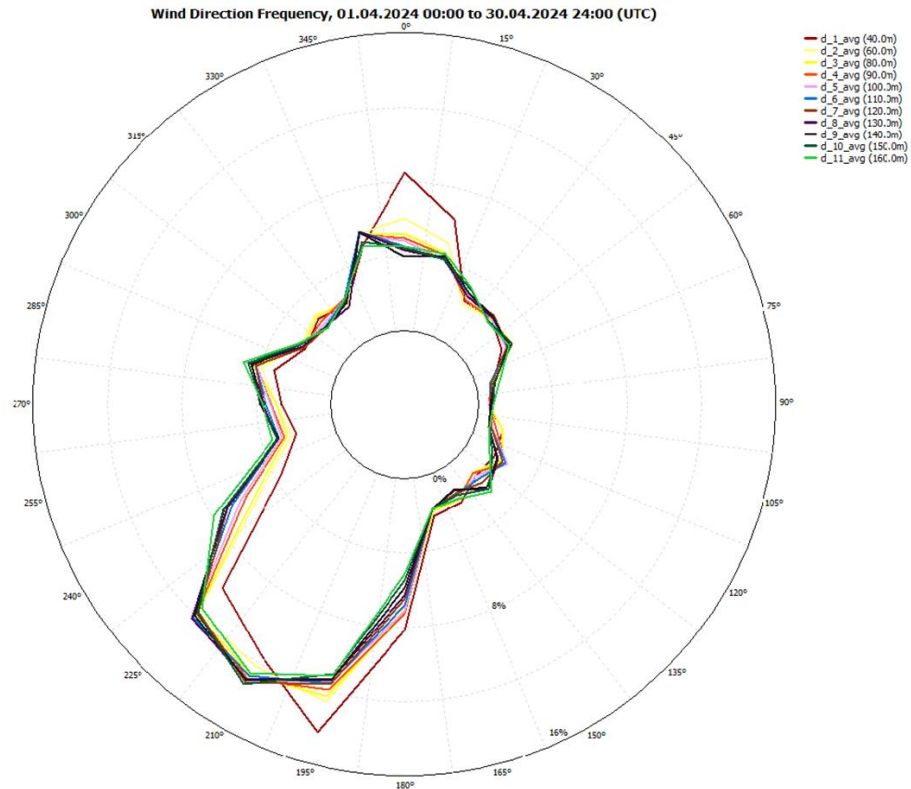
Рис. 1. Розміщення вітряної установки в тунелеподібній долині

ГІС можна використовувати для більш точного визначення впливу вітрових електростанцій на навколишнє середовище та прийняття

обґрунтованих рішень щодо вибору місця розташування. Це забезпечить баланс між потребами енергетичного сектору та захистом природних екосистем.

Підсумовуючи, можна сказати, що моделювання будівництва майбутніх ВЕС вимагає аналізу великих обсягів інформації, збір якої можна ефективно організувати за допомогою методів геоінформатики. Існують численні приклади використання геоінформаційних систем (ГІС) для вирішення проблеми вибору майданчиків для будівництва вітроелектростанцій. Зокрема, передбачається, що цифрові топографічні карти можуть бути використані для визначення ділянок, які є рівними або мають невеликий нахил у напрямку вітрового потоку, з урахуванням відсутності навколишніх перешкод (пагорбів, дерев, будівель тощо) [12].

Комплексний підхід до вибору майданчика для вітрових турбін вимагає якісної оцінки місцевих характеристик, які можуть сприяти високій швидкості та стабільності вітру, а отже, і потенційному виробництву енергії (Рис.2). Коли для вітрових турбін використовуються вежі меншої висоти, особливо ті, що нижче 20 м, більш точним є розрахунок вітрозахисних зон відносно об'єктів на конкретних ділянках і буферних зон, що обмежують потенційні зони турбулентності. Ці дані також можуть бути використані для визначення ділянок, де швидкість вітру може сповільнитися.



**Рис. 2. Частота та напрямок вітру «Полонина Руна»
з 01.04.2024 по 30.04.2024**

Однією з найважливіших умов успішного інвестування у вітроенергетику є добре розуміння типових вітрових умов для даного мікрорегіону. Як зазначалося вище, потужність повітряного потоку, що проходить через ротор вітрової електростанції, пропорційна кубу швидкості вітру. Навіть у регіонах з хорошими вітровими умовами місце розташування майбутніх майданчиків для будівництва електростанцій необхідно ретельно вибирати з урахуванням геометрії ділянки, в тому числі потенційної наявності перешкод. Ці фактори часто недооцінюються, але їх вплив на продуктивність кожної окремої електростанції є вирішальним. В результаті, вибір місця розташування проекту між сприятливими і несприятливими зонами може легко компенсувати дво-триразову різницю в енергоефективності і, відповідно, у витратах на електроенергію між аналогічними електростанціями [8].

Можлива енергія вітру залежить від шорсткості поверхні землі в даному місці, включаючи спортивні споруди, будівлі, дерева, пошкодження кліток

вітрогенераторів та інші високі перешкоди. У Швеції були проведені експерименти в аеродинамічній трубі для визначення мінімальної відстані між вітровими турбінами, щоб уникнути взаємного впливу. Експерименти показали, що відстань має становити щонайменше шість вітрових турбін в діаметрі. Існують також докази того, що ця відстань повинна становити 8-12 см в діаметрі.

