

Міністерство освіти і науки України
Луцький національний технічний університет

(повне найменування вищого навчального закладу)
Факультет аграрних технологій та екології

(повне найменування факультету)
Кафедра екології

(повне найменування кафедри)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»

МОЖЛИВІСТЬ РОЗШИРЕНОГО РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ У
ЛІСОСТЕПОВІЙ ЗОНІ ВОЛИНСЬКОЇ ОБЛАСТІ

спеціальність 101 Екологія
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Екологія»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ЕОСЗ - 41

БАГНЮК Іван Іванович

(підпис)

Керівник:

к.геогр.н., доцент

ФЕДОНЮК Віталіна Володимирівна

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» _____ 20__ р.

к.геогр.н., доцент

Гарант освітньої програми:

Федонюк Віталіна Володимирівна

(підпис)

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет аграрних технологій та екології

Кафедра екології

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 10 Природничі науки

Спеціальність: 101 Екологія

Освітня програма: «Екологія»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«__» _____ 2026 р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Багноку Івану Івановичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи:

Можливість розширеного розвитку вітроенергетики у Лісостеповій зоні Волинської області

Керівник роботи: Федонюк Віталіна Володимирівна, к. геогр. н., доцент

затверджені наказом закладу вищої освіти від «__28__» лютого__ 2026__ р. № 102/01-02_

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: «__01__» червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: літературні джерела, статистична та довідкова

література, інформація з відкритих джерел, дані власних аналітичних та статистичних досліджень, практичних оцінок і розрахунків.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, що потрібно розробити): 1) Загальна фізико-географічна характеристика території дослідження 2) Загальні засади розвитку вітроенергетики та актуальний стан у Волинській області. 3) Особливості просторово-часової динаміки вітрового режиму в межах Лісостепової зони Волинської області. 4) Розробка рекомендацій щодо впровадження малої вітроенергетики у Лісостеповій зоні Волинської області. 5) Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу: 1. Картографічна, статистична і аналітична характеристика розвитку вітроенергетики в Україні. 2. Статистично-графічний аналіз кліматичних чинників, що визначають розвиток вітроенергетики. Таблиці, графіки, діаграми. 3. Перспективи розширеного використання малої вітрогенерації: наявні пропозиції на ринку України та їх порівняльний аналіз. 4. Рекомендовані напрямки розвитку вітроенергетики і впровадження малих ВЕС на Волині (Лісостепова зона). 6. Висновки і рекомендації.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « ____ » _____ 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи бакалавра	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Вибір та обґрунтування теми</i>	<i>Вересень - Жовтень 2025</i>	
2.	<i>Огляд літератури із досліджуваної проблеми</i>	<i>Листопад – Грудень 2025</i>	
3.	<i>1 розділ</i>	<i>Листопад – Грудень 2025</i>	
4.	<i>2 розділ</i>	<i>Січень – Березень 2026</i>	
5.	<i>3 розділ</i>	<i>Березень – Квітень 2026</i>	
6.	<i>Висновки та пропозиції</i>	<i>Квітень – Травень 2026</i>	
7.	<i>Формування списку використаних джерел</i>	<i>Квітень 2026</i>	
8.	<i>Формування додатків</i>	<i>Травень 2026</i>	
9.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	<i>Травень 2026</i>	
10.	<i>Нормоконтроль</i>	<i>Травень 2026</i>	
11.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	<i>До 01.06.2026</i>	
12.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту</i>	<i>10.06.2026</i>	

Здобувач вищої освіти _____ (_____) (_____)
(підпис) (прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи _____ (_____) (_____)
(підпис) (прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Багнюк І.І. Можливість розширеного розвитку вітроенергетики у Лісостеповій зоні Волинської області. Рукопис.

Кваліфікаційна робота бакалавра ОП «Екологія» спеціальності 101 Екологія. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

Кваліфікаційна робота бакалавра складається з 3 розділів, вступу, висновків, переліку посилань та додатків.

Об'єктом даного дослідження є вітровий режим у Лісостеповій зоні Волинської області та можливості використання вітроенергетичного потенціалу у даному регіоні.

Методи дослідження, які були використані при написанні кваліфікаційної роботи бакалавра: збір інформації, аналіз і синтез, порівняння і аналогія, статистичне опрацювання числових рядів, даних натурних спостережень і обстежень, статистична обробка, осереднення, графічна інтерпретація характеристик вітрового режиму (за даними метеостанції Луцьк) та динаміки досліджуваних показників.

У першому розділі кваліфікаційної роботи бакалавра проаналізовано методику та методологію проведених досліджень, а також зроблено узагальнюючий аналіз основних понять та теоретико-методологічних засад використання відновлювальних джерел енергії у наш час, зокрема, в Україні та на Волині, основних складових відновлювальних джерел енергетичних ресурсів.

У другому розділі кваліфікаційної роботи бакалавра розглянуто основні аспекти сучасного кліматичного і, зокрема, вітрового режиму у Лісостеповій зоні Волинської області (за даними метеостанції Луцьк), його динаміку в часі та зміни в контексті особливостей регіональних проявів глобальних кліматичних змін в Північно-Західному Поліссі.

У третьому розділі проаналізовано наявні можливості та перспективи розширеного використання вітроенергетичного потенціалу у досліджуваному

регіоні в контексті необхідності та важливості переходу до розширеного використання альтернативних відновлювальних джерел енергії у наш час.

Результати виконання кваліфікаційної роботи бакалавра: проаналізовано фізико-географічні умови Лісостепової зони Волинської області, її природний потенціал, що визначає кліматичні особливості та впливає на впровадження альтернативної енергетики. Проведено деталізований аналіз сучасного вітрового режиму за даними метеостанції Луцьк, його числових та графічних характеристик. Визначено перелік та пріоритетність рекомендованих заходів, що спрямовані на збільшення використання вітроенергетичного потенціалу у Лісостеповій зоні Волинської області, яка має для цього більш сприятливі показники, ніж зона Полісся. Розроблено систему першочергових заходів при розширенні впровадження малої вітроенергетики. Розглянуто наявні практичні кейси (вітропарк поблизу міста Володимира). Оцінено перспективи розширеного використання відновлювальних джерел енергії в регіоні в контексті необхідності формування енергонезалежності України в умовах повномасштабної війни, розв'язаної проти нашої держави.

Ключові слова: Лісостепова зона, Волинська область, швидкість вітру, напрямок вітру, вітроенергетичний потенціал, відновлювальні джерела енергії, альтернативна енергетика.

ANNOTATION

Baqniuk I.I. The possibility of expanded development of wind energy in the Forest-Steppe zone of Volyn region.

Qualification work of the bachelor of EP "Ecology" specialty 101 Ecology. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The bachelor's thesis consists of 3 sections, introduction, conclusions, list of references and appendices.

The object of this study is the wind regime in the Forest-Steppe zone of the Volyn region and the possibilities of using wind energy potential in this region.

Research methods that were used when writing the bachelor's qualification work: information collection, analysis and synthesis, comparison and analogy, statistical processing of numerical series, data from field observations and surveys, statistical processing, averaging, graphic interpretation of the characteristics of the wind regime (according to data from the Lutsk weather station) and the dynamics of the studied indicators.

The first section of the bachelor's qualification work analyzes the methodology and methodology of the research conducted, and also makes a general analysis of the basic concepts and theoretical and methodological principles of the use of renewable energy sources in our time, in particular, in Ukraine and Volyn, the main components of renewable energy sources.

The second section of the bachelor's qualification work considers the main aspects of the modern climatic and, in particular, wind regime in the Forest-Steppe zone of the Volyn region (according to the Lutsk weather station), its dynamics over time and changes in the context of the features of regional manifestations of global climate change in North-Western Polissya.

The third section analyzes the existing opportunities and prospects for the expanded use of wind energy potential in the studied region in the context of the necessity and importance of the transition to the expanded use of alternative renewable energy sources in our time.

Results of the bachelor's qualification work: the physical and geographical conditions of the Forest-Steppe zone of the Volyn region, its natural potential, which determines the climatic features and affects the implementation of alternative energy, were analyzed. A detailed analysis of the modern wind regime was conducted according to the data of the Lutsk weather station, its numerical and graphical characteristics. The list and priority of recommended measures aimed at increasing the use of wind energy potential in the Forest-Steppe zone of the Volyn region, which has more favorable indicators for this than the Polissya zone, has been determined. A system of priority measures for expanding the implementation of small-scale wind energy has been developed. Existing practical cases have been considered (a wind farm near the city of Volodymyr). The prospects for the expanded use of renewable energy sources in the region have been assessed in the context of the need to form Ukraine's energy independence in the conditions of a full-scale war unleashed against our state.

Keywords: Forest-Steppe zone, Volyn region, wind speed, wind direction, wind energy potential, renewable energy sources, alternative energy.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1. ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ТА СУЧАСНІ АСПЕКТИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ.....	13
1.1. Методологічна база проведеного дослідження.....	13
1.2. Актуальність використання альтернативних джерел енергії.....	15
1.3. Поняття та види альтернативних енергетичних ресурсів.....	16
1.4. Характеристики вітроенергетичного потенціалу певної території..	22
1.5. Вплив вітроенергетичних установок на довкілля.....	24
Висновки до розділу 1.....	31
РОЗДІЛ 2. СУЧАСНИЙ РОЗВИТОК ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ.....	33
2.1. Основні особливості сучасного розвитку вітрової енергетики.....	33
2.2. Становлення і сучасний стан вітроенергетики у світі та в Україні.....	35
2.3. Регіональні особливості вітроенергетичного сектору в Україні.....	35
2.4. Переваги та недоліки впровадження вітроенергетики.....	38
Висновки до розділу 2	40
РОЗДІЛ 3. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ У ЛІСОСТЕПОВІЙ ЗОНІ ВОЛИНСЬКОЇ ОБЛАСТІ.....	42
3.1. Загальна характеристика Лісостепової зони Волинської області.....	42
3.2. Сучасний стан вітроенергетики у Волинській області.....	46
3.3. Методика оцінки вітроенергетичного потенціалу території.....	48
3.4. Оцінка параметрів вітроенергетичного потенціалу Волинського Лісостепу.....	56
Висновки до розділу 3	61
ВИСНОВКИ.....	63
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	65

ВСТУП

У сучасних умовах перехід системи виробництва електроенергії та задоволення енергетичних потреб як на рівні держави, так і на рівні окремих домогосподарств із використанням альтернативних джерел енергії розглядається як одне з ключових екологічних завдань. Його значення виходить далеко за межі локального масштабу, оскільки воно має вагомий вплив на глобальні процеси. Концепція так званої «зеленої енергетики» сьогодні сприймається не лише як інструмент зміцнення енергетичної незалежності держав і регіонів, але й як важливий напрям подолання загальносвітових екологічних викликів. Серед них особливої уваги потребують проблема зміни клімату, забруднення природних компонентів довкілля, деградація екосистем та інші негативні наслідки антропогенного впливу на природне середовище.

Для України питання розвитку відновлюваної енергетики набуло особливої актуальності у зв'язку з війною, розв'язаною росією. За таких умов формування повноцінного сектору «зеленої» енергетики та активний перехід до використання відновлюваних джерел електроенергії стають важливими елементами забезпечення енергетичної безпеки держави. Залежність від вуглеводневих ресурсів країни-агресора давно є неприйнятною, тоді як власні поклади нафти й природного газу на території України є досить обмеженими. Додатковою проблемою стало й те, що значна частина родовищ кам'яного вугілля, які традиційно розроблялися в межах Донбасу, нині перебуває поза доступом. Навіть у перспективі після звільнення регіону відновлення їх повноцінної експлуатації ускладнюється масштабними руйнуваннями інфраструктури, наслідками бойових дій, мінною небезпекою та депопуляцією цих територій. Усі зазначені обставини зумовлюють необхідність пошуку та активного впровадження альтернативних джерел енергії, серед яких важливе місце займає використання потенціалу вітру.

Вітроенергетичний потенціал є одним із важливих природних ресурсів, що може ефективно використовуватися для виробництва електроенергії альтернативним способом. Його застосування поширюється як у межах

індивідуальних господарств, так і на рівні державних енергетичних систем. Саме тому дослідження можливостей використання енергії вітру та оцінка її потенціалу набувають значної наукової і практичної актуальності, що й зумовило вибір теми даної кваліфікаційної роботи бакалавра.

Метою роботи є дослідження особливостей вітрового режиму та оцінка вітроенергетичного потенціалу Лісостепової зони Волинської області, а також аналіз змін, що відбуваються у характеристиках вітру в умовах глобального потепління та його регіональних проявів.

Для досягнення поставленої мети було визначено такі *завдання*:

- 1) на основі опрацювання наукових і літературних джерел проаналізувати чинники формування та змін основних характеристик вітроенергетичного потенціалу у межах Лісостепової зони Волинської області (за даними метеостанції Луцьк);
- 2) дослідити екологічні наслідки функціонування вітроенергетичних установок у процесі їх експлуатації;
- 3) здійснити аналіз динаміки вітрового режиму в Лісостеповій зоні Волинської області з використанням показників багаторічної кліматичної норми та встановити наявність можливих регіональних проявів кліматичних змін, що впливають на формування вітроенергетичного потенціалу;
- 4) визначити основні параметри вітроенергетичного потенціалу для території дослідження, виконати статистичні розрахунки та представити результати у вигляді таблиць, графіків і діаграм із подальшою їх графічною інтерпретацією.

Об'єктом дослідження виступає вітроенергетичний потенціал південної частини території Волинської області (Лісостеп) та його динаміка. Предметом дослідження є особливості взаємодії та взаємовпливу показників вітроенергетичного потенціалу і характеристик вітрового режиму в межах даної території. У процесі виконання роботи застосовувалися такі методи дослідження: оціночний, описовий, аналітичний, порівняльний, статистико-

математичний, метод моделювання, методи інформаційно-комунікаційних технологій, а також графічні методи обробки та представлення результатів.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було також використано інструменти штучного інтелекту (ШІ) для редагування і форматування тексту теоретичних розділів виключно як допоміжний засіб для уточнення формулювань, опрацювання літературних джерел, графічного представлення результатів дослідження. Усі твердження, результати та висновки належать автору і ґрунтуються на власному аналізові досліджених матеріалів.

Практичне значення дослідження полягає у можливості використання отриманих результатів у різних напрямках наукової, освітньої та прикладної діяльності. Матеріали роботи можуть бути корисними у навчальному процесі закладів вищої освіти під час викладання дисциплін екологічного, географічного та природоохоронного спрямування, зокрема при вивченні питань екології, відновлюваної енергетики, кліматології, урбоекології та раціонального використання природних ресурсів. Результати проведеного дослідження можуть застосовуватися також під час підготовки навчально-методичних матеріалів, виконання студентських наукових робіт, курсових і дипломних досліджень, а також у процесі популяризації знань про можливості використання альтернативних джерел енергії.

Окрім освітньої сфери, отримані результати можуть мати практичне значення для впровадження та розвитку альтернативних вітроенергетичних установок на території нашого регіону. Проведений аналіз особливостей вітрового режиму та оцінка вітроенергетичного потенціалу можуть бути використані під час планування розміщення об'єктів малої та середньої вітроенергетики, визначення найбільш сприятливих ділянок для встановлення вітроенергетичних установок, а також для підвищення ефективності їх експлуатації. Це, у свою чергу, сприятиме зростанню частки відновлюваних джерел енергії у структурі енергоспоживання Волинської області та підвищенню рівня її енергетичної незалежності.

Матеріали дослідження можуть бути корисними і для органів місцевого самоврядування та фахівців, що займаються просторовим плануванням та розвитком територій. Зокрема, результати аналізу вітрового режиму можуть враховуватися під час розроблення містобудівної документації, планування забудови нових житлових кварталів, реконструкції існуючих мікрорайонів, а також при визначенні оптимального розташування промислових підприємств або розширенні виробничих потужностей уже функціонуючих об'єктів. Урахування особливостей циркуляції повітряних мас та характеристик вітрового режиму є важливим фактором забезпечення комфортного та безпечного життєвого простору у населених пунктах.

Крім того, результати дослідження можуть бути використані для оцінювання особливостей поширення забруднюючих речовин у повітряному басейні регіону дослідження. Відомо, що швидкість і напрямок вітру суттєво впливають на процеси перенесення та розсіювання атмосферних домішок, тому аналіз цих показників може сприяти більш точному прогнозуванню екологічної ситуації у Волинській області.

