

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ВОЛКОВАЯ ОЛЕКСАНДРА ОЛЕКСАНДРІВНА

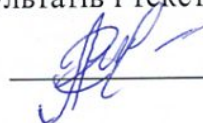
УДК 911.9:504.062.2

ДИСЕРТАЦІЯ
ПРИРОДНО-РЕСУРСНИЙ ПОТЕНЦІАЛ ТЕРИТОРІЇ
ДЛЯ РОЗМІЩЕННЯ ВІТРОАГРЕГАТИВ: ТОПІЧНИЙ РІВЕНЬ

Спеціальність 11.00.11 – конструктивна географія
і раціональне використання природних ресурсів
(10 Природничі науки)

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата географічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 О. О. Волковая

Науковий керівник Черваньов Ігор Григорович, доктор технічних наук, професор

*Усі преемственні
дисертації ідеї
за звітності
Після Г.А.
Учений секретар
секретарі*

Харків – 2018

АНОТАЦІЯ

Волковая О. О. Природно-ресурсний потенціал території для розміщення вітроагрегатів: топічний рівень. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата географічних наук за спеціальністю 11.00.11 – конструктивна географія і раціональне використання природних ресурсів (10 Природничі науки). – Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна Міністерства освіти і науки України, Харків, 2018.

Відновлювана енергетика на сьогодні є пріоритетним напрямом розвитку енергетики у багатьох розвинених країнах світу. Проте, попри значну кількість географічних, зокрема картографічних досліджень і розробок щодо регіонального оцінювання потенціалу для розвитку вітроенергетики, досі бракує методики його визначення у конкретній точці майбутнього спорудження вітроагрегату, тобто на топічному рівні розгляду. Цей просторовий рівень суттєво відрізняється від регіонального й навіть місцевого через те, що на ньому виключно важливу роль відіграє комплекс географічних факторів: морфологія рельєфу й структура ґрунтово-рослинного покриву. Їх неврахування, яке має місце на інженерно-проектувальному рівні, призводить до помилок у виборі такої точки установки вітроагрегату.

Як відомо, вітровий режим спостерігається на метеорологічних станціях і метеопостах вже досить тривалий час, забезпечуючи репрезентативні дані для аналізу й картографування. Але інтерполяція такої інформації на будь-яку конкретну точку місцевості, тобто на топічний рівень розгляду, неможлива з причини суттєвого впливу типу й структури ландшафту, який модифікує вітровий потік. Через практичну неможливість тривалого спостереження метеоелементів у конкретній точці місцевості, та ще й на

висоті осі вітроагрегату, ця проблема може бути вирішена розрахунковими засобами, як це показано у роботах вітчизняних та зарубіжних дослідників О. О. Ачкасової, М. Є. Баймірова, М. П. Кузнєцова, О. С. Третьякова, Р. Beaucage, J. Cataldo, M. Zeballos та ін. Такі розрахункові моделі існують (Т. Ван де Веккен, Ф. Вайн, В. С. Васильєв, Я. Є. Молодан, Н. І. Хрисанов), натомість, вони вимагають системного аналізу багатьох факторів фізико-географічної обстановки. Отже, виникає проблема визначення, і одночасного розгляду цих факторів як передумова успішного розміщення вітроагрегатів: самі вони є високотехнологічними пристроями, але проблема вибору й оцінювання їх місця розміщення є конструктивно-географічною.

Метою дисертаційного дослідження є імплементація методики оцінки природо-ресурсного потенціалу території для розвитку вітроенергетики регіонального рівня на топічний рівень з різним поєднанням фізико-географічних умов та з урахуванням необхідної економічної інфраструктури.

Дисертаційне дослідження базується на модельному підході в конструктивній географії. Порівняльно-географічний метод використовувався для вибору ділянки дослідження. Математичні та статистичні методи використовувалися для обробки результатів вимірів швидкостей вітру. Сучасні методи картографічного та геоінформаційного моделювання використовувалися при побудові й дослідженні поверхонь розподілу вітроенергетичних ресурсів та у визначенні обсягів виробітку енергії (з використанням програм Панорама, Surfer, ArcGIS, а також спеціалізованої ГІС WindFarm). Методи географічного аналізу і синтезу використовувались у змістовному аналізі отриманих результатів та для оптимізації можливого розміщення ВЕС.

Були отримані наступні результати. Виконано теоретичне обґрунтування та запропоновано спосіб обрання варіанту оптимального врахування комплексу фізико-географічних та екологічних чинників при оцінюванні потенціалу вітроенергетики на топічному рівні, що є необхідним для визначення й моделювання розміщення вітроагрегату у певній точці

перспективної ділянки. Обґрунтовано вибір та вдосконалення методики моделювання вітропотoku й визначення вітропотенціалу з використанням моделі MS-Micro/3 для ділянок із складною орографією й строкатою ландшафтною структурою, типовою для Лівобережного Лісостепу України. Встановлено, що обрана модель в таких умовах має найменші показники похибки та забезпечує достатню достовірність результатів. Проведено порівняльний аналіз основних моделей прогнозування середньої швидкості вітру та величини похибки кожної моделі в залежності від орографії та шорсткості місцевості. Удосконалено й апробовано спосіб отримання параметрів території, потрібних для моделювання вітропотoku, шляхом комплексного застосування польової ландшафтної зйомки, статистичних розрахунків та геоінформаційних технологій.

Встановлено, що в складних фізико-географічних умовах Лівобережного Лісостепу України слід ретельно визначати ділянки розміщення вітроагрегатів, адже вітроенергетичний потенціал істотно залежить від сукупності декількох природних чинників: рельєфу, рослинного покриву та наявності водних об'єктів. Встановлено залежність просторово-часового розподілу вітропотoku від структури рельєфу і співвідношення з нею рози вітрів, відповідно, енергетичної ефективності вітроустановки. Визначено, що серед типових ділянок флювіального рельєфу (плакор, схил, поверхня водосховища) найбільш перспективними для використання енергії вітру є найвищі ділянки та прибровочні частини навітряних схилів, що розташовані на плакорі, найменш – у тиловому шові схилу й частині водосховища. Хоча підтверджено, що домінуючим параметром при проектуванні виробітку енергії є абсолютна висота місцевості, встановлено, що за умови сприятливого впливу комплексу інших чинників, середні швидкості вітру можуть сягати великих значень навіть у точках місцевості, що не характеризуються домінуючими висотами. Потенційний виробіток енергії обернено залежить від шорсткості та прямо – від відкритості пануючому (статистично протягом року) вітрові.

Запропоновано методику вибору місця встановлення вітроагрегату шляхом картографічного моделювання та вилучення з подальшого розгляду зон обмеження, спричинених розселенням та інфраструктурою. Складено відповідні карти розповсюдження лімітуючих факторів. Натомість, навіть із врахуванням таких обмежень, загальна площа території, придатної для розвитку вітроенергетики, виявляється достатньою для вибору місця розташування вітроагрегатів із врахуванням найбільшого потенційного виробітку енергії. На основі проведених особисто польових вимірів акустичних рівнів шуму запропоновано використовувати для розміщення вітроагрегатів найбільш акустично навантажені ділянки, де рівень фонового шуму території здатен перекривати шум працюючої вітроелектростанції. Виявлено, що в межах Приоскільської тестової ділянки, що є регіональним шляхом сезонної міграції перелітних птахів, можна уникнути негативного екологічного ефекту шляхом розташування ланцюга вітроагрегатів перпендикулярно щодо шляху міграції та достатнього віддалення від основних ареалів їх мешкання чи відпочинку (територія поблизу Червонооскільського водосховища). Натомість наголошено, що необхідним є довгостроковий (не менше 1 року) моніторинг місцевої орнітофауни для визначення можливих загроз та заходів для їх усунення.

Доведено, що на території, прилеглій до тестової ділянки у Борівському районі Харківської області, існують гарні передумови для розвитку вітроенергетики. Отримані значення потенційного виробітку вітроустановок вказують, що в разі їх встановлення у даній місцевості, загальний час роботи вітроагрегата в перерахунку на повне навантаження становитиме від 1,6 тис. годин для вітроагрегатів типу Enercon E-40, і до 3,7 тис. годин для вітроагрегатів типу Enercon E-115, що, на думку міжнародних експертів з вітроенергетики, є досить високим показником. Виявлено, що в разі розвитку стратегії, заснованої на використанні старих менш потужних вітроагрегатів, менший виробіток буде відшкодовано за рахунок зменшення відводу (закупівлі, оренди) землі, забезпечення більш економної стратегії

підключення до електромережі. Але при цьому вибір місць розташування вітроагрегатів мусить уточнюватись відповідно до змін параметрів місцевості та висоти ротора вітрової турбіни. В рамках аналізу електромережі виявлено, що місцеві підстанції, як правило, здатні прийняти максимальну потужність у 10 МВт, що створює обмеження для масштабного розвитку вітроенергетики, але дозволяє побудову середньомасштабних вітроенергетичних станцій. Проведено порівняльний аналіз акустичного впливу вітроелектростанцій в межах різних стратегій розвитку вітроенергетики. Виявлено, що менші значення досягаються при використанні більш потужних вітроагрегатів.

У результаті проведеного дослідження переконливо продемонстровано, що моделювання за допомогою ГІС дозволяє не тільки пришвидшити процес обробки вхідних даних, але й визначити специфічні закономірності, виділити ділянки, у яких поєднання комплексу чинників дозволяє використовувати енергію вітру з найбільшою ефективністю.

Ключові слова: природно-ресурсний потенціал, вітроенергетика, топічний рівень, швидкість вітру, стратегія розвитку вітроенергетики, вітроенергетичні ресурси, геоінформаційні технології.

ABSTRACT

Volkovaia O. O. Natural and resource potential of the territory for placing wind aggregates: a topical level. – Qualification scientific work, manuscript.

Thesis for a Candidate Degree in Geography: 11.00.11. – Constructive geography and rational use of natural resources (10 Natural sciences). – V. N. Karazin Kharkiv National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

Renewable energy today is a priority direction of energy development in many developed countries of the world. There is a significant amount of geographic, in particular cartographic, researches on regional assessment of the wind energy potential. However, there is still a lack of methodology for determining wind energy potential at a specific point of the future wind farm site, meaning, at a topical level of landscape. This spatial level differs significantly from regional and even local because there an extremely important role is played by a complex of geographic factors: the morphology of the relief and the structure of the soil-vegetation cover. Their non-accounting, which takes place at the engineering and design level, leads to errors in the choice of the wind farm installation site.

The wind regime is observed at meteorological stations and meteorological posts for quite a long time, providing representative data for analysis and mapping. But the interpolation of such information on any specific point of the terrain, on the topical level of consideration, is impossible because of the significant influence of the landscape type and structure which modifies the wind flow. Because of the practical impossibility of long-term observation of meteorological elements at a particular point on the terrain and on the height of the wind turbine axis, this problem can be solved by calculation means, as had been shown in the works of national and international researchers (O. Achkasova, N. Baymirov, M. Kuznetsov, O. Tretyakov, P. Beaucage, J. Cataldo, M. Zeballos and others). Such computational models exist (T. Van de Vecken, F. Vain, V. Vasiliev, E. Molodan, N. Khisanov),

but they require a system analysis of many factors of the physical and geographical situation. Therefore, there arises the problem of determining and simultaneously considering these factors as a prerequisite for the successful wind turbines siting. Wind farms are high-tech devices, but the problem of choosing and evaluating their placement is constructive-geographical.

The purpose of the study was the implementation of the methodology for assessing the natural resource potential of the territory for the wind energy development from regional to topical (site) level with a different combination of physical and geographical conditions, considering necessary economic infrastructure.

The thesis research was based on the model approach in constructive geography. The comparative-geographical method was used to select the site of the study. Mathematical and statistical methods were used to process the results of wind speed measurements. Modern methods of cartographic and geoinformation modeling were used to construct and study the distribution surfaces of wind energy resources and to determine the wind energy output (using Panorama, Surfer, ArcGIS, and specialized WindFarm GIS). Methods of geographical analysis and synthesis were used in a substantive analysis of the obtained results and in optimization of possible wind farms location.

The following results were obtained. A theoretical substantiation has been made and a method for choosing the optimal account for a complex of physiographic and environmental factors in estimating the wind energy potential at the topical level was proposed, which is necessary for determining and modeling the location of the wind farm at a certain point on the prospective site. The selection and improvement of the wind flow modeling and wind potential estimation method using MS-Micro/3 model for sites with complex orography and variegated landscape structure typical for the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine was substantiated. The chosen model under such conditions has the lowest error indices and ensures sufficient reliability of the results. A comparative analysis of the main models for predicting the average wind speed was conducted and the magnitude of the error of each model due to the orography and roughness of the terrain was estimated.

The method of obtaining the parameters of the territory necessary for modeling the wind flow has been improved and tested through the integrated application of field landscape survey, statistical calculations and geoinformation technologies application.

It was established that in the complex physico-geographical conditions of the Left-Bank Forest-Steppe of Ukraine it is necessary to determine accurately location of wind farm sites, since the wind energy potential depends significantly on the aggregate of several natural factors: the relief, vegetation cover and the presence of water bodies. The dependence of the space-time distribution of the wind flow and, accordingly, the energy efficiency of the wind farm on the structure of the relief and its correlation with the wind rose was established. It was determined that among the typical areas of the fluvial relief (flat interfluvium, slope, surface of the reservoir), the most promising areas for use of wind energy are high areas and break parts of windward slopes located on the flat interfluvium, least are on the rear seam of the slope and within the part of the reservoir. Although it is confirmed that the absolute height of the terrain is the dominant parameter in the wind energy output design, it is established that with the beneficial effect of a complex of other factors, the average wind speeds can reach high values even at points of the terrain that are not characterized by dominant heights. Potential wind energy output back depends on the roughness and directly on openness to the prevailing (statistically during the year) wind.

A method for choosing the location of the wind farm site by cartographic modeling and eliminating the restriction zones caused by settlement and infrastructure from further consideration was proposed. Corresponding maps of distribution of limiting factors were made. Even with such limitations, the total area suitable for the development of wind energy was sufficient to select the location of the wind turbines, considering the highest potential energy output. On the basis of personally conducted field measurements of acoustic noise levels, it was proposed to use the most acoustically loaded sections for wind farms installation, where the level of background noise of the territory is able to cover the noise of a working wind power plant. It was revealed that within the near-Oskil test site, which is a regional route for seasonal migration of migratory birds, it was possible to avoid a negative ecological effect

due to the location of the wind turbine chain perpendicular to the migration path with sufficient distance from the main areas of their habitat and rest (the area near the Chervonooskilske water reservoir). Nevertheless, a long-term (no less than 1 year) monitoring of the local avifauna is needed to identify possible threats and measures for their elimination.

It was proved that on the territory adjacent to the test site in the Borovskiy district of the Kharkiv region, there are good prerequisites for the wind energy development. The obtained values of potential wind energy output indicated that in case of installation of wind farms on a given terrain, the total operating time in terms of full load would be from 1 600 hours using wind generators of the Enercon E-40 type and up to 3 700 hours for generators like Enercon E-115, which, according to international experts, is a fairly high figure. It was revealed that in case of development of a strategy based on the use of old less powerful wind generators, less energy output will be compensated by reducing the acquisition of land plots (purchase, lease) and providing a more economical strategy for connection to the power grid. However, the choice of locations for wind farms should be specified in accordance with changes in terrain parameters and the altitude of the wind turbine rotor. During power network analysis, it was found that local substations are generally able to accept a maximum capacity of 10 MW, which creates limits for the large-scale development of wind energy but allows the construction of medium-scale wind farms. A comparative analysis of the acoustic impact of wind power plants in the framework of various strategies for the development of wind energy was conducted. It was found that lower values could be achieved by using more powerful wind generators.

The result of the study clearly demonstrated that modeling using GIS allows not only to speed up the processing of input data, but also to determine specific patterns, to identify areas where a combination of factors allows the use of wind energy with the greatest efficiency.

Key words: natural resources potential, wind power, topical level, wind speed, wind energy development strategy, wind power resources, GIS technology.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. **Волковая О. О.** Застосування ГІС при розробці стратегії розвитку вітроенергетики на рівні адміністративного району / **О. О. Волковая**, О. С. Третьяков // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2013. – Вип. 17. – С. 9-12. – 0,3 д. а. (*Особистий внесок автора: представлено методику та результати вимірів фонові акустичної ситуації на місцевості для оцінки шумового впливу вітрогенераторів – 0,2 д. а.*)
2. Tretyakov O. Geoinformational support of wind power development at the local level / O. Tretyakov, **O. Volkovaia** // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. – Вип. 19. – С. 117-120. – 0,4 д. а. (*Особистий внесок автора: представлено результати аналізу методики прогнозування потенційного виробітку енергії для локальних територій та її апробації на території Харківської області – 0,3 д. а.*)
3. Balynska M. O. The application of difference image technique for change detection on the territory of Mezin national nature park / M. O. Balynska, O. S. Tretyakov, **O. O. Volkovaia** // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2015. – Вип. 21. – С. 58-66. – 0,5 д. а. (*Особистий внесок автора: представлено результати інструментального порівняння двох різночасових космічних знімків з метою виявлення та систематизації змін підстильної поверхні (ландшафту, землекористування, забудови і тощо) – 0,3 д. а.*)
4. **Волковая О. О.** Можливості уточнення та перевірки результатів картографічного моделювання швидкостей вітру на локальному рівні / **О. О. Волковая** // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2015. – Вип. 22. – С. 40-43. – 0,35 д. а.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації у зарубіжних спеціалізованих виданнях:

5. Агапова Е. Л. Математическое и картографическое моделирование потенциала энергетических ресурсов ветра на региональном и локальном уровне / Е. Л. Агапова, **А. А. Волковая** // Магілёўскі мерыдыян. – Могилев, 2015. – Том 15–16. – Вып. 1-2 (31-32) – С. 40-48. – 0,83 д. а. (*Особистий внесок автора: розкрито особливості математичного та картографічного моделювання енергетичних ресурсів вітру на локальному рівні – 0,43 д. а.*)

Наукові праці у інших наукових періодичних виданнях:

6. **Волковая О. О.** Моделювання вітрового потенціалу локальної ділянки Лісостепу для потреб вітроенергетики з використанням ГІС-технологій / **О. О. Волковая**, О. С. Третьяков, І. Г. Черваньов // Український географічний журнал. – Київ, 2015. – №4. – С. 10-16. – 0,72 д. а. (*Особистий внесок автора: представлено методiku і результат застосування моделі прогностичного розрахунку середніх швидкостей вітру для потреб вітроенергетики на основі ГІС-технологій – 0,6 д. а.*)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. **Волковая О. О.** Питання просторового моделювання шумового забруднення від ВЕС / **О. О. Волковая** // Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи: матер. щорічн. наук. конф. студентів та аспірантів, присвяч. пам'яті проф. Г. П. Дубинського, Харків, 6-8 квітн. 2011 р. – Харків, 2011. – Вип. 4. – С. 16-17. – 0,09 д. а.

8. **Волковая О. О.** Територіальний розподіл вітроенергетичного потенціалу: вплив географічних чинників / **О. О. Волковая** // Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи: матер. щорічн. наук. конф.

студентів та аспірантів, присвяч. пам'яті проф. Г. П. Дубинського, Харків, 5-6 квітн. 2012 р. – Харків, 2012. – Вип. 5. – С. 13-14. – 0,1 д. а.

9. **Волковая О. О.** Дослідження фонового шуму території для потреб вітроенергетики / **О. О. Волковая** // Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи: матер. щорічн. наук. конф. студентів та аспірантів, присвяч. пам'яті проф. Г. П. Дубинського, Харків, 5-6 квітн. 2013 р. – Харків, 2013. – Вип. 6. – С. 120-122. – 0,11 д. а.

10. **Волковая О. О.** Моделювання просторового розподілу фонового шуму для потреб вітроенергетики / **О. О. Волковая** // Охорона довкілля: матер. IX Всеукр. наук. Таліївських читань, Харків, 19-29 квітн. 2013 р. – Харків, 2013. – С. 39-41. – 0,11 д. а.

11. **Волковая А. А.** Геоинформационное моделирование фонового шума местности для определения воздействия ветроэнергетики на окружающую среду / **А. А. Волковая** // XXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов»: Материалы международного молодежного научного форума «Ломоносов – 2014» [Электрон. ресурс]. / МГУ им. Ломоносова. – Электрон. данные. – Москва, 2014. – электрон. диск (CD-ROM). – 0,08 д. а.

12. **Волковая О. О.** Проблеми використання ГІС для моделювання вітроенергетичних ресурсів на локальному рівні / **О. О. Волковая** // Географія, екологія, туризм: теорія, методологія, практика: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 25-річчю географічного факультету ТНПУ (21-23 травня 2015 року). – Тернопіль: СМП «Тайп», 2015. – С. 143-145. – 0,18 д. а.

13. **Volkovaia O.** Environmental impact assessment for two dimensions of wind farms / **O. Volkovaia** // Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта – наука – виробництво – 2017: зб. тез доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 10-річчю створення екологічного факультету (Харків, 19-22 квітня 2017 року). – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2017. – С. 51-52. – 0,12 д. а.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

14. **Волковая О. О.** Моделювання виробітку енергії вітрогенераторами: методичний посібник / **О. О. Волковая**, О. С. Третьяков. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2013. – 40 с. – 1,25 д. а. (*Особистий внесок автора: теорія оцінки вітроенергетичного потенціалу, інструкція до розрахунків у середовищі ГІС.* – 1,0 д. а.)

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	16
ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1 ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ПРИРОДНО-РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТЕРИТОРІЇ ДЛЯ ПОТРЕБ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ.....	25
1.1 Оцінка природно-ресурсного потенціалу території у конструктивно-географічних дослідженнях	25
1.2 Визначення вітрового потенціалу для потреб енергетики	27
1.3 Топічний рівень досліджень у вітроенергетиці	40
1.4 Ландшафтна структура території та її визначальний вплив на вітропотенціал.....	46
Висновки до розділу 1	48
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИКА ОЦІНКИ ПРИРОДНО-РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТЕРИТОРІЇ З ВРАХУВАННЯМ ЛАНДШАФТНОЇ СТРУКТУРИ.....	49
2.1 Складові системної оцінки.....	49
2.2 Ресурсна складова	51
2.3 Порівняння методик моделювання швидкості вітру.....	65
2.4 Обмежуючі фактори	73
Висновки до розділу 2	76
РОЗДІЛ 3 ЕТАПИ ОЦІНКИ ПРИРОДНО-РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТЕРИТОРІЇ ДЛЯ ПОТРЕБ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ НА ТОПІЧНОМУ РІВНІ. 78	
3.1 Вихідні дані.....	78
3.2 Моделювання середніх швидкостей вітру.....	82
3.3 Уточнення результатів шляхом врахування впливу ландшафтів	89
3.4 Дослідження обмежуючих факторів розташування вітроагрегатів.....	96

Висновки до розділу 3	118
РОЗДІЛ 4 МОДЕЛЮВАННЯ ВАРІАНТІВ РОЗМІЩЕННЯ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА ОСНОВІ РОЗРАХУНКУ ПРИРОДНО- РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТЕРИТОРІЇ	119
4.1 Моделювання варіантів стратегії розвитку вітроенергетики	119
4.2 Моделювання потенційного виробітку енергії	125
4.3 Моделювання рівнів шуму	130
Висновки до розділу 4	134
ВИСНОВКИ	135
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	139
ДОДАТКИ	161

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГІС	географічна інформаційна система
ВЕР	вітроенергетичні ресурси
ВЕС	вітроенергетична станція
ВЕУ	вітроенергетична установка (вітроагрегат)
ЛЕП	лінія електропередачі
ПРП	природно-ресурсний потенціал
ПС	підстанція
ПТК	природно-територіальні комплекси
ЦМР	цифрова модель рельєфу

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Відновлювана енергетика на сьогодні є пріоритетним напрямом розвитку енергетики у багатьох розвинених країнах світу [97, 182, 213]. В Україні тенденцію до її швидкого зростання передбачено діючими та розроблюваними директивними документами щодо розвитку енергетики. Значну роль відіграє при цьому й галузь вітроенергетики. Згідно Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 року, Енергетичної стратегії України на період до 2030 року [49, 87] величина встановлених потужностей вітрових електростанцій має зрости на порядок.

Вітроенергетичний потенціал визначається, насамперед, ландшафтно-географічними умовами у точці розміщення вітроагрегату, бо, залежно від них, вітропотік здатен змінювати потужність, напрям і режим руху. Ці особливості поведінки вітропотіку просторово вельми розбіжні, і незначне відхилення розміщення від оптимального може суттєво вплинути на ефективність роботи вітроагрегату (ВЕУ) чи цілої вітроелектростанції (ВЕС). Ніякі з відомих регіональних і навіть локальних досліджень не забезпечують елімінацію цієї похибки, потрібен розгляд топічного (точкового) рівня вибору місця розміщення вітроагрегату. У свою чергу, досі бракує методики визначення вітроенергетичного потенціалу у конкретній точці майбутнього спорудження вітроагрегату не стільки з інженерних, скільки з ландшафтно-географічних позицій. На топічному рівні виключно важливу роль відіграє комплекс географічних факторів: морфологія рельєфу й структура ґрунтово-рослинного покриву. Їх неврахування, яке має місце на інженерно-проектувальному рівні, призводить до помилок у виборі точки встановлення вітроагрегату – цієї величезної (більш за 100 м заввишки) високовартісної споруди. Це може завдати певного збитку суб'єктові господарювання, а в суспільній свідомості – підірвати віру в ефективність

вітроенергетики як конкуруючої галузі з енергетикою традиційною. Таким чином, географічна проблема породжує економічну й соціальну.

Як відомо, вітровий режим спостерігається на метеорологічних станціях і метеопостах вже досить тривалий час, забезпечуючи репрезентативні дані для аналізу й картографування. Але інтерполяція такої інформації на будь-яку конкретну точку місцевості, тобто на топічний рівень розгляду, неможлива з причини суттєвого впливу типу й структури ландшафту, який модифікує вітровий потік. Через практичну неможливість тривалого спостереження метеоелементів у конкретній точці місцевості, та ще й на висоті осі вітроагрегату, ця проблема може бути вирішена розрахунковими засобами, як це показано у роботах вітчизняних та зарубіжних дослідників О. О. Ачкасової, М. Є. Баймірова, М. П. Кузнєцова, О. С. Третьякова, Р. Beaucage, J. Cataldo, M. Zeballos та ін. [8, 9, 71, 88, 122, 136, 152, 159]. Такі розрахункові моделі існують (Т. Ван де Веккен, Ф. Вайн, С. А. Величко, В. С. Васильєв, Я. Є. Молодан, Н. І. Хрисанов [18–21, 81, 151, 165]), натомість, вони вимагають системного аналізу багатьох факторів фізико-географічної обстановки. Отже, виникає проблема визначення, і одночасного розгляду цих факторів як передумова успішного розміщення вітроагрегатів: самі вони є високотехнологічними інженерними спорудами, але проблема вибору й оцінювання їх місця розміщення є конструктивно-географічною.