Результати розрахунків моделювання вітрової тіні для різних типів перешкод показані на Рис. 7 [4]. Основними методами геоінформаційного моделювання та аналізу, необхідними для реалізації наведених вище схем є :

- аналіз близькості, побудова буферних зон;
 - аналіз поверхні місцевості, визначення видимості між об'єктами, розрахунок градієнтів схилів та експозицій;
 - 3D-моделювання та веб-картографування місцевості та об'єктів ВЕС.
- Вітрові електростанції виробляють енергію з незначним або нульовим хімічним впливом на навколишнє середовище, але вони мають багато наслідків, таких як зміна ландшафту через виділення землі під будівництво, шумовий вплив і радіоперешкоди. У цьому документі основний вплив вітрових турбін на навколишнє середовище аналізується з точки зору управління земельними ресурсами: визначення ступеня шумового впливу від роботи вітрових турбін - шумова зона ВЕС генерують шум, який зазвичай поділяється на інфразвук і шум, що впливає на людину та інші живі організми.

Інфразвук - це акустичні коливання в повітрі з частотою нижче 20 Гц, тобто нижче порогу чутності людини. Джерелами інфразвуку в природі є шум вітру, океанські хвилі, водоспади, бурі та землетруси. Водночас інфразвук поширений у повсякденному житті, наприклад, через використання обігрівачів, компресорів та автомобілів. Міська інфраструктура, така як тунелі, мости та висотні будівлі, також є джерелом поширення інфразвуку. Діапазон інфразвуку вважається безпечним для здоров'я людини, якщо його рівень знаходиться в межах 130 дБ.

Іншими словами, дослідники з США та Франції заявили, що низькочастотний шум від вітрових турбін негативно впливає на організм

людини, викликаючи стійку депресію, сильну ірраціональну тривогу і порушення життєдіяльності, тобто територія навколо ВЕС не придатна для комфортного життя людей, тварин і птахів. Водночас, згідно з дослідженням, проведеним на замовлення Федерального відомства охорони здоров'я Німеччини, низькочастотні вібрації від вітрових турбін не мають негативного впливу на навколишнє середовище або здоров'я людини, оскільки рівень шуму нижче порогу виявлення - 30 дБ.

Проблема зменшення шумового впливу вітрогенераторів вирішується шляхом розташування вітрогенераторів на певній відстані від житлових будинків, де рівень шуму не перевищує 40-50 дБ). Для різних потужностей вітрових турбін існують загальні рекомендації щодо діапазонів впливу в межах від 150 до 350. Однак Данська асоціація виробників вітроенергетики [3] рекомендує мінімум сім діаметрів ротора або відстань 300 метрів.

На сайті цієї Асоціації (www.Windpower.org) є у вільному доступі калькулятор, який прораховує рівні шуму від вітряка на різних дистанціях, який візуалізується як растрова карта.

Як відомо, навколо всіх промислових підприємств встановлюються охоронні та санітарно-захисні зони. Для того, щоб оцінити вплив вітрових турбін на навколишнє середовище, необхідно розрахувати охоронні зони.

При дослідженні вітроенергетичних систем охоронні зони використовуються для оцінки впливу шуму вітротурбін на навколишнє середовище, щоб, наприклад, визначити вплив обмежень на санітарно-захисну зону навколо небезпечних об'єктів. Також оцінюється вплив високих об'єктів на ландшафт на вітрові потоки. Приклади охоронних зон навколо об'єктів показані на рисунках 3-6. Наприклад, на Рис. 3 зображено полігональний об'єкт, межі якого рівновіддалені від межі об'єкта на певну величину, в даному випадку радіус R.

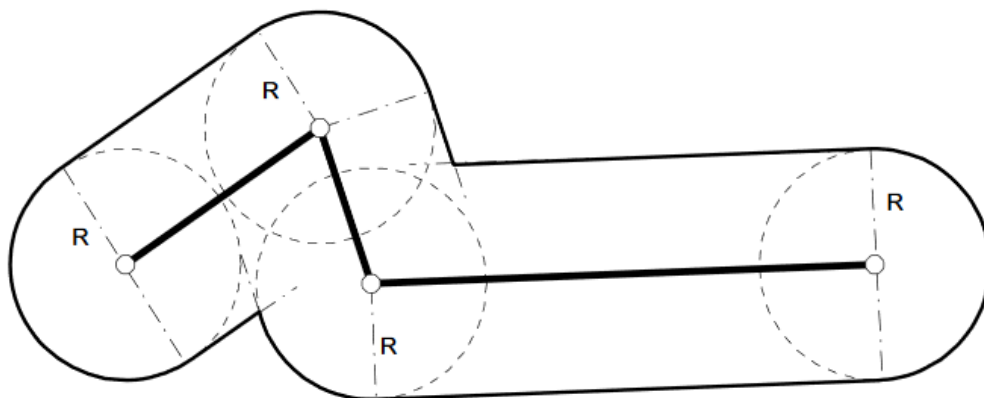
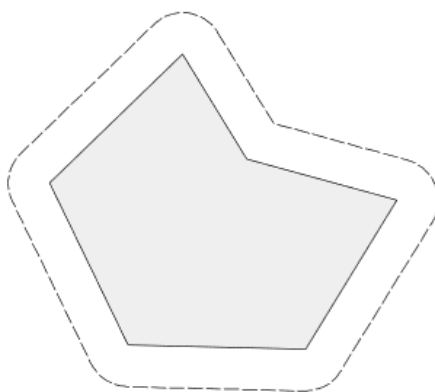
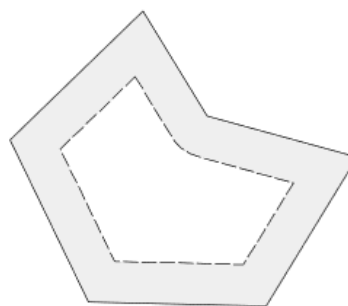