Структура кваліфікаційної роботи бакалавра включає такі елементи, як вступ, три розділи основної частини, висновки та рекомендації, а також список використаних джерел. У вступі обґрунтовано актуальність теми дослідження, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет роботи, а також окреслено методи наукового аналізу. У першому розділі розглядаються теоретичні аспекти формування та використання вітроенергетичного потенціалу, аналізуються чинники, що впливають на вітровий режим, проведено огляд наукових джерел. У другому та третьому розділах проведено оцінку розвитку вітроенергетики в Україні та на Волині. У третьому розділі також наведено результати статистичних розрахунків, оцінено параметри вітроенергетичного потенціалу, а також представлено їх графічну інтерпретацію у вигляді таблиць, графіків і діаграм. У завершальній частині роботи сформульовано висновки дослідження та подано рекомендації щодо практичного використання отриманих результатів.

РОЗДІЛ 1. ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ТА СУЧАСНІ АСПЕКТИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ

Впровадження використання альтернативних джерел енергії в наш час – це не тільки данина забезпеченню «зеленого переходу» та підвищенню екологічності виробничих процесів, але й необхідність для нашої держави: вже чотири роки російські агресори намагаються знищити нашу централізовану систему енергопостачання та енергогенерації, і в таких умовах децентралізація цих систем та перехід до активного використання альтернативних енергетичних джерел – це нагальна необхідність.

Тому темою дослідження в кваліфікаційній роботі бакалавра було обрано аналіз можливостей використання вітроенергетики у межах Волинської області, зокрема – у тій частині нашого регіону, де природні умови є більш сприятливими для створення вітрогенеруючих об'єктів – зоні Лісостепу. На відміну від північних поліських районів, південь Волині характеризується більш горбистим рельєфом, складнішою експозицією схилів та дещо вищими показниками середніх швидкостей вітру.

Зупинимось детальніше на методології проведеного дослідження.

1.1. Методологічна база проведеного дослідження

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра та реалізації поставлених дослідницьких завдань було застосовано комплекс загальнонаукових і спеціальних методів. Зокрема, використано методи аналізу й синтезу для систематизації та узагальнення отриманої інформації, методи індукції та дедукції для формування логічних висновків, статистико-математичні прийоми опрацювання даних, графічні методи для наочного відображення результатів дослідження, а також методи польових натурних обстежень досліджуваної території. Крім того, у кваліфікаційній роботі застосовувалися й інші допоміжні підходи, що сприяли більш комплексному вивченню поставленої наукової проблематики [16, 19].

У процесі виконання дослідження було здійснено ґрунтовний аналіз наукових публікацій, монографій та інших джерел, присвячених темі роботи. Також було узагальнено значний масив інформації, отриманої з відкритих інформаційних ресурсів, зокрема з мережі Інтернет, електронних бібліотечних фондів, наукових архівів, матеріалів засобів масової інформації та інших доступних джерел.

Аналізуючи результати опрацювання наукової літератури, слід зазначити, що особливості вітрового режиму привертали увагу дослідників ще з давніх часів. Вивчення процесів формування вітрів, їх просторово-часової мінливості та основних числових характеристик (швидкості, напрямку, повторюваності, та інших) здійснювалося багатьма відомими вченими – метеорологами, фізиками та географами. До числа дослідників, які зробили вагомий внесок у дослідження закономірностей вітрового режиму та його параметрів в світі, належать Будде, Стокс, Вільсон, Обермайєр, Ассман, Вітте, Росс, Максвелл, Р.І. Грабовський, В.М. Оболенський та інші науковці [10, 17, 20, 25, 29].

Закономірності формування показників вітрового режиму, їх сезонна та річна мінливість у різних регіонах нашої держави, України, а також особливості розвитку атмосферних циркуляційних процесів досліджували також такі українські вчені, як Г.Ф. Прихотько, М.В. Буйков, В.М. Мучник, О. Шевченко, С. Сніжко, М.М. Талерко, О.Н. Сухінський, М.М. Акімов, І.А. Осокіна, Б.Н. Лесков, Г.М. Пірнач, М.В. Сирота, В.П. Баханов, О.А. Кривобок та багато інших дослідників [10, 14, 17, 20, 25, 29].

Наукові питання динаміки вітрового режиму на території Волинської області також знайшли відображення у працях низки вітчизняних науковців. Серед них слід відзначити дослідницькі роботи В.М. Бабіченка, М.Н. Сусідка, В.Р. Смітюха, І.М. Щербаня, І.К. Половка, Ф.П. Зузука, Я.О. Мольчака, В.П. Попова, В.М. Пищолки, Ф.П. Тарасюка, Н.А. Тарасюк, В.В. Федонюк та інших дослідників [2, 3, 11, 17, 22, 24, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 33]. При проведенні розрахунків показників вітрового режиму для Лісостепової зони Волинської області у межах даного дослідження в кваліфікаційній роботі бакалавра нами

також були використані архівні метеорологічні дані, надані Волинським обласним центром з гідрометеорології [1].

1.2. Актуальність використання альтернативних джерел енергії

Окремої уваги потребує розгляд актуальності дослідження можливостей використання альтернативних джерел енергії, зокрема енергії вітру, що набуває особливого значення в сучасних умовах.

Одним із важливих завдань сучасного етапу розвитку енергетики є вивчення потенціалу та перспектив ширшого застосування альтернативних енергетичних ресурсів (АЕР), які також часто називають відновлюваними енергетичними ресурсами (ВЕР). До їх складу як важливий елемент входить і вітроенергетичний потенціал території. Водночас слід зазначити, що не всі різновиди альтернативних джерел енергії можуть бути однаково ефективно використані на території України. Наприклад, ресурси геотермальної або моретермальної енергії мають обмежене поширення, тоді як використання енергії вітру та сонячної енергії вважається значно перспективнішим і є предметом активних наукових досліджень [16, 19].

Особливої актуальності питання розширення використання альтернативних джерел енергії набуло в умовах повномасштабної війни, розв'язаної проти України російською федерацією. У зв'язку з цим наша держава поступово відмовляється від використання традиційних вуглецевих енергоресурсів, які імпортувалися з країни-агресора, передусім природного газу та нафти. При цьому необхідно враховувати, що власні запаси вуглеводневих енергетичних ресурсів України є обмеженими, що додатково підсилює потребу у розвитку альтернативної енергетики [25, 36].

Ще одним важливим фактором, який стимулює Україну, її регіони та міста до активнішого впровадження відновлюваних джерел енергії, є проблема глобальних кліматичних змін. Вона обумовлює необхідність виконання нашою державою міжнародних зобов'язань щодо формування національно визначеного внеску у скорочення викидів парникових газів у атмосферу. Саме перехід до

використання відновлюваних джерел енергії у значних масштабах може стати ефективним інструментом досягнення цієї мети [16, 19].

Для території Волинської області найбільш перспективними з точки зору розширення використання є два основні види альтернативних енергетичних ресурсів – геотермальна енергія та енергія вітру. Інші види відновлюваних ресурсів, зокрема біоенергетичні або геотермальні, не мають такого значного потенціалу для масштабного виробництва електроенергії порівняно з названими джерелами вітрової та сонячної енергії. Водночас використання водневої енергетики також розглядається як перспективний напрям, однак наразі він перебуває переважно на стадії наукових досліджень і теоретичного обґрунтування, тоді як практичне впровадження технологій генерації водневої енергії поки що не набуло широкого поширення [6, 8, 9].

З огляду на це доцільно більш детально розглянути ключові аспекти розвитку вітрової енергетики як одного з видів альтернативних відновлюваних джерел енергії, проаналізувати основні проблеми, що виникають у процесі її використання, а також визначити перспективи подальшого розвитку цього напрямку на території Волинської області та безпосередньо в межах Лісостепової зони нашого регіону.

1.3. Поняття та види альтернативних енергетичних ресурсів

Альтернативними джерелами енергії зазвичай називають такі енергетичні ресурси, що мають потенціал до природного відновлення і можуть використовуватися людиною шляхом залучення різних природних процесів. До них належать енергія водних потоків, сила вітру, сонячне випромінювання, геотермальна енергія (тепло внутрішніх шарів Землі, гарячі джерела, підземні термальні води, гейзери, а також використання температурної різниці між поверхневими і більш глибокими шарами земної кори), енергія біомаси, що отримується шляхом спалювання органічної сировини або її переробки у рідкі чи газоподібні види біопалива, а також енергія морських припливів і відпливів. На відміну від традиційних викопних палив, до яких відносять нафту, природний

газ, кам'яне і буре вугілля, торф, горючі сланці та уранову руду, альтернативні джерела енергії характеризуються здатністю до постійного природного відтворення. Саме тому їх прийнято називати відновлюваними. Звісно, можна уявити гіпотетичну ситуацію, коли у надзвичайно віддаленому майбутньому припиниться випромінювання Сонця або зникне тепловий потік із надр Землі. У такому випадку потенціал сонячної чи геотермальної енергії також вичерпається. Проте подібні сценарії можливі лише у дуже далекій перспективі, тому на сучасному етапі розвитку цивілізації ці джерела розглядаються як практично невичерпні [16, 18, 25, 35, 37]. На сьогодні вони активно досліджуються та впроваджуються у багатьох країнах світу як перспективні й екологічно безпечні види енергетичних ресурсів, а ключовим питанням залишається передусім економічна доцільність їх використання в конкретних регіонах, у тому числі й на території Волинської області [16, 19].

У глобальному масштабі використання альтернативних джерел енергії постійно розширюється, а їхня частка у загальному виробництві електроенергії невідомо зростає. Так, лише протягом 2019 року у різних країнах світу було введено в експлуатацію об'єкти відновлюваної енергетики сумарною потужністю понад 200 ГВт.

Розглянемо коротко основні різновиди відновлюваних джерел енергії та специфіку їх застосування.

Сонячна енергія.

Сонце є головним і найпотужнішим джерелом енергії для нашої планети. За оцінками фахівців, щорічно на Землю надходить приблизно 173 ПВт (або 173 мільйони ГВт) сонячної енергії, що більш ніж у десять тисяч разів перевищує сучасні потреби людства в енергоресурсах. Фотоелектричні панелі, встановлені на дахах будівель або на спеціально відведених відкритих майданчиках, здатні перетворювати сонячне випромінювання на електроенергію завдяки використанню напівпровідникових матеріалів, найчастіше кремнію. Окрім цього, сонячні колектори широко застосовуються у багатьох країнах для

отримання теплової енергії, яка використовується для опалення приміщень, підігріву води та навіть для систем кондиціонування повітря [16].

Важливо зазначити, що сонячні батареї здатні генерувати електроенергію навіть у хмарну погоду або під час снігопаду, хоча їх ефективність у таких умовах дещо знижується. Для забезпечення максимальної продуктивності фотоелектричних систем панелі встановлюють під певним кутом до поверхні Землі. При цьому величина кута нахилу залежить від географічної широти місцевості: чим далі територія розташована від екватора, тим більшим має бути кут нахилу панелей відносно поверхні [16, 19].

Енергія вітру.

Використання сили вітру як рушійної енергії має дуже давню історію. Ще багато століть тому люди застосовували вітряки та вітряні млини для подрібнення зерна, розпилювання деревини, а також для роботи насосних чи водопідіймальних механізмів. Сучасні вітроенергетичні установки працюють за тим самим принципом, але значно ефективніше та у великих масштабах. Спочатку вони перетворюють кінетичну енергію повітряних потоків на механічну енергію обертання ротора, після чого генератор трансформує її в електричну енергію.

Вітрова енергетика належить до тих напрямів відновлюваної енергетики, які демонструють найшвидші темпи розвитку. За останні двадцять років сумарна потужність наземних і морських вітрових електростанцій у світі збільшилася майже у 75 разів – з приблизно 7,6 ГВт у 1996 році до близько 572 ГВт станом на 2021 рік [19, 25].

Гідроенергія (енергія води).

Використання енергії водних потоків відоме людству ще з часів стародавніх цивілізацій. Наприклад, у Стародавньому Єгипті та Римській імперії водяні потоки застосовувалися для приведення в дію різноманітних механізмів, зокрема водяних млинів. У середньовічній Європі водяні млини використовувалися не лише для помелу зерна, але й у лісопильній справі, на цегельних виробництвах і навіть на целюлозно-паперових мануфактурах.

Починаючи з кінця XIX століття енергію води активно почали використовувати для виробництва електроенергії [16, 19].

Іноді під час аналізу альтернативних джерел енергії гідроенергетику не завжди згадують, оскільки вона вважається досить традиційною галуззю енергетики. Однак, з огляду на те, що ключовим критерієм альтернативності є відсутність вуглецевого походження енергії, гідроенергетика належить до класичних видів відновлюваної енергетики. Енергетичні об'єкти такого типу практично не створюють значних викидів у атмосферу і не спричиняють істотного забруднення природних геосфер [25].

Геотермальна енергія.

Геотермальна енергетика базується на використанні теплової енергії, що надходить із надр Землі. Внутрішнє тепло планети нагріває гірські породи та підземні води, які можуть використовуватися для виробництва електроенергії або теплопостачання. Видобування геотермальної енергії зазвичай здійснюється за допомогою буріння неглибоких свердловин, що не потребує надто великих фінансових витрат. Найбільш ефективним цей вид енергетики є у тих регіонах, де гарячі підземні води або геотермальні джерела розташовані близько до поверхні земної кори, наприклад в Ісландії, районі Єллоустоунського національного парку, на Камчатці та в інших геотермально активних зонах.

До геотермальної енергетики часто відносять і використання теплових насосів, робота яких ґрунтується на різниці температур між поверхневими та глибшими шарами ґрунту або води. Фактично такі системи також використовують теплову енергію земних оболонок, тому їх розглядають як один із різновидів геотермальних технологій [16].

Біоенергетика.

Під біоенергетикою розуміють виробництво енергії з органічної біомаси. Це може відбуватися як шляхом прямого спалювання біомаси, так і через її переробку у різні види палива, наприклад біодизель або біогаз. Біоенергетична сировина є універсальною, оскільки з неї можна отримувати тепло,

електроенергію та паливо. Для цього використовують тверду, рідку або газоподібну біомасу.

Як відновлювану сировину застосовують різноманітні відходи рослинного та тваринного походження – соломі, тирсу, пожнивні залишки, гілки, сухостій, деревні обрізки тощо. Крім того, спеціально вирощують енергетичні культури, наприклад швидкорослі породи дерев і кущів або трав'янисті рослини, такі як енергетична верба, тростина та інші види біоенергетичних культур [16,25].

Моретермальна енергія.

Ще одним різновидом альтернативної енергетики є використання енергії, пов'язаної з динамічними процесами Світового океану. Найчастіше йдеться про енергію припливів і відпливів, морських течій та хвиль. Рух водних мас приводить у дію турбіни генераторів, які виробляють електроенергію. Хвильові електростанції використовують гідродинамічну енергію морських хвиль, різницю тиску та температури водних мас [16, 19].

Хоча дослідження у цій сфері ще тривають, науковці вже підрахували, що лише узбережжя Європи потенційно може генерувати понад 280 ТВт·год енергії щорічно. Це приблизно відповідає половині сучасного рівня енергоспоживання такої держави, як Німеччина [19].

У більшості економічно розвинених країн світу сьогодні активно розробляється стратегія так званого «зеленого» енергетичного переходу. Вона передбачає поступову або повну відмову від використання традиційних викопних палив і перехід до відновлюваних джерел енергії. Багато держав визначили конкретні терміни такого переходу, які можуть стосуватися як усієї енергетичної системи, так і окремих її секторів.

Важливим міжнародним документом, що визначає напрямки цих змін, стала Паризька кліматична угода. Відповідно до її положень, до 2030 року технології з нульовими викидами вуглецю можуть стати конкурентоспроможними у тих галузях економіки, на які припадає понад 70 % глобальних викидів парникових газів. Досягнення цієї мети передбачає реалізацію так званого «зеленого енергетичного переходу», під яким розуміють

поступову трансформацію вугільної та нафтогазової енергетики у систему, що базується на використанні відновлюваних джерел.