Науково-практична проблема, що розглядається, є актуальною. По-перше, будь-яке вдаль уточнення позиції майбутнього вітроагрегату (тим більше – ВЕС) буде сприяти більш високій окупності капітальних витрат, отже, заохочуватиме до інвестицій у галузь; по-друге, це мусить сприйматися як успіх конструктивної географії щодо розробки методології оцінювання актуального природного ресурсу, яким є вітер, і надасть цій найбільш активній галузі сучасної географії більш високого соціального статусу.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є імплементація методики оцінки природно-ресурсного потенціалу території

для розвитку вітроенергетики регіонального рівня на топічний рівень з різним поєднанням фізико-географічних умов та з урахуванням необхідної економічної інфраструктури.

Для досягнення поставленої мети необхідним було вирішити наступні завдання:

- проаналізувати історію розвитку теоретичних уявлень і досвід оцінки ресурсного потенціалу вітроенергетики на регіональному й локальному рівнях в Україні та світі;
- визначити, у яких відношеннях методика аналізу вітропотенціалу на топічному рівні мусить враховувати досвід її оцінки на регіональному й локальному рівнях;
- розробити уточнені наукові засади та алгоритми моделювання вітропотoku;
- визначити та обґрунтувати фактори, що територіально обмежують використання природних ресурсів вітроенергетики, зокрема, акустичне навантаження, та виокремити зони придатності території для розміщення вітроагрегатів;
- здійснити апробацію отриманих результатів на тестових об'єктах в межах Харківської лісостепової провінції Лівобережного Лісостепу України;
- розробити варіанти стратегії розвитку вітроенергетики в даному регіоні із врахуванням всіх досліджених чинників, розрахувати потенційний виробіток енергії та економічну оцінку відповідно до кожного з варіантів стратегії і здійснити порівняльний аналіз.

Об'єктом дослідження є вітровий енергетичний потенціал території на топічному рівні.

Предметом дослідження є просторовий розподіл вітроенергетичного потенціалу в залежності від ландшафтно-географічних умов і соціальної інфраструктури території.

Модельним регіоном дослідження слугує територія середнього Пооскілля (в межах Борівського та Ізюмського районів Харківської області).

Методи дослідження. Дисертаційне дослідження в цілому базується на модельному підході, притаманному конструктивній географії. *Порівняльно-географічний метод* використано для вибору ділянки дослідження. *Математичні та статистичні методи* використані для обробки результатів вимірів швидкостей вітру. Сучасні *методи картографічного та геоінформаційного моделювання* застосовано у побудові й дослідженні поверхонь розподілу вітроенергетичних ресурсів (ВЕР) та визначенні обсягів виробітку енергії. Використані програмні продукти Панорама, Surfer, ArcGIS, а також спеціалізована ГІС WindFarm. *Методи географічного аналізу і синтезу* забезпечували інтерпретацію експериментальних результатів та змістовно супроводжували вирішення нової конструктивно-географічної задачі оптимізації розміщення ВЕС.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

- узагальнено світовий досвід прогнозування вітроенергетичних показників для територій з фізико-географічними умовами, подібними до території Лівобережної України;
- встановлено нові закономірності розподілу швидкості вітру та потужності вітроелектростанцій в умовах складної орографії на локальних ділянках Лісостепу України;
- запропонована й апробована на тестових об'єктах методика розрахунку природно-ресурсного потенціалу вітроенергетики на топічному рівні для доцільного розміщення вітроагрегатів;
- досліджено прогностичну величину акустичного впливу вітроагрегатів із використанням сучасних геоінформаційних технологій шляхом побудови статистичної поверхні фонового шуму місцевості та подальшого накладання акустичного навантаження вітроагрегату на існуючі умови;
- запропоновано та проаналізовано можливість використання вітроагрегатів, що були раніше у використанні, як альтернативного економічно виправданого варіанту прискорення розвитку вітроенергетики;

Удосконалено:

- методику розрахунку природно-ресурсного потенціалу вітроенергетики із виокремленням зон, привабливих для розміщення вітроагрегатів;
- методику прогностичного розрахунку швидкостей вітру на висоті встановлення вітроколеса на основі моделі MS-Micro/3 на локальному рівні шляхом врахування комплексу місцевих фізико-географічних чинників, що дозволяє з обґрунтованою достовірністю визначати імовірні потужності вітроагрегатів стосовно до природних умов Лісостепової зони України;

Дістало подальший розвиток:

- розрахунки за різними моделями вертикального профілю вітропотoku.

Особистий внесок здобувача. Автором особисто здійснено розробку усіх складових дослідження, заявлених як елементи новизни. У дисертаційному дослідженні наведено й обґрунтовано методику дослідження впливу чинників географічного ландшафту на енергетичні характеристики вітропотoku. Розроблено моделі й алгоритми моделювання геоситуацій з урахуванням морфології рельєфу та структури ґрунтового рослинного покриву. Побудовано відповідні цифрові моделі, відображено на картах і здійснено їх аналіз. Обчислено прогностичні швидкості вітру та вітроенергетичний потенціал в умовах складної орографії, виконано необхідні розрахунки. Модельні побудови апробовано на тестових об'єктах, здійснено експериментальні вимірювання фонового шуму.

Усі наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. Із робіт, виконаних у співавторстві, на захист винесені лише власні авторські ідеї та підтверджені результати.

Апробація матеріалів дисертації. Результати досліджень перевірялись незалежними методами, представлялись, обговорювались та були опубліковані у матеріалах на наукових заходах міжнародного, національного та регіонального рівнів, зокрема в Україні на конференціях ГІС-форум «Освіта. Наука. Виробництво» (Харків, 2014, 2015, 2016), на щорічних

Міжнародних наукових конференціях студентів та аспірантів «Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи», присвячена пам'яті проф. Г. П. Дубинського (Харків, 2014, 2015), Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 25-річчю географічного факультету Тернопільського національного педагогічного університету імені В. Гнатюка (Тернопіль, 2015), XXIV Міжнародній науковій конференції на тему: «Актуальні проблеми безперервної географічної освіти та картографії» (Харків, 2015), XX Міжнародній науково-практичній конференції, присвяченій 10-річчю створення екологічного факультету Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (Харків, 2017); а також на семінарі аспірантів та докторантів лабораторії «Географічний простір та суспільство» Університету Ренн-2 (Франція, 2016), сумісному семінарі науковців лабораторії «Географічний простір та суспільство» та Дослідницького центру з політичної діяльності в Європі (Франція, 2016).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась на кафедрі фізичної географії та картографії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, пов'язана з напрямком наукових досліджень з геоінформаційного моделювання. Дисертаційне дослідження було заплановане в рамках виконання стратегічної перспективи розвитку досліджень і розробок міжнародного проекту TEMPUS-TACIS CD_JEP-21242-2000 «Education development in environmentally safe energetic», який очолювався науковим керівником даного дослідження. Безпосередньо тематика дисертаційного дослідження пов'язана з прийнятими в Україні законодавчими, нормативно-правовими актами та програмними документами, спрямованими на розвиток альтернативної енергетики: Енергетичною стратегією України до 2030 р., схваленою розпорядженням Кабінету Міністрів України № 1071-р від 24 липня 2013 р., Національним планом дій з відновлюваної енергетики на період до 2020 р., Державною цільовою економічною програмою енергоефективності та розвитку сфери виробництва енергоносіїв

з відновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палива на 2010–2016 роки. Постановою Кабінету міністрів України №942 від 7 вересня 2011 р. дослідження у сфері альтернативної енергетики включені до переліку пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок. Частина положень, пов'язаних з екологічним впливом вітроенергетики та методиками прогнозування швидкостей вітру, розроблялася в рамках програми «Rennes Metropole mobility grants for “incoming” foreign PhD students» під час стажування автора в Університеті Ренн-2 в лабораторії «Географічний простір та суспільство» (Ренн, Франція). Окремі методологічні розробки автора реалізовані у науково-дослідній роботі «Карта потреб підвищення енергоефективності малих територіальних громад Харківської та Донецької областей з урахуванням потенціалу нетрадиційних джерел енергії» (2015 р.), № держреєстрації 0115U002974.

Практичне значення отриманих результатів. Результати роботи є вихідними для обґрунтування місця встановлення ВЕС в умовах території України у місцевості зі складною орографією та незначними середньорічними швидкостями вітру. Результати порівняння стратегій розвитку вітроенергетики можна використовувати у енергетичному плануванні на локальному та регіональному рівні, розробці програм з впровадження та розвитку вітроенергетики у Харківській області органами державного управління, у процесі прогнозування роботи вітроенергетичних станцій на етапі їх проектування, а також у навчальній і дослідницькій діяльності.

Розробки автора знайшли практичне впровадження в процесі укладання картографічних творів вітроенергетичних ресурсів в рамках реалізації науково-дослідної роботи № 0115U002974 «Карта потреб підвищення енергоефективності малих територіальних громад Харківської та Донецької областей з урахуванням потенціалу нетрадиційних джерел енергії» (довідка № 0301-134 від 30 вересня 2016 р.). Наукові положення та окремі практичні результати дослідження впроваджені у навчальний процес Харківського

національного університету імені В. Н. Каразіна на кафедрі фізичної географії та картографії при викладанні курсів «Фаховий практикум» та «Основи географічного моделювання» (довідка № 0202-1093 від 30 вересня 2016 р.).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та 7 додатків. Обсяг загального тексту дисертації складає 178 сторінок друкованого тексту, з них основного тексту 124 сторінки. Робота ілюстрована 5 таблицями та 22 рисунками. Список використаних джерел містить 218 найменувань, з них 141 кирилицею та 77 латиною.

РОЗДІЛ 1

ПІДХОДИ ДО ОЦІНКИ ПРИРОДНО-РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТЕРИТОРІЇ ДЛЯ ПОТРЕБ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ

1.1 Оцінка природно-ресурсного потенціалу території у конструктивно-географічних дослідженнях

На сучасному етапі розвитку науки в Україні сформувалися два основні підходи до розгляду поняття «природно-ресурсний потенціал» (ПРП): соціально-економічний, за яким більша увага приділяється комплексності поняття, вартісній оцінці ресурсів (М. В. Багров, А. П. Голіков, Ю. Д. Дмитревський, В. П. Руденко, Я. Б. Олійник, О. І. Шаблій та ін. [10, 41, 46, 79, 89, 109, 130, 197]), та конструктивно-географічний, пов'язаний з формуванням причинно-наслідкових зв'язків, побудовою теоретичного підґрунтя для визначення потенціалу ресурсів, використанням конструктивного підходу (І. П. Герасимов, А. М. Маринич, В. М. Петлін [4, 39, 65, 98–101]) та методу моделювання (А. П. Голіков, Л. Г. Руденко, Г. І. Швебс, І. Г. Черваньов та ін. [38, 79, 128, 131]). Обидва підходи розвивалися у тісному зв'язку, опираючись на фундамент праць академіка В. І. Вернадського, який вперше сформулював поняття «природних продуктивних сил».

Формулюванню термінів ПРП, природний ресурс, потенціал велику увагу приділено у роботі Руденка В. П. [109, 197]. На основі багаторічного досвіду вивчення питання оцінки ПРП вченим було сформульовано основні проблеми досліджень у цій галузі. Серед іншого, дослідник розглядає необхідність врахування у комплексному показнику ПРП не тільки наявних та потенційних ресурсів, але й потенційного впливу на навколишнє середовище та можливостей природного відтворення ресурсів; необхідність ширшого застосування сучасних технологій, зокрема геоінформаційних систем (ГІС); потребу вдосконалення методів дослідження ПРП та у науковому обґрунтуванні шляхів територіальної організації природокористування на базі ПРП [109].

І. Герасимов і Д. Арманд визначають природні ресурси як різноманітні засоби існування людей, які вони черпають безпосередньо з природи [4, 39]. Не слід оминати увагою поняття «потенціалу ландшафту», який визначають як «характеристику заходів можливого виконання ландшафтом соціально-економічних функцій, що відображає ступінь можливої участі ландшафту в задоволенні різноманітних потреб суспільства» [95]. Трактують близьким до ПРП території, проте акцентує увагу на ландшафті як ресурсі. Близьким до техніко-економічного обґрунтування у вітроенергетиці є термін «енергетичний потенціал» – «природні ресурси і умови природного середовища території, які можуть бути використані в господарстві з урахуванням досягнень науки і техніки для виробництва енергії, а також механізми їх залучення в господарський обіг в даний час або в майбутньому періоді» [75].

У багатьох дослідженнях з оцінки ПРП як комплексного показника [41, 110, 135, 185, 197], здійснюється оцінка мінеральних, водних, земельних, лісових, біологічних, природно-рекреаційних ресурсів, а оцінка атмосферних (повітряних) ресурсів або не здійснюється, або виконується оцінка вологості, температури, тобто тих природних ресурсів, які мають враховуватися насамперед для сільськогосподарських або рекреаційних потреб. Це може бути пов'язано насамперед зі складністю регіональної оцінки ресурсів вітру, його значною диференціацією та стохастичною природою вітру, відсутністю акценту на розвиток галузі альтернативної енергетики у економіці країни до недавніх пір (до початку ХХІ століття).

ПРП території – це показник, який охоплює весь комплекс природних ресурсів. Проте розгляд поняття ресурсу нерозривно пов'язаний зі способом його використання. Вітроенергетика не потребує оцінки всього комплексу ресурсів території, тому у даному дослідженні широке поняття ПРП території звужується лише до тих природних ресурсів, які чинять або можуть чинити вплив на розвиток вітроенергетики, впливати на розміщення вітроагрегату. Одночасно, поняття ПРП території розглядає фрагмент реальної природи як цілісність, на відміну від окремого розгляду природного ресурсу [109,

135]. У підході до вітроенергетики, ми розглядаємо не лише енергію вітру як ресурс, а їх фізико-географічні умови у комплексі, всі, які можуть впливати на розвиток вітроенергетики, що й є інтерпретацією поняття природно-ресурсний потенціал території для потреб вітроенергетики.

Природно-ресурсний потенціал території для потреб вітроенергетики визначаємо у авторському трактуванні як комплекс кліматичних ресурсів та природних умов, що потенційно може бути використаний у процесі задоволення споживчих потреб (енергетика) і вимог екологічної комфортності довкілля для всіх живих організмів (у тому числі людей). Тобто, оцінка ПРП території для потреб вітроенергетики – визначення цінності сукупності ресурсів, які необхідно приймати до уваги у процесі розробки вітроенергетичного проекту.

1.2 Визначення вітрового потенціалу для потреб енергетики

Дослідження у напрямі моделювання вітроенергетичного потенціалу тісно пов'язані із історією вітроенергетичної галузі в цілому. Хоча перші прототипи механізмів, що використовували енергію вітру існували ще до нашої ери, а перші вітроагрегати, що виробляли електроенергію, були встановлені у Шотландії, США та Данії ще наприкінці XIX сторіччя, питання прогнозування виробітку енергії вітроагрегатами набули популярності у другій половині XX сторіччя [206]. Важливою передумовою для цього стала енергетична криза у 70-х роках, через яку уряди багатьох держав були змушені шукати альтернативи традиційним джерелам енергії.

Наступним стимулом підвищення уваги до альтернативних джерел енергії стала аварія на Чорнобильській атомній електростанції. Одним з наслідків стала переорієнтація розвитку енергетичної галузі багатьох країн з ядерної енергетики на інші види енергії. Так, саме у ті роки почався стрімкий ріст вітроенергетичної галузі у Франції. У ці ж роки починається популяризація екологізації виробництва та привертається увага до проблеми Глобального потепління.

Перші дослідження напрямлені саме на пошук місць оптимального виробітку енергії вітроагрегатом. Проте із збільшенням частки вітроенергетики у світовій економіці та збільшенням ролі ресурсу вітру у глобальних планах, постають проблеми негативного впливу вітроагрегатів (візуальний вплив, акустичний тощо). Все більше робіт присвячується оцінці впливу вітроагрегатів, обмеженням щодо їх встановлення. У багатьох країнах світу з'являються центри дослідження ВЕР.

Весь спектр робіт у галузі досліджень вітроенергетичного потенціалу охоплює дослідження наукового, публіцистичного та технічного характеру. Їх умовно можна поділити на:

- офіційні звіти щодо ресурсів вітроенергетики країни чи регіону;
- неофіційні або технічні звіти, складені неурядовими організаціями;
- монографії, що досліджують напрями оптимізації моделювання вітроенергетичного потенціалу, вітроенергетичні ресурси певної країни чи регіону, прикладні дослідження;
- роботи у галузі кліматичних досліджень, де у доповненні до аналізу фізичної природи вітру, кліматичних показників визначаються перспективи використання ресурсу вітру для потреб вітроенергетики;
- атласи вітроенергетичних ресурсів;
- інші роботи.

Цікавими для нашого дослідження є доробки іноземних науковців щодо прогнозування вітрової енергії на території інших держав [78, 167, 179, 211]. Такі праці дають змогу проаналізувати методику проведення дослідження. Так, можна відмітити працю Мамедова Ф. Ф. та Самедової У. Ф. [76], у якій проводився аналіз основних характеристик вітру (швидкість вітру у вертикальній та горизонтальній площині, повторюваність затишів, напрямів) та виокремлено ділянки перспективного розвитку вітроенергетики.

У дослідженнях американських вчених під керівництвом Д. де Рензо вже на початку 80-х років розглядалися основні напрями використання енергії вітру [23, 132]. У роботі [23] розглянуто вимоги до вибору ділянок

встановлення ВЕС, закономірності розподілу швидкостей вітру у залежності від висоти, шорсткості місцевості, розчленування поверхні, дано методику розрахунку ВЕР. Відмічалось, що для розрахунку ВЕР необхідне знання не середніх швидкостей вітру, а їх розподілу. За основу розрахунків бралась потужність вітрового потоку. За розрахунками енергія вітру пропорційна кубічній швидкості вітру.

У роботі німецьких дослідників [141] було докладно висвітлено поняття енергетичних ресурсів вітру та критерії, які визначають вибір оптимальної ділянки для встановлення ВЕУ. Енергетичні ресурси вітру автори поділили на природні (теоретичні ресурси, власне кінетична енергія вітру), придатні для практичного використання (технічний потенціал, найбільша частка кінетичної енергії, яка у відповідності до сучасного стану розвитку науки і техніки може бути перетворена у корисну енергію), економічні ресурси (економічний потенціал, частка останніх, яку можна перетворити у традиційний вид енергії з економічно обґрунтованими витратами у порівнянні із звичайними енергоресурсами). Також було розглянуто основні вимоги до вибору ділянки для встановлення ВЕС. Серед них треба відмітити вимогу до незначних показів повторюваності турбулентних явищ, змін напрямку та швидкості вітру та наявність домінуючого напрямку основних потоків вітру (для зменшення ефекту «затінення» та можливості встановлення більшої кількості ВЕУ).

У посібнику [18] було висвітлено проблеми, які можуть з'явитися під час виконання моделювання виробітку енергії, розглянуто екологічний аспект та програмне забезпечення і матеріали, які можуть бути використані для розрахунку потенційної енергії вітру. Приведено особливості вибору місця для побудови вітроенергетичної станції.

У кінці 80-х років також стає популярним створення вітрових карт для потреб вітроенергетики та інших сфер. Однією з перших розробок у цій галузі було проектування датськими науковцями Європейського Атласу вітру у 1989 році (The European Wind Atlas). Цей атлас можна використовувати в якості початкового керівництва для визначення довгострокових прогнозів

швидкості вітру. Пізніше було створено низку атласів вітру для інших регіонів світу (Норвегія, Канада, Фінляндія, Росія, тощо). Вітрові атласи містять дані про швидкість і напрями вітру в регіоні. Ці дані включають в себе карти, тимчасові ряди та частотні розподіли. Зазвичай, дані у кліматичному атласі охоплюють середні погодинні значення вітру на стандартній висоті (10 м) за термін до 30 років. Але існують відмінності у залежності від сфери застосування атласу [205].

Попри величезний світовий досвід моделювання швидкостей вітру, в Україні поки що наявні окремі роботи цього напрямку. М. Сиротюк [113] належить одна з них. У якості вихідних даних для отримання комплексної оцінки вітроенергетичного потенціалу (на прикладі фізико-географічних умов Закарпаття) авторка використала виміри швидкості вітру на опорній мережі Гідрометслужби України, врахувала залежності напрямку та швидкості вітру від різних природних чинників (напрямок гірських долин, особливості атмосферної циркуляції та рельєф). На основі обчислень питомої потужності вітрового потоку за методом Монте-Карло, нею було виділено 3 вітроенергетичні зони. Було визначено, що найбільший потенціал вітрової енергії має найвища зона (Полонинський хребет).

У роботі А. Смердова та Є. Бульби [114] здійснено аналіз доцільності використання вітрових установок для задоволення сільськогосподарських потреб. У цій роботі проводилася статистична оцінка характеристик швидкості вітру у м. Полтава. Через розрахунок коефіцієнтів для розподілу Вейбулла здійснено оцінку вітрового потенціалу регіону. Крім іншого, запропоновано програмне забезпечення для розрахунку швидкостей вітру, розроблене автором.

Низка досліджень вітроенергетичного потенціалу, його просторово-часової структури та залежності від фізико-географічних умов Лівобережного лісостепу належить науковцям Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. О. Ачкасовою та О. Третьяковим [8] досліджено вітроенергетичний потенціал рівнинної території рангу фізико-

географічного району, якому притаманні мінімальне (біля 10 %) заліснення та відсутність значних водних просторів. Результатом роботи була побудова великомасштабних карт вітроенергетичного потенціалу та середніх швидкостей вітру для території дослідження. Різні важливі аспекти натурних спостережень та аналітичних розрахунків вертикального профілю вітропотoku здійснено у роботах [20, 21, 133, 216]. Зокрема, С. Величко у кандидатській дисертації [20], досліджуючи можливості ресурсного забезпечення гібридних (геліо-вітроенергетичних) агрегатів на території всієї України (по адміністративних областях), встановив чотири типи співвідношень геліо- та вітропотенціалу, довівши досить значні можливості спільного їх використання. Він же дослідив експериментально вітровий режим у м. Харків на відносній висоті біля 40 м над землею поверхнею, зафіксувавши його з коротким інтервалом (через 1 хв.) у вигляді унікальної бази даних, потрібної для подальших розрахунків.

Цікавою є робота низки радянських авторів [44], у якій проводився аналіз території УРСР на ефективність роботи вітроагрегатів. За основу було взято факт, що вітроагрегати починають працювати за швидкості вітру 3-4 м/с. Із використанням флюгерних спостережень було обчислено тривалість роботи вітродвигунів. По результатах виявилось, що Харківська область належить до районів з найбільшою кількістю днів роботи двигуна у січні та середньою кількістю у липні, при цьому східна частина області має вищі показники за західну. Це дає змогу стверджувати, що вибір району нашого дослідження є обґрунтованим.

У роботі Новожилова М. А. [86] була проведена оцінка вітроенергетичного потенціалу різних регіонів СРСР на основі 15-річних метеорологічних спостережень за вітровими характеристиками із визначенням питомої потужності та енергії вітрового потоку.

Досить часто можна зустріти дослідження вітру у приграничному шарі атмосфери для потреб авіації. Ці дослідження дають змогу оцінити можливості виробітку вітрової енергії на різних висотних рівнях. В межах

таких дослідів було встановлено, що найбільші середні значення зрушень вітру у шарах від 10 до 100 м на території України характерні для Харкова та Сімферополя, найменші – для Одеси [134].

Важливо також враховувати несприятливі природні процеси, що можуть відбуватися в межах території дослідження. Ряд робіт, в яких розглядається саме це питання, також є корисними для оцінки вітрових характеристик регіонів України [27, 60]. Такі явища, як пилові бурі, сильні вітри є небажаними при встановленні вітроенергетичних станцій (зазвичай вітроагрегати автоматично вимикаються за швидкостей вітру більше дозволеної параметрами установки).

У праці науковців УкрНДГМІ [61] проводилося комплексне районування території України за потенціалом вітрової енергії на основі кліматичного узагальнення комплексу показників. До них відноситься: середня річна швидкість вітру (дає загальне уявлення про кліматичний вітроенергетичний потенціал будь-якого району) та її мінливість; питома потужність та сумарні потенційні вітроенергоресурси і утилізована вітрова енергія; тривалість енергоактивної швидкості вітру та енергетичного штилю; безперервна тривалість робочої швидкості (як критерій стабільності функціонування вітроагрегатів). Наведено характеристику виділених районів та відповідний ранг вітроенергозабезпеченості.

Вітрові умови району вітровикористання характеризуються вітроенергетичним кадастром, який включає в себе різні показники вітру, які визначаються за результатами багаторічних спостережень: середньорічні та середньомісячні швидкості вітру; повторюваність швидкості вітру та напрямів протягом року, місяця, доби; дані про поривчастість, затишшя та максимальні значення швидкості вітру; зміни її з висотою та ін. Таку інформацію надає Державна гідрометеорологічна мережа. Дані щодо характеристик вітру, отримані державною мережею з більш ніж 500 метеорологічних станцій та постів дають змогу оцінити можливості використання енергії вітру у регіонах та областях України. У виданнях УкрНДГМІ публікуються дані щодо вимірів вітрових характеристик

за тридцятирічний період з 1961 по 1990 р. р. на 10 станціях Харківської області, розташованих у містах: Золочів, Богодухів, Приколотне, Харків, Коломак, Куп'янськ, Комсомольське, Красноград, Ізюм, Лозова. Оптимальною частотою вимірів швидкості та напрямку вітру вважається зняття показань з 10-ти хвилинним інтервалом [60]. Результати безперервних постійних зчитувань показів анемометрів на метеостанціях Державної метеорологічної служби протягом багатьох років вказують на те, що середньорічні та середньомісячні значення швидкості вітру у конкретному місці змінюються у невеликому діапазоні.