Рис. 3. Схема побудови охоронної зони



а



б

Рис. 4. Охоронні зони з додатнім (а) та від'ємним (б) радіусами

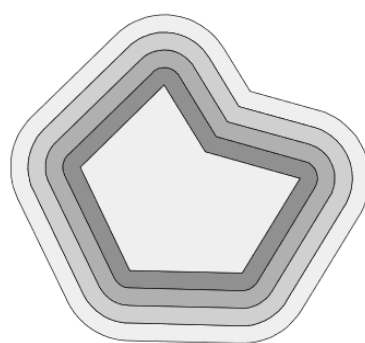


Рис. 5. Кільцеві охоронні зони

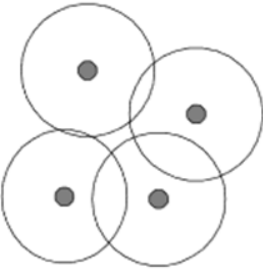
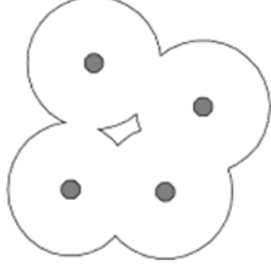
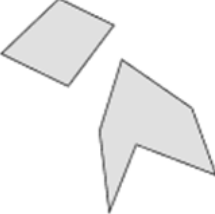
	Вхідні дані	Індивідуальні зони для кожного об'єкта	Об'єднана буферна зона для групи об'єктів
Точкові об'єкти			
Лінійні об'єкти			
Площинні об'єкти			

Рис. 6. Схема охоронних зон для об'єктів різної локалізації

Радіус буфера може бути числовою константою або значенням атрибута конкретного просторового об'єкта. У першому випадку всі охоронні області мають однаковий радіус; у другому випадку навколо кожного об'єкта визначається буферна область з унікальним радіусом. Крім того, можна використовувати декілька буферів, тобто масив радіусів, які можуть утворювати масив буферних зон. Якщо радіус від'ємний (радіус менший за виділену область), буферна зона створюється всередині полігонального об'єкта.

При розв'язанні багатьох прикладних задач геоінформатики необхідно визначати так звані зони близькості. Ці зони також називають діаграмами Вороного або зонами близькості.

Алгоритми, що обчислюють нахил та експозицію місцевості, дозволяють створювати нові регуляризовані сітки на основі растрових ЦМР, де кожен вузол відповідає куту нахилу та експозиції.

Відповідно до вищезазначених вимог, шумовий вплив роботи вітрогенератора великої потужності був оцінений шляхом створення буферної зони в ГІС. Мінімальна відстань 450 м від місця встановлення вважається достатньою для того, щоб шумовий вплив був незначним. Рекомендована відстань від потужної вітротурбіни до зони постійного перебування людей (шумової зони) становить 350 м.

На наступному кроці використовується алгоритм розрахунку прямої видимості для обчислення точок, які можна спостерігати вздовж заданої лінії на поверхні місцевості. Такий розрахунок також вимагає визначення висоти спостерігача над поверхнею землі (НА) і висоти об'єкта спостереження над поверхнею землі (НВ) [5]. Алгоритм розрахунку прямої видимості складається з декількох етапів. На першому етапі створюється профіль вздовж заданої лінії. На наступному етапі для кожної точки профілю створюється відрізок АВ, де точка А відповідає позиції спостерігача, а точка В - точці спостереження (наступній точці профілю). Зауважимо, що точка А знаходиться на висоті НА над поверхнею землі, а точка В - на висоті НВ. Третій крок - перевірити, чи перетинається цей відрізок з раніше створеним профілем висот. Якщо перетину немає, точку В видно з точки А. На Рис. 7 точку В не видно, тому що відрізок АВ перетинає лінію профілю в позначеній на рисунку точці. Товста лінія показує частину профілю, де точку видно з точки А при $H_B = 0$.

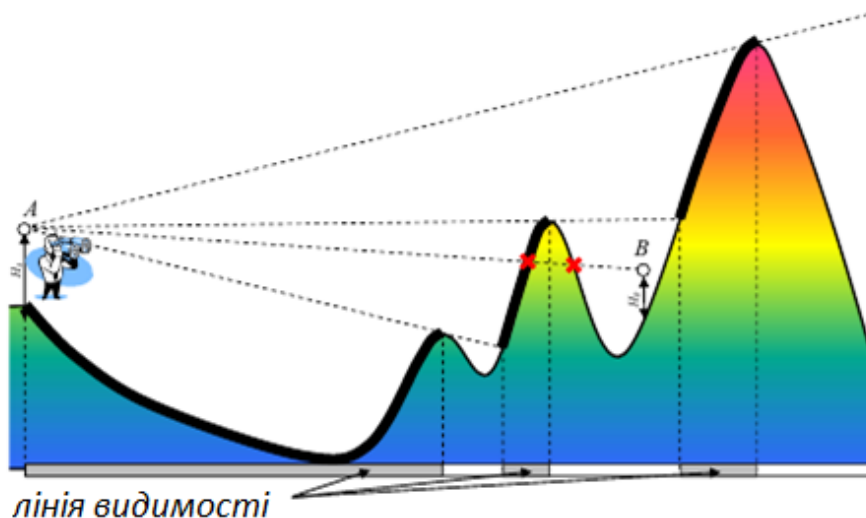


Рис. 7. Схема визначення ліній видимості

Результати роботи алгоритму можна візуалізувати у вигляді відрізків прямої видимості на електронних картах ГІС або у вигляді полігонів, що представляють видимі ділянки, спроектовані на 3D-модель місцевості. Якщо розрахунки стосуються значних відстаней, необхідно враховувати кривизну поверхні землі.

Продовженням попередніх розрахунків є розрахунок видимих або невидимих зон. У цьому завданні визначається область, в якій всі точки видно з заданої точки спостереження. У геоінформатиці існує два підходи до вирішення цієї задачі: автори обрали найбільш ефективний, який полягає у створенні радіальних, лінійних ліній видимості з центром у точці спостереження. Лінії видимості наносяться на карту під кутом, проведеним через певне кутове значення, наприклад, 5 градусів (Рис. 8). Перевагою цього методу є висока швидкість розрахунків, але недоліком - складність деталізації видимих і невидимих ділянок.