Навіть у 2020 році, попри пандемію COVID-19 та пов'язану з нею економічну кризу, багато міст, держав і великих компаній продовжували оголошувати про масштабні програми декарбонізації та активно впроваджувати їх на практиці. Після початку повномасштабної війни у 2022 році Україна, як країна-учасниця Паризької угоди, також не відмовилася від стратегічних планів щодо розвитку відновлюваної енергетики та впровадження альтернативних енергетичних технологій [19].

Значний внесок у розвиток «зеленого» енергетичного переходу роблять держави Європейського Союзу, вступ до якого визначений як стратегічна мета України. У країнах ЄС прогнозується подальше зростання потужностей альтернативної енергетики, зокрема вже у 2023 році очікувалося чергове збільшення обсягів введення нових об'єктів відновлюваної генерації. Навіть у складних умовах енергетичної кризи, спричиненої війною в Україні та обмеженням поставок російських нафти й газу, Європейський Союз продовжує реалізацію масштабної програми Green Deal, що передбачає глибоку трансформацію економічної політики ЄС [17].

Головною метою цієї програми є формування в Європейському Союзі кліматично нейтрального економічного простору. Планується, що до 2030 року викиди парникових газів будуть зменшені приблизно на 40 % у порівнянні з рівнем 1990 року, а частка енергії, отриманої з відновлюваних джерел, зросте до 30–35 % у загальній структурі енергоспоживання. За оцінками Європейської комісії, реалізація цих планів потребуватиме щорічних інвестицій у розмірі не менше ніж 250 млрд євро. Частка відновлюваних джерел у європейській енергосистемі вже демонструє стале зростання: у 2020–2021 роках приблизно 40 % електроенергії в Європі було вироблено саме з використанням відновлювальних енергетичних джерел [16, 19, 20, 22, 25, 29, 32].

Станом на 2022 рік провідними інвесторами у сфері розвитку відновлюваної енергетики були такі країни, як Сполучені Штати Америки,

Китай, Японія та Велика Британія. За даними аналітичної компанії Bloomberg NEF, від початку спостережень глобальні інвестиції у розвиток вітрової та сонячної енергетики, а також у проекти, пов'язані з використанням біопалива, біомаси, відходів та малої гідроенергетики, збільшилися майже у десять разів. Якщо приблизно двадцять років тому річні інвестиції у виробництво «чистої» енергії становили близько 33 млрд доларів, то нині їх обсяг перевищує 300 млрд доларів на рік у світовому масштабі [19].

Отже, альтернативна відновлювана енергетика на сучасному етапі є однією з найдинамічніших галузей світової економіки та має значний потенціал подальшого розвитку. Саме впровадження технологій у цьому секторі, на думку багатьох дослідників, створює перед людством можливості для подолання глобальної кліматичної кризи, а також сприяє формуванню енергетичної незалежності окремих держав і регіонів.

1.4. Характеристики вітроенергетичного потенціалу певної території

Розвиток людського суспільства тісно пов'язаний із постійним збільшенням обсягів використання ресурсів природи. У сучасній енергетиці основними видами палива, які застосовуються для отримання теплової та електричної енергії, залишаються вуглеводневі: це нафта, природний газ і вугілля. Саме такі вуглеводневі енергетичні викопні ресурси традиційно відносять до класичних або традиційних джерел енергії.

Однак важливим недоліком зазначених енергетичних ресурсів є їх невідновлюваний характер. Запаси цих корисних копалин мають обмежений обсяг і можуть бути повністю вичерпані в процесі інтенсивного використання. При цьому людство постійно нарощує масштаби їх видобутку, що прискорює виснаження природних запасів. Саме тому протягом приблизно останніх восьми десятиліть у різних регіонах світу, особливо в європейських країнах, активно розвивається галузь альтернативної енергетики.

Для того щоб оцінити перспективи використання енергії вітру як одного з альтернативних джерел виробництва електроенергії для Волинської області,

необхідно визначити основні чинники, від яких залежить ефективність функціонування вітроенергетичних установок.

До ключових характеристик повітряних потоків, що визначають вітроенергетичний потенціал певної території, належать середня швидкість вітру за рік, сезонна та добова динаміка його змін, повторюваність різних швидкостей і напрямків вітру, максимальні значення швидкості, а також показники питомої потужності й питомої енергії вітрового потоку. Аналіз зазначених параметрів дозволяє оцінити економічну доцільність застосування вітроенергетичних установок на конкретній території [16, 19].

Ще досить давно науковцями було встановлено, що енергетичний потенціал повітряного потоку прямо залежить від швидкості його руху. Зокрема, кількість енергії вітру за одиницю часу пропорційна кубу швидкості повітряного потоку. Це означає, що при збільшенні швидкості вітру вдвічі енергетичний потенціал потоку може зрости у вісім разів. Потужність вітрових турбін також значною мірою залежить від геометричних параметрів їх робочих елементів. Зокрема, вона пропорційна квадрату діаметра вітроколеса: якщо діаметр ротора збільшити у два рази, то за однакових швидкостей вітру потужність установки, як правило, зростає приблизно в чотири рази [4,5].

З метою аналізу вітрового режиму та оцінки енергетичного потенціалу повітряних потоків для території Лісостепової зони Волинської області України були використані кліматичні дані метеорологічної станції Луцьк – однієї із небагатьох метеостанцій Волині, яка розміщена саме в зоні Лісостепу. Відповідна інформація була отримана з архівних матеріалів Волинського регіонального центру з гідрометеорології та узагальнена на основі вивчених і проаналізованих наукових джерел за темою роботи [11].

Проведений аналіз показує, що середньорічна швидкість вітру в межах міста Луцька характеризується значною мінливістю і коливається у досить широкому діапазоні — від мінімального значення близько 0,8 м/с до максимального приблизно 4,6 м/с. Коефіцієнт варіації (C_v), який використовується для оцінювання ступеня часової мінливості швидкостей вітру

відносно середнього значення, знаходиться в межах від 0,25 до 0,44. Цей статистичний показник застосовується для характеристики однорідності досліджуваної сукупності даних. Прийнято вважати, що статистична сукупність є кількісно однорідною у випадку, коли коефіцієнт варіації не перевищує значення 0,33 [16].

За середніми швидкостями вітру можна визначити доцільність використання вітроенергетичних установок. Зокрема, якщо середня швидкість повітряного потоку становить менше ніж 3 м/с, застосування вітрових турбін вважається економічно недоцільним. У разі, коли швидкість вітру перебуває в межах 3,0–3,5 м/с, використання вітроенергетичних установок оцінюється як малоперспективне. Найбільш доцільним вважається їх застосування при середніх швидкостях вітру від 3,5–4,0 м/с і вище.

1.5. Вплив вітроенергетичних установок на довкілля

Вітер як фізичне явище у атмосфері Землі, являє собою рух повітряних мас відносно земної поверхні [10]. У метеорології зазвичай мають на увазі горизонтальне переміщення повітря, середні параметри якого визначаються на основі вимірювань за інтервал часу приблизно від однієї до трьох хвилин. Такий підхід дозволяє виключити короточасні мікромасштабні коливання повітряних потоків, що тривають лише кілька секунд.

Формування вітру обумовлюється нерівномірним нагріванням земної поверхні. На цей процес впливають різні фактори, зокрема хмарність, наявність водних об'єктів, особливості рельєфу місцевості та інші природні умови. Вітер безпосередньо пов'язаний із розподілом атмосферного тиску і зазвичай переміщується від областей з підвищеним тиском до зон зі зниженим тиском. У глобальному масштабі циркуляція повітря має характер конвективного переміщення повітряних мас між різними поясами атмосферного тиску.

До найважливіших параметрів, що характеризують вітер, належать його швидкість та напрям. При цьому розрізняють миттєві та усереднені (згладжені) значення цих показників. Усереднені значення визначаються шляхом

обчислення середнього показника за певний часовий інтервал. Натомість миттєві значення відображають стан повітряного потоку безпосередньо у момент вимірювання і можуть значно відрізнятися від середніх величин. Для потреб вітроенергетики основне значення мають саме усереднені показники швидкості вітру, характерні для певної місцевості [31, 33, 34].

Під напрямком вітру розуміють ту сторону горизонту, звідки надходить повітряний потік. Для визначення напрямку використовують систему основних та проміжних румбів. До основних належать північний, південний, східний та західний напрямки, а між ними виділяють ще вісім проміжних, наприклад північно-західний або південно-східний. Швидкість вітру зазвичай вимірюють у метрах за секунду.

За даними метеорологічних спостережень, одними з найвітряніших територій на Землі є прибережні райони Антарктиди, зокрема Земля Аделі, Земля Вікторії, мис Беркс та мис Денісона, розташовані у Західній Антарктиді. У Північній півкулі так званим «полюсом вітру» вважають фіорд Прінс-Кристіана, що знаходиться на південно-східному узбережжі Гренландії [2]. Рекордне значення середньорічної швидкості вітру зафіксовано на мисі Денісона — близько 19,4 м/с [16, 32]. На території України найбільш інтенсивні вітрові потоки спостерігаються у гірських районах Карпат і Криму, а також у прибережних зонах Чорного та Азовського морів.

Використання енергії вітру тісно пов'язане з тим, що вона фактично є перетвореною формою сонячної енергії. Сонячне випромінювання нагріває поверхню Землі нерівномірно, що спричиняє переміщення масштабних за розмірами територіального охоплення повітряних мас і формування повітряних потоків, які містять значний запас кінетичної енергії [25].

Людство використовує енергію вітру вже багато століть. Ще в Стародавньому Єгипті та країнах Близького Сходу вона застосовувалася для роботи млинів і пристроїв, що піднімали воду. У період з 1880 до 1930 року на території США діяло приблизно 60 тисяч вітрових установок, які використовувалися для перекачування води, забезпечення роботи підприємств та

навіть для виробництва електроенергії [19]. У сучасних умовах використання вітру для помелу зерна практично зникло, а старовинні вітряки здебільшого збереглися лише як історичні пам'ятки.

Будівництво сучасних вітрових електростанцій зазвичай здійснюється в районах, де середні швидкості вітру становлять не менше ніж приблизно 4,5 м/с.

Стандартні метеорологічні дані не завжди є достатніми для вибору місця розміщення вітрових електростанцій, оскільки вони відображають швидкість вітру переважно біля земної поверхні. Тому перед будівництвом вітрових електростанцій проводять спеціальні дослідження, спрямовані на оцінювання вітроенергетичного потенціалу місцевості. Для цього на висотах приблизно від 30 до 100 метрів встановлюють анемометри, які протягом одного або двох років фіксують показники швидкості та напрямку вітру.

Оскільки швидкість повітряних потоків зростає із висотою, вітрові електростанції доцільно розміщувати на підвищених ділянках рельєфу, зокрема на пагорбах. При виборі місця розташування також враховують наявність об'єктів, що можуть впливати на структуру повітряного потоку, наприклад лісові масиви, будівлі чи інші великі споруди. Загалом вітроенергетичний потенціал Землі є досить значним. Наприклад, у п'яти державах, розташованих на узбережжі Північного моря – Німеччині, Великій Британії, Нідерландах, Бельгії та Данії – потенційні ресурси вітрової енергії перевищують сумарний сучасний рівень енергоспоживання цих країн [16, 19].

Вітрові електростанції призначені для перетворення кінетичної енергії повітряних потоків у електричну енергію. Зазвичай вони складаються з кількох вітрових турбін, які об'єднані в єдиний енергетичний комплекс. Великі вітрові електростанції можуть включати понад сотню вітрогенераторів. Такі комплекси часто називають вітровими або вітряними фермами.

Виробництво електроенергії з використанням сили вітру нині здійснюється у промислових масштабах більш ніж у сімдесяти державах світу. Найбільші обсяги такої генерації зосереджені у таких країнах, як Сполучені Штати Америки, Іспанія та Китай. Станом на кінець 2020 року частка

електроенергії, отриманої за рахунок вітроенергетики, становила приблизно 6,3 % від загального світового виробництва електричної енергії [16, 17, 25, 32].



Рисунок 1.1 Зростання генерації вітрової енергії у світі, 1997 – 2025 р. (побудовано за [18, 19]).

Типи вітрових електростанцій.

Залежно від місця розташування та умов експлуатації вітрові електростанції поділяють на кілька основних різновидів:

- 1) наземні – установки розміщуються на суходолі, часто на підвищених ділянках рельєфу, зокрема на пагорбах або відкритих рівнинних територіях;
- 2) прибережні – розташовані неподалік від берегової лінії морів або океанів;
- 3) офшорні – зводяться безпосередньо в акваторії морів на відстані приблизно 10–12 км від узбережжя;
- 4) плавучі (надвожні) – встановлюються на спеціальних платформах, що перебувають у дрейфі в морях або океанічних акваторіях.

Найбільш поширеними у світі залишаються наземні вітрові електростанції. Однією з наймасштабніших серед них, а також серед усіх вітрових енергетичних об'єктів загалом, є електростанція, розташована поблизу міста Роско в штаті Техас (США). Вона була введена в експлуатацію 1 жовтня 2009 року. До її складу входять 627 вітрових турбін, а сумарна встановлена потужність становить

близько 780 МВт. Загальна площа території, яку займає ця електростанція, сягає приблизно 400 км² [5, 31, 33].

Серед прибережних вітроелектростанцій однією з найбільших є енергетичний комплекс Хорс-Холлоу, також розташований у штаті Техас (США). До його складу входить 421 вітрова турбіна, а загальна потужність становить близько 735 МВт [4, 5, 16, 33].

Однією з найбільших офшорних вітрових електростанцій є комплекс Мідделгрюнден у Данії, споруджений у 2000 році. Його встановлена потужність становить приблизно 40 МВт [16, 19].

Станом на кінець 2020 року сумарна встановлена потужність офшорних вітроенергетичних об'єктів у світі досягла приблизно 5375 МВт. Протягом лише одного 2020 року було введено в експлуатацію ще близько 357 МВт нових морських потужностей. Найбільший потенціал для подальшого розвитку офшорної вітроенергетики, за оцінками фахівців, має Великобританія [19].

Перший експериментальний зразок плавучої вітрової турбіни було створено у грудні 2007 року. Генератор потужністю 80 кВт було встановлено на плавучій платформі на відстані 10,6 морської милі від узбережжя Південної Італії на ділянці моря з глибиною приблизно 108 м. Також триває реалізація проєкту першої у світі повномасштабної плавучої вітрової електростанції, що споруджується поблизу норвезького міста Ставангер [16,19].

Екологічний вплив вітроенергетики водночас також має певні негативні наслідки, про які дискутують дослідники.

Попри значні екологічні переваги використання відновлюваних джерел енергії, розвиток вітроенергетики може супроводжуватися певними негативними наслідками для навколишнього природного середовища. Основні з них проявляються у таких формах [19]:

- 1) вилучення значних земельних площ для розміщення енергетичних об'єктів;
- 2) вплив на тваринний світ, передусім на птахів;
- 3) акустичне забруднення (шумовий ефект);

- 4) зміна візуального вигляду природного ландшафту;
- 5) виникнення перешкод для роботи електронних і телекомунікаційних систем [4, 5, 33].

Вітрові турбіни не можуть розташовуватися надто близько одна до одної, оскільки внаслідок взаємного впливу повітряних потоків їх ефективність зменшується. Саме тому для розміщення таких об'єктів потрібні значні площі територій. Зазвичай для встановлення обладнання необхідно приблизно 0,1 км² площі на кожен мегават встановленої потужності. Таким чином, для функціонування вітрової електростанції потужністю 200 МВт необхідно близько 20 км² території [19].

Вплив на тваринний світ може проявлятися у потенційній небезпеці для водних організмів, птахів та комах. Особливо відчутним цей вплив може бути під час будівництва об'єктів. Наприклад, у процесі спорудження морських або прибережних електростанцій можливе порушення природних умов існування іхтіофауни, що інколи призводить до зміни шляхів міграції риб або навіть їх загибелі. Під час експлуатації електростанцій шум та вібрація мають відносно незначний вплив, а припинення судноплавства і рибальства поблизу опор турбін іноді навіть сприяє покращенню умов існування морських організмів. Для морських ссавців, таких як дельфіни, тюлені чи кити, вплив вітрових електростанцій зазвичай оцінюється як незначний.