Треба відмітити, що на думку низки авторів [143], розвивати вітроенергетику доцільно лише у тих районах, де середня річна швидкість вітру складає не менше 3-5 м/с. За такої швидкості можливе використання ВЕУ малої та середньої потужності. За швидкості вітру більше 7 м/с стає доцільним встановлення ВЕУ великої потужності. Для найповнішого використання вітроенергетичних ресурсів необхідно обрати оптимальне розміщення площадки для побудови ВЕУ. Сприятливими умовами для її вибору є: значний вітроенергетичний потенціал (середня швидкість вітру більше 5 м/с); повторюваність енергетичних затишів ($v < 3 \text{ м/с}$), 20-30 %; відсутність або мала повторюваність «штормових» (більше 20-25 м/с) та «ураганних» (більше 33 м/с) швидкостей вітру [143]. За такою класифікацією Харківська область є придатною для розвитку вітроенергетики.

Дослідження, пов'язані з проведенням аналізу вітрових умов із рекомендаціями по вибору місць розміщення вітроенергетичних установок проводилися також В. П. Харитоновим. У своїй роботі [124] він описує особливості вітрової енергії, основні вимоги до вибору ділянки для будівництва ВЕС, основні методи які використовуються для прогнозування швидкості вітру та дані, які потрібні для цього. Детально розглянуто методи прогнозування швидкостей вітру за розподіленням Вейбулла. Окремо було розглянуто можливості розрахунків виробітку енергії у разі недостатньої відкритості метеостанції.

У роботі Волевахи М. М. [27] представлено огляд просторового та сезонного розподілу вітроенергетичних ресурсів на території України, висвітлені питання закономірності розподілу вітру в різних фізико-географічних зонах, зроблені розрахунки ймовірності безперервної роботи вітроустановок.

Доцільним на нашу думку є поділ методів прогнозування вітрової енергії, які пропонує Кузнєцов М. П. [71], за яким виділяються їх дві категорії: фізичні, які досліджують ряд фізичних властивостей атмосфери та її взаємодії з поверхнею землі, та статистичні, що базуються на статистичних закономірностях серед масиву результатів безпосередніх вимірювань. Використання одночасно обох категорій забезпечує оптимальну точність результатів.

В Україні також існує досвід картографування для потреб вітроенергетики. Наприклад, у атласі [5] наведено карту енергетичних ресурсів вітру, на якій зображено розподіл робочих швидкостей вітру та величина швидкості вітру для окремих населених пунктів. У атласі [6] є карта енергетичного потенціалу вітру, побудована на основі показників швидкостей вітру на висоті 10 м, представлені діаграми питомого потенціалу вітроресурсів на інших висотах. Крім того, у Національному атласі України [84] також є ряд карт, присвячених вітровим характеристикам. До них належать карти розподілу вітрів по території України у січні та липні та карти вітроенергетичних ресурсів (за літній та зимовий період), які охоплюють інформацію про тривалість робочої швидкості вітру, середні швидкості вітру на висоті 15 над рівнем земної поверхні, питому потужність вітрової енергії та кількість потенційної енергії, яка вироблятиметься вітроенергетичними установками.

Багато науковців хоча й не виконували розрахунків потенційного виробітку чи оцінки вітроенергетичних ресурсів, але розглядали важливі поняття, якими має оперувати будь-який дослідник, який здійснює прогноз роботи ВЕС. У таких роботах було розглянуто середні швидкості, розподіл

їх максимальних значень, вплив на значення швидкості вітру різних параметрів, таких як баричний градієнт, умови циркуляції атмосфери та характер підстильної поверхні [47, 61]. У низці досліджень розглядалися закономірності, корисні для прогнозування розвитку вітроенергетики. Так, у роботі [134] розглянуто зв'язок вертикальних зрушень вітру та його вертикального профілю з стратифікацією температури. Було визначено, що більші зрушення вітру спостерігаються за від'ємних градієнтів температури. У багатьох роботах [70, 78, 80] можна зустріти дослідження впливу різних форм рельєфу (схилів, пагорбів, западин) на швидкість вітру, умови появи турбуленції вітру, відмінності вертикальних вітрових профілів в залежності від характеру місцевості. Такі дослідження мають велике значення для нашої роботи.

Існує ряд досліджень, у яких розглядається вплив різних перешкод на вітер та турбулентний режим в атмосфері (наприклад, [64]). Ці дослідження проводилися ще у середині ХХ сторіччя за застарілою методикою, але виявлені закономірності досить репрезентативно характеризують поведінку вітру під впливом лісополоси. Так, перед полозою на відстані 35-40 м спостерігається ріст швидкості вітру, на відстані $3 \cdot h$ (трикратній до висоти лісополоси) за полозою швидкість вітру вдвічі менша від початкового значення, а свою попередню величину набуває лише на відстані $40 \cdot h$. Крім того, перешкоди спричиняють зміну швидкостей вітру й на значних висотах, підйом повітряних мас на висоті 100 м спостерігається за 0,5-1,5 км до початку масиву лісопосадки. Така інформація дає уявлення про вимоги до вибору місця розташування вітроагрегату.

Для більш повного розуміння природи вітру корисною є також інформація, викладена у роботах пов'язаних з використанням динаміки атмосфери та дельтапланеризмом. Автори, що проводили дослідження у цій галузі, ґрунтовно вивчали поведінку вітру в залежності від різних чинників, температури, форм рельєфу. Знання цих особливостей є фундаментальними. Так, у роботі [90] було розкрито такі поняття, як турбуленція та сила вітру,

зрушення вітру. Охарактеризовано залежність розподілу вітрів від різних форм земної поверхні, розподілу температури, тощо. Розглянуто основні засади авіаційної метеорології та умови появи термічних та динамічних висхідних потоків повітря.

В роботі Волевахи М. М. [27] корисним є виділення форм рельєфу, які найістотніше впливають на характеристики вітрової енергії. До них відносяться: вузька меридіонально витягнута долина, оточена підвищеннями до 10 м над її рівнем (долини річок у південно-західній та західній частинах України); горбиста місцевість, невеликі долини рівнинних або гірських річок, підвищення навколо яких не перевищують 40 м (Правобережжя та Передкарпаття); степова рівнина, широкі долини річок з пологими схилами (центральні і південні області та рівнинна частини Криму); невеликі вододільні плато (Донецька та Придніпровська височини); круті навітряні схили значних підвищень, вододільні плато великих рік (долини Дніпра та Дністра); високі плато та широкі вододіли, гірські перевали (Українські Карпати і Кримські гори). Це дасть змогу краще оцінити вплив орографії місцевості на потенційний виробіток енергії.

В роботі [3] дано обґрунтування можливості побудови вітроенергетичних станцій на основі розрахунків швидкостей вітру. Автори стверджують, що існує можливість зняття значних показів енергії з вітроагрегатів, встановлених у аеродинамічних коридорах: на високогір'ї та у місцях різкого розширення долин гірських річок, де вітер має максимальну швидкість та двосторонній напрямок руху.

Найсприятливішими вважаються підвищення та рівнинні ділянки, місця, близькі до морських узбережь, долин великих річок та водойм. Слід уникати близькості до лісів, житлових будинків та промислових об'єктів, які можуть перешкодити підходу повітряних мас до установки. Важливою є відсутність високих перешкод з підвітряної сторони на відстані, яка визначається висотою перешкоди [18, 23, 124]. На пагорбах швидкість вітру вище в порівнянні з навколишньою рівнинною територією. Необхідно пам'ятати,

що вітер може змінювати свій напрям раніше, ніж досягне пагорба, так як область високого тиску фактично розширюється на деякій відстані перед пагорбом. Також необхідно пам'ятати, що турбулентність, значення якої різко збільшується в разі крутого пагорба або його нерівної поверхні, може звести нанівець переваги більш високої швидкості вітру [40].

При обтіканні пагорба або хребта з навітряної сторони повітря піднімається, утворюючи динамічний висхідний потік. Над вершиною швидкість потоку дещо зростає. За пагорбом повітряний потік опускається, часто закручуючись при цьому в потужний вихор, який називають підгірним ротором. При зменшенні площі перетину ізольованого струменю газу швидкість потоку в ньому зростає. Саме це відбувається і над вершиною. Відчутне прискорення повітряного потоку над вершиною виникає при швидкості вітру понад 5-6 м/с [90].

Для розрахунку потужності вітроагрегатів слід враховувати відкритість місцевості, де планується розмістити ВЕУ. Для загальної оцінки впливу рельєфу та захищеності флюгера на характеристики вітру застосовується класифікація В. Ю. Мілевського [11]. Ця класифікація дозволяє враховувати не тільки форму рельєфу (опукла, плоска, увігнута), наявність перешкод (будівель, споруд, дерев), а й присутність водних поверхонь (озера, моря, океану). За класифікацією Мілевського клас відкритості змінюється від 4_у (елементи захищеності знаходяться вище флюгера і рельєф місцевості увігнутий) до 10_а (відкрита поверхня поблизу великої водойми, рельєф місцевості опуклий), тобто чим вище цифра класу відкритості, тим менше захищеність флюгера і тим більше реєстрована на даній станції швидкість вітру.

Залежність швидкості вітру від висоти в приземному шарі, що визначається для конкретної місцевості на основі вимірів швидкості вітру на різній висоті відносно земної поверхні виражається у вигляді вертикального профілю вітру [25]. Як правило, на значних висотах, де відсутній вплив поверхневого тертя, швидкість вітряного потоку є значно більшою, ніж біля поверхні чи на стандартній висоті розташування

анемометру на метеостанціях. Швидкість вітру залежить від висоти над рівнем землі [23]. Близько до землі вітер сповільнюється за рахунок тертя об земну поверхню.

Вітрова енергія, крім зазначених фізичних перемінних, суттєво залежить від географічних чинників. Їх можна поділити на глобальні (визначаються географічним положенням країни), регіональні (залежність від умов географічного поясу, близькість до моря) та місцеві. Територія України належить переважно до помірного поясу (крім смуги субтропічного ландшафту Південного берега Криму), завдяки чому тут панує західний перенос повітря, частими є фронтальні атмосферні процеси, що урізноманітнюють вітровий режим, але бувають тривалі періоди панування антициклонічного безвітряного режиму [22].

На швидкість вітру значно впливають місцеві географічні умови (показники шорсткості) та характер земної поверхні, включаючи різні природні та штучні перешкоди, такі, як пагорби, дерева, інші вітродвигуни та забудова. Такі перешкоди знижують швидкість вітру, впливають на вертикальний розподіл вітрового потоку і призводять до завихрень потоку, що ускладнює перетворення енергії вітру. Суттєвий вплив на роботу ВЕУ чинить ущільнення та прискорення вітрового потоку, який проходить над підвищеннями чи у вузьких долинах [23].

Швидкість руху повітряних шарів над поверхнею землі змінюється: тертя об поверхню гальмує приземні шари. Ефект гальмування залежить від ступеня нерівності поверхні. Швидкість вітру, якщо розглядати її безпосередньо від землі до більш верхніх шарів атмосфери, поступово наближається до швидкості ламінарного потоку. Поєднуючи крайні точки векторів швидкостей, отримують характерну епюру швидкостей вітру на висоті. Якщо сила вітру змінюється в залежності від висоти, мова йде про так звані зсуви (або зрушення) вітру. Зрушення вітру зростає в міру наближення до земної поверхні. Це вказує на те, що в приземному шарі висотою до 10-20 м, очікується найбільш істотна зміна швидкостей.

Вітер поблизу поверхні огинає всі її нерівності. Якщо на шляху вітру, перпендикулярно його напрямку, розташовується гребінь, то з навітряної сторони приземні шари повітря спрямовуються вгору, а з підвітряної – вниз, створюючи завихрення. Досліджуючи дану точку простору, можна зазначити, що швидкість вітру змінюється миттєво, і кожній миті відповідають різні швидкості вітру в різних точках простору. Турбулентність є властивістю руху повітря. Турбулентність поблизу землі викликається трьома причинами: зрушенням вітру, перешкодами і термічною неоднорідністю повітря поблизу поверхні. В залежності від характеру поверхні, швидкості, висоти і термічної активності можна прогнозувати можливість виникнення вихорів різної сили. Поодинокі дерева, що стоять на рівнині, окрема будівля можуть викликати завихрення протяжністю до 100-200 м. Нерівності ґрунту також впливають на вітер у приземному шарі [90].

Енергія вітрового потоку, яка у подальшому використовується як ресурс, залежить у першу чергу від швидкості вітру та щільності повітря. Щільність повітря у свою чергу визначається фізичним станом та складом повітря – температурою, тиском, вологістю [91]. Від величини швидкості вітру відповідно енергія знаходиться у кубічній залежності. Подвоєння швидкості вітру дає збільшення енергії в 8 разів. Таким чином, середня швидкість вітру 5 м/с може дати приблизно в 2 рази більше енергії, ніж вітер із середньою швидкістю 4 м/с [24].

Вітрову енергію можна розглядати як одну з форм прояву сонячної енергії, перетвореної у кінетичну енергію рухомих повітряних мас. Потужність сонячного випромінювання, яка безперервно перетворюється в енергію вітрових потоків на Землі, оцінюється приблизно у 10^{11} ГВт [19]. До основних факторів, що впливають на точність оцінки енергії вітру, відносять: зміну густини повітря в залежності від висоти над рівнем моря та температури та відповідність існуючих даних для вітру вітровим умовам конкретного місцеположення вітроагрегату [124].

Особливістю вітрової енергії є нерівномірність її прояву у часі та просторі. Існують регіони, де за рік швидкість вітру на висоті 10 м не перевищує 3 м/с. На таких ділянках не можна розраховувати на ефективну роботу вітроенергетичних установок [124]. У більшості регіонів спостерігаються значні сезонні зміни вітрових потоків. Причому в зимові місяці швидкість вітру зазвичай вище, ніж влітку. Деякі автори, досліджуючи багаторічний хід швидкостей вітру, відмічають, що більші швидкості вітру фіксуються вдень, коли спостерігається розвиток конвекції, що створює значний вертикальний обмін повітря [104]. Денні зміни швидкості вітру спостерігаються, як правило, поблизу морів і великих озер. Для нашого дослідження така інформація не є вирішальною, але дає змогу оцінити можливості вибору тієї чи іншої ділянки для розміщення ВЕС. Так, якщо значення швидкостей вітру, знятих взимку, виявляються граничними, то швидкості вітру влітку будуть недостатніми для розвитку вітроенергетики.

Багато робіт присвячено впливу ВЕС на навколишнє середовище. Наприклад, у роботі [19] розглядалися екологічні особливості використання альтернативних джерел енергії, фактори негативного впливу, до яких належить вирубання земельних ресурсів, шумове забруднення, вплив на сприйняття ландшафту, на телебачення та зв'язок, вплив на орнітофауну. Зазначено також методи усунення негативного впливу ВЕС на навколишнє середовище. Охарактеризовано властивості вітру як ресурсу, основні закономірності розподілу швидкості вітру у просторі.

1.3 Топічний рівень досліджень у вітроенергетиці

Для проведення кількісного аналізу та моделювання необхідним є визначення розмірності геосистем, які вивчаються [53]. Похідним від цього є відображення структурно-динамічних ознак природного середовища [116]. Закономірності, які діють в геосистемах однозначні в певних територіальних межах. Кожен ранг геосистеми має просторові параметри, в межах яких

діють конкретні співвідношення ландшафтно-географічного порядку. Згадані у попередньому підрозділі дослідження вітроенергетичного потенціалу за територіальним охопленням можна поділити на глобальні, національні, регіональні та локальні (або топічні). Кожна розмірність має свою специфіку, свій тип вихідних даних, оптимальну модель розрахунків, форму представлення результатів та напрями використання. Інтерпретація глобального та національного рівня не викликає питань, проте розгляд регіонального, локального і, особливо, топічного рівня не є однозначним.

Слід зауважити, що у нашому дослідженні ми спираємося на переконання Сочави В. Б. у необхідності вивчення геосистем як цілісності, а їх компонентів – як складових цілого. Будь-яке явище слід вивчати з врахуванням загальної структури, динамічного стану та таксономічної приналежності тієї геохори, до якої це явище належить [116]. Так само Сочава В. Б. наполягає, що топогеосистеми (локального рівня) не можуть розглядатися окремо від регіональних, поза уявленням про геосистеми в цілому. Тому поділ на топічний та регіональний рівень розглядається нами у комплексі і без відриву один від одного.

Зауважимо, що існує певна невизначеність у трактуванні терміну «топічний». Поняття «топічний» та «топологічний» зазвичай використовуються для пояснення однієї і тієї ж розмірності геосистем.

Краукліс А. А. [69] використовує поняття «географічної топології» як вивчення природного середовища за дрібними просторово-часовими градаціями, а саме «топами» (геотопи, біотопи, екотопи тощо). Топічний аспект фізичної географії полягає у розгляді природного середовища на основі даних про топи як елементарні геосистеми, на основі якого формується поняття топогеосистеми.

За Сочавою В. Б. [116] виділяють три основні порядки розмірності геосистем: планетарний, регіональний та топологічний. Окремо науковець виділяє геоміри (як гомогенні ареали комплексів природних явищ) та геохори (геосистеми з гетерогенною структурою). Таким чином до топологічного

(локального рівня) відносяться геоміри біогеоценоз, фація, група фацій, клас фацій, геом та геохори елементарний різноякісний ареал, група урочищ, місцевість, район та округ. Геом та округ як граничні розмірності відносяться і до регіонального рівня.

Втім, такий територіальний поділ топологічного порядку не є єдиним. Так, за Солнцевим М. А. [82] на цьому рівні можна виділити підурочище, урочище, місцевість та ландшафт. Ісаченко А. Г. [54] також виділяє три головні рівні організації геосистем: планетарний (географічна оболонка), регіональний (фізико-географічні зони, сектори, країни, провінції) та локальний, або топічний (місцевий). До топічного рівня науковець відносить прості природно-територіальні комплекси (урочища, фації тощо).

Не слід оминати і факт специфічного виділення окремо локального та топічного рівнів, особливо у роботах, пов'язаних з вивченням взаємозв'язків природних та соціально-економічних систем. Так, Куниця М. М. [72] зауважує, що така взаємодія на топічному, локальному та регіональному рівнях буде залежати від розмірності систем розселення. Колбовський Є. Ю. [63] у ландшафтному плануванні виділяє топорівень, локальний (місцевий) рівень, внутрішньо регіональний мезо-, регіональний макро- та міжрегіональний верхній рівень.

Однозначним є те, що такі терміни як «топи», «топология», «топологічна розмірність» використовуються у дослідженнях, заснованих на даних про структури місцевого, або локального значення, про географічні «місця» та «місцевості» [69], тому розглядаються нами як синоніми. У нашій роботі ми будемо використовувати термін «топічний рівень» для розмірності конкретної точки місцевості та прилеглої території, в межах якої взаємодія вітроагрегату та навколишнього середовища буде найінтенсивнішою.

Відповідно до [116] горизонтальна площа найкрупнішої розмірності топологічного рівня найчастіше сягає 5-10 тис. км² (але у монотонних біокліматичних умовах, може досягати у 3 рази більших значень). Вертикальна потужність у середньому складає 1,5-2 км.

На топічному рівні за [69] у внутрішніх зв'язках геосистем епігенетичні компоненти грають більш важливу роль, ніж первинні властивості земної поверхні (на відміну від регіонального, де обидві компоненти приблизно рівнозначні, та планетарного, де активним початком є ефект, обумовлений планетарними властивостями фізичної поверхні Землі). Крім того, топогеосистемам властивий значно вищий ступінь динамічності структури і режимів функціонування, ніж регіональним. Вони найбільшою мірою пронизані транзитними і обмінними потоками, є найбільш динамічними і мінливими. Таким чином, на топічному рівні важливо роль грає структура ландшафтів та зв'язки між всіма їх компонентами. Тому закономірним наслідком є те, що для регіонального та топічного рівня використовуються різні методики моделювання вітроенергетичного потенціалу та різний комплекс вихідних даних.

Природно, що керівники вітроенергетичних проектів зацікавлені у виробітку максимально можливої потужності з вітрового ресурсу. Тому, щоб вибір місця розташування вітроелектростанції був керованим та доступним процесом, проводиться попередня регіональна оцінка вітроенергетичного потенціалу. Найкращим, найточнішим та найбільш трудомістким процесом є вимірювання швидкостей вітру на місцевості [214]. Водночас, таке дослідження є дорогим і не завжди доступним. На більших територіях середні швидкості вітру можна змодельовати за допомогою відповідних методик моделювання, які враховують вплив на швидкість вітру таких параметрів як абсолютна висота, рельєф та шорсткість місцевості. Вихідними даними для таких моделей служать або точкові виміри швидкостей вітру, або дані вимірів метеостанцій, або результати розрахунків числових моделей прогнозування погоди. Результатом такого моделювання буде поверхня середніх швидкостей вітру для заданої абсолютної висоти для всієї території дослідження. Насправді така модель досить репрезентативно представляє середні швидкості вітру для плоскої однорідної поверхні, але потребує коригування при переході до конкретного місця встановлення вітроагрегату (врахування місцевої

топографії). Такі карти вітрів є досить поширеними у різних масштабах, від глобального до регіонального, і є найкращою оцінкою вітрового ресурсу на великій території. Вони не замінюють анеометричні вимірювання, а, скоріше, слугують для фокусування досліджень і показують, де будуть доцільними вимірювання на місцевості.

Дослідження вітроенергетичного потенціалу починаються, як правило, з розрахунку «теоретичного ресурсу» (максимально доступного потенційного виробітку енергії на території), який зменшується на наступному етапі дослідження обмежуючих факторів (за рахунок зменшення площі території, доступної для розташування вітроагрегатів). Ресурси вітру з врахуванням технічних обмежень називають «технічними», а додатково з врахуванням територіального планування, соціальних та екологічних обмежень – «практичними ресурсами» [214].

Таким чином, на регіональному рівні вітрові ресурси розглядаються стратегічно. Для власника вітрової електростанції регіональні карти вітрів є цінним інструментом пошуку оптимального місця розташування, але не є достатньо точними, щоб виправдати фінансування проекту. Ефективність роботи ВЕС є дуже чутливою до невизначеності та помилок у оцінці вихідної швидкості вітру. Тому власник ВЕС, як правило, проводить додатковий комплекс розрахунків та аналізу вітрових ресурсів, з оцінкою потенційного довгострокового виробітку енергії. У таких «точкових» розрахунках слід використовувати наземні виміри – багаторічні метеодані або результати спеціального вітромоніторингу [19].

Розглянемо методики моделювання, які використовувалися у дослідженнях вітроенергетичного потенціалу регіонального та топічного рівня.

Достатньо репрезентативними і зручними на регіональному рівні досліджень є онлайн-ГІС, такі як «Renewable resources map and data» (Національної лабораторії відновлюваних джерел енергії США) [215]. Основою для карт у ГІС є або дані спеціальних досліджень для обраних територій [212], або результати розрахункових моделей (наприклад,

за методикою Датського технічного університету [172, 205]). ГІС 3DTIER «Renewable Energy» надає інформацію для первинної оцінки ресурсів вітру [92]. Вихідні дані: результати спостережень (відкриті джерела метеорологічної інформації) та числового моделювання атмосферної циркуляції з врахуванням рельєфу та властивостей поверхні. Просторова роздільна здатність моделі складає 5 км, інформація про методику розрахунку відсутня. Окремо слід виділити бази даних, такі як NASA SSE (Surface meteorology and Solar Energy [202]), які надають розрахункові дані параметрів вітру для будь-якої точки (за географічними координатами).

У дослідженнях **топічного рівня**, як правило, за основу беруться розрахунки регіонального рівня, але з уточненнями та доповненнями. Так, у роботі Баймірова М. Є. [9] пропонується для оцінки вітроенергетичного потенціалу використовувати районування досліджуваної території за класами вітрової активності (Табл. 1.1). Перший і другий клас вважається автором непридатним для установки вітроагрегатів.

Таблиця 1.1

Класи вітрової активності (за [9])

Клас	1	2	3	4	5	6	7
Висота, м	Швидкість вітрового потоку, м/с						
10	<4,4	4,4–5,1	5,1–5,6	5,6–6,0	6,0–6,4	6,4–7,0	>7,0
30	<5,1	5,1–5,9	5,9–6,5	6,5–7,0	7,0–7,4	7,4–8,2	>8,2
50	<5,6	5,6–6,4	6,4–7,0	7,0–7,5	7,5–8,0	8,0–8,8	>8,8

Вихідними даними є середньорічні швидкості вітру на певній висоті за даними метеостанції г. Атирау (Казахстан), середньорічне значення густини повітря, рельєф місцевості та технічні характеристики вітроагрегатів. Перерахунок швидкості вітру на необхідну висоту (у діапазоні 5-50 метрів) виконується за експоненційним законом Хелмана (1.1) [120].

$$V_{H_2} = V_{H_1} \cdot \left(\frac{H_2}{H_1} \right)^b, \quad (1.1)$$

де

H_1 – висота, для якої відомі швидкості вітру (як правило, 10 м);

H_2 – задана висота;

b – показник, що характеризує вертикальний профіль та рельєф поверхні.

Обмежуючими факторами є рельєф місцевості, екологічні обмеження. Для моделювання добового надходження вітрової енергії використано розподіл Вейбулла (розподіл ймовірності швидкості вітру). Для розрахунку виробітку енергії використано стандартну формулу (1.2) [120].

$$E = \int_{u=0}^{\infty} E_U du = \int_{u=0}^{\infty} \left[\frac{1}{2} \rho A u^3 C_p \Phi_U T \right] du, \quad (1.2)$$

де

ρ – густина повітря;

A – площа, що охоплюється вітроколесом;

C_p – коефіцієнт потужності, характеризує ефективність використання вітроколесом енергії вітропотoku (для ідеальної ВЕУ $C_p = C_{p_{\max}} = 0,59$);

Φ_U – функція розподілу ймовірності швидкості вітру.

1.4 Ландшафтна структура території та її визначальний вплив на вітропотенціал

У попередніх підрозділах ми розглянули сучасний стан досліджень природно-ресурсного потенціалу для потреб вітроенергетики, основні напрями досліджень на топічному рівні та визначили, що ландшафтно-географічні чинники є вирішальними для розвитку вітроенергетики. Розглянемо докладніше основні підходи до визначення поняття та вивчення ландшафту, а також яким чином ландшафтні дослідження можуть стати корисними для вітроенергетичного проекту. Термін «ландшафт» неодноразово розглядався у багатьох дослідників. Так, Гродзинський М. Д. [43] відзначав, що саме через це поняття у географію вводилися комплексний та системний

підходи, здійснилася інтеграція географії та екології. Вчений підкреслював, що тлумачення ландшафту не є однозначним, і виділив конструктивістську та загальну концепцію розгляду ландшафту (як похідну від поліструктурної та системної концепції), підхід ландшафтної екології, поведінкової географії, психології та феноменологічний підхід тощо.