Це дослідження просторових характеристик ВЕС оцінює просторове розташування вітрових турбін по відношенню до таких елементів ландшафту, як топографія, контури населених пунктів і ліси. Топографічні умови досліджуваної території були отримані з сервісу OpenStreetMap у вигляді шейп-файлів FerGIS. Ці дані були скориговані та доповнені генеральним планом та супутниковими знімками високої роздільної здатності. Були внесені доповнення щодо адміністративних меж міста, поточного стану дорожньої мережі, ліній електропередач та забудови.

В якості топографічних даних для цієї території було використано глобальну модель SRTM (NASA, США). Ці версії були отримані з веб-сайту SRTM 90m Digital Elevation Databases ev4.1 (Рис. 8).



Рис. 8. Лінії видимості

Враховуємо взаємне розташування веж ВЕУ за допомогою інструменту GenerateNearTable в ArcToolBox. Створить таблицю положення (Рис. 9) (розраховані відстані та орієнтації між усіма об'єктами у всіх комбінаціях).

Якщо припустити, що діаметр вітрової турбіни становить 50 м, то найкоротша відстань - 201 м, тобто діаметр вітрової турбіни - 4 м. Напрямки до найближчої ВЕУ показують, що вежі не блокують одна одну по відношенню до вітрового потоку.

Це пояснюється тим, що напрямок до найближчої вежі становить 53° , що близько до зимового напрямку вітрового потоку 45° . Однак відстань між цими вежами становить 424 м, що нівелює «ефект паркування». Згідно з результатами моделювання, ділянка в цілому придатна будівництва ВЕС із 6 веж висотою 80 – 100 м.

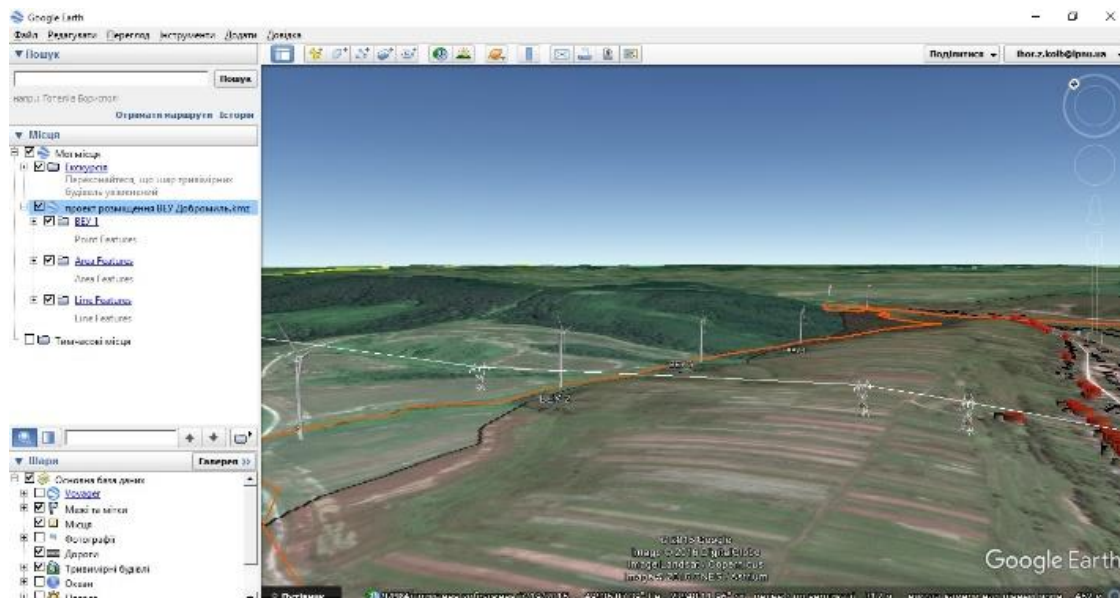


Рис. 9. Топографічні дані з веб-сайту SRTM 90m Digital Elevation Databases ev4.1

У даній роботі, як засіб тривимірного моделювання проєктованого вітропарку використано популярний і мабуть, всім відомий веб-картографічний сервіс GoogleEath.

Для досягнення натурального зображення моделі місцевості використано 3D моделі вітрогенераторів та веж високовольтних ліній електропередач.

Картографічні шари, що формують цифрову карту місцевості в ArcMap було експортовано у файл формату KMZ, який читається у сервісі GoogleEath (Рис.10).

Результатом моделювання є високоякісна, текстурована тривимірна модель місцевості. Модель повністю керована, тут можна змінювати масштаб, ракурс огляду, виконувати вимірювання площ, напрямків, відстаней. Елементи управління легкі для засвоєння широкого кола інтернет-користувачів.



Рис. 10. Результат тривимірного моделювання ВЕС в Полонині Руні в сервісі Google Eath

Полонина Руна

Доцільність розроблення детального плану території обумовлена інвестиційними пропозиціями щодо будівництва і функціонування вітрової електричної станції в межах ур. «Полонина Руна» за межами населених пунктів.

Детальний план території розробляється на земельні ділянки земель комунальної власності Тур'є-Реметівської сільської ради Ужгородського району Закарпатської області, які розташовані за межами населених пунктів, для розміщення на ур. «Полонина Руна» окремого об'єкта будівництва - об'єктів вітрової енергетики - відповідно до чинного законодавства з використанням матеріалів містобудівного та земельного кадастрів. У межі розроблення детального плану території увійшла вся полонина, окрім вершинної частини, де знаходяться руїни військового комплексу «Барс».