У період будівництва прибережних або офшорних енергетичних об'єктів можуть змінюватися донні відклади та структура турбулентних потоків води, що насамперед негативно впливає на донні організми. Ступінь такого впливу значною мірою залежить від характеру донного субстрату і є найменшим у разі скельних порід [16]. Під час експлуатації електроенергія передається підводними кабелями. Якщо напруженість електричного або магнітного поля перевищує допустимі значення, це може викликати реакцію уникнення у риб та інших донних організмів, унаслідок чого кабельні лінії можуть перешкоджати їх природним міграційним шляхам [19].

Щодо впливу на птахів, результати досліджень європейських орнітологів свідчать, що він здебільшого є незначним. Птахи зазвичай здатні виявляти вітрові турбіни на відстані понад один кілометр і змінювати траєкторію польоту, облітаючи небезпечні об'єкти [16]. За даними дослідника Zdenko Simic [37], рівень загибелі птахів становить приблизно 0,3–0,4 особини на кожну гігават-годину виробленої електроенергії, що для території США відповідає приблизно 70 тисячам птахів щороку. Водночас у деяких випадках, наприклад у Франції, реалізацію окремих проєктів будівництва вітрових електростанцій було призупинено саме через побоювання щодо можливого негативного впливу на популяції птахів [37]. Крім того, на деяких вітрових електростанціях практикується тимчасове зупинення роботи турбін під час сезонних міграцій перелітних птахів [37].

Існують також відомості про негативний вплив на популяції кажанів. Наприклад, на двох ділянках східного узбережжя США, де було встановлено 63 вітрові турбіни, протягом двох тижнів зафіксовано загибель приблизно 2200 кажанів [19].

Шум, який виникає під час роботи вітрових турбін, поділяють на механічний та аеродинамічний. Найбільший внесок у формування акустичного навантаження мають такі елементи конструкції, як електрогенератор, механізм повороту гондоли, редуктор, а також лопаті ротора. Частина шумів виникає постійно під час роботи установки, інші – періодично. Водночас рівень шуму від вітрових турбін, порівняно з багатьма іншими промисловими джерелами, є відносно невисоким.

Певний вплив мають також візуальні зміни ландшафту. Сприйняття вітрових електростанцій у цьому аспекті є досить суб'єктивним: одні люди вважають їх привабливим елементом сучасного техногенного ландшафту, інші – сприймають як небажане порушення природного вигляду місцевості. Відомий випадок у США, коли реалізацію проєкту будівництва вітрової електростанції було відкладено на кілька років саме через суперечки щодо естетичного вигляду трансформованого природного ландшафту [25].

Крім того, вітрові електростанції можуть спричиняти певні радіо- та телевізійні перешкоди. Це пояснюється тим, що рухомі лопаті вітрових турбін здатні відбивати радіохвилі ультракороткого та надвисокого діапазонів. У результаті можуть виникати порушення у роботі навігаційного обладнання літаків, а також погіршуватися якість приймання телевізійного сигналу наземними антенами [19].

Висновки до розділу 1: отже, аналіз розвитку альтернативної енергетики свідчить про те, що сучасне людство стоїть на порозі масштабних змін у виробництві та споживанні енергії. Традиційні джерела палива – нафта, природний газ, вугілля та інші викопні ресурси – залишаються основою енергетики, однак їх невідновлюваність і постійне зростання обсягів видобутку створюють серйозні загрози для довкілля та енергетичної безпеки. Водночас відновлювані джерела енергії, такі як сонячна, вітрова, гідро-, геотермальна та біоенергія, пропонують перспективну альтернативу, адже їхні запаси практично невичерпні у масштабах людського життя і не спричиняють суттєвого забруднення атмосфери чи геосфер.

Дослідження показують, що ефективність використання альтернативних джерел значною мірою залежить від природно-кліматичних умов конкретної території. Наприклад, вітровий потенціал оцінюється за середньорічною швидкістю, добовою та річною динамікою вітру, його напрямками та потужністю. Для Лісостепової зони Волинської області України середньорічні швидкості вітру коливаються від 0,8 до 4,6 м/с, що визначає економічну доцільність встановлення вітрових електроустановок при швидкостях понад 3,5 м/с. Встановлено, що потужність вітрогенератора зростає пропорційно квадрату діаметра лопатей і кубу швидкості вітру, що підкреслює важливість оптимального проектування та вибору місць для ВЕС.

Вітрові та інші відновлювані джерела енергії мають низку екологічних особливостей. Вітрові установки потребують значної площі та можуть впливати на тваринний світ, включно з птахами, кажанами та донними водними

організмами у разі офшорних станцій. Проте сучасні дослідження свідчать, що цей вплив є порівняно низьким і керованим: птахи зазвичай облітають турбіни, а шум від робочих установок поступається рівню інших промислових джерел. Водночас існують обмеження на розміщення турбін для уникнення інтерференції, а при офшорних установках враховується вплив на донні осади та міграційні шляхи риб. Таким чином, екологічна безпека при впровадженні альтернативної енергетики забезпечується правильним плануванням і застосуванням сучасних технологій.

На глобальному рівні розвиток відновлюваної енергетики демонструє стрімке зростання. Лідерами у виробництві та інвестиціях є США, Китай, Іспанія, Японія та Великобританія. Частка відновлюваних джерел у світовому виробництві електроенергії постійно зростає, і на кінець 2020 року вона складала понад 6 % у світовому масштабі. У ЄС за реалізацією програми Green Deal планується до 2030 року скоротити викиди парникових газів на 40 % і підвищити частку енергії з ВДЕ до 30–33 %, а до першого півріччя 2022 року частка електроенергії з відновлюваних джерел досягла близько 40 %. Україна також демонструє значну динаміку розвитку альтернативної енергетики: зокрема, у 2019 році загальна потужність вітрових електроустановок перевищила 1000 МВт, а найбільші ВЕС з потужністю понад 100 МВт були встановлені у південних та південно-східних регіонах держави.

Отже, впровадження та розвиток альтернативної енергетики має багатогранне значення: воно забезпечує зменшення негативного впливу на клімат, підвищує енергетичну незалежність держав і регіонів, стимулює технологічний розвиток та економічний потенціал. Розвиток відновлюваної енергетики в Україні та світі свідчить, що «зелений перехід» стає не лише глобальною стратегією протидії кліматичним загрозам, а й одним із ключових чинників сталого розвитку суспільства у XXI столітті.

РОЗДІЛ 2. СУЧАСНИЙ РОЗВИТОК ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У СВІТІ ТА В УКРАЇНІ

2.1. Основні особливості сучасного розвитку вітрової енергетики

Таким чином, як уже зазначалося раніше, протягом останніх десятиліть у світовому співтоваристві особливої актуальності набули питання так званого «зеленого переходу», що передбачає активне впровадження та поширення відновлюваних джерел енергії. На думку багатьох науковців і провідних експертів, саме розвиток альтернативної енергетики здатний суттєво зменшити або навіть зупинити негативні процеси, пов'язані з глобальними кліматичними змінами. У країнах Європейського Союзу значне зростання частки відновлюваних джерел у структурі виробництва електроенергії відбулося у 2021 році. Навіть в умовах пандемії держави ЄС продовжували реалізацію масштабної програми Green Deal, яка вважається однією з найбільших трансформацій економічної та енергетичної політики в історії Європейського Союзу. Основною метою цієї стратегії є формування на території ЄС єдиного простору з нульовими викидами вуглецю приблизно до 2030 року. Для досягнення цього передбачається скоротити обсяги викидів парникових газів на 40 % порівняно з рівнем 1990 року, а також підвищити частку енергії, отриманої з відновлюваних джерел, до 30–33 % у загальній структурі енергоспоживання. За оцінками Європейської комісії, реалізація зазначених цілей вимагатиме щорічних інвестицій у розмірі не менше 260 млрд євро. При цьому частка відновлюваних джерел енергії в енергетичній системі Європейського Союзу продовжує стабільно зростати: наприклад, у першій половині 2022 року приблизно 40 % електроенергії в ЄС було вироблено саме за рахунок таких джерел [35, 36].

На сьогодні провідні позиції у сфері фінансування розвитку відновлюваної енергетики посідають великі економічно потужні держави, серед яких Китай, Сполучені Штати Америки, Велика Британія та Японія. З моменту початку систематичного моніторингу цих процесів агентством Bloomberg світові інвестиції у розвиток вітрової та сонячної енергетики, а також у проекти,

пов'язані з використанням біопалива, біомаси, відходів і гідроенергетики, зросли майже в десять разів. Упродовж останніх десятиліть обсяги щорічних вкладень у розвиток альтернативної енергетики демонструють стрімке зростання: якщо раніше вони становили приблизно 33 млрд доларів, то нині їх величина досягла близько 300 млрд доларів на рік [16, 36].

Щодо України, то протягом останніх десятиріч у державі також спостерігалася досить активна динаміка розвитку електроенергетичної генерації на основі використання відновлюваних джерел. Найбільш інтенсивно розвивалися такі напрямки альтернативної енергетики, як сонячна та вітрова. У 2019 році в українському секторі вітроенергетики відбулися дві важливі події. По-перше, Україна приєдналася до так званого міжнародного «гігаватного клубу», оскільки загальна встановлена потужність вітрових електроустановок у країні перевищила 1000 МВт. По-друге, станом на той самий рік у державі було введено в експлуатацію три вітрові електростанції, потужність кожної з яких перевищувала 100 МВт. З огляду на природно-кліматичні особливості території України найбільша кількість вітроенергетичних установок була зосереджена у південних та південно-східних регіонах країни, що наочно відображено на діаграмах і картосхемі (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 Розташування найбільших ВЕС України до початку широкомасштабної війни у 2022 р. (подано за матеріалами [16, 19]).

2.2. Становлення і сучасний стан вітроенергетики у світі та в Україні

Вітрова енергетика вже давно знайшла широке застосування у багатьох країнах світу, і Україна не є винятком. Наша країна володіє значним природним потенціалом для розвитку вітроенергетичних проектів. «Станом на 2021 рік, тобто перед війною, сумарна встановлена потужність вітроенергетичних станцій України становить 1170 МВт і це 18,3% від частки суцільної встановленої зеленої потужності України» [19].

Проте війна завдала надзвичайно великих збитків та руйнувань даній галузі енергетики. Фактично, серед великих ВЕС України тільки ВЕС «Старий Самбір» 1 і 2 не зазнали впливу бойових дій під час широкомасштабної війни. На кінець 2022 р. на території України функціонувало сім великих вітрових електростанцій: Ботієвська, Приморська, Дмитрівська, ВЕС Старий Самбір 1 та 2, Тузловська та Берегове [19]. Проте після початку широкомасштабної війни більшість з цих ВЕС (що розміщалися на півдні та південному сході України) були втрачені через окупацію або зруйновані.

Слід зазначити, що такі вітропарки, як Новоазовський, переважно створювалися до війни у віддалених районах, на морському узбережжі в Приазов'ї та Причорномор'ї, у степовій південній зоні, адже при такому підході вони не чинять негативного тиску на прилеглі населені пункти (шум, тощо), а також вони ідеально підходять для енергозабезпечення рекреаційних зон, будинків відпочинку, туристичних баз та таборів у курортний сезон. Вітроелектростанції мали цілий ряд переваг, але були в них і свої певні недоліки. Проте 85 % цієї генерації компанії-власники (такі, як ДТЕК України) втратили у 2022 – 2023 рр., зазнавши суттєвих збитків.

2.3. Регіональні особливості вітроенергетичного сектору в Україні

У структурі розвитку вітроенергетичного сектору України спостерігається виражена регіональна диференціація, що зумовлена природно-кліматичними, економічними та інфраструктурними факторами. Станом на 2025 рік загальна встановлена потужність вітрових електростанцій у країні становить понад

2,3 ГВт, при цьому постійне введення нових об'єктів у експлуатацію забезпечує динамічне зростання цього показника.

Традиційно лідерами у генерації вітрової електроенергії виступають південні та південно-східні області, такі як Запорізька, Херсонська, Миколаївська та Одеська, де кліматичні умови, зокрема близькість до узбережжя Чорного та Азовського морів, сприяють більш високій середній швидкості вітру. У цих регіонах сконцентровано найбільшу частину вітрових потужностей: наприклад, частина великих вітропарків у Запорізькій області має значно вищі встановлені потужності порівняно з іншими частинами країни. Проте у зв'язку з війною значна частина вітрогенерації в даних областях зруйнована.

На рис. 2.2. представлено діаграму порівняльного регіонального розподілу обсягів вітрогенерації в Україні станом на 2025 р.

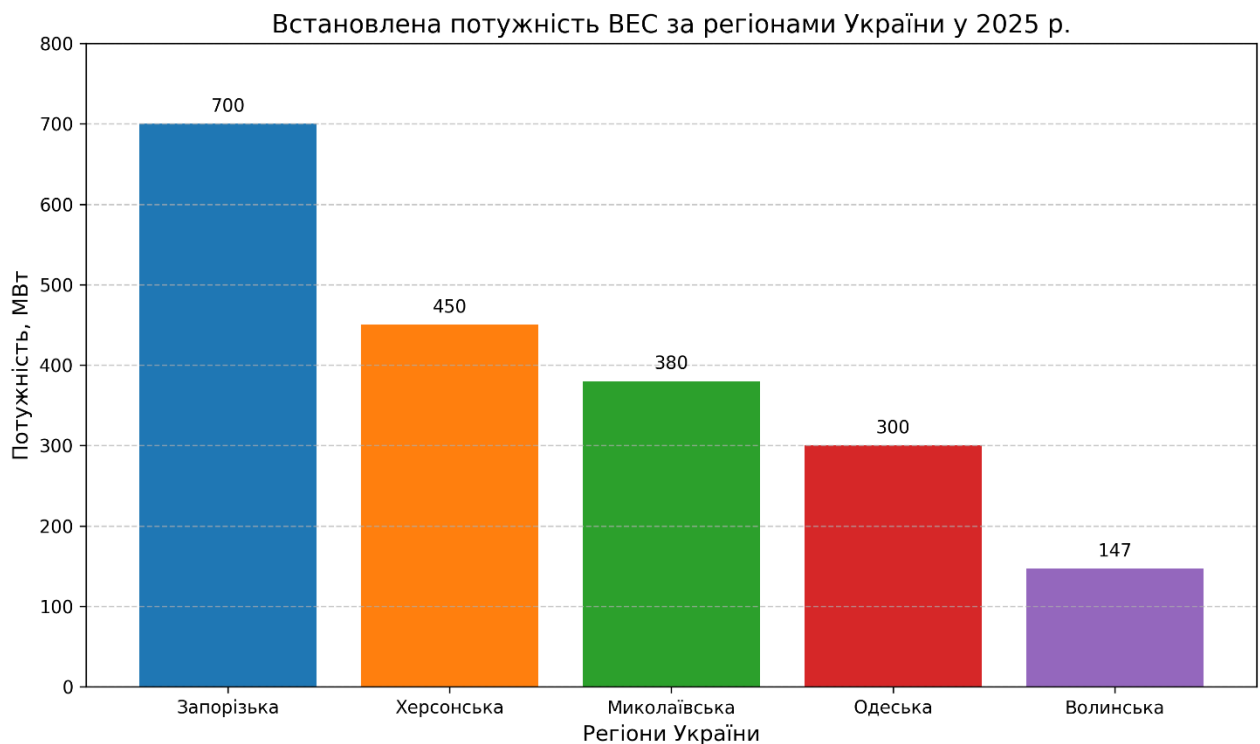


Рисунок 2.2. Регіональний розподіл потужностей вітрогенерації в Україні станом на 2025 р. (за даними [19]).

У свою чергу західні регіони, серед яких і Волинська область, тільки починають активну стадію розвитку власної вітроенергетичної інфраструктури.

До 2024 року вітроенергетика Волині практично не була представленою у загальноукраїнських рейтингах за встановленою потужністю, проте реалізація проєкту потужного вітропарку поблизу міста Володимир на кінець 2025 — початок 2026 р. дозволяє регіону активно наздоганяти лідерів. Шляхом реалізації цього проєкту Волинь відходить від нульового рівня приєднаних потужностей до потенційних показників у сотні мегават, що суттєво підсилює вклад західної частини України в загальну генерацію «зеленої» енергії.