За поліструктурним підходом, який розвивали К. Раман, О. Ретеюм, В. Солнцев, В. Преображенський, Ю. Пузаченко, Г. Хаазе, В. Боков, М. Гродзинський, Г. Швебс та ін., ландшафт розглядається як поліструктурне утворення, у якому може біти виділено стільки структур, скільки в ньому є типів зв'язків, оскільки саме зв'язок і породжує структуру. Ці структури не можна звести одна до одної, а тим більше інтегрувати їх у якусь одну – вони доповнюють одна одну [43, 102]. Згідно класичного радянського підходу до розгляду ландшафтів, який розвивали Л. Раменський, М. Солнцев, С. Калесник, К. Геренчук, А. Ісаченко, В. Сочава, Г. Міллер та інші ландшафт є конкретною територіальною ділянкою з чітко встановленими межами, досить великого розміру (декілька тисяч км²), в межах якої набір і співвідношення природних комплексів нижчих рангів лишається характерним лише для неї [43]. Загальне ж тлумачення, яке найчастіше використовується у сучасній літературі, можна охарактеризувати наступним чином. Ландшафт – це генетично однорідна ділянка географічної оболонки, яка природньо відокремила у ході її розвитку і представляє собою цілісну територіальну систему взаємопов'язаних, взаємодіючих компонентів (гірських порід, ґрунтів, повітря, біоти), які функціонують під впливом зовнішніх та внутрішніх факторів. При цьому поняття структури ландшафту є фундаментальним і за класичної ландшафтної школи вивчається шляхом класифікації. Так, виділяють структурно-генетичний (В. Ніколаєв), структурно-динамічний (А. Краукліс, В. Міхеєв, В. Сочава) та структурно-ландшафтний (П. Щищенко) принцип класифікації [45].

Висновки до розділу 1

1. Здійснено аналіз наявних науково прикладних досліджень та розробок за об'єктом та предметом дослідження, проведено аналіз поняттєво-термінологічного апарату. Виявлено два основні підходи до розгляду поняття «природно-ресурсний потенціал» (ПРП): соціально-економічний, за яким більша увага приділяється комплексності поняття, вартісній оцінці ресурсів, та конструктивно-географічний, пов'язаний з формуванням причинно-наслідкових зв'язків, побудовою теоретичного підґрунтя для визначення потенціалу ресурсів, використанням конструктивного методу моделювання.

2. Визначено основні завдання, які постають у дослідженнях за використання конструктивно-географічного підходу. Здійснено порівняння вітчизняних та закордонних досліджень ПРП.

3. Здійснено аналіз досліджень вітроенергетичного потенціалу, виявлено основні напрями та тенденції. Було розглянуто праці як іноземних дослідників, зокрема Р. Beaucage, J. Cataldo, M. Zeballos Т. Ван де Веккена, Ф. Вайна, так і вітчизняних вчених, зокрема О. О. Ачкасової, М. Є. Баймірова, М. П. Кузнєцова, О. С. Третьякова, В. С. Васильєва, Я. Є. Молодан, Н. І. Хрисанова. Виявлено основні методи та завдання. Побудовано схему складових та напрямів досліджень у вітроенергетиці.

4. Виявлено найактуальніші для України складові вітроенергетичного проекту, які потребують детальнішого розгляду: визначення чинників підвищення виробітку енергії, оцінка потенційного впливу на навколишнє середовище та розробка методики врахування факторів, які обмежують розвиток вітроенергетики.

5. На основі аналізу робіт у галузі конструктивної географії, соціально-економічної географії, картографії здійснено порівняння регіонального та топічного рівня досліджень, визначено основні параметри, які мають бути прийняті до уваги у дослідженнях на топічному рівні.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [2, 28].

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ОЦІНКИ ПРИРОДНО-РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТЕРИТОРІЇ З ВРАХУВАННЯМ ЛАНДШАФТНОЇ СТРУКТУРИ

2.1 Складові системної оцінки

Аналіз робіт, розглянутих у попередньому розділі, дав можливість створити комплексний алгоритм оцінки природно-ресурсного потенціалу території для потреб вітроенергетики на топічному рівні (Рис. 2.1). Він включає декілька основних складових: обґрунтування вибору території для впровадження вітроенергетичного проекту, моделювання вітроенергетичного потенціалу території, визначення обмежуючих факторів, розрахунок потенційного виробітку енергії ВЕУ, моделювання потенційного впливу ВЕУ та економічну оцінку.

Перший етап є важливим саме через момент переходу від регіонального рівня досліджень до топічного. Регіональні статистичні дані та карти вітрів є більш доступними та надають можливість попередньо оцінити територію на предмет доцільності розвитку вітроенергетики взагалі. На цьому етапі необхідно віднайти якомога більшу кількість даних для порівняння та зіставлення з результатами локальних вимірів та моделювання.

Етап моделювання вітроенергетичного потенціалу включає в себе три складові (ресурсна складова): дослідження рельєфу, параметрів вітру та шорсткості місцевості. Ці дані є вихідними для більшості методик розрахунків, а точність результату є вкрай важливою. Додаткові ландшафтно-географічні дослідження можуть бути залучені на кількох етапах: розрахунку матриці висот (проведення структурного аналізу рельєфу, що дозволить збільшити точність результуючої матриці висот), побудові поверхні шорсткості (проведення класифікації існуючих ландшафтів на основі космічного знімку та присвоєння ним коефіцієнту шорсткості, замість оцифрування вже існуючих карт ландшафтів), проведення додаткового етапу

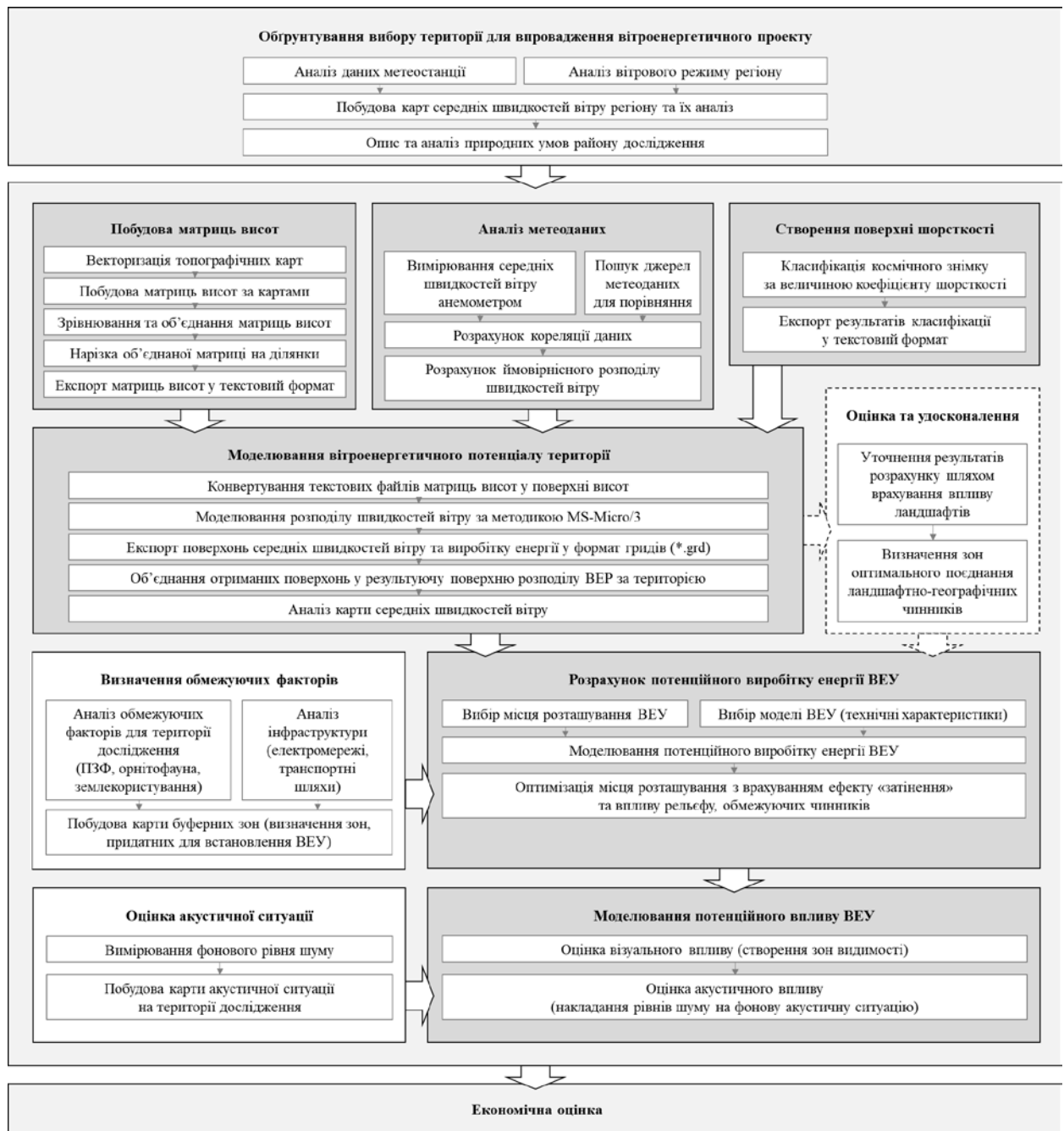


Рис. 2.1 Алгоритм оцінки природно-ресурсного потенціалу території для потреб вітроенергетики з врахуванням ландшафтної складової (виділено пунктиром)

оцінки та удосконалення побудованої моделі середніх швидкостей вітру шляхом аналізу ландшафтної структури території.

Наступним етапом є визначення обмежень розвитку вітроенергетики, які визначають місце встановлення вітроагрегатів додатково до ресурсної складової. На основі даних ресурсної та обмежуючої складової проводиться

наступний етап розрахунку потенційного виробітку енергії для кожного потенційно можливого місця встановлення вітроагрегатів. Так як кожен вітроагрегат буде може здійснювати негативний вплив на навколишнє середовище, необхідним наступним етапом є оцінка потенційного впливу та вилучення із розрахунків вітроагрегатів, які чинять потенційно значний негативний вплив. Лише після отримання низки ділянок, які мають оптимальні значення з позицій ресурсної, обмежуючої та складової впливу, можна здійснювати останній етап економічної оцінки проекту [85, 126].

Розглянемо детальніше методики розрахунків для кожного етапу алгоритму.

2.2 Ресурсна складова

В основі моделювання вітроенергетичного потенціалу лежать параметри вітру (середня швидкість, повторюваність напрямів тощо). Тож, для того, щоб удосконалити існуючі методики, необхідно здійснити розгляд та аналіз фізичної природи вітру та існуючих методик їх врахування.

Вітер – це рух повітря відносно земної поверхні, викликаний нерівномірним розподілом атмосферного тиску, який характеризується швидкістю і напрямом [51]. Результати безперервних постійних зчитувань показів анемометрів на метеостанціях Державної метеорологічної служби протягом багатьох років вказують на те, що середньорічні та середньомісячні значення швидкості вітру у конкретному місці змінюються у невеликому діапазоні. Тобто, незважаючи на те, що вітер – це стохастичний процес, йому притаманні деякі закономірності. Кожен напрям вітру (румб) характеризується швидкістю, потужністю, режимом, повторюваністю (тривалістю дії різних градацій швидкостей вітру в годинах або відсотках за рік чи інший період часу в конкретній місцевості, на певній висоті відносно земної поверхні) як за кожним з періодів спостережень, так і для року в цілому.

Вітер є великомасштабним переміщенням повітряних мас в атмосфері. Ці переміщення повітря у глобальному масштабі спричинені в першу чергу різницею у нагріванні Сонцем атмосфери Землі. Тобто, енергія вітру є опосередкованою у просторі-часі формою сонячної енергії.

Різноманітні місцеві рухи більш-менш суттєво залежать від регіональної та глобальної циркуляційних систем. Основними модифікаторами, які перетворюють більш масштабні циркуляції у місцеву мікромасштабну циркуляцію, є рельєф і підстильна поверхня, тобто ландшафтна структура певної місцевості або її виокремленої ділянки, починаючи від гір та пагорбів і закінчуючи локальними перешкодами, такими як забудова та дерева. Швидкість, структура и напрям вітропотoku змінюються як латерально, так і вертикально й розподіляються у широкому діапазоні швидкостей і напрямів.

Енергетичні характеристики вітру отримують шляхом перерахунку безпосередніх вимірів, якщо це можливо, на місці майбутнього встановлення ВЕС. Саме так поведуть себе великі підприємства, які намагаються уникнути негараздів або ж невдалих розміщень ВЕС. Якщо виміри вітрових характеристик є достатньо тривалими (5 років чи більше), то вони можуть бути використані безпосередньо як показник характеристик вітру у майбутньому. Проте, зазвичай, у бізнесі рідко вдається відкладати освоєння ресурсу на такий тривалий термін. Частіше використовують більш обмежені дані (виміри тривають близько 1 року). В такому разі для здійснення довгострокового прогнозування застосовують статистичні методи.

Поряд з таким емпіричним шляхом обґрунтування розміщення ВЕС, користуються модельними розрахунками. Як повідомлялось у огляді (розділ 1), таких моделей існує досить багато.

Швидкість вітру – це основний параметр, від якого залежить виробіток енергії. Від швидкості у 3-му ступені залежить потужність вітропотoku, тобто кількість енергії, яку він несе у собі протягом одиниці часу. Якби вітроагрегати були здатні використовувати енергію у повному діапазоні

швидкостей, то в такому разі задача обрахування очікуваного виробництва енергії, до чого ми підходимо, була б тривіальною.

Натомість, кожен вітроагрегат, залежно від конструкції, здатен працювати лише у певному діапазоні миттєвих швидкостей. Отже, усереднені у часі дані дають лише орієнтовну інформацію. Насправді, важливий спектр швидкостей, але не середнє її значення за певний час.

Для кожного вітроагрегату встановлені мінімальні й максимальні швидкості вітру, за яких він здатен виробляти енергію. Більшість з них мають за мінімальну швидкість біля 5 м/с, максимальну біля 25 м/с.

Отже, якщо узяти спектр швидкостей вітру, то обмеживши його крайні (мінімальні й максимальні швидкості), отримаємо технологічний вітер і можемо обчислити потужність технологічного вітру. Чим більшою є швидкість вітру, тим більшою буде енергоефективність установки (включно до значення граничної швидкості).

При цьому кількість енергії, що виробляється вітроагрегатом (P), збільшується в третьому ступені зі збільшенням швидкості вітру (V) удвічі [124]: $P \sim V^3$. Швидкість вітру у свою чергу прямо пропорційно залежить від величини таких параметрів, як баричний градієнт, інтенсивність циклонічної діяльності. Посилаючись на середню швидкість вітру, можна одержати лише орієнтовну оцінку вітроенергетичних ресурсів. Проте для визначення повного потенціалу необхідним є врахування й інших параметрів.

Існує кілька способів визначення швидкостей вітру в межах ділянки дослідження [59, 147, 187, 193]:

1. На сьогодні існує досить велика кількість баз даних (мережа Internet та офіційні джерела), які містять інформацію щодо вітрових характеристик різних регіонів світу. Проте для України зазвичай така інформація є неповною та не репрезентативною.

2. Для отримання даних про швидкість вітру можна також звернутися в місцеву метеослужбу або аеропорт. Але зазвичай метеостанції округлюють

дані за деякі проміжки часу, що не дає можливості побачити картину сезонності або зміни швидкості вітру в залежності від часу доби. Крім того, через віддаленість метеостанції від ділянки дослідження часто можуть з'являтися значні похибки у швидкостях вітру.

3. Виміри швидкості вітру в місці очікуваної установки портативною метеостанцією. Перевагою такого підходу є висока точність даних. При проведенні робіт по виміру швидкості вітру на місці установки, можна встановити анемометри на необхідну висоту. Також можна встановити кілька анемометрів в різних місцях ділянки, щоб визначити найбільш вітряне місце для монтажу. Даний спосіб є найбільш об'єктивним і дає найточніші покази швидкості вітру в місці установки. Недоліком є тривалість часу виміру. Для проведення об'єктивних вимірів, необхідно встановлювати анемометри на тривалий термін – бажано не менше одного місяця. В ідеальному варіанті, портативна метеостанція повинна знімати показання протягом цілого календарного року, так як у всіх регіонах існує сезонність вітрів [40].

Середня швидкість вітру – це статистичне значення миттєвих швидкостей вітру, усереднене за визначений період часу, який може варіювати від декількох секунд до кількох років [25]. Середньорічна швидкість вітру характеризує загальний вітровий потенціал території. Це швидкість вітру, як визначається як середнє зважене (або арифметичне) значення всіх спостережуваних швидкостей вітру протягом року. Середні швидкості вітру можуть бути обчислені і для інших періодів, наприклад: місячні, денні, годинні.

Швидкість вітру у даній місцевості постійно змінюється. Існують зміни багаторічному ході середніх швидкостей вітру, зміни за порами року, з проходженням погодних систем (синоптичні зміни), щоденні зміни (добові) та зміни від секунди до секунди (турбулентність).

Важливим обмеженням оцінки вітрових ресурсів є те, що висота вітроколеса (від 30 до 60 над землею поверхнею) виявляється значно вищою за рівень вимірювання вітру на метеостанціях (висота щогли флюгера та анемометра 12 м). Аналітичні роботи свідчать, що у приземному шарі повітря збільшення висоти призводить до нелінійного збільшення швидкості вітру.

Для врахування цієї обставини, обирається відповідна модель для відтворення вертикального профілю вітру на рівень вітроколеса за даними стандартних спостережень, або вводяться певні поправки в отримані оцінки вітроресурсів. У сучасних ГІС використовуються автоматичні моделі підрахунку швидкості вітру на висоті турбіни із використанням закону зміни швидкості вітру залежно від висоти [157, 160]. Натомість, сам цей закон потребує застосування певних параметрів, які відображають структуру і стан рельєфу й підстильної поверхні.

Вітрові установки на сьогодні обмежені найнижчим 150-метровим шаром атмосфери. На цих висотах вітер у значній мірі залежить від характеристик земної поверхні (внаслідок тертя), і, як наслідок, швидкість вітру є меншою.

Зона, у якій вітер залежить від тертя - планетарний прикордонний шар атмосфери – прилеглий до земної поверхні шар повітря, властивості якого через інтенсивність турбулентного перемішування визначаються в основному термічним і динамічним впливом підстильної поверхні. Товщина цього шару значно більша за висоти розміщення сучасних вітроагрегатів. Вона складає від 300–400 до 1500–2000 м, в середньому близько 1000 м, в залежності від передачі імпульсу, тепла і вологи між атмосферою і поверхнею, що призводить до стійкості атмосфери. Вона тим більша, чим більшою є шорсткість земної поверхні і чим інтенсивнішим є розвиток турбулентності.

Швидкість вітру номінально складає 0 м/с на рівні земної поверхні і невідпинно зростає із висотою. Зміна швидкості вітру з висотою називається зсувом або вертикальним профілем вітру (Рис. 2.3).

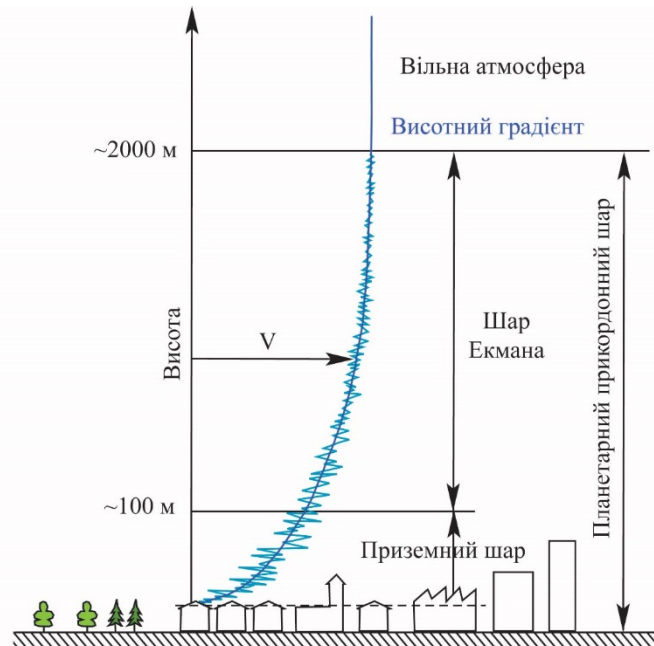


Рис. 2.3 Вертикальний профіль вітру

Для екстраполяції величини швидкості вітру у вертикальній площині важливо враховувати шорсткість підстильної поверхні місцевості [159, 181]. Шорсткість поверхні – це сукупність нерівностей поверхні з відносно малими кроками на базовій довжині.

Зміна швидкості вітру із висотою з врахуванням шорсткості поверхні може бути відображена за допомогою логарифмічного закону. Для нейтральних стабільних умов цей закон визначається за формулою (2.1) [159].

$$V_z = \frac{V^*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right), \quad (2.1)$$

де

V_z – швидкість вітру на висоті z ;

z_0 – коефіцієнт шорсткості;

V^* – швидкість тертя;

k – постійна фон Кармана (0,4).

Висота шорсткості є характеристикою місцевості та має встановлене значення в залежності від сили тертя о поверхню, над якою проходить вітер.

Кожний тип поверхні має свій коефіцієнт шорсткості (z_0), який може змінюватися від 0,0003 для водних поверхонь до 1 та більше для лісів.

Необхідність врахування даного показника шорсткості пов'язана з тим, що на режим вітру і, в особливості, на швидкість вітру великий вплив мають фізико-географічні умови місцевості. У зв'язку із рівнинністю рельєфу узбережжя, спостерігаються великі відмінності в швидкості вітру у вузькій прибережній зоні і в районах, віддалених від узбережжя, в яких в результаті різкого збільшення шорсткості підстильної поверхні швидкості вітру значно зменшуються. Подібна ситуація спостерігається і в зонах, заглиблених у суходіл. Так, наприклад, відповідно теорії, яку висунув Енджелл та ін. [73] місто можна розглядати як єдину пасивну перешкоду на шляху повітряного потоку, що сповільнює його швидкість. Всі фронти, швидкість яких над сільською місцевістю лежать в інтервалі від 4 до 14 м / с, незалежно від напрямку руху сповільнюються над містом приблизно в два рази. Вертикальний профіль вітру змінюється в залежності від шорсткості підстильної поверхні (найбільша шорсткість відповідає міській забудові, найменша – сільській місцевості) (Рис. 2.4). Як бачимо, на висоті 100 метрів значення швидкості вітру над містом складає менше 60 % від швидкості геострофічного вітру, в той час, як для сільської місцевості цей показник складає більше 86 %.

Найпоширеніший метод визначення вертикального профілю вітру – розрахунок на основі виміряного значення швидкості вітру (V_{z_h}) на заданій висоті (z_h) та прийнятого значення коефіцієнту шорсткості в залежності від типу підстильної поверхні (z_0). Для цього використовують рівняння (2.2).

$$\frac{V_z}{V_{z_h}} = \frac{\ln(z/z_0)}{\ln(z_h/z_0)}, \quad (2.2)$$

де

V_{z_h} – виміряне значення швидкості вітру на висоті z_h .

Відповідно, за наявності вимірів швидкості вітру на двох висотах в одній точці, визначаємо висоту шорсткості місцевості (z_0).

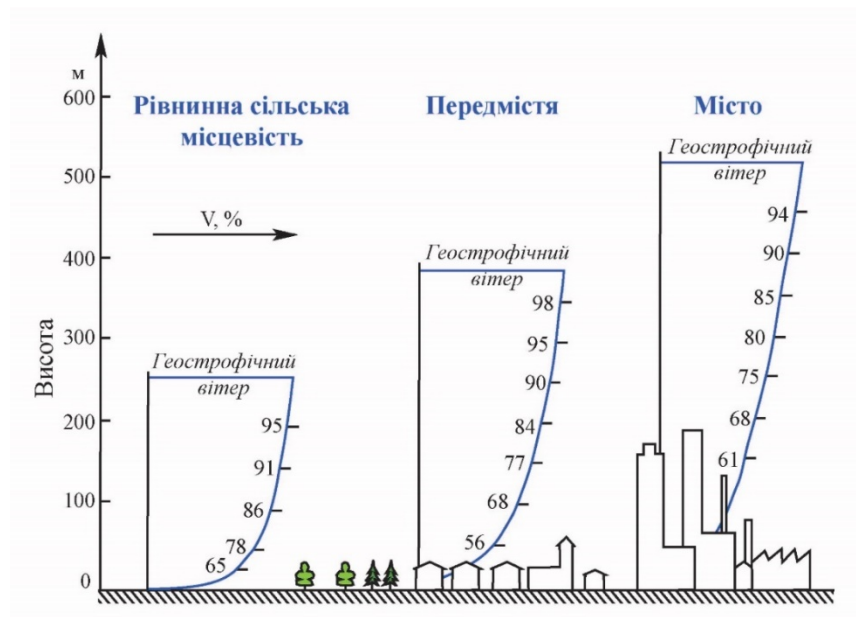


Рис. 2.4 Вертикальний профіль швидкості вітру у відсотках до швидкості геострофічного вітру (за [161])

Логарифмічний закон визначення профілю вітру застосовується лише до вітрів над плоскою земною поверхнею із рівномірною шорсткістю. У випадку, коли спостерігається диференціація рельєфу місцевості або зміна шорсткості, швидкість вітру буде змінюватися від місця до місця разом зі зміною профілю вітру.

Вітрові турбіни часто розташовують на вершинах пагорбів, так як над ними зазвичай переважають більш високі швидкості вітру. Це робить завдання прогнозування швидкості вітру на перспективному місці встановлення вітрових турбін складнішим. Для рівного невисокого пагорбу, спостерігатиметься, обернено до описаного логарифмічного закону, посилення швидкості вітру близько до землі (Рис. 2.5). Отже, використання логарифмічного закону є неприйнятним (коефіцієнт шорсткості z_0 є дійсним лише за співвідношення більше 1). В такому разі використовують ступеневий закон (2.3).

$$V_z = V_{zh} \left(\frac{z}{z_h} \right)^\alpha, \quad (2.3)$$

де

α – показник, який залежить від шорсткості поверхні.