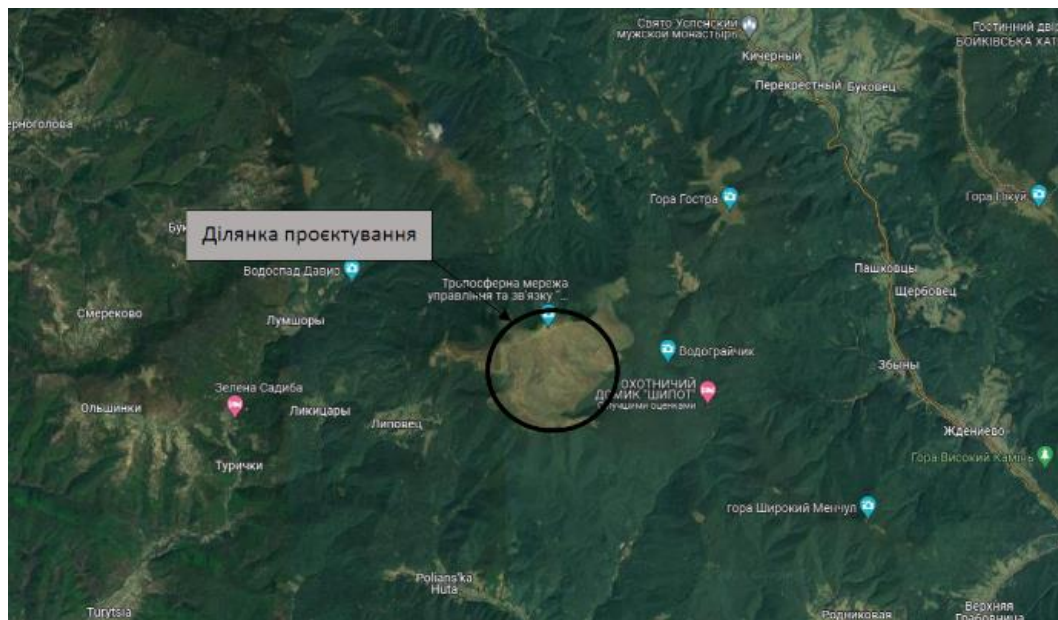


Рис. 11. Розташування ділянки проєктування на Google картах

На рисунку нижче надається викопіювання зі Схеми планування Закарпатської області, на якому зазначені межі території гірничо-рекреаційного комплексу з центром у с. Лумшори.



**Рис. 12. Випокіювання зі Схеми планування території
Закарпатської області**

Згідно даного картографічного матеріалу та даних земельного кадастру України розроблення детального плану території в проектних межах не суперечить Схемі планування Закарпатської області.

Проектом пропонується розміщення на Полонині Руні 30 вітряків, типу WTU 5,2, номінальною потужністю до 5,2 МВт, з висотою щогли 100 метрів, та розмахом лопастей 151 метри. Тобто максимальна висота конструкції може досягати 175 метра.

Згідно розрахунку рози вітрів території було прийнято рішення щодо розміщення 30 вітроелектростанцій на найвищих точках території полонини - на її умовних водорозділах (хребтах Полонини), оскільки згідно проведених розрахунків в даних місцях достатньо хороший вітер.

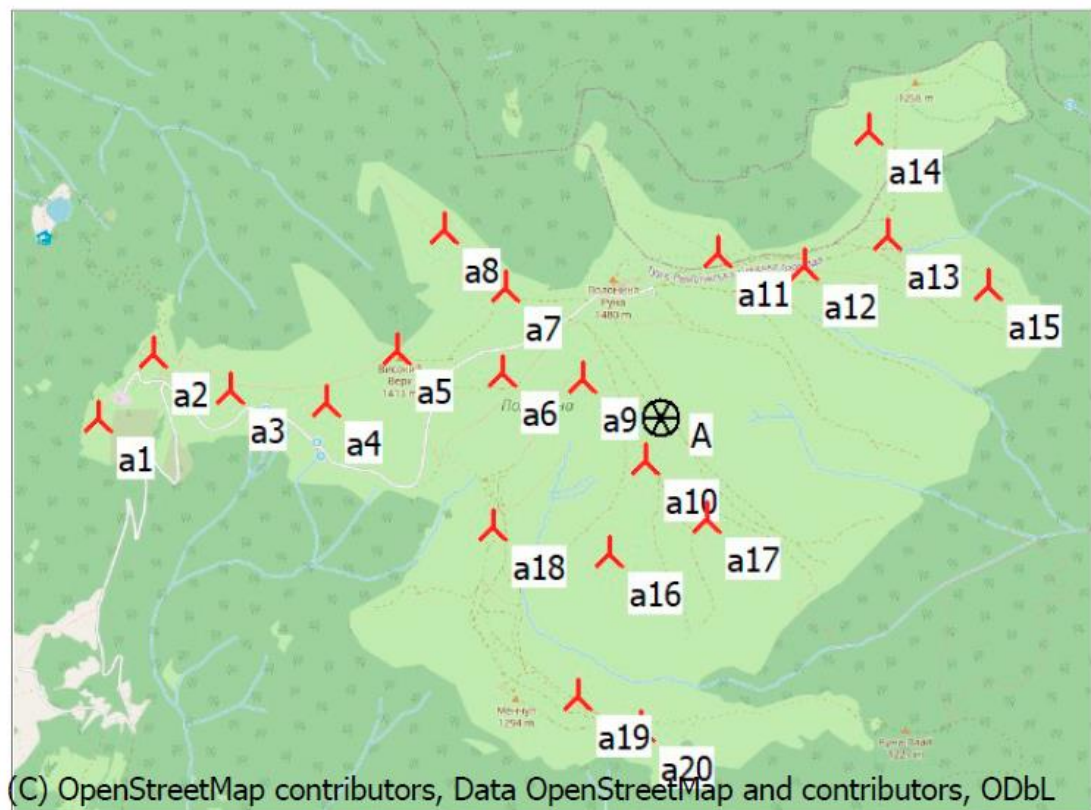


Рис. 13. Найкращі місця для розміщення вітроустановок на території Полонини Руни

Вітроенергетичні установки (ВЕУ) - це силові установки з регульованою швидкістю, що живляться від інверторів з ротором з трьома лопатями у вигляді установки, спрямованої проти вітру. Змінна швидкість досягається за допомогою частотного регулювання фазної обмотки статора синхронного генератора.