Такий регіональний розподіл потужностей свідчить про те, що хоча південні області традиційно мають значно кращі умови для розміщення великих вітрових електростанцій за рахунок природних факторів, нові проєкти у центральних та західних областях (зокрема у Волинській області) сприяють зменшенню центру тяжіння галузі та формуванню більш збалансованої національної мережі відновлюваних джерел енергії. Тенденція до рівномірнішого розвитку відновлюваної генерації в регіонах України відповідає стратегії енергетичної децентралізації та зміцнення енергетичної безпеки у контексті сучасних викликів.

Стан розвитку вітроенергетики України у 2025 р. характеризується поступовим відновленням потенціалу зростання галузі, незважаючи на продовження війни.

У 2025 році в Україні введено 324 МВт нових потужностей вітрових електростанцій, що перевищує сумарні показники двох попередніх років.

Загалом реалізуються або плануються проєкти будівництва понад 700 МВт нових ВЕС [19].

Основна частина вітроелектростанцій і далі зосереджена у південних та прибережних регіонах України, де спостерігаються найвищі середньорічні швидкості вітру та сприятливі показники вітроенергетичного потенціалу, хоча частина об'єктів на півдні та сході країни зазнала руйнувань або тимчасово не експлуатується через воєнні дії.

Основні тенденції розвитку галузі характеризуються поступовим відновленням після масштабних втрат на перших етапах війни у 2022–2023 рр.

Також все більшого поширення і актуальності набуває розвиток малої вітроенергетики, роль та переваги якої представлені нами на схемі на рис. 2.3.



Рисунок 2.3. Роль малої вітроенергетики у господарському комплексі.

Відбувається переміщення осередків реалізації нових проєктів у західні області України (Львівська, Закарпатська, Волинська).

В практику входить поєднання ВЕС із системами накопичення енергії (BESS). Вагомим є також помітне зростання ролі малої та децентралізованої вітроенергетики в Україні.

2.4. Переваги та недоліки впровадження вітроенергетики

Вітрові електростанції мають численні переваги, однак їх експлуатація також супроводжується певними обмеженнями.

Переваги вітроелектростанцій:

- 1) Екологічність. Вітропарки належать до категорії зеленої енергетики, оскільки не продукують шкідливих викидів у атмосферу.

- 2) Відсутність витрат на постачання палива. Під час роботи немає потреби постійно закуповувати енергетичні ресурси.
- 3) Відновлюваність енергетичного ресурсу. Вітрові турбіни зазвичай розташовують у регіонах із високою швидкістю вітру, що робить джерело практично невичерпним.
- 4) Можливість віддаленого розміщення. Вітростанції можна будувати у малонаселених або віддалених районах, що не обмежує їхню інтеграцію в енергомережу [19, 34].

Вітроелектростанції мають також і ряд суттєвих недоліків, до основних з яких належать:

- 1) Нестабільність енергетичного ресурсу. Вітер є природним явищем, яке неможливо накопичити або транспортувати за потреби, тому необхідне резервне живлення для підтримки безперервності електропостачання.
- 2) Високі початкові витрати при будівництві. Вартість вітрових турбін значна, а окупність проекту зазвичай коливається від 7 до 9 років при розрахунковому ресурсі турбіни близько 25 років. Тому до початку будівництва потрібен ретельний економічний аналіз.
- 3) Шумове навантаження. Вітрові установки генерують шум під час роботи, що може впливати на комфорт проживання поблизу. Важливо узгоджувати розміщення з місцевою громадою.
- 4) Негативний вплив на фауну. Незважаючи на «зелену» природу технології, турбіни можуть становити загрозу для птахів, рукокрилих і деяких комах, які потрапляють під обертові лопаті [19].

Екологи радять розташовувати вітростанції переважно на територіях, які вже зазнали антропогенного навантаження. В Україні експертами виділено п'ять областей на узбережжі Чорного моря як такі, що є найбільш придатними для будівництва ВЕС.

Ще однією актуальною екологічною проблемою в процесі експлуатації великих ВЕС є утилізація відпрацьованих лопатей. До 2024 року в Європі очікується виведення з експлуатації понад 14 тисяч лопатей вітроелектростанцій.

Наразі ринок їх переробки практично не розвинений, тоді як для більшості інших компонентів – фундаментів, веж, гондол – вже існують ефективні методи утилізації (85–90% маси).

Ускладнення полягає в тому, що лопаті виготовлені зі складних композитних матеріалів, які забезпечують їхню легкість і довговічність. У Німеччині очікується значне збільшення обсягів утилізації лопатей на початку 2020-х років. Найпоширенішим методом є спільна переробка в цементних печах, де склопластик та мінеральні компоненти використовуються як добавки у виробництві цементу [19, 21, 35].

Разом з тим, важливим завданням залишається розвиток нових технологій переробки лопатей, таких як механічне подрібнення, сольволіз та піроліз. Кожен із цих методів має свої обмеження: механічне дроблення ефективне лише для невеликих обсягів, сольволіз потребує значних енергетичних витрат, а піроліз зменшує міцність волокон через високу температуру. Тому збільшення фінансування досліджень у цій сфері є надзвичайно актуальним для забезпечення сталого розвитку вітроенергетики.

Висновки до розділу 2: таким чином, аналізуючи необхідність та значущість активного впровадження альтернативних джерел енергії у сучасних умовах «зеленого переходу», подолання кліматичної кризи та забезпечення енергетичної незалежності держави і її регіонів, можна стверджувати, що розвиток відновлюваної енергетики є надзвичайно актуальним як у глобальному, так і в національному масштабі.

Протягом останнього десятиліття в Україні спостерігалось інтенсивне зростання використання відновлюваних джерел енергії, зокрема потужностей сонячних та вітрових електростанцій. Проте масштабна військова агресія Російської Федерації у 2022–2026 рр. завдала значних руйнувань цій сфері. Основна частина великих СЕС та ВЕС була зосереджена у південних областях (Запорізька, Херсонська, Миколаївська), що призвело до їх тимчасового захоплення, розграбування або фізичного пошкодження під час бойових дій.

Навіть після деокупації фіксуються численні пошкодження конструкцій недобудованих вітрових станцій, що свідчить про необхідний тривалий період відновлення та стабілізації цих регіонів. Враховуючи високий рівень мінування територій, процес відновлення енергетичних об'єктів може зайняти значний час.

У зв'язку з цим стратегічне значення набуває розвиток альтернативної енергетики у західних, північно-західних та центральних регіонах України. Регіони, які раніше вважалися малоперспективними для використання сонячної та вітрової енергії, зараз потребують переосмислення традиційного підходу до планування енергетичних проектів.

Додатковим фактором, що підкреслює актуальність такого перегляду, є сучасні дані щодо регіональних проявів кліматичних змін: у цих частинах країни спостерігається збільшення середніх річних швидкостей вітру, зростання максимальних поривів та деяке зменшення річної хмарності, що сприяє підвищенню геліопотенціалу.

Отже, дослідження числових характеристик вітрового потенціалу Волинської області, як і всього Західного регіону України в цілому, його річної та місячної динаміки за останні десятиліття у контексті регіональних кліматичних змін є надзвичайно важливим для оцінки доцільності розширеного впровадження вітрової енергетики у цих регіонах та формування ефективної стратегії розвитку «зеленої» енергетики в Україні.

РОЗДІЛ 3. ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ У ЛІСОСТЕПОВІЙ ЗОНІ ВОЛИНСЬКОЇ ОБЛАСТІ

3.1. Загальна характеристика Лісостепової зони Волинської області

Лісостепова зона – це перехідний природний комплекс між Поліссям і Степом, що охоплює значну частину території України, у тому числі й південну частину Волинської області. Лісостеп займає близько 34 % території України, простягаючись смугою з заходу на схід понад 1100 км і з півночі на південь до 250–350 км, і характеризується своєрідним поєднанням лісових і лучно-степових ландшафтів [22, 26, 29, 34].

Фізико-географічне положення Волинської області визначає її належність до північно-західної частини України, де лісостепова зона змінює поліські ландшафти на півдні і межує з Польщею на заході, Рівненською областю на сході, Львівською на півдні та Білоруссю на півночі. У межах нашої області виділяється два основні типи ландшафтних комплексів: поліський (переважає на півночі регіону) і лісостеповий (південь регіону) [26].

Умовну межу між Поліссям та Лісостепом проводять дещо північніше Луцька. Межа між природними зонами Полісся (мішаних лісів) та Лісостепу на території Волинської області є умовною та проходить по лінії перепаду рельєфу й зміни типів ґрунтів.

Основні орієнтири даної межі: 1) траса «Устилуг – Луцьк – Рівне»: Географічно ця границя значною мірою збігається з автомобільною дорогою Устилуг – Володимир – Луцьк – Рівне. Території на північ від цієї лінії належать до Полісся, а на південь – до зони Лісостепу [22, 26, 27, 28].

Село Шепель та Іванчиці: За дослідженнями відомого історика та етнографа Олександра Цинкаловського, межа проходить саме через села Шепель та Іванчиці (що розміщені неподалік Луцька).

Рельєфний перехід: це лінія, де пласка і заболочена Поліська низовина переходить у хвилясту Волинську височину.

Ключові відмінності основних природних зон на Волині можна коротко описати наступним чином.

Полісся (Північ): тут переважають піщані ґрунти, соснові та мішані ліси, багато боліт та озер (наприклад, Шацькі озера).

Лісостеп (Південь): регіон характеризується родючими сірими лісовими ґрунтами та чорноземами, переважають широколистяні ліси (дуб, граб) та розорані степові ділянки.

Рельєф лісостепової частини Волині долинно-грядовий, із слабо вираженими підвищеннями та невеликими перепадами висот, що призводить до характерної хвилястої поверхні з яружно-балочними формами рельєфу. Це забезпечує сприятливі умови для розвитку сільськогосподарського виробництва: площі розораних земель у регіоні становлять значну частину земельного фонду області – близько 1050,2 тис. га (53,6 %) із загальних 2014,4 тис. га [22].

Клімат лісостепової зони Волині – помірно континентальний. У середньому за рік температура повітря складає близько $+7-8^{\circ}\text{C}$, з теплими літами та м'якими зимами (середня січнева – близько -4°C ; середня липнева – близько $+17^{\circ}\text{C}$). Річні суми опадів у лісостеповій частині області становлять 550–650 мм, при цьому більшість опадів (понад 70 %) випадає у вегетаційний період з квітня по вересень. Такий режим опадів і температур сприяє тривалому вегетаційному періоду, що є важливим для сільськогосподарської продукції, особливо зернових і технічних культур [22, 26, 27, 28].

Ґрунтовий покрив лісостепової зони Волинської області характеризується великою різноманітністю родючих ґрунтів. Основними є опідзолені темно-сірі та сірі ґрунти, а також чорноземи, які локально зустрічаються на більш сприятливих ділянках. Чорноземні та опідзолені ґрунти добре накопичують органіку і мають високий агроресурсний потенціал, що обумовлює сприятливі умови для вирощування культурних рослин. У поєднанні з темно-сірими і опідзоленими ґрунтами це забезпечує високий рівень родючості ґрунтового покриву у середній частині лісостепу.

Лісова рослинність у межах лісостепової зони займає близько 20 % території, переважно у вигляді невеликих масивів, розташованих у долинах річок, балках і ярах. Основними лісоутворюючими породами є дуб та граб, у змішаних насадженнях також зустрічається клен, липа та інші широколистяні види. Ці широколистяні ліси належать до геоботанічного Люблінсько-Волинського округу, що вирізняється змішаною флорою з домішками степових видів (див. рис. 3.1).

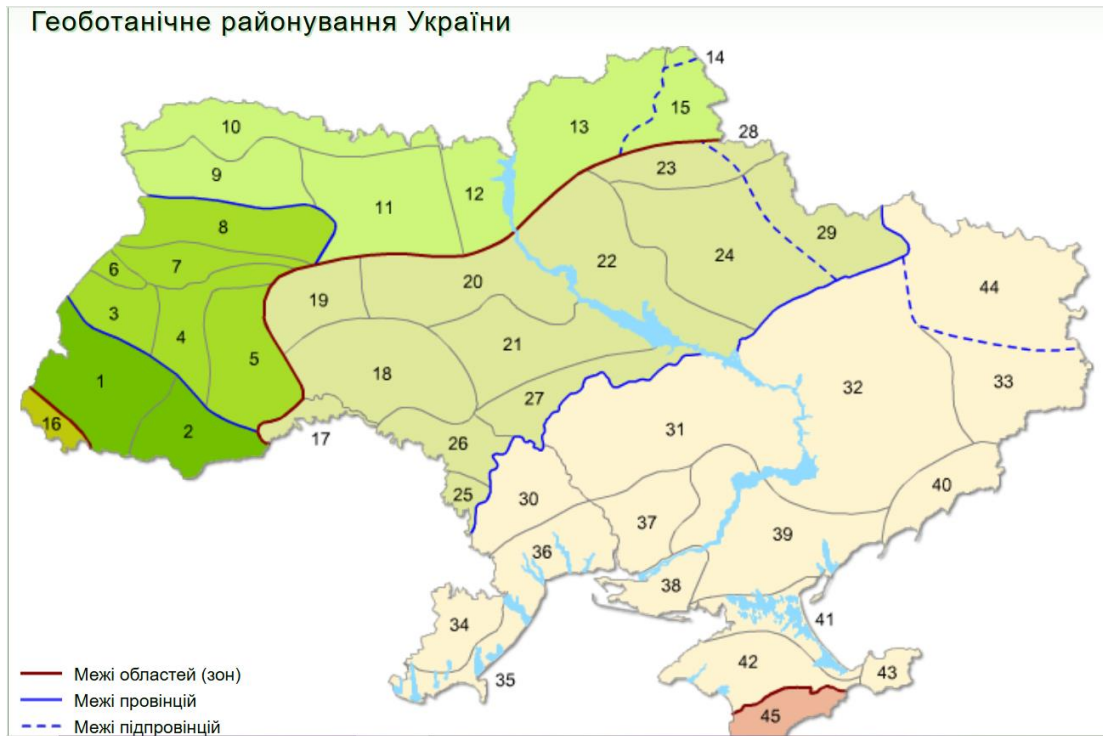


Рисунок 3.1 Виділення Лісостепової зони у Волинській області на карті геоботанічного районування України (подано за <https://geomap.land.kiev.ua/zoning-5.html>).

На карті, представлений на рис. 3.1, бачимо, що в межах Волинської області виділяються три геоботанічні округи: два – в Поліській зоні (Східноєвропейській (сарматській) провінції хвойно-широколистяних та широколистяних лісів, Поліській підпровінції хвойно-широколистяних лісів). Це – округ 9 (Західнополіський округ дубово-соснових, соснових, грабово-дубових лісів, заплавних луків та евтрофних боліт) та округ 10 (Верхньоприп'ятський округ соснових, вільхових, ялинових (фрагментарно) лісів, заплавних луків та оліго-, мезо-, евтрофних боліт).

Один геоботанічний округ виділяється у зоні Лісостепу (Південнопольсько-Західноподільській підпровінції широколистяних лісів, луків, лучних степів та евтрофних боліт) – це округ 8: Люблінсько-Волинський округ грабово-дубових, дубових лісів і остепнених луків.

Водні ресурси теж відіграють важливу роль у формуванні лісостепоного середовища області. Загальна довжина річок перевищує 3200 км, причому значна частина водних артерій належить до басейнів Прип'яті та Західного Бугу. Серед природних водних об'єктів вагоме місце посідають понад 220 озер, найбільшим з яких є Світязь – один із найбільших природних водойм України. Вода й річкові долини впливають на мікрокліматичні умови лісостепу та сприяють розвитку лугово-болотних угідь у долинах, де ґрунти насичені вологою [22, 26, 27, 28].

Лісостепова зона Волищини має значний потенціал для сільського господарства завдяки сприятливим ґрунтово-кліматичним умовам. В аграрному секторі зона характеризується високими рівнями урожайності зернових, зокрема кукурудзи, де найкращі показники врожайності спостерігаються саме у районах із лісостеповими умовами. Такі умови також сприяють розвитку технічних культур, що мають важливе економічне значення для регіону.