Таким чином, у ряді досліджень, коли постає необхідність розрахунку швидкостей вітру над поверхнею, на якій є досить значний перепад висот, необхідно користуватися саме ступеневим законом зміни швидкості вітру з висотою.

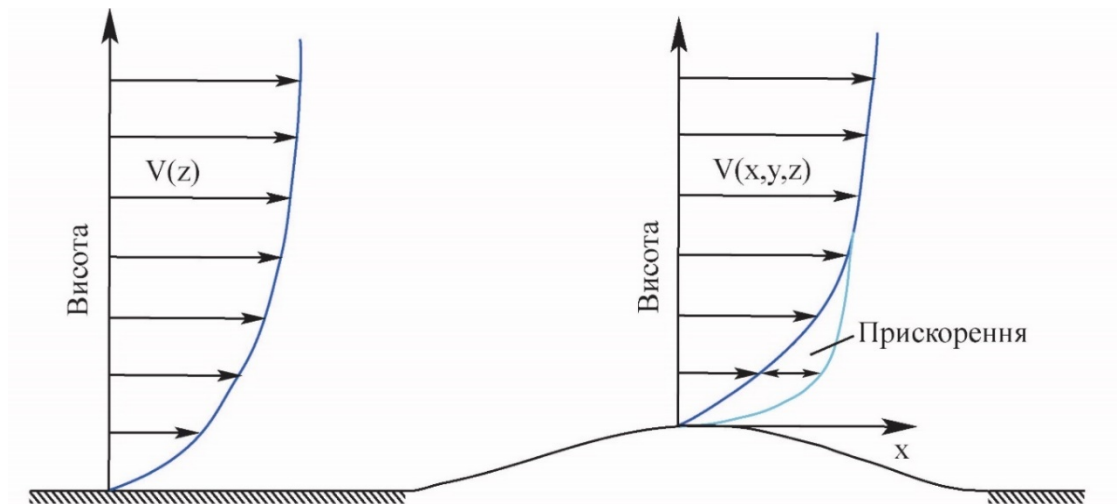


Рис. 2.5 Зміна профілю вітру на вершині пагорбу

Важливим у прогнозуванні розвитку вітроенергетики є також розподіл швидкостей вітру у часі, тобто частота повторюваності окремих швидкостей вітру (сумарний час в межах періоду, коли діє дана швидкість вітру чи заданий діапазон швидкостей).

Швидкість вітру постійно змінюється, тому більш прийнятним є опис характеристик вітру статистичними методами. Досліднику важливо знати не конкретну швидкість вітру у певний момент, а те, як змінюється середня швидкості вітру за певний період і як відхиляється навколо середнього значення.

Метод, який зазвичай використовується розробниками ВЕС, полягає у вимірюванні швидкості вітру інтервалом у кожні 10 хвилин переважно щонайменше протягом календарного року для певної точки місцевості. Кожне значення у подальшому сортується у вузькі інтервали швидкостей вітру – біни. Ця процедура називається «*бінінгом*» даних. При побудові кривої розподілу Вейбулла було використано «бін» шириною 1 м/с (Рис. 2.6).

Відносна частота є часткою вимірювань швидкості вітру в кожному «біні». Її можна розглядати як ймовірність того, що виміряна швидкість вітру потрапить саме в даний інтервал «біну». Відносна частота визначається таким чином, що загальна площа під кривою має значення, рівне одиниці.

Середня швидкість вітру позначається $V_{сер}$ і може бути розрахована за формулою (2.4).

$$V_{сер} = \sum_{i=1}^n V_i p(V_i), \quad (2.4)$$

де

V_i – центральне значення швидкості вітру i -го «біну»;

$p(V_i)$ – ймовірність (або відносна частота) потрапляння виміряного значення в i -ий «бін».

Для простоти можна прийняти миттєву швидкість вітру як квазіпостійну складову та визначати турбулентні відхилення (флуктуації) навколо цього середнього значення вітру. Квазіпостійне значення отримується шляхом усереднення за відповідний проміжок часу. За цей самий проміжок ми характеризуємо мінливість вітру дисперсією швидкості вітру, яка дорівнює середньоквадратичному значенню турбулентних флуктуацій. Квадратний корінь з дисперсії є стандартним відхиленням, позначається σ і вимірюється у м/с.

Визначення *поривчастості вітрового потоку* у даній точці місцевості забезпечує параметр, відомий як інтенсивність турбулентності I (2.5).

$$I = \frac{\sigma}{V_{\text{сер}}}, \quad (2.5)$$

де

σ – стандартне відхилення;

$V_{\text{сер}}$ – середнє значення швидкості вітру.

Теоретично встановлено, що двох параметрична (швидкість – ймовірність) крива розподілу асиметрична й має позитивний ексцес. Її називають розподілом Вейбулла і відносно неї порівнюють спостережувані показники (Рис. 2.6) [124].

Для функції розподілу Вейбулла, ймовірність $p(V)$ швидкості вітру, що має значення V задається рівнянням (2.6).

$$p(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c} \right)^{(k-1)} \exp \left[- \left(\frac{V}{c} \right)^k \right], \quad (2.6)$$

де

k – параметр форми;

c – параметр масштабу, який вимірюється у м/с;

V – швидкість вітру.

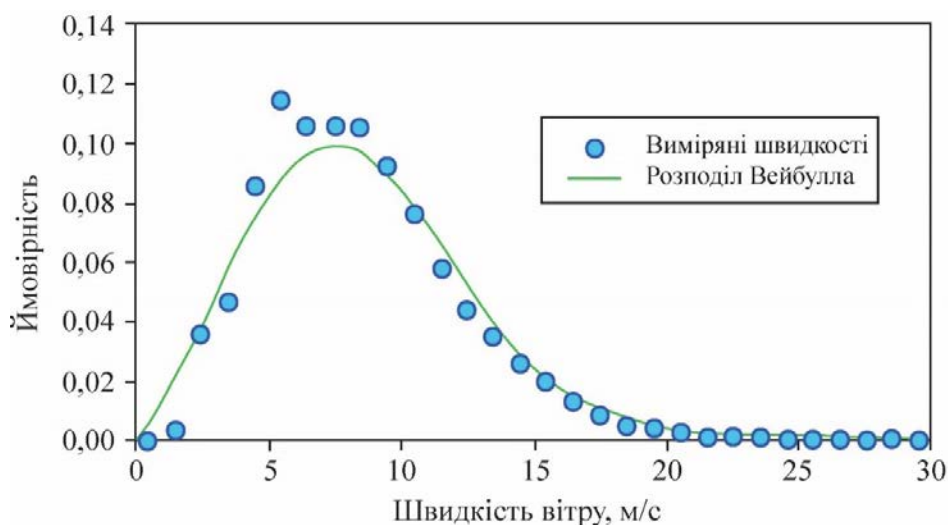


Рис. 2.6 Вимірний розподіл швидкостей вітру і розподіл Вейбулла з параметром масштабу $c=9,5$ м/с і параметром форми $k=2,3$.

Значення параметрів c і k визначаються на етапі апроксимації конкретних даних метеоспостережень. Параметр форми k визначається за допомогою графіка інтегральної повторюваності швидкості вітру, побудованого в логарифмічних координатах. На осі абсцис відкладається інтегральна повторюваність швидкості вітру в % від загального числа спостережень, а по осі ординат – значення швидкості вітру в м/с. Нанесення експериментальних даних на такий графік дає, як правило, лінійну (білогарифмічну) залежність. Котангенс кута нахилу прямої лінії до осі абсцис дає значення параметра k . Параметр масштабу розподілу Вейбулла визначається за формулою (2.7) [52].

$$c = \frac{1}{V_{сер} \Gamma(1 + 1/k)}, \quad (2.7)$$

де

$V_{сер}$ – середня швидкість вітру;

k – параметр форми.

В разі коли значення $k=2$, розподіл Вейбулла зводиться до одно параметричного розподілу Релея.

Обчислення технологічно доступної потужності вітроагрегату буде залежати від його параметрів. Нами було узято за еталон вітроенергетичну установку Enercon E-40 (Додаток Ж), яка використовувалась як базова в емпіричній роботі. Слід мати на увазі, що із розвитком високих технологій будівництва вітроустановок, ця частина дослідження потребуватиме корекції.

Вітроенергетична установка (ВЕУ) – це комплекс взаємопов’язаного устаткування та споруд, призначений для перетворення енергії вітру в інші види енергії (спочатку механічну енергію вітроколеса, що обертається, а потім в теплову, електричну, тощо) [40].

Коли вітрова турбіна обертається, необхідною є деяка кількість енергії для подолання втрат на обертання і тертя, навіть якщо вихідна потужність є нульовою. Мінімальна робоча швидкість вітру – це мінімальна швидкість

вітру, при якій забезпечується обертання турбіни з номінальною частотою обертання і з нульовою продуктивністю (холостий хід). За більших значень швидкості вітру (зазвичай 3-5 м/с) вітрова турбіна починає генерувати вихідні потужності.

Коли вітрова турбіна досягає своєї номінальної вихідної потужності (рівень потужності, відповідний паспортним даним турбіни) швидкість вітру визначається як номінальна (розрахункова) швидкість вітру.

За високої швидкості вітру сили, які діють на вітрових турбін є суттєвими. Швидкість вітру, при якій розрахункова міцність вітроагрегату дозволяє виробляти електроенергію без пошкоджень для установки називається максимальною робочою швидкістю вітру (зазвичай 25 м/с). За вищих швидкостей вітру вітроагрегат зупиняє обертання лопатей. Тим не менш, настільки високі швидкості вітру виникають лише зрідка [40].

За швидкості вітру вище номінальної і нижче максимальної для обмеження навантаження і підвищення ефективності автоматично відбувається оптимізація регулювання роботи вітрової турбіни. Виділяють пасивне саморегулювання (використання специфічної аеродинамічної конструкції) та за допомогою активних механізмів (зміна кута нахилу лопаті).

Навантаження на лопаті турбіни супроводжується вилученням потужності або енергії, разом з відповідною втратою імпульсу в повітрі, що проходить через ротор. Ця втрата імпульсу може бути пов'язано з тягою на роторі, яка характеризується опором з навітряної сторони і слідом, який розвивається за ротором. Найвищі втрати імпульсу спостерігаються у зоні сліду, розміром у половину радіусу ротора. Проте вже на відстані 3–5 діаметрів турбіни слід стабілізується. Варіації імпульсу навколо турбіни можуть бути представлені осесиметричним графіком розподілу Гауса (або нормального розподілу), з максимальною втратою імпульсу, або дефіциту швидкості, в центрі сліду.

Виробники вітрових турбін надають дані щодо потужності та тягової сили будь-якої турбіни у формі кривих (Рис. 2.7). В залежності від типу

регулювання (активного чи пасивного) покази для значних швидкостей вітру будуть відрізнятися. Потужність зазвичай виражається в кіловатах (кВт) і сила тяги – у кіло Ньютонах (кН). Іноді сила тяги може бути виражена як коефіцієнт потужності (C_p). C_p пов'язаний з потужністю співвідношенням (2.8).

$$C_p = \frac{P}{0,5\rho V^3 S}, \quad (2.8)$$

де

P – потужність у Вт;

S – площа ротора;

ρ – щільність повітря;

V – швидкість вітру.

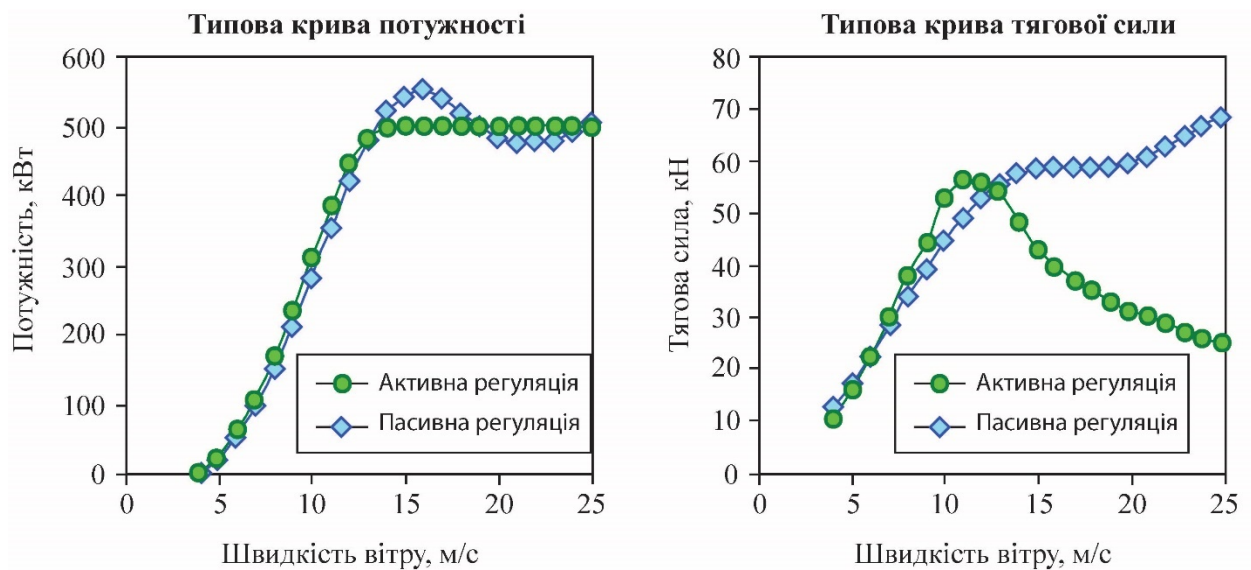


Рис. 2.7 Типові криві потужності і тягової сили турбіни

2.3 Порівняння методик моделювання швидкості вітру

У процесі здійснення розрахунку прогностичних вітроенергетичних характеристик вітру для локальної території оптимальним є поєднання математичних та картографічних методів моделювання [56, 58]. Картографічне представлення статистичних розрахунків дає змогу

візуалізувати їх результати у вигляді, оптимальному для дослідження, позбавляє помилок та прорахунків, дає уявлення про точність математичного моделювання та його географічну вірогідність [68]. Втім, те континуальне представлення даних, яке може надавати картографічна модель (на відміну від дискретного математичного представлення), потребує певних додаткових операцій переходу (інтерполяції даних). Саме в процесі операції переходу і виявляється небезпека отримання невірогідних результатів моделювання, що дослідник може не взяти до уваги. В разі проведення точкових розрахунків, така похибка може бути неістотною через нерівномірність розподілу похибки. Проте, для створення неперервної площини значень дані мають максимально відповідати дійсності. Тому, на етапі переходу від математичної до картографічної моделі має здійснюватися перевірка отриманих даних моделювання на відповідність реальним умовам.

Розподіл вітропотенціалу певної локальної ділянки, обраної, як правило, із загальних міркувань, визначається засобами моделювання, якими враховуються її фізико-географічні особливості. Оптимальним засобом верифікації даних такого моделювання є безпосередній вимір вітроенергетичних параметрів шляхом встановлення анемографів у певних точках, для яких отримано найбільший енергетичний потенціал вітропотoku. Проте досить часто у дослідників обмежена або навіть відсутня можливість проведення повноцінних вимірів у численних точках. Тому корисним є пошук інших, побічних варіантів перевірки моделі розрахунку.

Оптимальним і найбільш точним методом перевірки є *встановлення приладів* для виміру вітроенергетичних характеристик на ділянці дослідження. Для цього, зазвичай, встановлюється анемограф безпосередньо у точці перспективного розміщення вітроагрегата.

За умови недостатнього охоплення даними інструментальних вимірів території дослідження здійснюється *порівняння отриманих даних із даними пунктів постійних метеостанцій*. Основними проблемами для даного способу є, по-перше, віддаленість метеостанцій від ділянки дослідження,

що може суттєво впливати на достовірність даних щодо розподілу швидкостей вітру. По-друге, недостовірність даних, отриманих із власне метеостанцій через, наприклад, затіненість щодо вітропотоків. Спеціалізовані метеопости встановлюються вітроенергетиками у відкритій місцевості, а от відкритість метеостанцій (через тривале існування в одному місці і зміну довкілля через забудову, лісонасадження тощо) частіше за все виявляється порушеною. Якщо між метеостанцією та ділянкою вимірювання знаходиться перешкода, дані метеостанції вже не є достовірними. Тому, для цього способу екстраполяції даних вимірювань є необхідним проведення попереднього аналізу даних найближчих пунктів державної опорної мережі із врахуванням вітрової затіненості метеостанції.

Методики врахування вітрової затіненості так само різняться [163, 176, 195]. Так, у роботі [106] пропонується проведення розрахунку, що базується на системному використанні даних обстеження метеостанцій і енергетичних роз вітрів. В разі затіненості сектору, виробіток електроенергії ВЕУ оцінюються за даними близько розташованої метеостанції, щодо якої цей сектор відкритий для вітру, і яка має однорідні з вихідною метеостанцією умови щодо утворення вітру. Якщо такої «корегуючої» метеостанції знайти не вдається, то метеостанція із затіненими секторами виключається з розгляду (якщо, природно, для неї відсутні спостереження за період, попередній до часу виникнення перешкоди).

Досить ефективним є статистичний метод *аналізу частотного розподілу швидкостей вітру*, про який йшлося на початку розділу. Так, у роботі [9] верифікацію моделі проведено через розрахунок параметрів розподілу за даними метеостанції та власне ділянки моделювання, обчислення очікуваного виробітку енергії за цими даними та порівняння отриманих значень.

Здійснення розрахунків потенційного виробітку енергії базується на значенні швидкості вітру, при чому чим детальнішою є інформація щодо

значень швидкості вітру, тим, зрозуміло, точнішим буде прогнозований виробіток енергії.

Найпоширенішими моделями розрахунку середніх швидкостей вітру та вітроенергетичного потенціалу є (Табл. 2.1):

1. Аналітичні моделі (метод найближчого сусідства, зворотних зважених відстаней). Зазвичай вони є найпростішими і широко відомі у математичній географії.

2. Емпіричні (модель впливу Дж. Клайна)

3. Лінійні моделі вітрового потоку (WAsP, MS-Micro/3), що широко використовуються для прогнозування просторової зміни середньої швидкості вітру, розподілу частот за напрямом (роза вітрів), зсуву профілю вітру та інших граничних характеристик приземного повітряного шару. Вони увійшли в широке вживання в 1980-х роках, коли обчислювальний ресурс був досить обмежений, і тоді ж набули статусу галузевого стандарту [207]. За ними можна було виконати швидкі та достатньо точні розрахунки для територій, де на середньорічні швидкості вітру не надто впливає наявність крутих схилів, поділу вітропотoku, баричних систем, низько розташованих вихорів (джет-стрімів), а також інших динамічних та нелінійних явищ.

4. Моделі обчислювальної гідродинаміки (CFD) (WindSim) вважаються наступним поколінням моделей вітрового потоку для ВЕС. Більшість з них виходять з вимоги збереження маси та імпульсу нелінійного рівняння Нав'є-Стокса, і забезпечують розрахунок лише для умови постійного профілю вітру, що є надто жорстким і нереалістичним обмеженням. Натомість, кілька наукових досліджень показують, що моделі CFD усе ж таки працюють краще, ніж WASP моделі, але не у всіх випадках.

5. Наступні за ступенем складності є мезомасштабні моделі чисельного прогнозу погоди (NWP): MASS, WRF, ARPS, MC2, KAMM і т.д. [207]. Моделі NWP дають можливість обраховувати і прогнозувати широкий спектр метеорологічних явищ, але потребують значної обчислювальної потужності. Щоб обійти цю проблему, моделі NWP, як правило,

використовують у поєднанні з лінійними «мікромасштабними» моделями вітрового потоку для досягнення більш високої просторової роздільної здатності.

Незалежно від методу моделювання, невизначеність збільшується із зростанням складності рельєфу (Табл. 2.1). Чим більш складна місцевість, тим більшою є похибка. Жодна модель не надає точнішої оцінки швидкості вітру. Отже, особлива увага повинна бути приділена змістовному тлумаченню та осмисленому використанню результатів моделювання. Надалі у роботі ми спираємось на зручнішу для нас модель MS-Micro/3, яка у жодному разі не програє іншим.

Таблиця 2.1

**Похибка розрахунку середніх швидкостей вітру
(відповідно до показів анемометру) (за [152, 207])**

	Метод	Плоске підвищення	Відкритий пагорб	Пагорби	Гірський схил	Гори	Загальна
Аналітична модель	Зворотних зважених відстаней	3 %	5 %	2 %	9 %	12 %	6 %
Емпірична модель	Модель впливу Дж. Клайна	-	0 %	10 %	6 %	-	Н
Чисельні моделі	Windsim	6 %	2 %	8 %	8 %	13 %	7 %
	WAsP	5 %	2 %	7 %	8 %	16 %	7 %
	MS-Micro/3	4 %	1 %	6 %	8 %	16 %	7 %
	NWP	4 %	-	8 %	-	-	Н

Більш точно швидкість вітру в місці розташування електростанції і, відповідно, її передбачувану вихідну потужність можна спрогнозувати за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення, до якого належать сучасні вітроенергетичні геоінформаційні системи. Перевагою ГІС у порівнянні з іншими засобами географічних досліджень є те, що вони дозволяють вивчати взаємозв'язки між об'єктами, що є основою географічного моделювання.

До найпоширеніших засобів ГІС, які дають змогу безпосередньо опрацьовувати інформацію щодо розвитку прогнозування виробітку енергії вітровими електростанціями, належать англійська програма WindFarm, яку розробила компанія ReSoft, і пакет програмного забезпечення WASP (Wind Atlas Analysis and Application Program), датської лабораторії DTU Wind Energy. Обидві програми дозволяють розраховувати параметри вітрового потоку та ефективність роботи вітроенергетичної установки для конкретного місця на земній поверхні, скориставшись інформацією про швидкість і напрям вітру у регіоні та даними про місцевий рельєф.

Програма WindFarm дозволяє: проводити розрахунок енергетичного виходу вітропарку, в тому числі із врахуванням впливу рельєфу місцевості; оптимізувати розташування вітроагрегатів для максимального виробітку чи мінімальних витрат енергії, враховуючи природні, інженерні та планувальні обмеження; виконувати розрахунки шуму (із зазначенням шумових контурів); аналізувати дані вітроагрегатів; визначати величини, кореляції та прогнозовані значення швидкості вітру; створювати карту зон візуального впливу; розраховувати значення мерехтіння тіні лопатей БЕУ; створювати тривимірні моделі; виконувати радіолокаційний аналіз [217].

WASP – програма для горизонтальної та вертикальної екстраполяції показників вітру. Вона містить інструменти для розрахунку вітрового потоку на різних територіях і поблизу перешкод, із врахуванням шорсткості та рельєфу місцевості. Використовуючи дані по розподілу вітру, програма може розрахувати як вітроенергетичний потенціал ділянки, так і виробіток конкретного агрегата. Програма складається з п'яти блоків розрахунку: аналізу вихідних даних (перетворення будь-якого часового ряду вітрових вимірів на статистичну відбірку параметрів клімату місцевості); перетворення вихідних даних для роботи у середовищі програми; оцінки вітрової ситуації місцевості із побудовою карт розподілу та можливістю отримання показників у конкретних точках; оцінки вітрового потенціалу;

розрахунку річного виробітку ВЕС і конкретних вітроагрегатів із виключенням можливих втрат [171].

AnemoScope Wind Energy Simulation Toolkit – споріднена програма, розроблена Канадським центром гідравліки. Першочергове її призначення – моделювання клімату. Але в той самий час вона володіє всіма інструментами для розрахунку потенційного виробітку енергії вітроагрегатами, створення карт швидкостей та енергії вітру. Крім того, програма дозволяє розраховувати моделі вітрового потоку для різних типів ландшафтів. Оперує двома метеорологічними моделями – MC2 та MS-Micro [146].

WindPro – це програмне забезпечення, яке використовується для моделювання роботи ВЕС. Програмою може бути визначено: потенційний виробіток енергії, рівень шуму від вітроагрегата, втрати потенційного виробітку через ефект «затінення», загальну придатність вітроагрегата. WindPro розроблена датською компанією EMD International A/S. WindPro може оптимізувати макет розташування ВЕС для заданих характеристик вітроагрегатів, обмежень у відстані між агрегатами, розташуванні відносно один одного, рівні шуму та візуальному впливі. Вона також може бути використана для створення фотомонтажу, в якому зображення майбутніх вітроагрегатів накладаються на фотознімок місцевості, щоб показати, як буде виглядати ВЕС в разі її спорудження [166].

Ще один сучасний інструмент проектування вітрової енергії – програма WindSim, розроблена норвезькими науковцями. У своєму інструментарії вона, подібно до попередніх програм, містить всі засоби для проектування виробітку енергії вітру. Але на відміну від інших моделей вона використовує іншу метеорологічну модель розрахунку, яка краще розраховує швидкості вітру для затінених ділянок схилів. Крім іншого, враховуються навантаження на вітроагрегат під впливом характеристик поля вітру, таких як зрушення вітру, кут надходження вітрового потоку і турбулентність [218].

Існуючі ГІС також здатні опрацьовувати дані вітрових режимів. Тим не менш, при наявності значного інструментарію та методів, вони дають

деяку похибку, пов'язану з густиною повітря та орографією місцевості. Прийнято вважати, що такі програми дають непогані результати, коли місцевість досить плоска і наявні тільки пологі пагорби. Однак, якщо вітроенергетичні станції мають бути розташовані в гірській місцевості, результати стають менш надійними [192].

У нашій роботі ми будемо користуватися програмним забезпеченням WindFarm. І хоча WindFarm є не єдиним програмним забезпеченням, що виконує подібні функції і має ряд недоліків, але простота роботи з програмою, доступність до споживача та можливість конвертації вихідних даних забезпечує її популярність. Крім того, результати моделювання, які надає програма, відрізняються легкістю інтерпретації та більшою точністю.

Більш ефективним є поєднання можливостей спеціалізованих ГІС для безпосередніх розрахунків ВЕР території з програмними можливостями ГІС, які мають потужні інструменти для створення векторних та матричних карт топографічної поверхні, наприклад ГІС Карта 2011 [8]. Через те, що зазвичай для моделювання використовується точкове положення анемометру, розрахунок швидкостей вітру на затінених ділянках (ущелини, яри, схили, пониження у рельєфі, підвітряні схили височин) може бути неточним. Для уникнення цієї проблеми пропонується використовувати кілька положень анемометрів для більш точної характеристики [156]. У нашій роботі ми використовували покази одинично встановленого анемометру. У подальшому для інших точок значення швидкості встановлювалося шляхом математичних підрахунків. На етапі обробки результатів, для перевірки достовірності і встановлення величини похибки використовувалося програмне забезпечення ГІС Golden Software Surfer. Для аналізу та візуалізації отриманих результатів було використано ArcGIS Desktop та відкрите програмне забезпечення QGIS.