Суттєвою особливістю сучасних моделей ВЕУ є низька швидкість обертання ротора. За рахунок інновацій в конструкції силових передач

швидкість обертання ротора знижена. Завдяки цьому істотно знижений рівень шуму від ВЕУ і, крім того, значно зменшений ризик зіткнення птахів з рухомими лопатями ВЕУ.

Загалом кожна ВЕУ має типову площадку після закінчення будівництва, а в даному випадку територія буде повністю озеленена, навіть площадку для обслуговування пропонується зберігати в озеленому виді, для забезпечення збереження території і унеможливлення фрагментації та зменшення негативних наслідків на довкілля.

Головна споруда – це щогла ВЕУ, трансформаторна яка знаходиться всередині щогли (для забезпечення можливості відкритого доступу до території), та площадка для обслуговування.

Типова площадка для ВЕУ показана на рис. 14.

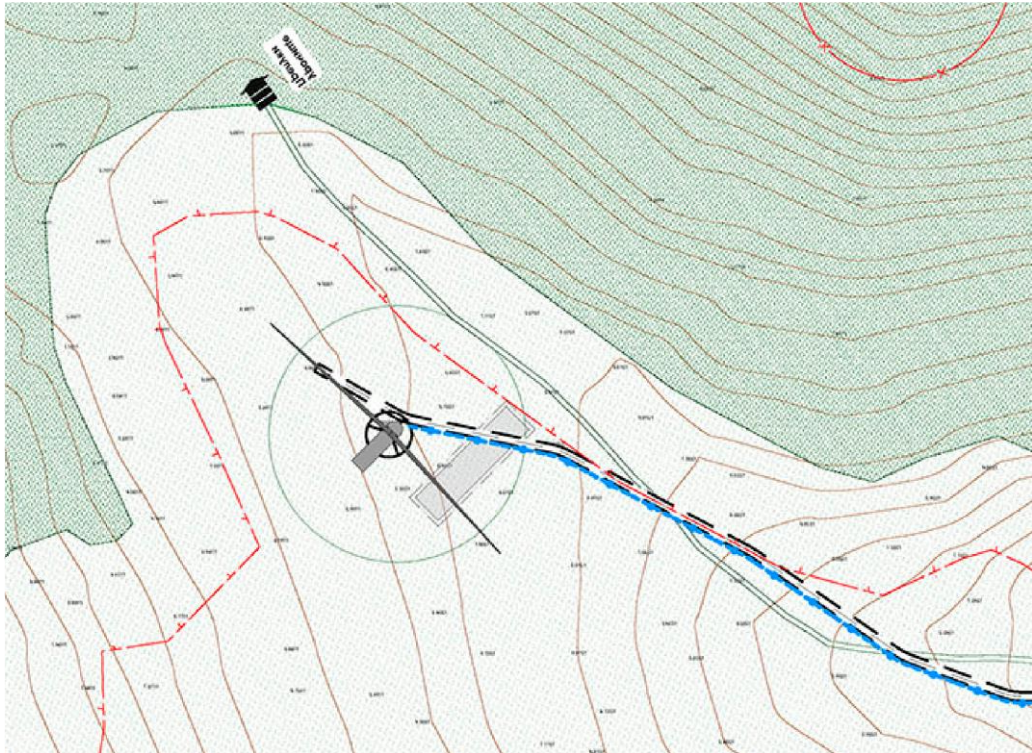


Рис. 14. Типова площадка ВЕУ

Конструктивно вітроенергетична установка являє собою конусоподібну вежу, на верхівці якої розташована гондола з ротором та лопаті.

ВЕУ оснащена автоматизованою системою безпеки, яка забезпечує безпечну роботу ВЕУ при відмові системи контролю, поломках компонентів або систем. Для визначення помилок в роботі приводів головних компонентів

ВЕУ забезпечується системою контролю стану. Установка забезпечується високоефективною системою блискавкозахисту.

Висновки. Оцінка впливу місця розташування вітроелектростанції на навколишнє середовище за допомогою геоінформаційних систем є важливим інструментом у процесі планування та реалізації проєктів у сфері відновлюваної енергетики. Використання ГІС дозволяє комплексно аналізувати просторові дані, моделювати екологічні ризики та враховувати такі фактори, як рельєф місцевості, біорізноманіття, рівень шумового впливу та можливі соціально-економічні наслідки.

Результати дослідження показують, що інтеграція ГІС у процес вибору місця розташування ВЕС сприяє мінімізації негативного впливу на довкілля та забезпечує баланс між розвитком вітроенергетики та збереженням природної середовища. Завдяки просторовому аналізу можна визначити оптимальні зони для встановлення ВЕС, які забезпечуватимуть максимальну ефективність виробництва енергії та водночас не зашкодять екосистемам та місцевому населенню. Показано можливість ефективного аналізу виявлення проблем та переваг у просторовому розташуванні вітрових енергетичних установок.

Таким чином, будівництво ВЕС є альтернативою і екологічно доцільною формою користування невичерпних і поновлюваних енергетичних ресурсів, практично не вимагає активної і глибокої експлуатації території.

Крім того, будівництво вітроелектростанцій дозволить підвищити стабільність забезпечення електроенергією промислових та комунальних підприємств в умовах дефіциту енергоносіїв в Україні.