Водночас лісостеп Волині зазнає антропогенних змін: значні площі орних земель і рекреаційні навантаження зумовлюють деградацію природних екосистем, порушення структури ґрунтів та зміни флори й фауни. Моніторинг стану ґрунтово-рослинного покриву, зокрема в контексті ерозії, забруднення та втрат органічних речовин, залишається важливим завданням для сталого природокористування. Таким чином, лісостепова частина Волинської області – це складний природний комплекс із помірно-континентальним кліматом, родючими ґрунтами, різноманітною рослинністю і розвиненою сіткою водних ресурсів, що створює сприятливі умови як для агропромислового виробництва, так і для природоохоронних та рекреаційних заходів. Особливості рельєфу, який визначається тим, що тут бере свій початок Волинська височина, чинники мікроклімату, які характеризуються підвищеними швидкостями вітру, в цілому є сприятливими для розвитку вітроенергетики, особливо – малої [22, 26].

3.2. Сучасний стан вітроенергетики у Волинській області

До недавнього часу розвиток вітроенергетики у межах Волинської області був мінімальним та обмежувався встановленням невеликих і малопотужних вітряків – генераторів струму в окремих домогосподарствах чи на фермах.

Проте ситуація змінилася в минулому році, коли було розпочато будівництво вітропарку у Володимирському районі, в Лісостеповій зоні Волині. Будівництво сучасного вітропарку неподалік від міста Володимир стало одним із найбільш масштабних проєктів розвитку відновлюваної енергетики у північно-західному регіоні України.

Реалізація цього проєкту є важливим етапом формування регіональної системи альтернативної енергетики та сприяє збільшенню частки електроенергії, виробленої з відновлюваних джерел. Будівництво вітрової електростанції відбувається в умовах зростання попиту на екологічно чисті джерела енергії та необхідності підвищення енергетичної безпеки України.

Інвестором та основним реалізатором проєкту виступає енергетичний підрозділ групи компаній ОККО, що входить у склад концерну «Галнафтогаз». У квітні 2025 року компанія залучила міжнародне фінансування для реалізації проєкту, зокрема кредитні ресурси міжнародних банків на суму близько 157 млн євро, тоді як загальна вартість будівництва оцінюється приблизно у 225 млн євро.

Вітрова електростанція складається з комплексу сучасних вітрових турбін великої потужності, встановлених на території кількох громад Володимирського району. Загальна проєктна потужність першої черги вітропарку становить близько 147 МВт, що робить його одним із найбільших об'єктів вітрової енергетики у західній частині України. На початку 2026 р. було достроково введено в експлуатацію першу частину станції потужністю 90 МВт, яка почала передавати вироблену електроенергію до об'єднаної енергосистеми держави.

Особливістю запуску цього енергетичного об'єкта стало те, що його роботу було розпочато раніше запланованого терміну у зв'язку з дефіцитом електроенергії, який виник унаслідок пошкодження енергетичної

інфраструктури під час російських обстрілів. На початковому етапі вітроелектростанція працювала у технічному режимі та передавала електроенергію до енергосистеми України безкоштовно з метою стабілізації енергопостачання.

За оцінками енергетичних фахівців, функціонування цієї вітроелектростанції дозволяє забезпечити електроенергією понад 100 тисяч споживачів, що є важливим внеском у покриття пікових навантажень енергосистеми країни. У перспективі планується подальше розширення проєкту: після введення додаткових потужностей у лютому 2026 року загальна встановлена потужність станції може зрости приблизно до 150 МВт, а у наступні роки планується будівництво ще кількох черг вітрових електростанцій у регіоні.

Будівництво вітропарку має значний соціально-економічний та екологічний ефект для регіону. Під час реалізації проєкту було створено нові робочі місця, модернізовано транспортну інфраструктуру та збільшено надходження до місцевих бюджетів. Крім того, виробництво електроенергії з енергії вітру сприяє скороченню викидів парникових газів і зменшенню використання викопних видів палива, що позитивно впливає на екологічний стан довкілля. Таким чином, вітропарк поблизу міста Володимир є одним із ключових елементів формування системи відновлюваної енергетики Волинської області. Його функціонування сприяє підвищенню енергетичної незалежності регіону, розвитку сучасної енергетичної інфраструктури та реалізації загальнодержавної стратегії переходу до «зеленої» енергетики. У таблиці 3.1. подано узагальнену характеристику розвитку вітроенергетики на Волині.

Перспективи розвитку вітроенергетики у регіоні включають розширення потужностей до 150 МВт у найближчі роки; подальше будівництво нових ВЕС у Волинській області та формування нового кластеру відновлюваної енергетики Західної України.

Таблиця 3.1. – Коротка статистична характеристика розвитку вітроенергетики Волинської області (складено за [22]).

Показник	Значення
Потужність першої черги ВЕС	90 МВт
Проектна потужність вітропарку	147–150 МВт
Загальна вартість будівництва	225 млн €
Кредит міжнародних банків	157 млн €
Кількість споживачів, яких може забезпечити електроенергією вітропарк	понад 100 тис.
Інвестор проекту	ОККО Group (Галнафтогаз)

3.3. Методика оцінки вітроенергетичного потенціалу території

Для оцінювання природного потенціалу вітрової енергії у Лісостеповій зоні Волинської області було використано кліматичні показники, що відповідають багаторічній нормі спостережень метеорологічної станції Луцьк, оскільки ця станція розміщена саме в межах Волинського Лісостепу. Зазначена станція розташована в с. Підгайці. Вихідні метеорологічні матеріали отримано з архівних фондів Волинського обласного центру з гідрометеорології [1]. Для підвищення достовірності результатів ці дані додатково уточнювалися та коригувалися відповідно до методичних підходів і результатів аналізу, представлених у джерелі [16].

Оцінка перспектив використання вітрових ресурсів у Лісостеповій зоні Волині здійснювалася поетапно та передбачала комплексний аналіз низки факторів. Першим етапом стало дослідження швидкісних характеристик вітру. На цьому етапі розглядалися не лише середні значення швидкості вітру за добу, місяць і рік, але й аналізувалася повторюваність швидкостей, які вважаються найбільш придатними для ефективної роботи вітроенергетичних установок на досліджуваній території. Такий підхід дає змогу більш об'єктивно оцінити реальні можливості використання вітрової енергії.

Другий етап дослідження полягав у визначенні потенційних територій, придатних для розміщення вітроенергетичних установок. У процесі цього

аналізу здійснювався відбір ділянок, які за своїми природними та просторовими характеристиками можуть бути перспективними для спорудження вітроенергетичних станцій.

Третій етап передбачав проведення розрахунків можливого обсягу енергії, який потенційно може бути отриманий на обраних пріоритетних територіях за умови використання вітрових установок різної встановленої потужності. Це дало можливість оцінити енергетичну ефективність і доцільність впровадження таких об'єктів у межах досліджуваної території.

Загальноприйнятим у сфері вітроенергетики вважається положення, відповідно до якого економічно обґрунтоване використання енергії вітру можливе на тих територіях, де середня швидкість вітру становить щонайменше 4 м/с. Саме цей показник зазвичай використовується як один із базових критеріїв визначення придатності певної місцевості для розвитку вітроенергетики. У таблиці 3.2 наведено класифікацію територій залежно від характеристик їх вітрового режиму та перспективності використання енергії вітру.

Разом із тим результати досліджень свідчать, що протягом останніх десятиліть середньорічні значення швидкості вітру на території дослідження змінюються в межах 3,5–4,0 м/с. Ці показники є близькими до кліматичної норми і загалом відображають типовий багаторічний режим вітру для даного регіону. Враховуючи зазначені значення, територія Лісостепу Волині належить до зон, де доцільним є використання вітроенергетичних установок невеликої потужності.

Крім того, такий підхід відповідає загальноприйнятим принципам просторового планування вітроенергетичних об'єктів. Потужні вітрові електростанції зазвичай не рекомендується розміщувати безпосередньо в межах населених пунктів, оскільки вони потребують значних площ та можуть створювати певні екологічні й акустичні навантаження. З цієї причини великі вітрові електростанції зазвичай виносять за межі урбанізованих територій. Натомість у містах доцільніше використовувати малопотужні вітроенергетичні установки, які, подібно до невеликих сонячних електростанцій, можуть частково

забезпечувати місцеві потреби в електроенергії на рівні домогосподарств або комунальної інфраструктури [4, 5, 18, 25].

Вітровий режим, який відіграє суттєву роль у формуванні екологічного стану екосистем, перебуває у тісному взаємозв'язку з іншими метеорологічними та кліматичними чинниками. Динаміка повітряних потоків у межах міст, наприклад, значною мірою залежить від загальних кліматичних умов, температурного режиму, вологості повітря та інших атмосферних процесів. З огляду на це, кліматичні умови території дослідження належать до помірного кліматичного поясу і формуються під впливом західної частини атлантико-континентальної кліматичної області України. Для цієї кліматичної провінції характерні відносно м'якші та більш вологі погодні умови порівняно з багатьма іншими регіонами країни. У літній період температурні показники тут зазвичай дещо нижчі, ніж на значній частині території України, тоді як холодна пора року відзначається помірною м'якістю. Зимовий сезон нерідко супроводжується частими відлигами, що зумовлює нестійкість снігового покриву. Теплий період року характеризується достатньою кількістю опадів і підвищеною вологістю повітря, що загалом формує досить вологий і помірно теплий кліматичний режим Волинського регіону [22].

Таблиця 3.2. – Оцінка перспективності використання ділянок для потреб вітроенергетики (подано за [16])

№	Середні річні швидкості вітру	Оцінка перспективності спорудження вітроенергоустановок
1	< 3,0 м/с	Використання вітроенергоустановок є неперспективним
2	3,0 – 3,5 м/с	Використання вітроенергоустановок є малоперспективним
3	3,5 – 4,0 м/с	Перспективне використання вітроенергоустановок малої потужності
4	4,0 – 5,5 м/с	Перспективне використання вітроенергоустановок малої та великої потужності
5	> 5,5 м/с	Перспективне використання всіх типів вітроенергоустановок

В цілому для даної території швидкість вітрового потоку (або швидкість вітру в метеорологічному значенні даного числового показника) у середньорічному виразі є дещо меншою або близькою до 4 м/с. Однак, враховуючи той факт, що швидкість вітру вимірюється на метеорологічних станціях на висоті встановлення флюгера чи анеморумбометра близько 12 м (іноді трохи вище або трохи нижче, але ніколи не вище 20 м), а сучасні вітроустановки досягають у висоту 100 м, виникає потреба у розрахунку швидкості вітру саме на такій значній висоті [19].

Вітроенергетичний потенціал швидкості вітру на будь-якій висоті до 100 м над поверхнею землі обчислюється за формулою (Васько, 2001):

$$W_1 = V_0 * (H_1/H_0)^k$$

Де: W_1 – це вітроенергетичний потенціал на висоті 100 м, бали;

V_0 – це швидкість вітру на висоті метеостанції, м / с;

H_1 – запланована висота осі ротора ВЕУ, м;

H_0 – встановлена висота флюгера на метеостанції, м (найчастіше = 12 м);

k – поправочний емпіричний коефіцієнт, що дорівнює 0.167.

При виборі перспективної ділянки для будівництва вітрових електростанцій враховуються також такі критерії:

- крутизна схилу, де заплановане будівництво ВЕУ – вона повинна становити не більше 5^0 ;
- сучасна структура землекористування на досліджуваній території (ряд ділянок ні при яких умовах не можуть бути вилучені під спорудження ВЕУ, і в цілому – потрібен дозвіл землекористувачів та землевласників);
- площа території, що відводиться під ВЕУ, повинна становити не менше 1 км².

Для встановлення територій, що мають найбільший потенціал для розміщення вітрових електростанцій, у сучасних дослідженнях активно застосовуються матеріали дистанційного зондування Землі, зокрема космічні знімки. На основі таких даних створюються карти крутості схилів, які надалі класифікуються за величиною нахилу поверхні – зокрема, виділяються ділянки з

ухилом менше 5° та понад 5° . Паралельно з цим, використовуючи топографічні карти масштабу 1:50 000, інформацію державного земельного кадастру України та супутникові знімки, формується картографічна модель сучасної структури землекористування досліджуваної території.

У межах такого картографічного аналізу виділяють основні типи просторових об'єктів, серед яких: забудовані території, землі природно-заповідного фонду, лісові масиви, сільськогосподарські угіддя, незадіяні або малопродуктивні землі, садові насадження, пасовища, водні об'єкти, а також рекреаційні та паркові зони. Серед перелічених категорій найбільш придатними для розміщення вітроенергетичних об'єктів вважаються ділянки, які не використовуються у господарській діяльності, а також території неугідь і пасовищ. Інші типи земель, особливо забудовані території, природоохоронні об'єкти чи лісові масиви, на початковому етапі дослідження, як правило, виключаються з подальшого аналізу.

Поєднання карт крутизни рельєфу з картами структури землекористування дає можливість визначити ділянки, що теоретично можуть розглядатися як потенційні майданчики для спорудження вітроенергетичних установок. Після цього всі виявлені контури таких територій підлягають оцифруванню, а також проводиться розрахунок їх площі. Ділянки, площа яких є меншою за 1 км^2 , зазвичай не розглядаються як перспективні та виключаються з подальшого аналізу [4, 5, 18].

Під час визначення придатності територій для будівництва вітрових електростанцій важливим фактором також є можливий шумовий вплив на навколишнє середовище та прилеглі населені території. Згідно з чинними санітарними нормами, безпечним для людини рівнем шуму, який не спричиняє негативного впливу на слух навіть за тривалого впливу, вважається 55 дБ у денний період та 40 дБ у нічний час (Санітарні норми, 1996). Дослідження показують, що на відстані приблизно 300 м навіть від потужних вітрових турбін рівень шуму зазвичай не перевищує 40 дБ, тобто відповідає встановленим нормативним вимогам (Будівництво ВЕС, 2011) [4, 5, 18].

Окрім цього, при плануванні розміщення вітрових установок необхідно враховувати вимоги щодо збереження біорізноманіття та мінімізації можливого впливу на природні екосистеми. З цією метою рекомендовано дотримуватися певної мінімальної відстані між окремими установками, яка має становити не менше ніж чотири висоти вітроенергетичної установки. Застосування описаної методики дозволяє сформувати картографічну модель ділянок, що мають найвищу перспективність для розміщення вітроенергетичних установок у межах території Лісостепової зони Волинської області.

На наступному етапі дослідження може бути проведений розрахунок потенційного обсягу електричної енергії, який теоретично можна отримати, використовуючи площі визначених пріоритетних територій. Оцінювання технічно можливого виробництва електроенергії здійснюється за спеціальною розрахунковою формулою, запропонованою у відповідних наукових дослідженнях (Мазінов та ін., 2009) [18].

$$E_{\text{mic}} = P_0 * t * n$$

Де: E_{mic} - технічно досяжний обсяг вироблення вітрової електроенергії;

P_0 – номінальна потужність вітроустановки;

t – кількість годин її роботи за кожен місяць;

n – % кількості днів зі швидкістю вітру > 4 м/с.

Перейдемо до характеристики основних показників вітрового режиму у м. Луцьку, які склалися на даний час.

Формування вітрового режиму на території дослідження визначається поєднанням впливом кількох природних чинників. З одного боку, важливу роль відіграють особливості підстилаючої поверхні, а з іншого – загальний характер атмосферної циркуляції. Напрямок і швидкість повітряних потоків значною мірою залежать від сезонної та місячної динаміки баричних центрів, що формуються над просторами Євразійського материка та акваторією Атлантичного океану. Протягом року територія Волинської області перебуває під впливом різних типів повітряних мас. Найбільш поширеним є континентальне повітря помірних широт, яке надходить у регіон упродовж усього року та формується внаслідок

трансформації арктичних або морських повітряних мас помірних широт. Окрім цього, у всі сезони спостерігається проникнення морського повітря помірних широт. У зимовий період його надходження пов'язане з активною циклонічною діяльністю, що розвивається над територією Північно-Західної Європи, тоді як у літній сезон воно часто зумовлене впливом антициклонічних процесів [19].