2.4 Обмежуючі фактори

Одним з етапів впровадження вітроенергетичних проєктів є аналіз впливу на навколишнє середовище, із врахуванням вибору місця і класифікації ландшафту. Отримання дозволу на будівництво буде залежати від характеру, розміру та місцезнаходження пропонованого вітроенергетичного об'єкту.

Природоохоронні території – специфічна область, що призначена для збереження природних комплексів чи об'єктів, що мають господарське, наукове чи культурно-просвітницьке значення. Об'єктом охорони може бути природний ландшафт чи рідкісні види рослин чи тварин. За такими територіями здійснюється суворий нагляд. В залежності від причин виділення території у природоохоронну зону, будівництво ВЕУ на цій території може стати можливим, але за обов'язкової ретельної експертної перевірки. У деяких випадках побудова ВЕС може призвести до порушення екосистем. Інформацію щодо місць розповсюдження видів флори та фауни, що охороняється, можна отримати від місцевих організацій, що видають дозвіл на будівництво, а також від організацій з охорони навколишнього середовища [17, 62].

Вітроустановки мають бути віддалені від основних шляхів перельоту птахів. Птахи можуть потрапляти в лопаті ротора або до турбулентних потоків, викликаних обертанням лопатей. Дослідження показали, що небезпека зіткнень відносно низька. Значно більше відбувається зіткнень птахів з транспортом чи лініями електропередач. Більшість випадків зіткнення з ВЕУ бувають вночі, в сутінках або за поганих метеорологічних умов. Птахи дуже добре знають місця свого годування і відпочинку і уникають зіткнень з вітроагрегатами. При плануванні установки нових вітроагрегатів, крім усього іншого, враховується розташування місць годівлі та масового гніздування птахів [18].

Історично та археологічно значимі території. На таких територіях необхідно ретельно розробляти будівництво під'їзних шляхів, щоб мінімізувати вплив на історичні та археологічні ділянки.

Гідрологія. Можливо, що в деяких випадках виникає необхідність оцінки впливу проекту на водні ресурси тієї чи іншої території. При чинію негативного впливу можуть бути транспортні комунікації та потреба у дренажі, що буде позначатися на кількості та якості води.

Шум. Останнім часом ВЕУ утворюють набагато менше шуму, ніж перші розробки. Але все ж акустичний вплив залишається важливим фактором вибору майданчика [96, 111, 123].

Для цілей дослідження важливим був розгляд робіт у кількох напрямках. По-перше, це роботи, пов'язані із впливом ВЕС на навколишнє середовище, при цьому велике значення надавалося шумовому забрудненню [19]. Другий напрям - розуміння природи шуму від вітроагрегатів, специфіка його появи та поширення [164, 196]. Окремо розглядалися питання вимірювання рівнів звуку, обробки та інтерпретації результатів вимірів [14, 168, 169]. Розробка методики дослідження спиралася на роботи, у яких досліджувалися можливості побудови карт шуму та специфіка розподілу звуку у природі, що має істотне значення для його моделювання [1, 66, 77]. Принципово новим у роботі є вивчення можливостей використання геоінформаційних систем у процесі визначення шумового впливу вітроагрегатів на навколишнє середовище.

Будівництво вітроагрегатів для виробництва електроенергії може заподіяти незручності на місцевому рівні. Вітроенергетична установка має бути віддаленою від житлових будинків, шкіл та лікарень настільки, щоб рівень шуму, який створюється працюючою ВЕС становив не більше 45 дБ. Шумові ефекти від ВЕУ мають різну природу та поділяються на механічні (шум від редукторів, підшипників, генераторів) і аеродинамічні впливи. Останні можуть змінюватися від низькочастотних (менш за 16-20 Гц) до високочастотних (від 20 Гц до декількох кГц). Вони викликані обертанням робочого колеса і визначаються наступними явищами: створення розрідження за ротором або вітроколом зі спрямуванням потоків повітря в деяку точку сходу турбулентних потоків; пульсаціями підйомної сили

на профілі лопаті; взаємодією турбулентного пограничного шару з задньою кромкою лопаті. Як правило, аеродинамічний шум посилюється при проходженні лопаті повз вежу вітроустановки. Виробники вітроагрегатів намагаються випускати установки з якомога меншим рівнем вироблення шуму. Віддалення ВЕС від населених пунктів і місць відпочинку вирішує проблему шумового ефекту для людей. Проте шум може впливати на фауну, у тому числі морську, в районі розміщення акваторіальних ВЕС [19, 141].

Аналіз робіт з шумового забруднення, спричиненого вітроенергетикою [167, 191, 201], дає можливість прийти до кількох висновків:

1. Рівень шуму, що створюється ВЕУ, залежить від багатьох факторів.
2. Конструктивно, шум за рівних інших умов тим більший, чим ширшими є лопаті ротора вітроагрегату.
3. Невелика частина шуму утворюється механічними компонентами вітроагрегату.
4. Згідно досліджень деяких вчених, найбільший рівень шуму спостерігається спереду ВЕУ, а найменший – по обидва боки від башти у площині колеса вітроагрегату.

Розвиток вітроенергетики може чинити істотний вплив на привабливість тієї чи іншої території для відпочинку та туризму [158, 184, 198, 210]. Зазвичай це є характерним для проектів будівництва вітроелектростанцій. У цих випадках необхідно враховувати думку спільноти.

Візуальний вплив на ландшафт. Має бути оцінений візуальний вплив на ландшафт як ВЕУ, так і ліній електропередач.

Лопаті вітроагрегату при сонячному світлі створюють рухомі тіні. Такі тіні, у разі попадання на вікна житлових будинків, можуть викликати роздратування. Для вирішення цієї проблеми необхідно при проектуванні ВЕУ враховувати напрямок падіння тіні.

Демонтаж. ВЕУ після закінчення терміну своєї служби (близько 20 років) слід замінити на нову чи відремонтувати, або відправити на переробку у якості відходів. Відновні заходи після закінчення строку

служби обладнання є однією з умов будівництва ВЕС. У цьому зв'язку слід визначити, чи зможе набути використана ділянка свого початкового вигляду природнім шляхом або виникне необхідність у тривалих відновних заходах.

Висновки до розділу 2

1. Здійснено огляд методик розрахунку середніх швидкостей вітру, їх порівняння, розрахунок похибок та характеристика обраної моделі для удосконалення.

2. Наведено пояснення фізичної природи вітру, а саме таких складових, як швидкість вітру, просторово-часові варіації швидкостей вітру, фізико-географічні фактори зміни швидкості вітру (зокрема рельєф та шорсткість місцевості). Проаналізовано питання моделювання швидкостей вітру як центральної складової конструктивно-географічного дослідження. Здійснено класифікацію джерел статистичних даних для розрахунків.

3. Визначено основні методики розрахунку вітроенергетичного потенціалу, їх складові та обмеження. Найпоширенішими моделями розрахунку середніх швидкостей вітру є: аналітичні моделі (метод найближчого сусіда, зворотніх зважених відстаней), емпіричні (модель впливу Дж. Клайна), лінійні моделі вітрового потоку (WAsP, MS-Micro/3), моделі обчислювальної гідродинаміки (CFD) (WindSim), мезомасштабні моделі чисельного прогнозу погоди (NWP), наприклад, MASS, WRF, ARPS, MC2, КАММ тощо. Здійснено огляд програмного забезпечення, яке може бути використане для моделювання вітроенергетичного потенціалу.

4. Визначено основні складові оцінки вітроенергетичного потенціалу при переході на топічний рівень дослідження. Проведено верифікацію даних моделювання на ділянках зі складною орографією. Незалежно від методу моделювання, невизначеність збільшується із зростанням складності рельєфу. Чим більш складна місцевість, тим більшою є похибка. Жодна модель не надає точнішої оцінки швидкості вітру. Отже, особлива увага

повинна бути приділена змістовному тлумаченню та осмисленому використанню результатів моделювання. Визначено, що оптимальне поєднання точності та легкості розрахунку для топічного рівня досліджень може забезпечити модель MS-Micro/3. Проведено порівняння результатів розрахунків даної моделі для різних типів місцевості та обсягу вихідних даних для розрахунків.

5. Визначено обмежуючі фактори розвитку вітроенергетики та особливості їх врахування.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [29–32, 149].

РОЗДІЛ 3

ЕТАПИ ОЦІНКИ ПРИРОДНО-РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТЕРИТОРІЇ ДЛЯ ПОТРЕБ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ НА ТОПІЧНОМУ РІВНІ

3.1 Вихідні дані

Після вибору ділянки дослідження та аналізу загальних фізико-географічних умов місцевості, необхідним є уточнення деяких важливих параметрів, до яких в першу чергу належить швидкість вітру. Здійснення розрахунків виробітку потенційного виробітку енергії засноване на значенні середньої швидкості вітру, при чому чим детальнішою є інформація щодо значень швидкості вітру, тим точнішим буде прогнозований виробіток енергії. Для цього в межах нашого дослідження використовується побудова статистичної поверхні середніх швидкостей вітру, кожній точці якої відповідає певне розраховане значення середньої швидкості для місцевості.

Харківська область належить до східної зони розподілу вітрів по Україні із середніми швидкостями вітру більше 5 м/с. Крім того, в останні роки спостерігається зміщення стабільних зон атмосферного тиску над Україною, прогнозується подальше підвищення інтенсивності швидкостей вітру над всією територією нашої держави [74]. Це, а також аналіз території України з питань сприятливості метеорологічних характеристик для потреб вітроенергетики [50, 67], спричинили вибір ділянки дослідження у Харківській області. Досліджувана ділянка розміщена на заході Борівського району Харківської області, включає невелику частину території Ізюмського району (Рис. 3.1). Район дослідження охоплює територію площею 275 км² і має вигляд прямокутника.

В межах району розміщено декілька населених пунктів: селища Комарівка, Підлиман, Піски-Радківські, села Підвисоке, Гороховатка, Мирне, Бахтин, Голубівка. Значну частину ділянки займає Червонооскільське

водосховище, вплив якого на розподіл швидкостей вітру та виробіток енергії є важливим при проведенні дослідження. Загальна довжина водосховища – 76 км, ширина – 1,8 км (максимальна – 4 км). Крім того, на території розташовано ще 2 ставки та ряд невеликих річок.

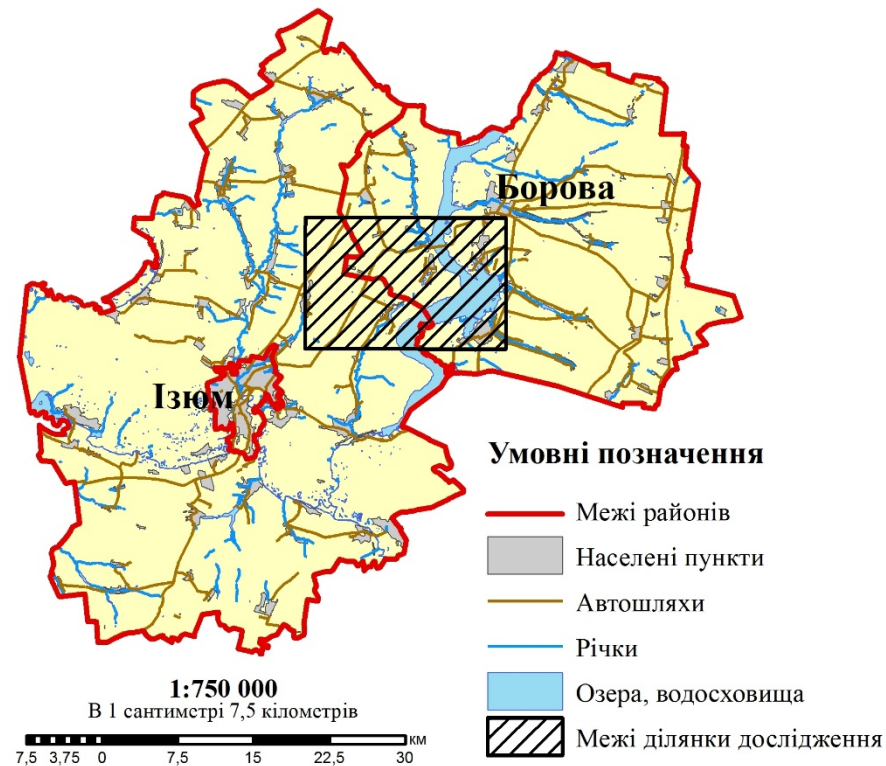


Рис. 3.1 Розташування досліджуваної ділянки в межах Борівського та Ізюмського районів Харківської області

У геоморфологічному відношенні ділянка розміщена в межах Приоскільського плато Середньоруської височини [125]. На ділянці, як і в цілому по області, поширений рельєф флювіального походження. В цілому ділянка рівнинна, з переважанням яружно-балкового рельєфу і похилом у сторону водосховища. Висоти коливаються від 72 м над рівнем моря на берегах водосховища до 187 м на плакорі. Водосховище ділить територію на дві частини. На схід від нього поверхня має пологіший схил, середні висоти нижчі, територія значно залісена. На захід від водосховища спостерігається різкий підйом на узбережжі місцями до 120 м. Ця частина

зайнята переважно сільськогосподарськими землями, ріллею. Значна лісистість наявна лише на схилі перед водосховищем. У північній частині ділянки, на схід від села Мирне рельєф прорізає глибока яруга, вкрита чагарниковою рослинністю. Ще одним пониженням у рельєфі західного берегу є улоговина ставка біля селища Комарівка.

Територія Борівського району входить до складу південно-східного недостатньо вологого теплого агрокліматичного району Харківської області, що має помірно-континентальний клімат. Середньорічні температури: літня $+21^{\circ}\text{C}$, зимова $-7,4^{\circ}\text{C}$. Середня кількість опадів -480 мм. Найбільша кількість опадів випадає у літні місяці (38 %). Висота снігового покриву -14 см. Таким чином, на території дослідження можливим є обмерзання лопатей турбіни, що деякою мірою впливає на аеродинамічні характеристики лопатей та може слугувати загрозою для людини в разі зривання пластів льоду з лопатей. Тому необхідним є обмеження пересування в межах ВЕС за погодних умов, що сприяють обмерзанню лопатей.

Найбільша швидкість вітру (15 м/с) спостерігається в лютому, найменша $-$ в липні. Середньорічна швидкість вітру над територією Борівщини становить $5-6$ м/с, це ледь не вдвічі вище, ніж у середньому по Україні. Далі приводиться роза вітрів, яка відображає повторюваність напрямів вітру для території в околицях м. Великий Бурлук (після станції у м. Ізюм $-$ це найближча метеорологічна станція Державної метеорологічної мережі) і досить достовірно характеризує вітри місцевості в межах нашої ділянки (Рис. 3.2). Дані метеостанції у місті Ізюм не використовувалися через значне «затінення» метеостанції перешкодами (недостатня відкритість місцевості; наявність житлової забудови, лісових насаджень поблизу станції). Найбільша повторюваність розподілена між чотирма напрямками: північним, північно-західним, західним та східним. Напрямок вітрів міняється мало. З жовтня по квітень переважають вітри східного і південно-східного напрямів, а в теплу пору року (з травня по серпень) $-$ західного і північно-західного напрямів.

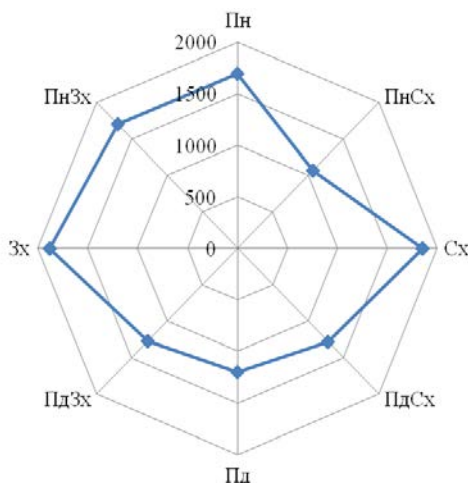


Рис. 3.2 Роза вітрів, м. Великий Бурлук

Слід вказати на певні мікрокліматичні відмінності на території дослідження, які формуються під впливом глибоко розчленованого рельєфу, близькості лісу та особливо Червонооскільського водосховища. Передусім, різниця в інтенсивності денного нагрівання та нічного охолодження водойми і прилеглого суходолу влітку зумовлює розвиток місцевої циркуляції, веде до зменшення сум опадів, але знижує навколишню температуру. Різниця температур між полями, лісами і водосховищем пересічно коливається від 0,5 °C до 8 °C. Це спричинює появу місцевих вітрів.

Під час проектування ВЕС враховується необхідність вилучення частини угідь з використання та подальшої рекультивації земель після закінчення терміну експлуатації вітроагрегатів. Тому необхідним є врахування видового складу ґрунтів в межах ділянки дослідження. Ґрунти за механічним змістом різноманітні: від глинисто – піщаних до легкоглинистих. Переважають важкосуглинисті та легкосуглинисті. Чорноземи – домінуючі ґрунти району. Вододільні простори району дослідження вкриті чорноземами звичайними та чорноземами звичайними потужними мало – та середньо гумусними, а також їхніми змитими видами. У низинних ділянках зустрічаються гігроморфні ґрунти: лучні чорноземні, лучні, болотні слабо-, сильно-, середньо солонцюваті і засолені. За геоботанічним районуванням територія Борівського району належить до Старобільської степової ділянки північної частини Лівобережного

Степу України Східно-Європейської провінції Євразійської степової області. Зональними типами рослинності є хвойні ліси, суходільні та заплавні луки.

Лісова рослинність переважає на берегах Червонооскільського водосховища та на яружно-балочних системах і представлена, головним чином, лісами та лісовими насадженнями по ярах та балках, польовими та прияружними смугами, дорожньо-захисними смугами, насадженнями населених пунктів та ін. [55]. Серед деревних порід переважають сосна (57 %) та дуб (32 %), присутні клен, в'яз та берест. Таким чином, середня висота лісового масиву в межах дослідження складає близько 20 метрів.

Сейсмічні умови району відзначаються порівняною стабільністю. Найзначніші поштовхи за останні роки з магнітудою $M=2,9$ були зареєстровані поблизу Куп'янська 22.11.2009. За даними [118] сейсмічність території дослідження для об'єктів масової забудови та підвищеної відповідальності складає 5 балів.

3.2 Моделювання середніх швидкостей вітру

Уперше у регіоні досліджень квазінеперевне (з інтервалом у – 5 с) фіксування швидкості вітру і автоматичний запис результатів у комп'ютері було здійснено у лабораторії альтернативної енергетики кафедри географічного моніторингу і охорони природи Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна у 2004-2005 р.р. С. Величком. Анемометр було встановлено на висоті біля 40 м. на даху університетського корпусу. Оброблені цим дослідником дані для різних типів погоди наведені у його роботах [20, 21]. Завдяки цьому, було отримано достовірні відомості про тонкі зміни часової структури вітрового потоку. Їх певним обмеженням є те, що вони стосуються висотно забудованої території великого міста, де за санітарними нормативами неможливо розміщувати вітроагрегати.

У нашому дослідженні використовувались дані безпосередніх короткоперіодичних вимірів анемометру, який було встановлено на висоті

22 м відносно земної поверхні (180 м над рівнем моря), на термін у 5 місяців за холодний період року з початку жовтня по початок березня (Додаток В).

Важливий аспект оцінки вітрових ресурсів пов'язаний з тим, що відносна висота вісі вітроколеса сучасного потужного вітроагрегат у знаходиться в інтервалі висот 50-70 м, тобто вищій за висоту встановлення анемометру. Відомо, що в приземному шарі спостерігається, як правило, зростання швидкості вітру із збільшенням висоти від земної поверхні. Для екстраполяції величини швидкості вітру у вертикальній площині було використано логарифмічний закон побудови вертикального профілю вітру, а також враховано шорсткість підстильної поверхні місцевості.

Для оцінки ймовірнісного розподілу отриманих значень швидкості вітру було використано функцію розподілу Вейбулла. Використовуючи відповідні для ділянки аргументи цієї функції, отримано параметри $k = 2,4$ та $c = 6,33$, які надалі слугують підставою для подальших розрахунків.

У нашому дослідженні було використано методику моделювання швидкостей вітру, яка наведена у [8]. Принципово новим є розгляд неоднорідних територій для дослідження виробітку енергії вітроагрегатами, аналіз придатності простої моделі розрахунку швидкостей вітру саме для території із фізико-географічними умовами, подібними до Харківської області, яка в своїй північно-західній частині є типовим Лівобережним Лісостепом. Отже, надалі можливості використання отриманих результатів слід поки що обмежити саме лісостеповими умовами території України. Априорі зазначимо, що вони є складнішими, ніж більшість відомих моделей для більш монотонних рівнинних територій, через виразну структуру рельєфу та мозаїчність шерехатості поверхні, які є важливими фізичними факторами модифікації вітрового потоку.

Для виконання даної частини дослідження нами було використане програмне забезпечення ГІС Карта 2011, WindFarm. Програма ГІС Карта 2011 є досить зручним інструментом для створення та редагування векторних карт, дозволяє працювати з даними інших ГІС, будувати тривимірні поверхні

та проводити розрахунки. Програма WindFarm – це інструмент, що дозволяє аналізувати перспективи роботи ВЕС у різному середовищі, моделювати роботу вітроагрегатів на основі даних висот, швидкостей вітру, шорсткості, тощо. Було розроблено детальну етапність роботи у програмі (Додаток Г).

Врахування рельєфу. На першому етапі дослідження було побудовано сумарну матрицю висот у середовищі програми ГІС Карта 2011. За основу для побудови матриці було взято топографічні карти місцевості у масштабі 1:10 000. Розмір території становить 275 км². Таке охоплення є надто великим для оброблення у згаданій вище програмі WindFarm. Тому результуючу карту було поділено на ряд частин, кожна з яких аналізувалася окремо.

Негативною властивістю аналізу у програмі WindFarm є досить значне спотворення результатів у крайових ділянках карти. Щоб його уникнути, було забезпечене перекриття суміжних модельних ділянок з величиною 50 %. Сторона квадрату склала 5 км, перекриття – 2,5 км. У такий спосіб з однієї великої, загальної для усієї території, матриці, ми отримали 31 окремі матриці висот. Апаратним способом відповідно до алгоритму вони були об'єднані в одну, вихідну для врахування фактору рельєфу у розподілі вітропотоків (Рис. 3.3).

Останнє, що було зроблено на цьому етапі – переведення (конвертування) сумарних матриць висот у текстовий формат задля подальшого використання у середовищі інших ГІС.

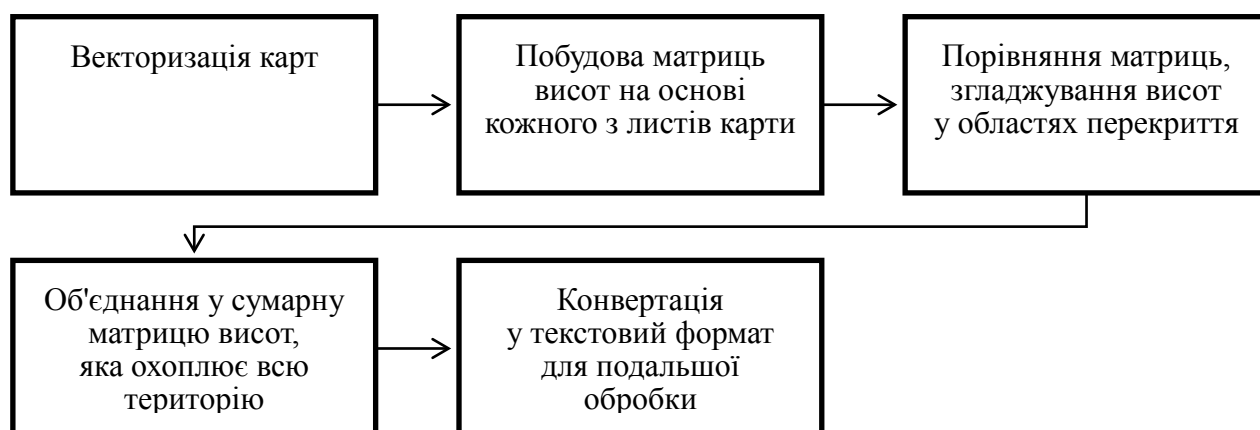


Рис. 3.3 Алгоритм обробки даних щодо рельєфу місцевості

Надалі були обчислені статистичні поверхні середніх швидкостей вітру для різних висотних рівнів., які взяті разом дають картину тривимірного географічного поля вітрового потоку в залежності від умов місцевості.

Врахування шорсткості поверхні. На основі космічного знімку території у програмі WindFarm було побудовано поверхню шорсткості місцевості. Для цього було проведено векторизацію об'єктів місцевості (лісів, лісосмуг, чагарників, ріллі, водосховищ, ставків, населених пунктів) на основі растрового зображення. Кожному об'єкту було присвоєно відповідне значення аеродинамічного коефіцієнту шорсткості на основі класифікації місцевості стосовно до аеродинамічного коефіцієнту шорсткості z_0 , (Табл. 3.1) [174].

Таблиця 3.1

Типові значення коефіцієнту шорсткості z_0

Значення z_0	Тип місцевості
0,0001-0,0003	Акваторії водойм, відмілини, плоскі засніжені рівнини
0,0002-0,001	Піски та сніги
0,001-0,01	Сіножаті, однорідні поверхні землі, рілля
0,01-0,04	Вирівняні ділянки з низькою рослинністю, торфовища, тундрові ландшафти
0,04-0,1	Відкриті сільськогосподарські ділянки, живоплоти, високі сіножаття
0,1-0,5	Сільськогосподарські ділянки з високою рослинністю, густі загороджувальні насадження
0,5-1	Ліс та лісиста місцевість, передмістя, сільські ландшафти
1-4	Центри великих міст

Створення тривимірної моделі вітрового потоку. Наступним етапом було створення набору даних для програми WindFarm, по кожній з матриць висот. Кожен набір даних має прив'язку до географічних координат. У набори даних одразу було вміщено сітки із значеннями висот та шорсткості місцевості. До кожного з наборів даних було прив'язано інформацію щодо рози вітрів та швидкостей вітру згідно показань анемометру. На кожній з ділянок місце розташування анемометру обиралося на тій самій абсолютній (180 м) та відносній висоті (22 м), що й у тій частині ділянки, де він розміщувався під час вимірювань.