Список використаних джерел

1. Відновлювані джерела енергії / за заг. ред. С. О. Кудрі. – Київ : Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с.
2. Віхарєв Ю. О., Радиш І. П. Роль використання поновлюваних джерел енергії в Закарпатті – регіоні оперативного моніторингу транскордонних переносів шкідливих речовин // Праці Міжнародного енергоекологічного конгресу «Енергетика. Екологія. Людина». – Київ : Українські енциклопедичні знання, 2003. – С. 147–149.

3. Денисюк С. П., Радиш І. П., Негодуйко В. О., Пертко П. П. Гармонійний розвиток енергетики – запорука сталого розвитку України // Тези доп. Міжнародної науково-практичної конференції «Карпатська конференція з проблем охорони довкілля». – Мукачєво–Ужгород, 2011. – С. 187–188.

4. Глобальний атлас вітрів. URL: <https://globalwindatlas.info/en/> (дата звернення: 25.09.2025).

5. Енергоефективність та напрями самоенергозабезпечення регіонів на прикладі Закарпаття / Денисюк С. П., Віхарєв Ю. О., Радиш І. П., Гололобов О. І., Ковальов О. В., Машкара О. Г. ; за ред. Ковалка М. П. – Київ : Українські енциклопедичні знання, 2000. – 118 с.

6. Інформаційні технології у вирішенні завдань забезпечення безпеки життєдіяльності людини, ергономіки, охорони праці і навколишнього середовища : монографія : у 2 ч. / за ред. Я. О. Серікова ; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків : ХНАМГ, 2013–2014. – ISBN 978-966-695-296-0. Ч. 2 : Вітроелектричні станції / Я. О. Серіков, О. М. Діденко, В. Е. Лісичин ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ, 2014. – 183 с.

7. Кудря О. С. Перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні. Розвиток вітроенергетики та сонячної енергетики : презентація. URL: https://ua-energy.org/upload/files/16{EIF_Kudria.ppt (дата звернення: 25.09.2025).

8. Кудря С. О., Яценко Л. В., Душина Г. П. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії. – Київ : Інститут електродинаміки НАНУ, 2001. URL: <https://saee.gov.ua/sites/default/files/Kudria.pdf> (дата звернення: 25.09.2025).

9. Лопушанська М. Р., Іванов Є. А., Вижва А. М., Циганок Л. В. Методика оцінки впливу на довкілля для об'єктів відновлюваної енергетики (на прикладі об'єктів вітрової енергетики у Львівській області) // Екологічні науки : наук.-практ. журн. – 2024. – № 1 (52). – Т. 1. – С. 126–133. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.19> (дата звернення: 25.09.2025).

10. Метеорологічне забезпечення та обслуговування. URL: https://meteo.gov.ua/files/content/docs/meteo_kerdoc/Nastanova%20z%20gydrometzabezpechennja.pdf (дата звернення: 25.09.2025).

11. Сиротюк М., Гринда О. Методичні аспекти оцінювання вітроенергетичного потенціалу // Вісник Львів. ун-ту. Серія геогр. – 2011. – Вип. 39. – С. 313–319.

12. Основи вітроенергетики : підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д. : НГУ, 2015. – 335 с. URL: <https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/%D0%9E%D0%92-2015-02-11.pdf> (дата звернення: 25.09.2025).

13. Офіційний веб-сайт Української вітроенергетичної асоціації. URL: <http://www.uwea.com.ua/press.php> (дата звернення: 25.09.2025).

14. Павлига А. В., Дубінін Ю. С. Еколого-правові вимоги до розміщення та функціонування об'єктів вітрової енергетики в Україні // Юридичний науковий електронний журнал. – 2021. – № 11. – С. 341–345.

15. Планування та розміщення ВЕУ. URL: <http://xn--drmstrre-64ad.dk> (дата звернення: 25.09.2025).

16. Поп С. С., Пересоляк В. Ю., Потіш Л. А., Приходько В. П. Звіт з оцінки впливу на довкілля «Товариство з обмеженою відповідальністю “Атлас Воловець Енерджи”», номер реєстраційної справи у Єдиному реєстрі з ОВД 2018821379. URL: https://ecozakarpat.gov.ua/?page_id=4743 (дата звернення: 25.09.2025).

17. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання : розпорядження Кабінету Міністрів України від 13.08.2024 № 761-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 25.09.2025).

18. Про регулювання містобудівної діяльності : Закон України від 17.02.2011 № 3038-VI // Відомості Верховної Ради України. – 2011. – № 34. – Ст. 343.

19. Про стратегічну екологічну оцінку : Закон України від 20.03.2018 № 2354-VIII // Відомості Верховної Ради України. – 2018. – № 16. – Ст. 138.

20. Розпорядження Кабінету України «Про Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року» від 13 серпня 2024 р. № 761-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text> (дата звернення: 25.09.2025).

21. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року: розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#n6> (дата звернення: 25.09.2025).

References

1. Kudria, S. O. (Ed.). (2020). Vidnovliuvani dzherela enerhii [Renewable energy sources]. Kyiv: Institute of Renewable Energy of NASU. 392 p.

2. Vikhariev, Yu. O., & Radysh, I. P. (2003). Rol' vykorystannia ponovliuvanykh dzherel enerhii v Zakarpatti – rehioni operatyvnoho monitorynhu transkordonnykh perenosiv shkidlyvykh rehovyn. In Proceedings of the International Energy-Ecological Congress “Enerhetyka. Ekolohiia. Liudyna” (). Kyiv: Ukrainski entsyklopedychni znannia. 147–149 pp.

3. Denysiuk, S. P., Radysh, I. P., Nehoduiko, V. O., & Pertko, P. P. (2011). Harmonijnyi rozvytok enerhetyky – zaporuka staloho rozvytku Ukrainy. In Proceedings of the International Scientific-Practical Conference “Carpathian Conference on Environmental Protection Issues” Mukachevo–Uzhhorod. 187–188 pp.