Арктичні повітряні маси, як морського, так і континентального походження, досягають даної території відносно нечасто, проте їх вплив є відчутним, особливо щодо температурного режиму. Саме з їхнім вторгненням пов'язані найнижчі мінімальні температурні показники. Під час надходження арктичного повітря можливе різке похолодання, коли протягом однієї доби температура повітря може знизитися на 20°C і навіть більше. У літньо-осінній період іноді спостерігається проникнення морського арктичного повітря, що спричиняє встановлення прохолодної та вологої погоди. У теплу частину року, зокрема влітку, на територію регіону може надходити континентальне тропічне повітря, яке зумовлює формування найвищих температурних максимумів. Також інколи фіксується надходження морського тропічного повітря з району Середземномор'я, що приносить теплу, переважно хмарну погоду, яка нерідко супроводжується утворенням туманів [1, 11].

Особливості атмосферної циркуляції безпосередньо впливають і на переважні напрями вітрів. У холодний період року найчастіше спостерігаються вітри західного та південно-західного напрямків. У літній сезон домінуючими стають західні та північно-західні вітри, хоча помітною залишається також частка південно-західних потоків. Окрім них, періодично фіксуються вітри південного та східного напрямків [11, 21]. Побудована на основі даних цієї таблиці діаграми (рис. 3.2) наочно демонструють, що протягом року в межах регіону переважають вітри західного напрямку та суміжних секторів.

Швидкість вітру значною мірою визначається особливостями підстилаючої поверхні, величиною градієнту тиску та загальними умовами атмосферної циркуляції. Згідно даних ст. Луцьк, середньорічні показники швидкості вітру досить помірні і коливаються в межах 3,8–4,0 м/с. Найчастіше

протягом року спостерігаються вітри з швидкістю від 2 до 3 м/с, тоді як випадки значно більшої швидкості (8–10 м/с) є малоюмовірними і становлять лише близько 9 % від загальної кількості зафіксованих випадків. Вітри зі швидкістю понад 10 м/с на території Волинської області виникають дуже рідко [11].

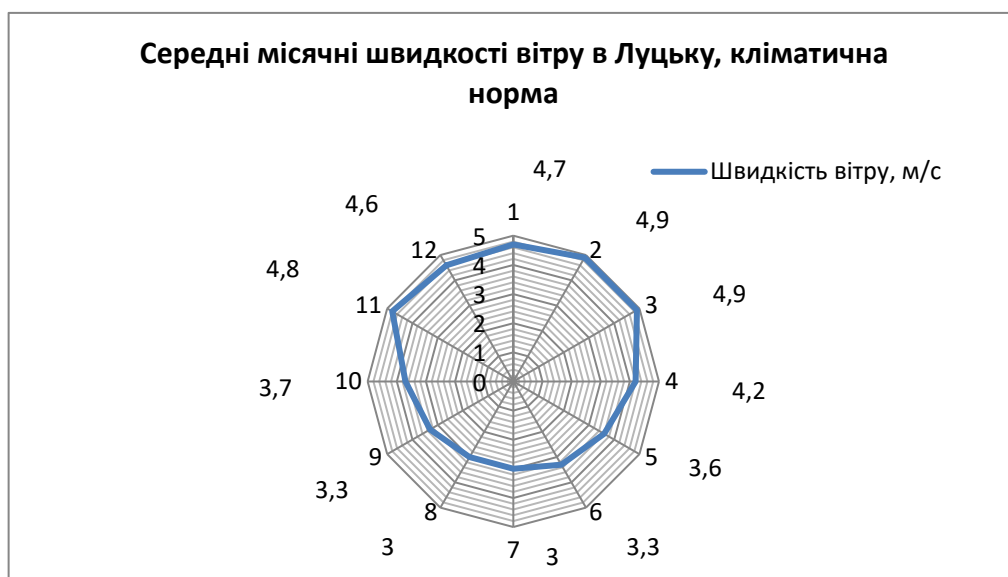
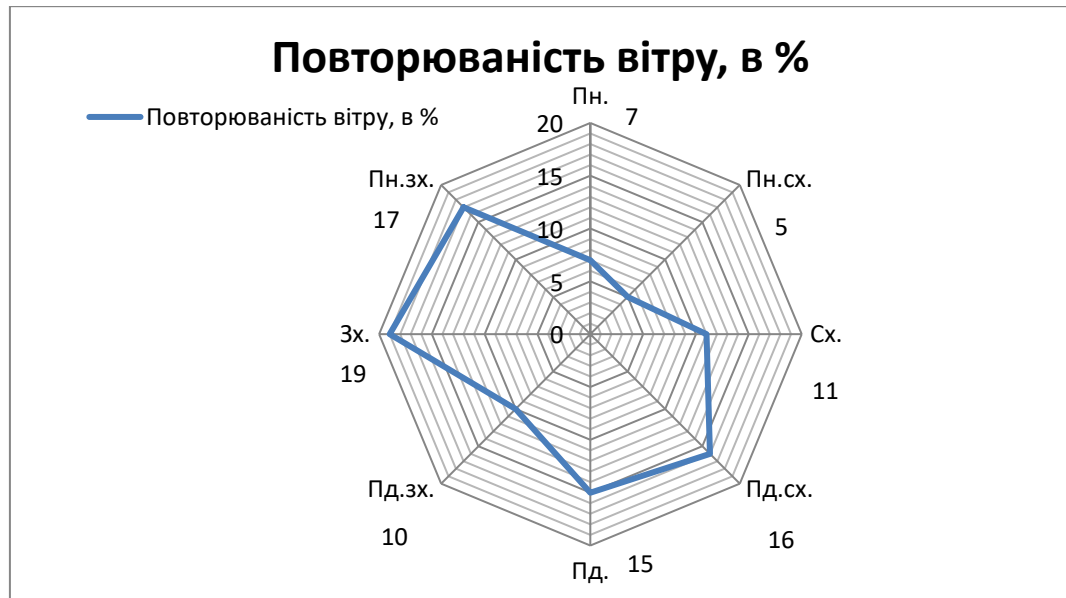


Рисунок 3.2 Основні показники вітрового режиму в Лісостеповій зоні Волинської області (побудовано за даними ст. Луцьк). *Примітка: 10 % днів – штиль, безвітряна погода, ці дані не подавалися на діаграмах.*

Протягом доби швидкість вітру демонструє чітку послідовну мінливість. Максимальні значення спостерігаються в денні години, близько 13:00, і варіюють від 4,6 м/с у липні – серпні до 5,9 м/с у березні – квітні. Найменші швидкості характерні для нічного часу (близько 01:00), коли вони коливаються від 2,0 м/с у липні до 4,8 м/с у лютому. Така суттєва різниця пояснюється

особливостями нагрівання поверхні: вдень сонячна інсоляція створює значні температурні контрасти між різними ділянками території, що формує локальні зони підвищеного та зниженого тиску. Саме між цими зонами виникають повітряні потоки, які поступово посилюються протягом дня. Подібний діурнальний режим вітру є типовим для літнього періоду. У зимовий час добова змінність швидкості вітру значною мірою визначається більш широкомасштабними циркуляційними процесами, що охоплюють як локальний, так і регіональний та глобальний рівні атмосфери [31, 32, 33].

3.4. Оцінка параметрів вітроенергетичного потенціалу Волинського Лісостепу

Відповідно до наведених вище методичних підходів та із застосуванням формул, запропонованих у працях Васько П.Ф. (2001) та Мазінова А.Г. (2009) [4, 5, 18], було виконано розрахунок основних показників, що характеризують вітроенергетичний потенціал території дослідження та оцінено перспективи генерації електроенергії для двох варіантів установки вітроенергетичних об'єктів: промислова вітроенергетична установка середньої потужності 3,6 МВт та мала вітроенергетична установка середньої потужності 10 кВт.

У таблиці 3.3 наведені розраховані значення показників для кожного місяця року, а також усереднені або сумарні річні величини. Для оцінки потенціалу враховувалися такі параметри: середня швидкість вітру (м/с) – це базовий показник, від якого залежить розрахунок усіх наступних характеристик вітроенергетичного потенціалу; вітроенергетичний потенціал – це інтегральний показник, розрахований за методикою П.Ф. Васько, виражений у балах; технічно досяжний обсяг вироблення електроенергії промисловою ВЕУ потужністю 3,6 МВт; технічно досяжний обсяг вироблення електроенергії малою ВЕУ потужністю 10 кВт. Такий підхід дозволяє оцінити не лише середню продуктивність вітрових установок у межах року, а й визначити потенційні можливості генерації електроенергії на різних типах вітроенергетичних установок, що є важливим для планування розвитку вітроенергетики у регіоні.

Таблиця 3.3. – Показники вітроенергетичного потенціалу Лісостепової зони Волинської області

Показник	Місяці року												Рік
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
Середня місячна швидкість вітру, м/с	4,7	4,9	4,9	4,2	3,6	3,3	3,0	3,0	3,3	3,7	4,8	4,6	4,0
W (вітроенергетичний потенціал), бали	6,9	7,2	7,2	6,2	5,3	4,9	4,4	4,4	4,9	5,4	7,1	6,8	5,9
Еміс.мах (технічно досяжний обсяг вироблення вітрової електроенергії для промислової ВЕУ потужністю 3,6 МВт)	0,24 МВт	0,26 МВт	0,26 МВт	0,24 МВт	0,19 МВт	0,18 МВт	0,14 МВт	0,14 МВт	0,18 МВт	0,2М Вт	0,24 МВт	0,24 МВт	2,51 МВт
Еміс.мах (технічно досяжний обсяг вироблення вітрової електроенергії для малої ВЕУ потужністю 10 КВт)	0,72 КВт	0,84 КВт	0,84 КВт	0,68 КВт	0,56 КВт	0,50 КВт	0,45 КВт	0,45 КВт	0,50 КВт	0,59 КВт	0,75 КВт	0,70 КВт	7,58 КВт

На основі даних таблиці 3.3 були побудовані діаграми (рис. 3.3 – 3.5), які наочно демонструють річну динаміку розрахованих показників для Лісостепової зони у Волинській області та їх сумарні річні величини. Проведемо детальний аналіз отриманих результатів та порівняємо їх із рекомендованими мінімальними та оптимальними значеннями параметрів, необхідними для ефективного функціонування вітроенергетичних установок.



Рисунок 3.3 Річний хід швидкості вітру у Лісостеповій зоні Волинської області (за даними ст. Луцьк).

Аналіз даних таблиці 3.3 та діаграм на рис. 3.3 показує, що середньорічна швидкість вітру у межах території дослідження становить близько 4,0 м/с. З точки зору ефективності використання вітрової енергії, цей показник перебуває на межі доцільності для спорудження вітроенергетичних установок, адже загальноприйнятою умовою для перспективного розміщення ВЕУ є середньорічна швидкість вітру понад 4 м/с. Варто зазначити, що території з середньорічною швидкістю понад 7 м/с вважаються оптимальними для будівництва вітрових електростанцій, а найбільш сприятливими – із швидкостями понад 10 м/с; такі значення для районів Волинської області не характерні. Водночас протягом року спостерігається суттєва місячна варіативність швидкостей вітру. Найвищі середні місячні значення досягають 4,9 м/с у лютому та березні, тоді як найнижчі спостерігаються в серпні та вересні та становлять близько 3,0 м/с. Аналіз сезонної динаміки показує, що найбільш сприятливим періодом для використання вітроенергетичного потенціалу є холодні місяці, з листопада по березень, коли швидкості вітру помітно зростають. Проте навіть у цей період середні швидкості вітру в Лісостеповій зоні Волинської області практично не перевищують 5 м/с. Через це в цілому дана територія не може розглядатися як перспективна для спорудження великих промислових пакетних ВЕС, які в довоєнний період масово проектувалися та вводилися в експлуатацію на півдні України та в прибережних регіонах.

Розглянемо показник вітроенергетичного потенціалу (табл. 3.3, рис. 3.4), який визначається з урахуванням низки факторів: фактичних швидкостей вітру, зафіксованих на рівні анемометричного обладнання місцевої метеостанції, висоти його встановлення, середньої висоти ротора ВЕС чи ВЕУ, а також емпіричних коефіцієнтів відповідно до методики Васько П.Ф. Для проведення розрахунків використовували середньомісячні та середньорічні значення швидкості вітру, висоту установки анеморумбометра та флюгера на метеостанції у с. Підгайці (12 м), а також середню висоту ротора вітроустановок, що експлуатувалися на півдні України до початку війни (100 м). Вітроенергетичний потенціал оцінюється у балах, причому доцільним вважається будівництво та

експлуатація ВЕУ за умови, якщо V перевищує 6 балів, а оптимальним показником для розвитку вітроенергетики регіону є значення понад 10 балів.

Аналіз даних таблиці 3.3 та діаграми на рис. 3.4 демонструє, що середньорічне значення вітроенергетичного потенціалу в зоні дослідження становить приблизно 5,9 балів, що трохи нижче порога, рекомендованого для ефективного використання вітрової енергії. Разом із тим, детальне дослідження річної динаміки цього показника показує його кореляцію зі швидкістю вітру: у період з листопада по березень значення V досягають рівня, достатнього для встановлення та продуктивної роботи вітроенергетичних установок, що свідчить про сезонну доцільність впровадження ВЕУ у холодні місяці.



Рисунок 3.4 Вітроенергетичний потенціал W у Лісостеповій зоні Волинської області та його зміни протягом року.

При значеннях вітроенергетичного потенціалу, що коливаються в межах 6–7 балів, фахівці в галузі вітроенергетики радять використовувати малі вітроустановки. До категорії малих ВЕУ належать генератори потужністю від 5 до 50 кВт, тоді як промислові вітроенергетичні установки сучасного типу мають потужність понад 500 кВт. У проміжку 50–500 кВт функціонують вітрогенератори середньої потужності. Малі ВЕУ (5–50 кВт) зазвичай монтуються на території приватних домогосподарств і дозволяють частково забезпечити електроенергією житлові будинки, комунальні об'єкти або адміністративні заклади (школи, дитячі садки, сільські амбулаторії тощо). Основна перевага таких установок полягає у їхній відносній доступності,

простоті експлуатації та ефективності в умовах сільської місцевості, де завдяки відкритим просторам швидкість вітру є вищою. У межах міст можливим є встановлення малих ВЕУ на дахах житлових і промислових будівель, що додатково збільшує висоту ротора та покращує продуктивність генератора.

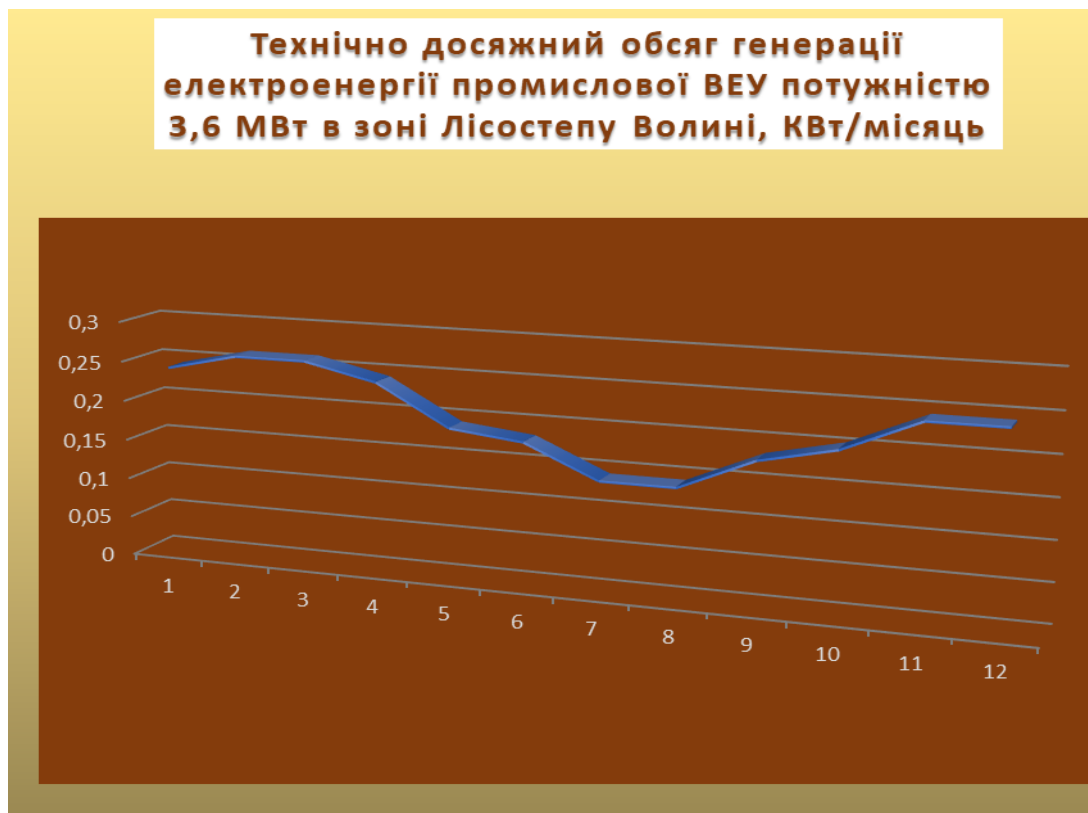


Рисунок 3.5 Технічно досяжний обсяг вітрогенерації електроенергії у Лісостеповій зоні Волинської області при встановленні промислової ВЕС потужністю 3,6 МВт. Річна генерація – в межах 2,51 МВт.