Наступний етап – моделювання швидкостей вітру, для якого було використано програмний модуль WindFlow. Під час моделювання спочатку було проведено математичний розрахунок швидкостей вітру за заданими параметрами, потім – побудова поверхонь середніх швидкостей вітру для даної території. Була укладена результуюча карта середніх швидкостей вітру для досліджуваної території (Рис. 3.4).

Виявлені проблеми. Слід зазначити, що за результатами побудови поверхонь швидкостей вітру ми отримали деяку похибку розрахункових швидкостей вітру. Ця похибка пов'язана із різноманітністю показів шорсткості в межах ділянки та великими перепадами висот для території. Розмір похибки встановлювався шляхом об'єднання поверхонь розподілу швидкостей вітру для різних ділянок. Найбільшою виявилась похибка для акваторії водосховища. Величина розбіжностей між значенням у зонах переходу складала близько 0,5 м/с (10 %), хоча, за іншими дослідженнями, наведеними у [207], похибка даної моделі для локальних ділянок може складати близько 6 %. Аналіз причини появи у нашому дослідженні більшої похибки дозволив нам припустити, що нею могла бути надмірно велика комірка подання просторової інформації (5x5 км), що надалі слід врахувати.

У результаті дослідження встановлено непридатність (принаймні, для умов шорсткості поверхні лісостепу) логарифмічного закону зміни швидкості вітру з висотою. Наприклад, вимірювання показали, що для рівного невисокого пагорбу, спостерігається посилення швидкості вітру близько до землі, що спричинює зміну у вертикальному профілі [24]. При аналізі отриманої поверхні можна дійти висновку, що найбільші перепади у швидкості вітру спостерігаються у місцях схилу, а на рівнинній території на сході (поверхня водосховища, та північному заході) похибки менші. Тому для обраної ділянки використано ступеневий закон зміни швидкості вітру з висотою [158], відповідно до якого були перераховані отримані розрахункові дані поля швидкостей вітру.

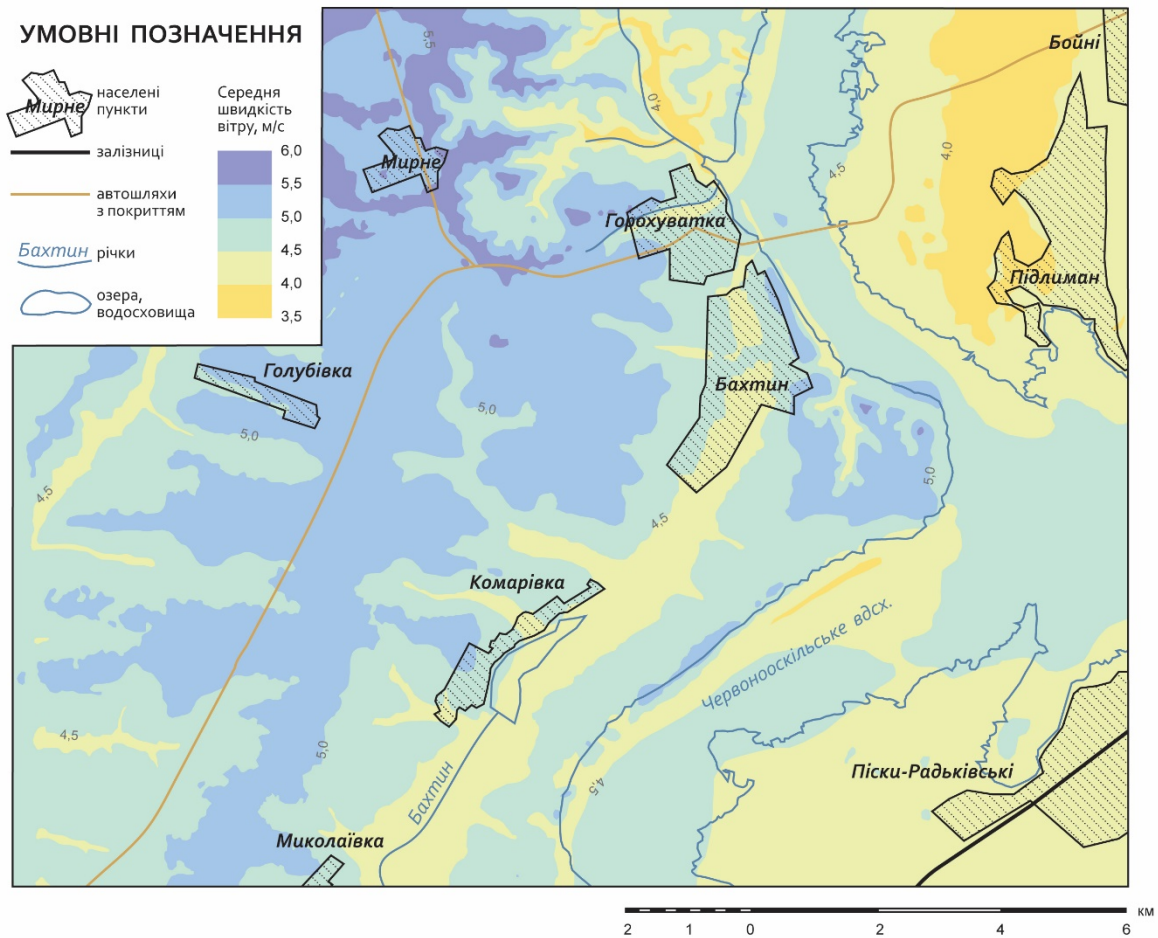


Рис. 3.4 Результати моделювання середніх швидкостей вітру (для висоти 10 м)

Нагадаємо, що розрахунок проводився спочатку для місця встановлення анемометру. Надалі, на їх основі обчислювалися ймовірнісні показники на всю територію дослідження, згідно до моделі розрахунку MS-Micro, за якою враховуються атрибутивні показники місцевості. Дослідження результатів моделювання дозволило дійти висновку, що застосування простої лінійної моделі розрахунку вітроенергетичних характеристик має обмежуватися незначною територією дослідження та супроводжуватися порівняльним застосуванням різних методик.

Аналіз результатів. За результатами моделювання доведено, що найбільші швидкості вітру в межах тестової ділянки спостерігаються на плакорі, у північній його частині, яка характеризується найбільшими

висотами у даній місцевості. Попри тривіальність цього результату, він має методичне значення, пересвідчуючи у реальності моделі. Деяке зростання швидкостей вітру спостерігається повсюдно на прибережному схилі (ділянка поблизу с. Бахтин), що спричинене у першу чергу близькістю водосховища (хоча апіорі вважається, що малі водойми не впливають на вітровий потік безпосередньо). Найшвидше, тут має вирішальне значення суттєве зменшення шорсткості водної поверхні у порівнянні з суходолом, тому вітри певних напрямів розганяються над поверхнею водосховища. Отже, слід керуватися і розою вітрів. Так як північний напрям вітру має більшу повторюваність, ніж південний, ми спостерігаємо більші покази швидкості вітру саме в північній частині ділянки узбережного схилу. Найнижчі покази швидкості – поблизу с. Підлиман (через значну лісистість та невеликі абсолютні висоти).

Встановлено, що в складних фізико-географічних умовах Лівобережного Лісостепу України слід прискіпливо визначати ділянки розміщення вітроагрегатів, по вітроенергетичний потенціал примхливо залежить від сукупності декількох природних чинників: рельєфу, рослинного покриву та наявності водних об'єктів. Причому, такі тонкощі як структура рельєфу і навіть співвідношення напрямків його форм із розою вітрів, суттєво визначають відміни у просторово-часовому розподіленні вітропотoku, отже, його енергетичній ефективності. З огляду на це, виробіток енергії вітроагрегатами має бути суттєво відмінним для різних потенційних положень відповідно до конкретних фізико-географічних умов. Визначено, що серед виділених ділянок (плакор, схил, водосховище) найбільш перспективною для використання енергії вітру є найвища ділянка, що розташована на плакорі. Найменші середні швидкості вітру спостерігаються у широкій частині водосховища, оточеній з усіх сторін лісовими насадженнями та узбережним схилом з боку переважаючого напрямку вітрів.

Хоча підтверджено, що домінуючим параметром при проектуванні виробітку енергії є абсолютна висота місцевості, встановлено, що за умови сприятливого впливу комплексу інших чинників, середні швидкості вітру

можуть сягати великих значень навіть у точках місцевості, що не характеризуються домінуючими висотами. Кращий виробіток енергії буде у тій місцевості, яка має найменші показники шорсткості та достатньо відкрита для розгону повітряних потоків.

Отже, моделювання за допомогою ГІС дає змогу більш повно оцінити перспективи розміщення ВЕС та виділити на локальних ділянках точки місцевості, що мають найбільший вітроенергетичний потенціал.

3.3 Уточнення результатів шляхом врахування впливу ландшафтів

Наступним етапом було необхідно визначити, яким чином природні ландшафти впливають на покази середніх швидкостей вітру на території дослідження. Для цього на основі методики, описаної у Бодні О. В. [15] була побудована карта природно-територіальних комплексів (ПТК).

Картографування ПТК проводилося на рівні урочищ. За визначенням А. Г. Ісаченко [54] урочищем називається частина ландшафту, яка є комплексом фацій, пов'язаних переважно з окремими опуклими або увігнутими мезоформами рельєфу на однорідному субстраті та об'єднаних загальною спрямованістю процесів руху вод, перенесенням твердого матеріалу і міграції хімічних елементів. Виходячи з цього основою для виділення урочищ були: обмеженість однією мезоформою рельєфу; літогенна однорідність будови товщі, охопленої процесами ґрунтоутворення; один тип гідрологічних умов; набір рослинних угруповань та типів ґрунтів.

Основна роль для визначення ПТК належить вивченості рельєфу території, тому був проведений детальний структурний аналіз рельєфу, виділення контурів, які були однорідними в геоморфологічному відношенні. Такий аналіз здійснювався на основі вже побудованої цифрової моделі рельєфу (ЦМР), описаної у попередньому підрозділі, та космічного знімку території, що надав інформацію про постійні та тимчасові водотоки. На основі ЦМР також був здійснений більш детальний морфометричний

та гідрологічний аналіз, побудовано тривимірну поверхню місцевості, цифрові моделі морфометричних показників (крутизни, експозиції схилів, горизонтального і вертикального розчленування). Результат відображено на карті (Рис. 3.5).

Далі для виділення меж ПТК була використана інформація про літогенну основу, ґрунти та рослинність [7, 48] шляхом векторизації та подальшого оверлейного аналізу паперових карт 80-х рр. Інформація про рослинність була уточнена за допомогою дешифрування, класифікації космічного знімку території з навчанням та при польовій експедиції влітку 2014 року. Дані щодо рослинності та гідрографії додатково було перевірено шляхом аналізу різночасових знімків території за 1989, 2007 та 2016 роки за методикою, наведеною у роботі за участі автора [149]. Даний аналіз був використаний і на етапі подальшого дослідження обмежуючих факторів.

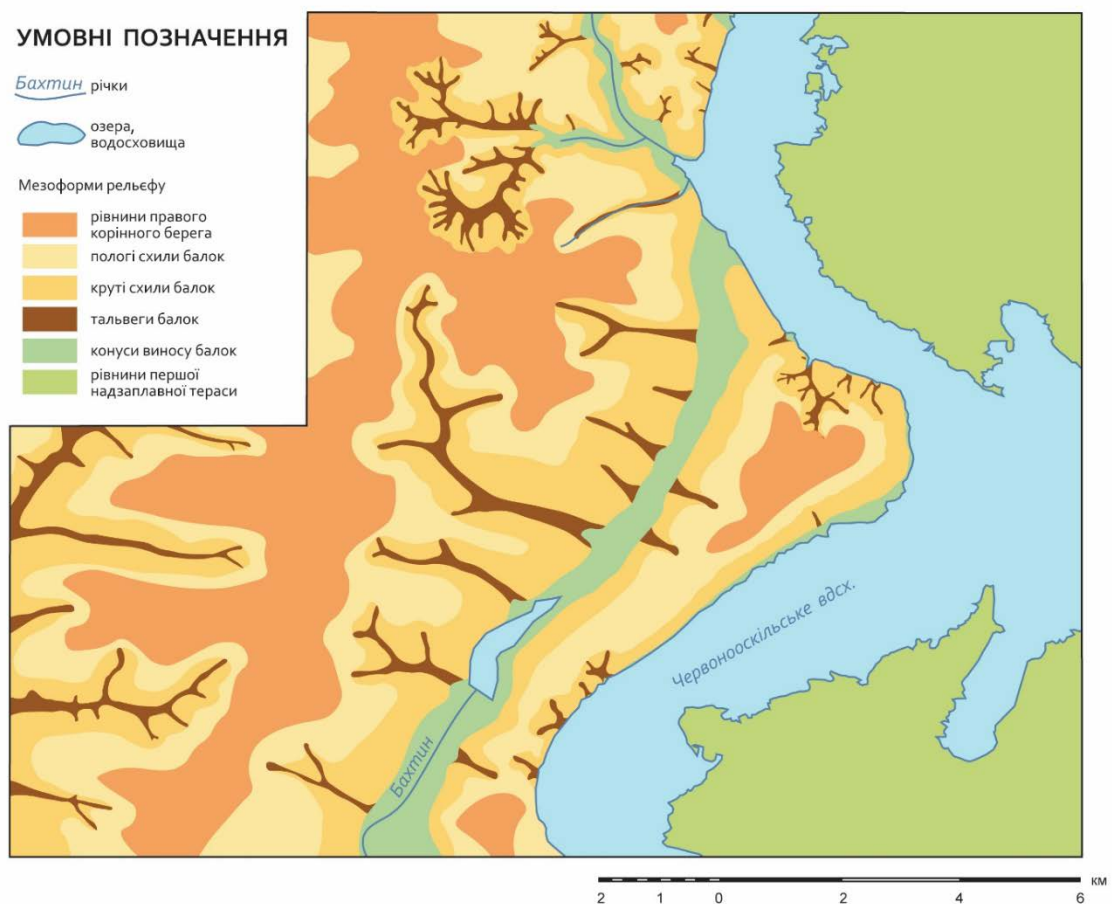


Рис. 3.5 Результати виділення мезоформ рельєфу на території дослідження

Після отримання всіх необхідних вихідних даних проводилося типологічне районування ділянок за 4 властивостям ПТК: форми рельєфу, четвертинні відклади, генетичні типи ґрунтів, сучасний рослинний покрив. Результатом стала карта ПТК території (Рис. 3.6), побудована шляхом

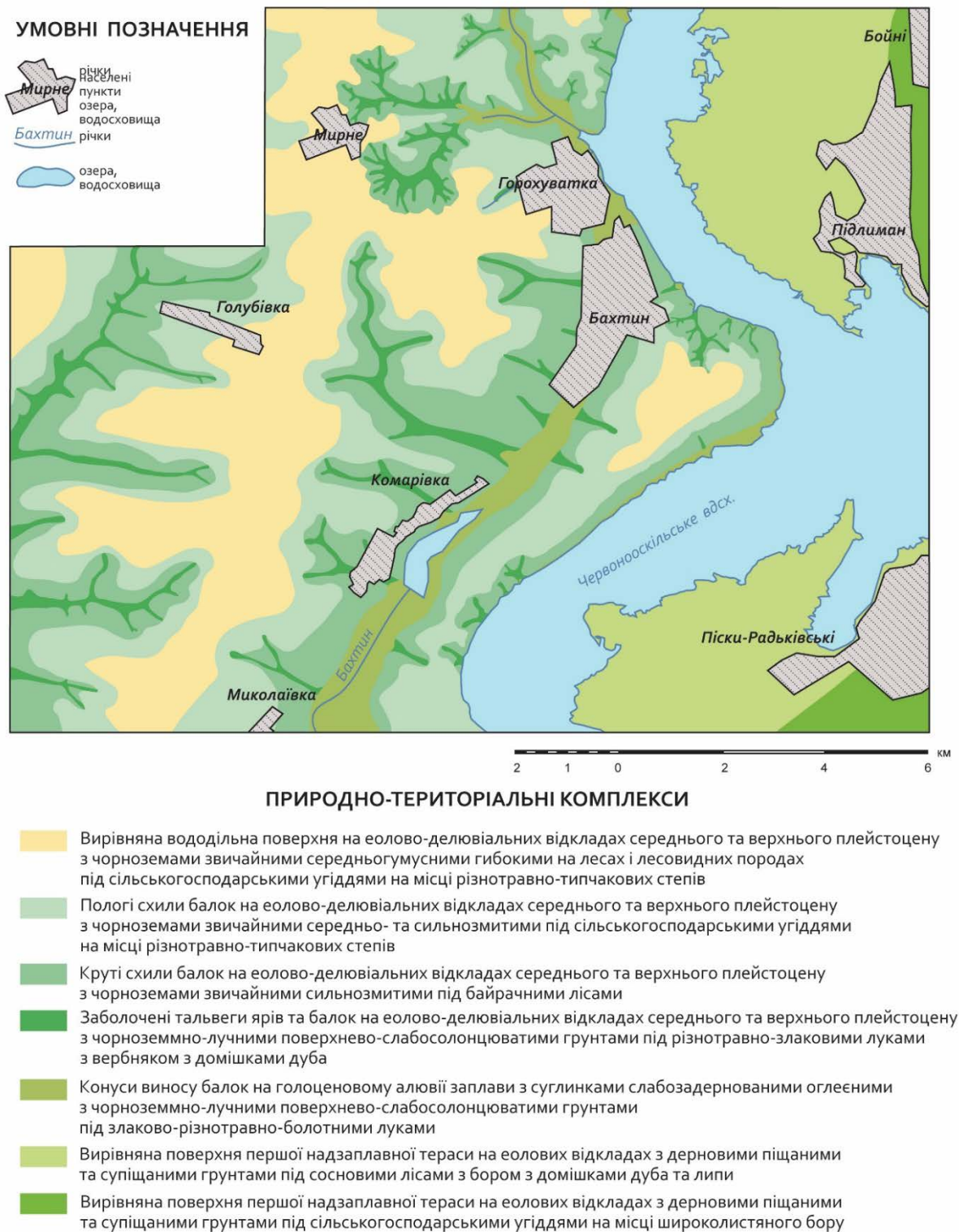


Рис. 3.6 Природно-територіальні комплекси на території дослідження

векторизації, оверлейного аналізу та поєднання даних з використанням результатів автоматизованого дешифрування космічних знімків методом класифікації з навчанням. Результат перевірено у ході польових досліджень.

Далі на основі побудованої карти ландшафтів проводився аналіз зон, що будуть мати потенційно відмінні значення від розрахованої моделі середніх швидкостей вітру. Так, ділянки у частинах конусів виносу балок під злаково-різнотравно-болотними луками відповідно до свого просторового протягнення з півночі на південь та ділянки вирівняної вододільної поверхні під сільськогосподарськими угіддями на місці різнотравно-типчакових степів сприяють розгону повітряних мас і, відповідно, сприяли збільшенню середніх швидкостей вітру. І навпаки, ділянки крутих схилів балок під байрачними лісами та заболочених тальвегів ярів та балок під різнотравно-злаковими луками з вербняком з домішками дуба мають спричинювати зменшення швидкостей вітру у сусідніх зонах.

За результатами було уточнено розрахунки середніх швидкостей вітру та розраховано потенційний виробіток енергії саме у тих місцях, де через вплив всіх ландшафтних факторів потенціал виробітку енергії є вищим.

Результати розрахунку потенційного виробітку енергії представлено на карті (Рис. 3.7), для порівняння подано космічний знімок території із схематичним розташуванням вітроагрегатів на території (Рис. 3.8).

Як видно з карти, найбільший виробіток енергії спостерігається для агрегатів №1 та №2 у найвищих точках місцевості, на плакорі. Такий результат пов'язаний з тим, що вітри не зустрічають на своєму шляху істотних перешкод (схилів, пагорбів), і вітроагрегати можуть використовувати повітряні потоки різних напрямків. Місцевість у межах цієї ділянки є досить однорідною, рівнинною, що також покращує результати. Також помітним є те, що хоча вітроагрегат №2 розміщений вище за №1 на 5 м, покази виробітку енергії є однаковими ($Y=1,279$ ГВт·год). Це пов'язано з тим, що на північ від агрегату №2 розташований яр, що має перепад висот та вкритий густою лісовою

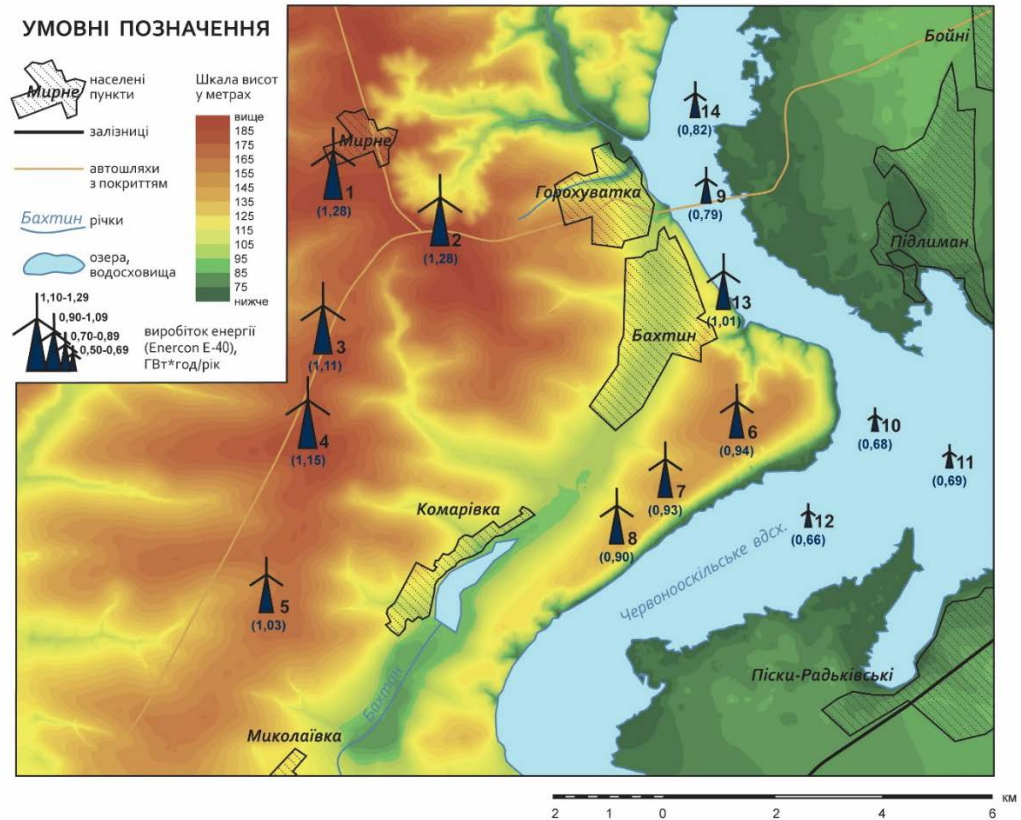


Рис. 3.7 Потенційний виробіток енергії вітроагрегатів у зонах оптимального поєднання ландшафтно-географічних чинників



Рис. 3.8 Космічний знімок ділянки дослідження із позначенням місцеположень вітроагрегатів

рослинністю. Така перешкода дещо знижує рівень виробітку. Населений пункт на північ від агрегата №1 також знижує покази, але дещо менше.

Вітроагрегати №3, №4 та №5 розташовані дещо нижче на плакорі, на висоті відповідно 175, 179 та 162 м. Покази виробітку складають 1,109, 1,150 та 1,034 ГВт·год. Такі значення безпосередньо пов'язані з висотою розміщення вітроагрегатів. Як можемо побачити з космічного знімку, місцевість у ділянці цих агрегатів є безлісою, і відносно вирівняною.

Вітроагрегати №6, №7 та №8, розташовані на вершині прибережного схилу водосховища на висотах 160, 155 та 145 м, мають значення виробітку менші, ніж агрегати на плакорі, але все ж істотні – 0,944, 0,930 та 0,902 ГВт·год. Так само різниця значень між цими трьома агрегатами пов'язана у першу чергу з різницею абсолютних висот.

Звернемо увагу на агрегати №5 та №6, хоча різниця висот є незначною (всього 2 м), але різниця показів виробітку енергії складає 0,09 ГВт·год, що є досить великим значенням. Те ж саме спостерігається при розгляді агрегатів №1 (180 м) та №4 (179 м), різниця виробітку між якими складає 0,129 ГВт·год. Для порівняння можемо привести значення агрегатів №7 та №8, різниця висот між якими складає 10 м, а різниця виробітку – 0,028 ГВт·год. Аналізуючи й інші дані виробітку, ми можемо прийти до висновку, що в межах однієї ділянки дослідження, що характеризується досить однаковими фізико-географічними умовами, різниця виробітку енергії є незначною, в той час, як на ділянках з різними умовами ця різниця сягає значних величин.

Попередньо вже було сказано, що недоліком розміщення на узбережжі був досить високий степінь заліснення схилу та можливість появи турбулентних рухів повітря, що уповільнювали б вітрові потоки. Як бачимо з результатів, у даному випадку профіль вітру є достатньо високим над поверхнею водосховища, щоб у місці встановлення вітроагрегатів вітер досягав високих швидкостей і недоліки, що розглядалися, не чинили істотного впливу. Внаслідок ущільнення швидкостей вітру на схилі, значення виробітку залишаються значними.

Продовжимо аналіз. Вітроагрегат №9, розташований на дамбі, та агрегати №10, 11, 12, мають абсолютну висоту встановлення, що відповідає урізу води – 72,5 м. Але при цьому найбільших значень виробітку досягає вітроагрегат №9 ($Y=0,778$ ГВт·год), інші агрегати мають виробіток відповідно 0,682, 0,692 та 0,661 ГВт·год. Такі значення дають змогу оцінити залежність виробітку від інших умов, крім абсолютної висоти. Згідно показів анемометру, переважаючими вітрами, що дмуть у межах досліджуваної ділянки є Пн та ПнПнСх. Так як над поверхнею водосховищ рух повітряних потоків є швидшим внаслідок практичної відсутності уповільнення повітряного потоку через тертя (коефіцієнт шорсткості мінімальний), то зрозумілим стає, що агрегат №9 досягає найбільших значень саме через можливість розгону вітру завдяки протяжності водосховища з півночі на південь. Пропорційно відстані від берега на північ від агрегата до точки встановлення, отримуються показники виробітку енергії (як бачимо, у агрегата №12 ця відстань є найменшою).