4. Global Wind Atlas. (n.d.). Global Wind Atlas. Available at: <https://globalwindatlas.info/en/>.

5. Denysiuk, S. P., Vikhariev, Yu. O., Radysh, I. P., Hololobov, O. I., Kovaliov, O. V., & Mashkara, O. H. (2000). Enerhoefektyvnist' ta napriamy samoenerhozabezpechennia rehioniv na prykladi Zakarpattia (M. P. Kovalko, Ed.). Kyiv: Ukrainski entsyklopedychni znannia. 118 p.

6. Serikov, Ya. O. (Ed.). (2014). Vitroelektrychni stantsii [Wind power stations]. In Information technologies in solving safety, ergonomics, labor protection and environmental tasks (Vol. 2). Kharkiv: KhNUMG. 183 p.

7. Kudria, O. S. (n.d.). Perspektyvy rozvytku vidnovliuvanoi enerhetyky v Ukraini. Rozvytok vitroenerhetyky ta soniachnoi enerhetyky [Presentation]. Available at: https://ua-energy.org/upload/files/16{EIF_Kudria.ppt.

8. Kudria, S. O., Yatsenko, L. V., & Dushyna, H. P. (2001). Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh ta netradytsiinykh dzherel enerhii. Kyiv: Institute of Electrodynamics of NASU. Available at: <https://saee.gov.ua/sites/default/files/Kudria.pdf>.

9. Lopushanska, M. R., Ivanov, Ye. A., Vyzhva, A. M., & Tsyhanok, L. V. (2024). Metodyka otsinky vplyvu na dovkillia dlia obektiv vidnovliuvanoi enerhetyky (na prykladi vitrovoi enerhetyky u Lvivskii oblasti). *Ekologichni nauky*, 1(52), 126–133 pp. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.19>.

10. Ukrainian Hydrometeorological Center. (n.d.). Meteorologichne zabezpechennia ta obsluhovuvannia [Meteorological support and service]. Available at: https://meteo.gov.ua/files/content/docs/meteo_kerdoc/Nastanova%20z%20gydrometzabezpechennja.pdf.

11. Syrotiuk, M., & Hrynda, O. (2011). Metodichni aspekty otsiniuvannia vitroenerhetychnoho potentsialu. *Visnyk Lvivskoho Universytetu. Seriiia Heohrafiia*, 39, 313–319 pp.

12. Pivniak, H., Shkrabets, F., Neuberger, & Tsyplenkov, D. (2015). *Osnovy vitroenerhetyky [Fundamentals of wind energy]*. Dnipro: National Mining University. Available at: <https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/%D0%9E%D0%92-2015-02-11.pdf>.

13. Ukrainian Wind Energy Association. (n.d.). Official website. Available at: <http://www.uwea.com.ua/press.php>.

14. Pavlyha, A. V., & Dubinin, Yu. S. (2021). Ekolohopravovi vymohy do rozmishchennia ta funksiionuvannia obektiv vitrovoi enerhetyky v Ukraini. *Yurydychnyi naukovi elektronnyi zhurnal*, 11, 341–345 pp.

15. Planuvannia ta rozmishchennia VEU. (n.d.). Available at: <http://xn--drmstrre-64ad.dk>.
16. Pop, S. S., Peresoliak, V. Yu., Potish, L. A., & Prykhodko, V. P. (n.d.). Zvit z otsinky vplyvu na dokillia "Atlas Volovets Energy". Available at: https://ecozakarp.at.gov.ua/?page_id=4743.
17. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024). Pro zatverdzhennia Natsionalnoho planu dii z vidnovliuvanoi enerhetyky na period do 2030 roku [Order No. 761-p]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text>.
18. Verkhovna Rada of Ukraine. (2011). Pro rehuliuвання mistobudivnoi diialnosti [Law No. 3038-VI]. Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy, 34, Article 343p.
19. Verkhovna Rada of Ukraine. (2018). Pro stratehichnu ekolohichnu otsinku [Law No. 2354-VIII]. Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy, 16, Article 138p.
20. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2024). Pro Natsional'nyi plan dii z vidnovliuvanoi enerhetyky na period do 2030 roku [On the National Action Plan for Renewable Energy until 2030] (Order No. 761-p). Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text>.
21. Cabinet of Ministers of Ukraine. (2023). Pro skhvalennia Enerhetychnoi stratehii Ukrainy na period do 2050 roku [Order No. 373-p]. Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#n6On>.

V. Peresoliak , I. Radish , I. Krylyo

APPLICATION OF GIS TECHNOLOGIES TO ASSESS THE IMPACT ON THE SURROUNDING ENVIRONMENT OF THE LOCATION OF WIND POWER PLANTS USING THE EXAMPLE OF "POLONYNA RUNA" OF THE TURYE-REMETIVSKAYA AH COMMUNITY

In the current context of renewable energy development, the most important task is to minimize the environmental impact of wind farms (WPPs) on the environment. The use of geographic information systems (GIS) allows for effective

analysis and modeling of the impact of WPP placement, taking into account environmental, landscape, climatic and social factors. The article considers the use of geographic information systems (GIS) to assess the environmental impact of the location of a wind farm (WPP) on the territory of the "Polonyna Runa" tract of the Turye-Remetivka territorial community.

The study involves the collection and processing of spatial data, including relief, wind speed and direction, the presence of protected areas and habitats of sensitive flora and fauna. GIS will be used to analyze visual and noise impacts, assess risks to biodiversity and public health, and model alternative siting options.

The assessment results contribute to making informed decisions regarding the choice of a location for wind power plants, reducing negative environmental impact and ensuring a balance between the development of green energy and the preservation of the natural environment.

Keywords: *wind energy, environmental impact assessment, geographic information systems, spatial planning, sustainable development of territories, renewable energy sources, decarbonization, CO2 emissions.*