Враховуючи невисокий рівень забезпеченості Волинської області вітровими ресурсами, було проведено розрахунки технічно досяжного обсягу вироблення електроенергії для Лісостепової зони, за метеопараметрами ст. Луцьк: $E_{\max 1}$ – для промислової ВЕУ потужністю 3,6 МВт, та $E_{\max 2}$ – для малої ВЕУ потужністю 10 кВт. Вибір потужності «еталонних» установок пояснюється типовими умовами експлуатації в Україні: промислові ВЕУ потужністю 3,6 МВт обиралися через їхню надійність, простоту обслуговування та практичність, тоді як малі ВЕУ потужністю 10 кВт є найпоширенішими завдяки оптимальному співвідношенню ціни, потужності, довговічності та якості (див. дані у таблиці 3.3 та графіки на рис. 3.5 і рис. 3.6).



Рисунок 3.6 Технічно досяжний обсяг вітрогенерації електроенергії у Лісостеповій зоні Волинської області при встановленні малої ВЕУ потужністю 10 кВт.

Результати розрахунків (табл. 3.3, рис. 3.5 – 3.6) показують, що промислова ВЕУ не здатна досягти проектної потужності ні у окремі місяці, ні за рік загалом. Натомість малі ВЕУ демонструють задовільні показники: проектна потужність 7,56 кВт при максимально можливій 10 кВт свідчить про економічну доцільність встановлення таких установок.

Висновки до розділу 3: отже, фізико-географічні особливості ландшафтів зони Лісостепу суттєво впливають на формування вітрового режиму. Рельєф цієї природної зони у Волинської області слабохвилястий, водні артерії створюють аераційні коридори, що впливає на циркуляцію повітряних мас, а зелені зони й паркові насадження сприяють перерозподілу швидкостей і напрямків потоків. Для урбанізованих районів планування міських кварталів, характер забудови, розташування магістралей і транспортних шляхів також визначають локальні особливості вітрового режиму.

Кліматичні умови Лісостепової зони Волині сприятливі: територія розташована в зоні помірного, м'якого, вологого та помірно теплого клімату. Мікрокліматичні відмінності між окремими районами обумовлені трансформацією сонячної радіації на активних поверхнях, наявністю зелених зон та водних об'єктів, висотною забудовою та іншими природними і антропогенними чинниками.

Розрахунки вітроенергетичного потенціалу та технічно досяжного вироблення електроенергії для промислової ВЕУ потужністю 3,6 МВт і малої ВЕУ 10 кВт показали, що вітрові ресурси регіону достатні для ефективної роботи малих ВЕУ у холодний період року (листопад–березень), причому найсприятливішими місяцями є лютий і березень. У теплий період року показники потенціалу знижуються, що робить будівництво великих ВЕС економічно та екологічно недоцільним.

Натомість розширене впровадження малої вітроенергетики, наприклад, на дахах висотних нежитлових будівель або у прилеглих сільських районах – є перспективним напрямком розвитку альтернативної енергетики. Малі ВЕУ можуть забезпечувати додаткову електроенергію для приватних садиб, навчальних закладів та адміністративних об'єктів. Оптимальною є комбінація з сонячними панелями: якщо сонячні панелі забезпечують генерацію в літній період, то вітрогенератори в холодну пору року дозволяють досягти більш повної енергетичної автономії.

Серед існуючих проблем встановлення малих ВЕУ у містах – шум і естетичне сприйняття, проте з розвитком технологій, що мінімізують акустичне навантаження, можна очікувати широке використання вітрогенераторів на дахах міських будівель. Це забезпечить додаткове вироблення «зеленої» енергії для електро- та теплозабезпечення, сприятиме енергетичній автономії та підвищенню екологічності міської інфраструктури.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз особливостей вітрового потенціалу у Лісостеповій зоні Волинської області України та взаємозв'язку вітрового режиму з формуванням міського середовища дозволяє сформулювати наступні узагальнення:

1) Вітровий режим відіграє ключову роль у визначенні екологічного стану регіону та його мікроклімату. Швидкість вітру, панівні напрямки та сезонні зміни вітрового потоку безпосередньо впливають на погодні умови, процеси самоочищення атмосфери, розсіювання забруднювачів та інші екологічні явища. Тому точна оцінка характеристик аерації території є надзвичайно важливою при плануванні забудови, реконструкції кварталів, розробці генеральних планів та проектуванні нових об'єктів.

2) Вивчення вітрового режиму забезпечує основу для оцінки температурно-вологісного режиму, запиленості та загазованості повітря, обґрунтування щільності забудови, ефективного використання земельних ресурсів та проведення багатфакторного аналізу вітроенергетичного потенціалу.

3) Формування вітрового режиму у Лісостеповій зоні Волині визначається комплексом факторів: глобальною циркуляцією повітря, рельєфом, характером підстильної поверхні, особливостями забудови, наявністю зелених зон та водних об'єктів. Загалом умови вітрового режиму є сприятливими: середні швидкості вітру складають 3,5–4,0 м/с, максимальні пориви досягають 16–20 м/с, а переважаючі напрямки – західний, північно-західний та південно-західний, що відповідає загальному типу західного перенесення повітряних мас.

4) Розрахункові показники свідчать, що середньорічний вітроенергетичний потенціал в Лісостеповій зоні Волинської області оцінюється на рівні 5,9 балів, що трохи нижче порогового значення 6,0 балів для визначення території як сприятливої для розвитку вітрової енергетики. Проте у холодний період року (листопад–квітень) цей потенціал зростає до 6,2–7,2 балів, що робить його більш привабливим для експлуатації ВЕУ у цей сезон.

5) За розрахунками, промислові вітрові електростанції потужністю 3,6 МВт в умовах території дослідження не досягають проектної потужності ані в окремі місяці, ані протягом року. Водночас показники малої ВЕУ (7,56 кВт річної потужності при максимальній – 10 кВт) є задовільними, що підтверджує їхню ефективність та доцільність встановлення у межах міста.

6) Результати дослідження свідчать, що розвиток вітроенергетики в регіоні можливий і доцільний, проте найбільш ефективними є малі ВЕУ потужністю 5–50 кВт, які добре працюють у холодний період року. Комбінування таких систем із сонячними панелями, ефективними у теплу пору року, дозволяє створити автономні енергетичні рішення для домогосподарств, промислових, соціальних, освітніх і культурних об'єктів. Це особливо актуально в умовах військової агресії російської федерації та руйнування енергетичної інфраструктури України.

7) Водночас експлуатація міні-ВЕУ супроводжується низкою екологічних викликів: шум та вібрації, можливий вплив на дику фауну (птахів і кажанів), естетичні питання та потреба у майбутній утилізації лопатей. За умови мінімізації або контролю цих негативних факторів, малі вітрогенератори можуть бути розміщені на дахах нежитлових висотних будівель, вносячи значущий внесок у розвиток альтернативної енергетики, реалізацію «зеленого переходу» та подолання глобальної кліматичної кризи.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ:

1. Архів погоди Волинського обласного центру з гідрометеорології [Електронний ресурс]. URL: <http://www.meteolutsk.net.ua/>
2. Василюк М., Федонюк В.В. Вітровий режим Луцька протягом 50 років та його екологічний вплив. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*. VII Міжнародний молодіжний конгрес, 10 – 11 лютого 2022 р., Україна, Львів : Збірник матеріалів. К.: Ярученко Я.В., 2022. С.31–32.
3. Василюк М.В., Михайлюк В.А., Федонюк В.В. Вітровий режим на Волині в контексті глобальних кліматичних змін. *Актуальні проблеми сучасної науки і освіти*: матеріали IV Міжнародної науково-практичної конференції м. Львів, 20-21 січня 2022 року. Львів: Львівський науковий форум, 2022. С.6 – 8.
4. Васько П.Ф. Разраунок показників технічної ефективності застосування вітроелектричних установок за результатами строкових вимірювань швидкості вітру. *Технічна електродинаміка*, 2001. № 6. С. 45 – 49.
5. Васько П. Ф., Вербовий А. П., Пазич С. Т. Реалізація стохастичної двопараметричної моделі поздовжньої складової швидкості вітру для задач вітроенергетики. *Відновлювана енергетика*, 2017. № 3. С. 50 – 64.
6. Волинська область [Електронний ресурс]. URL: https://allref.com.ua/uk/skachaty/Volins-ka_oblast-?page=1
7. Географічне положення, території та межі міст [Електронний ресурс]. URL: <http://www.novageografia.com/vogels-256-1.html>
8. Гордюк І. В., Дорошенко Ю.А. Комп'ютерне моделювання повітряних потоків у міській забудові. *Новітні комп'ютерні технології*. 2013. Вип. XI. С. 166–168.
9. Довкілля і здоров'я / В.І. Карамуша (упорядн.). Київ : Міністерство екології та природних ресурсів України, 2001. 44 с.
10. Екологічна енциклопедія: У 3т. / Редколегія: А.В. Толстоухов (головний редактор) та ін. К.: ТОВ «Центр екологічної освіти та інформації», 2007. Т.2: Є – Н. 416 с.

11. Корецька О. В. Стан районів міста Луцька очима його мешканців. Л. 2015. 108 с.
12. Клімат України / [за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко]. К.: Вид-во Раєвського, 2003. 245 с.
13. Короткий опис міста Луцька: розташування, природні умови, клімат [Електронний ресурс]. URL: https://www.lutskrada.gov.ua/sites/default/files/moredesc_01.pdf
14. Клімат Полісся: дослідження вчених і довготривалий прогноз погоди на Поліссі [Електронний ресурс]. URL: <http://www.polissya.eu/>
15. Кравчук П. А. Книга рекордів Волині. Луцьк: Волинська обласна друкарня ; Любешів : Ерудит, 2005. 302 с.
16. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії. К.: НТУУ «КПІ», 2012. 492 с.
17. Ліпінський В.М., Осадчий В.І., Бабіченко В.М. Активізація стихійних метеорологічних явищ на території України – прояв глобальних змін клімату. *Український географічний журнал*. К.: 2007. № 2. С. 11–20.
18. Мазінов А.С., Бекиров Е.А. Вітроенергетичні установки: типи, ефективність, вибір. *Сонячна і вітрова енергетика*. Науковий бюлетень. Сімферопіль. 2012. С. 18 – 23.
19. Міжнародне агентство з відновлюваної енергетики IRENA, REMAP – 2030. Перспективи розвитку відновлюваної енергетики в Україні до 2030 року // джерело: URL: <https://www.irena.org/>
20. Метеорологія і кліматологія / В.М. Кобрін, В.В. Вамболь, В.Л. Клеєвська, Л.Б. Яковлев. / Навч. посібник. Харків: Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т» 2006. 282 с.
21. Метеорологічна характеристика Волинської області [Електронний ресурс]. URL: <http://allreferat.com.ua/uk>
22. Мольчак Я.О. Луцьк: Сучасний екологічний стан та проблеми / Мольчак Я.О., Фесюк В.О., Картава О.Ф. Луцьк: РВВ ЛДТУ, 2003. 488 с.

23. Музей Волинського краю [Електронний ресурс]. URL: http://volyn-kray-mus.at.ua/publ/ekspozycja/viddil_prirodi_volini/7-1-0-7
24. Панькевич А.С., Федонюк В.В. Режим вітру у Луцьку в зоні впливу Будинку-Вулика. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування*. VIII Міжнародний молодіжний конгрес, 02 – 03 березня 2023 р. Збірник матеріалів. Україна, Львів : Національний університет «Львівська політехніка», 2023. С.84-85. URL: https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2023/feb/29834/zbirnykviiimizh_narodnyymolodizhnyykongres02-03032023.pdf
25. Півняк Г., Шкрабець Ф., Нойбергер Н., Ципленков Д. Основи вітроенергетики. Підручник. Дніпро: НГУ, 2015. 335с.
26. Павловська Т. С., Стельмах В. Ю., Полянський, С. В. Структура природного року у Волинській області та її мінливість у часі й просторі. *Acta Academiae Beregsasiensis: Geographica Et Recreatio*, Берегово, 2025, № 3. С. 82 – 94. DOI: <https://doi.org/10.32782/2786-5843/2025-3-7>
27. Сучасний екологічний стан та перспективи екологічно безпечного стійкого розвитку Волинської області: кол. моногр. / В.О. Фесюк, С.О.Пугач, А.М. Слащук [та ін.]; за ред.. В.О. Фесюка. К.: ТОВ «Під-ство «Ві Ен Ей»: 2016. 316 с.
28. Тарасюк Н.А., Тарасюк Ф.П. Регіональні прояви глобального потепління (за даними спостережень по метеостанції Луцьк). *Географія та екологія: наука і освіта* : матеріали V Всеукр. наук.-практ. конф. (з міжнар. участю), м. Умань, 10–11 квіт. 2014 р. / відп. ред. О. В. Браславська. Умань : ВПЦ «Візаві» (Видавець «Сочінський»), 2014. С. 330–333.
29. Шевченко О., Сніжко С. Вітровий режим великого міста. *Вісник КНУ ім. Тараса Шевченка, Серія «Географія»*. 3 (72). 2018. С.13 – 21.
30. Федонюк В.В., Іванців В.В., Федонюк М.А., Іванців О.В. Картографування екологічного стану повітряного басейну м. Луцька на основі ліхеноіндикації. *Часопис картографії*: Збірник наукових праць. К.: КНУ ім. Тараса Шевченка, 2016. Вип. 16. С. 250 - 271.

31. Федонюк М.А., Федонюк В.В. Екологічний вплив вітру у зоні міської забудови Луцька. *Авіація, промисловість, суспільство*: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції. Кременчук, 12 травня 2022 р. МВС України, Харків. нац. ун-т внутрішніх справ, Кременчуцький льотний коледж. Харків: ХНУВС, 2022. С. 379-383.

32. Федонюк В.В., Федонюк М.А. Вплив вітрового режиму на ефективне планування території Луцької ОТГ. *Розвиток територіальних громад: правові, економічні та соціальні аспекти*. Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції, 9 червня 2022 р., Миколаїв-с.Коблеве. Миколаїв: МНАУ: 2022. С.104 – 106.

33. Федонюк В.В., Федонюк М.А. Регіональний вплив змін клімату на господарський комплекс Волині. *Традиційні та інноваційні підходи до наукових досліджень*: матеріали IV Міжнародної наукової конференції. м.Житомир, 10 лютого, 2023 р. / Міжнародний центр наукових досліджень. Вінниця: Європейська наукова платформа, 2023. С. 129-131. URL: <https://archive.mcnd.org.ua/index.php/conference-proceeding/issue/view/10.02.2023/17>

34. Федонюк М. А. До питання удосконалення системи державного екологічного моніторингу стану атмосферного повітря. *Державне управління: удосконалення та розвиток*. 2013. № 2. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Duur_2013_2_6

35. Lew D.J. Alternatives to coal and candles: Wind power in China. *Energy Policy*. 2000, vol. 28, no. 4, pp. 271–286. DOI: 10.1016/S0301- 4215(99)00077-4

36. Seyyed Hossein Hosseini, Amir Hosein Peyman Rad, Eslam Kashi. Investigation of dissipation flow in the urbacanyon. *Advances in Environmental Technology*. 2015. № 3. P. 1761 – 1779.

37. Zdenko Simic. Small wind turbines. A unique segment of the wind power market. *Renewable Energy*, №50, 2013. P.156 – 234.