Таким чином, по результатах аналізу ми можемо прийти до кількох висновків. По-перше, величина виробітку енергії прямо пропорційно залежить від висоти встановлення вітроагрегата, у межах дослідження жоден інший з параметрів не чинив настільки істотний вплив. З цього твердження випливає, що не дивлячись на все, найбільш енергоефективним буде встановлення агрегатів на плакорі.

По-друге, так як у нашій ділянці переважно дують вітри з півночі, місце встановлення вітроагрегатів треба обирати таким чином, щоб забезпечити мінімальну кількість перешкод на північ від агрегату.

І нарешті, хоча низьке значення шорсткості для водосховища дало нам змогу припустити, що швидкість вітрів тут буде вищою і забезпечуватиме кращі результати виробітку, аналіз довів, що площі поверхні водосховища недостатньо для забезпечення переваги розташування вітроагрегатів на поверхні водосховища перед розташуванням на плакорі.

Результати показали, що найоптимальнішим буде розміщення агрегатів №1 та №2. При встановленні вітроагрегатів слід враховувати й такі фактори як близькість до населених пунктів та ліній електропередачі (ЛЕП). Візуальний та шумовий вплив часто стає перешкодою для розміщення ВЕС. Близкість же до лінії ЛЕП забезпечить мінімальні втрати електроенергії під час її транспортування. Таким чином, доцільніше було встановити вітроагрегат №2, який більш віддалений від села Мирне та має безпосередню близькість до ЛЕП.

По результат аналізу, було вирішено провести дослідження ще для двох місцеположень вітроагрегатів: №13 – на узбережному схилі на південь від дамби (висота встановлення 125 м), №14 – на північ від дамби на поверхні водосховища на висоті 72,5 м. Результати моделювання виявили величину перспективного виробітку енергії відповідно 1,012 ГВт·год та 0,821 ГВт·год. Як бачимо, величини виробітку значно вищі за відповідні показники для спільних ділянок, агрегат №13 має помітно кращу енергоефективність, ніж три агрегати на іншій стороні схилу. Це пов'язано саме із тим, що на північ від агрегата простягається найбільша у порівнянні з будь-якою іншою точкою карти площа водної поверхні, що дає змогу північним вітрами досягати значних швидкостей. Таким чином, агрегат на північному схилі має виробіток близький до значень на плакорі. З тих самих причин, агрегат №14 показує більші високі результати, ніж інші агрегати в межах водосховища.

3.4 Дослідження обмежуючих факторів розташування вітроагрегатів

Крім оцінки ресурсного потенціалу та планування підключення до електромережі, під час розробки вітроенергетичного проекту важливо врахувати просторові обмеження будівництва станції. Такі обмеження регулюються законодавством України [107, 112], а також рекомендаціями щодо розвитку галузі у інших країнах [188, 191, 211]. До об'єктів, що, згідно

цих документів, мають бути віддалені від вітроенергетичних станцій належать: населені пункти, водоохоронні об'єкти, лісові масиви, інженерні споруди, аеропорти та воєнні об'єкти, природоохоронні території.

Території населених пунктів можуть зазнавати специфічний вплив вітроагрегатів, пов'язаний з акустичним навантаженням (в тому числі інфразвуковим), явищем «мерехтіння тіні», яке створюється під час обертання лопатей вітроагрегату, візуальним впливом на ландшафт [162, 184, 194]. Такий вплив може створювати незручності для місцевого населення і, за даними деяких досліджень, бути причиною хвороб та психологічних порушень. Тим не менш, вагомість такого впливу все ще не є доведеною, існують протилежні твердження, за якими дія вітроагрегатів на місцеве населення може бути навіть меншою за вплив аеропортів. Крім того, сучасні розробники пропонують схеми зменшення всіх трьох видів впливу агрегатів на людей. Аеродинамічний шум намагаються знизити шляхом відповідної зміни профілю лопатей та вибором оптимальної швидкості обертання вітроколеса. Щодо візуального впливу, то в Європі прийнятим є опитування місцевих жителів перед будівництвом станції. Більшість людей з часом звикають до наявності ВЕУ у звичному вигляді місцевості. Тому в подальшому існує можливість розташування агрегатів ближче до населених пунктів.

Проте на даному етапі ми будемо керуватись законодавчими та нормативними актами, прийнятими у країнах з високим рівнем розвитку вітроенергетики. Згідно з нормами Євросоюзу, вітроелектростанції мають бути віддалені від населених пунктів на відстань не менш, ніж 300 метрів. За іншими джерелами [81], установки мегаватного класу можуть бути розміщені на відстані не менш ніж 3-5 кілометрів від великих міст, 1 кілометра – від межі міст, 750 метрів – від поселень, 500 метрів – від окремо стоячих житлових будівель, 350 метрів – від сезонних, тимчасових забудов.

Необхідність віддалення промислової інфраструктури від водоохоронних об'єктів пов'язана з можливістю забруднення останніх викидами виробництва, порушенням екологічного балансу, руйнуванням берегів, тощо. Вітроагрегат

під час своєї роботи не забруднює повітря, воду чи ґрунти, та не утворює твердих відходів. Тому, у разі встановлення вітроагрегатів цей негативний вплив пов'язаний у першу чергу з будівництвом станції, ремонтними та експлуатаційними роботами. Під час таких робіт існує потенційна можливість порушення ґрунтового та рослинного покриву, вимивання небезпечних матеріалів (нафта, бензин), засмічення ресурсами будівництва (внаслідок стоків з поверхні забудови). Окремо існує можливість збільшення стоку через побудову бетонної основи споруди та супутні роботи, що може бути причиною ерозії, підтоплення, та можливість дії на ґрунтові води – в залежності від глибини розкопок під фундамент.

Обмеження будівництва поблизу водних об'єктів регламентуються Водним Кодексом України [26]. З метою охорони поверхневих водних об'єктів від забруднення і засмічення та збереження їх водності вздовж річок, морів і навколо озер, водосховищ та інших водойм в межах водоохоронних зон виділяються земельні ділянки під прибережні захисні смуги. Прибережні захисні смуги встановлюються по берегах річок та навколо водойм уздовж урізу води (у меженний період) шириною: для малих річок, струмків і потічків, а також ставків площею менше 3 гектарів – 25 метрів; для середніх річок, водосховищ на них та ставків площею більше 3 гектарів – 50 метрів; для великих річок, водосховищ на них та озер – 100 метрів.

Якщо крутизна схилів перевищує три градуси, мінімальна ширина прибережної захисної смуги подвоюється. Прибережні захисні смуги є природоохоронною територією з режимом обмеженої господарської діяльності. У прибережних захисних смугах уздовж річок, навколо водойм та на островах забороняється: розорювання земель (крім підготовки ґрунту для залуження і залісення), а також садівництво та городництво; зберігання та застосування пестицидів і добрив; влаштування літніх таборів для худоби; будівництво будь-яких споруд (крім гідротехнічних, гідрометричних та лінійних), у тому числі баз відпочинку, дач, гаражів та стоянок автомобілів; миття та обслуговування транспортних засобів і техніки; влаштування звалищ

сміття, гноєсховищ, накопичувачів рідких і твердих відходів виробництва, кладовищ, скотомогильників, полів фільтрації тощо [26].

Таким чином, вітроагрегат обов'язково має бути встановлений на відстані від урізу води не меншій за величину прибережної захисної смуги, і бажано, щоб ще був віддалений настільки, щоб вплив від будівництва та експлуатації вітроагрегатів був неістотним. У роботі [81] рекомендується будувати ВЕУ на відстані не менше 400 метрів до урізу води.

Обмеження у будівництві поблизу лісових масивів законодавчо не є підкріпленими (не існує вимоги дотримання дистанції до забудови). В інших країнах питання близькості лісу виникає лише тоді, коли для будівництва споруди необхідною є вирубка певної площі лісів. Такі дії обов'язково попередньо мають бути узгоджені з відповідними структурами. Загалом, вітроагрегати не чинять негативного впливу на лісові насадження. Тим не менш, близькість лісу може спричинити зрушення вертикального профілю вітру та турбулентний потік, що у свою чергу спричинює підвищення навантаження на установку та зменшення її терміну експлуатації. Наявність лісової рослинності через високий показник шорсткості поверхні також є причиною зменшення швидкостей вітру, що негативно впливає на рівень виробітку енергії вітроагрегатом. Проблема низьких швидкостей вітру над лісовими насадженнями у Європейських країнах вирішується шляхом залучення ВЕУ більшої висоти [154]. При цьому необхідно, щоб висота від найвищої верхівки лісової рослинності до найнижчої точки вітроколеса складала величину, у два рази більшу за висоту лісової рослинності. Такий захід дозволяє оминати значну частину зрушення вітрового потоку, проте не завжди є доцільним (особливо, якщо лісова рослинність є досить високою). Тому у більшості випадків, за можливості, краще будувати вітроагрегати на деякій відстані від лісу. Однозначно визначити цю дистанцію досить важко. За дослідженням [64], після проходження над лісом із середньою висотою деревного ярусу 20 метрів, вітер відновлює свою початкову швидкість на відстані 800 метрів

від межі лісу. За іншими джерелами [81], допустимим є віддалення значенням не менше 400 метрів.

До інженерних споруд відносяться автомобільні шляхи, залізниці, газопроводи та лінії електропередач. Вітроагрегат має бути віддалений від даних об'єктів настільки, щоб, у разі поламки установки, не було завдано значної шкоди транспортним та паливно-енергетичним мережам. Загалом вітроенергетичні установки руйнуються дуже рідко. Завдяки новітнім технологіям, установки успішно витримують навіть штормові вітри (так, при швидкостях вітру більше 20-25 м/с установки зупиняються, завдяки чому величина ометаємої поверхні зменшується до площі лопатей (замість робочої площі кола), і споруда стає більш стійкою). Але, тим не менш, можливість пошкодження мереж має бути врахована. За [81] віддалення від автомобільних шляхів, залізниць, ліній електропередач для ВЕУ висотою з лопатями у 60 метрів має складати не менше 110 метрів (висота ВЕУ + 50 метрів), а від газопроводів – 120 метрів (дві висоти ВЕУ). Однак при проектуванні віддалення від мереж слід враховувати, що у подальшому під час монтажу обладнання виникне необхідність у транспортуванні матеріалів до місця встановлення, а під час експлуатації – у підключенні до електромережі. Тому врахування віддаленості від ліній електропередач та транспортних мереж має бути обміркованим.

Території аеропортів та землі оборони так само спричиняють обмеження для розміщення вітроагрегатів. Вітроенергетичні установки, які досягають висоти більше 90 метрів, вважаються перешкодою на шляху польотів повітряного транспорту та авіації, мають бути нанесені на авіаційні карти та оздоблені відповідними сигнальними вогнями [154]. Якщо ж вітроагрегат висотою більше 45 метрів розташований на відстані менше 20 кілометрів від аеропорту чи аеродрому, то він може чинити негативний вплив на їх безпечну експлуатацію. Зазвичай, факт будівництва вітроагрегатів узгоджується і доводиться до відома найближчим аеропортам, аеродромам, об'єктам оборони (наприклад, навчальні полігони) у радіусі

20 кілометрів [155]. Але все ж не рекомендується будувати вітроагрегати на відстані, меншій за 3 кілометри. Працююча установка може створювати перешкоди для радіолокаційних сигналів і спричинити загрозу для авіаперельотів. На території дослідження в радіусі 20 кілометрів відсутні працюючі аеродроми чи аеропорти, тому цей фактор не буде врахований.

Чинне законодавство України не встановлює чітких обмежувальних зон навколо природоохоронних об'єктів, регламентуючи насамперед діяльність в межах цих об'єктів. Санітарна зона певної величини закріплена за кожним окремим об'єктом природно-заповідного фонду. Тим не менш, не рекомендується розміщувати вітроустановки на відстані менше 1 кілометра від природних заповідників і національних парків, та на відстані 500 метрів від природоохоронних територій місцевого значення. Це дасть змогу усунути потенційний вплив станції на екологічний баланс об'єкту природно-заповідного фонду, на рідкісні види рослин та тварин, їх ареал мешкання. В межах ділянки дослідження розташовано три природоохоронні об'єкти місцевого значення: Борівський заказник ботанічний, Нижнє-Журавський заказник ентомологічний та Підлиманський заказник гідрологічний [103].

Визначення зон, придатних для спорудження ВЕС. На основі даних обмежень було побудовано карту лімітуючих факторів для ділянки дослідження (Рис. 3.9). Для обробки даних та побудови карти було використано програмне середовище ArcGIS. Першим етапом було створення шарів даних для кожного параметру (населені пункти, лісові насадження, тощо). У подальшому було здійснено операції просторового аналізу з шарами даних. На етапі буферизації було створено зони відповідних розмірів навколо територій кожного з об'єктів параметрів. Було використано наступні показники: населені пункти – 300 метрів; річки та водосховища – 400 метрів; лісові насадження – 400 метрів; транспортні мережі – 110 метрів; природоохоронні об'єкти – 500 метрів.

Наступним етапом було об'єднання отриманих буферів у єдиний шар і подальше накладання його на карту території дослідження.

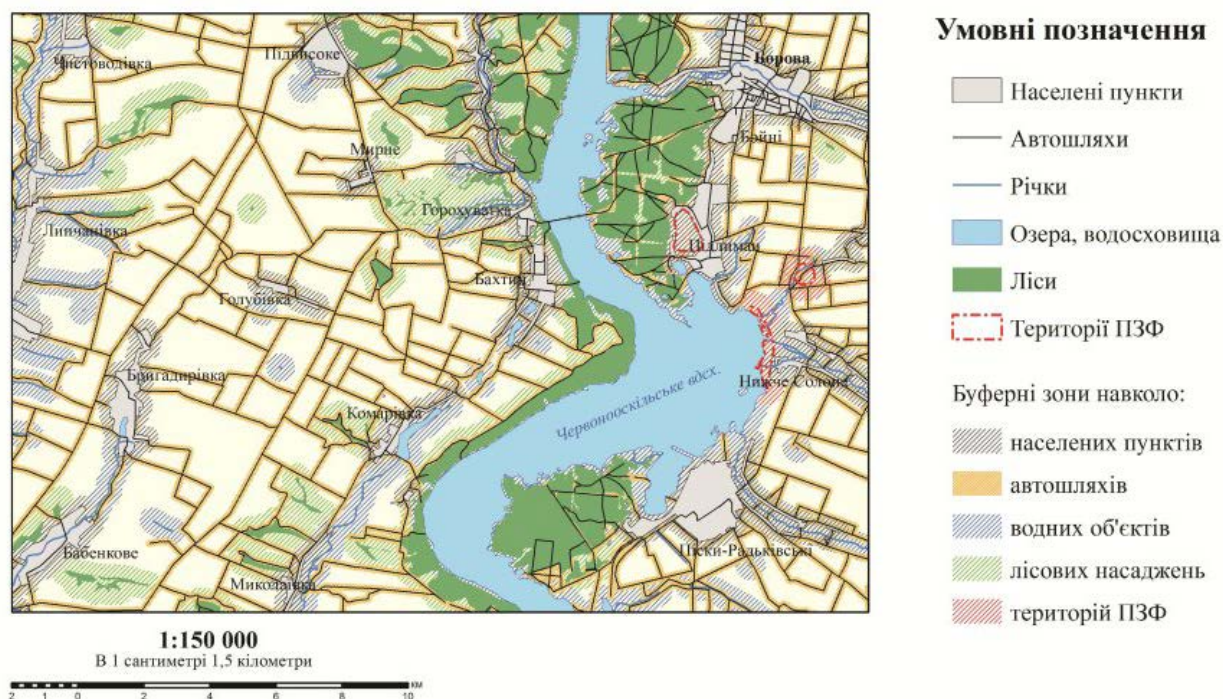


Рис. 3.9 Просторові обмеження спорудження вітроелектростанцій на ділянці дослідження

Таким чином, за отриманою картою можна виокремити ділянки, придатні і непридатні для розміщення вітроагрегатів. Загалом, більш детальному розгляду підлягає ділянка на правому березі водосховища. Причиною цього є як значна площа лімітуючих зон на лівому березі, так і кращі швидкості вітру та положення рельєфу на правому березі. Частина ділянки, на якій дозволено будівництво (виходячи із лімітуючих параметрів), залишається досить значною. Єдиним лімітом, який може перешкоджати побудові вітроенергетичної станції на плакорі, є автошляхи. Проте у роботі було здійснено аналіз для всіх типів автошляхів (не тільки з твердим покриттям, а й ґрунтові). Тому необхідність оминати автошляхи є відносною, і залежить як від надійності установки, так і від величини фінансування, направлено на відшкодування збитків (відбудови автошляху) в разі руйнування установки. Детальніший розгляд впливу лімітів буде здійснюватися на етапі вибору місця для конкретних агрегатів.

Наступним етапом є *моделювання фонових рівнів шуму*. Шум – це будь-який небажаний звук, перевищення фонового рівня звуку. Для людини поріг «комфорту» становить 45 дБ. ВЕС генерують шум значенням близько 100 дБ, в залежності від моделі [196]. Шумове забруднення входить до досить дієвих факторів екологічного ризику. Шум антропогенного походження порушує життєдіяльність живих організмів та людини. Він може спричиняти дратівливість та агресію, артеріальну гіпертензію (підвищення артеріального тиску), тіннітус (шум у вухах), втрату слуху. У деяких країнах, наприклад, у Великобританії, щоб отримати дозвіл на будівництво, необхідно оцінити вплив проекту на рівень шуму та надати звіт у місцеву організацію із захисту здоров'я та навколишнього середовища.

Моделювання шумового впливу має враховувати близькість поселень (шум від вітряків може розповсюджуватися на відстань від 300 м до кількох км), рівень фонового шуму (за його низького рівня акустичний вплив вітроагрегатів помітніший), мікрокліматичні особливості території (насамперед, вітровий режим) [19, 141].

Вітроенергетичні установки найчастіше розташовують у сільській місцевості, де фоновий рівень шуму є незначним. Але велика частина шуму від вітроагрегату може маскуватися такими фоновими рівнями, як шум вітру та інший шум навколишнього середовища.

Щоб у подальшому оцінити потенційний акустичний вплив вітроагрегата, було вирішено провести вимірювання та моделювання фонового шуму місцевості. Для цього було розроблено методику вимірювання шуму (Додаток Д). За основу для вимірів було взято державні стандарти [137, 138, 177], які стосуються як акустичних вимірів загалом, так і дослідження рівнів шуму для потреб різних галузей, зокрема потреб вітроенергетики.

Оцінці підлягав рівень фонового шуму L_a (дБА) та акустична ситуація в цілому на ділянці, що досліджується. Для проведення вимірів використовувався шумомір Iso-Tech SLM-1352A, який було надано компанією Nerzh an Avel. Проводилися вимірювання тільки постійного шуму. Величина

рівню шуму L_a (дБА) безпосередньо зчитувалася з показчиків шумоміру. Для збільшення точності вимірів у кожній точці зчитування проводилося тричі, за кінцеве значення брався середній показник L_a сер. (дБА) у точці заміру. Дослідження ділянки проводилися у денний час на відкритій місцевості за погодними умовами, що дозволяли проводити вимірювання шуму. А саме: відсутність опадів, грому та блискавки, вітру швидкістю більш ніж 10 м/с, джерел звуку, що є тимчасовими на даній місцевості (трактори, автотранспорт, літаки, що пролітають, та інше). При швидкості вітру більш ніж 1 м/с необхідно застосовувати екран для захисту мікрофону приладу від вітру. Точки проведення вимірів (Рис. 3.10) розташовувалися вздовж маршруту, загальною протяжністю у 60 км. Тривалість вимірів складала 6 годин (із врахуванням переміщення між точками).

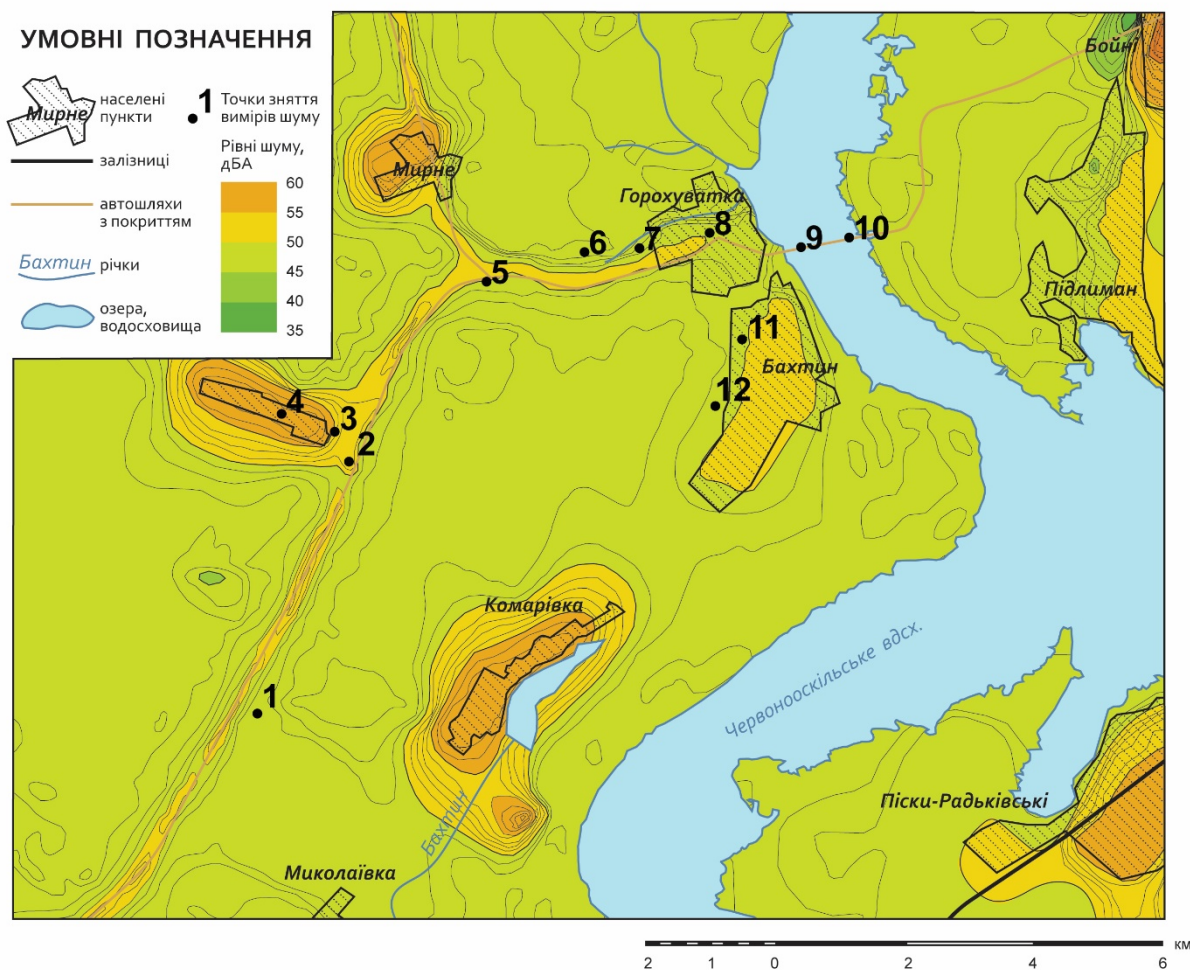


Рис. 3.10 Розподіл рівнів фонового шуму на ділянці дослідження

На основі даних, отриманих після вимірювання рівнів звуку та розрахунків (Додаток Е), було побудовано поверхню розподілу шуму по території дослідження. Даний етап виконувався у програмному середовищі MapInfo та Golden Software Surfer. Отримані поверхні можна аналізувати з питань доцільності встановлення вітроагрегатів у тому чи іншому місці, виходячи з акустичного впливу на оточуючі забудови (житлові, рекреаційно-оздоровчого призначення, тощо).

Вихідними даними виступали виміри на 12 точках, яким відповідали найвизначніші з точки зору завдань дослідження фізико-географічні характеристики місцевості. На основі цих вимірів ділянкам із схожими характеристиками було надано відповідні значення рівня звуку. Присвоєння значень точок здійснювалось у програмному середовищі MapInfo. Таким чином було отримано розподіл точок значень, що дало змогу побудувати карту. На цьому етапі було враховано специфіку поширення звуку. Звукові хвилі у повітрі поширюються рівномірно у всіх напрямках, і їх амплітуда зменшується зі збільшенням відстані від джерела. Збільшенню відстані в повітрі вдвічі відповідає зменшення наполовину амплітуди звукової хвилі, тобто зменшення рівня звуку на 6дБ. Збільшення відстані в 4 і 8 разів спричинює зменшення рівня відповідно на 12 дБ і 18 дБ [14]. Однак, така залежність є дійсною тільки за відсутності об'єктів, що відбивають або поглинають звук (умови вільного звукового поля). Для побудови поверхні рівня фонового шуму врахування цих закономірностей є неможливим через відсутність чітко виділеного джерела шуму. Рівень фонового шуму території представляється у вигляді поля, яке у свою чергу можна відобразити за допомогою статистичної поверхні. Тим, не менш, для розрахунків рівня шуму від вітроагрегату наведену специфіку було враховано.

Для подальших етапів було використано програмне забезпечення Golden Software Surfer. Для побудови поверхні фонового шуму було використано метод кригінгу, який дозволяє створювати точні цифрові поверхні за нерівномірно розподіленими в просторі даними. Метод кригінгу – досить

добре підходить для представлення даних у всіх науках про Землю. Даний метод намагається вловити тренди, які передбачаються в даних. Так, точки високого рівня переважніше з'єднувати уздовж гребеня, а не ізолювати за допомогою замкнутих горизонталей типу «бичаче око».

На основі отриманої поверхні було побудовано карту просторового розподілення значень фонового шуму для досліджуваної території (Рис. 3.10). Для населених місцевостей загальноприйнятою є шкала звукових рівнів, за якою має не перевищуватися значення у 45-50 дБ. Тому на карті значення більше 50 дБ позначено червоним кольором (незадовільні), 45-50 дБ – жовтим, менше 45 дБ – зеленим (допустимі).

Результати проведення дослідження дають змогу прийти до кількох висновків. По-перше, акустична ситуація на території в цілому є достатньо сприятливою для розвитку вітроенергетики. За робочих швидкостей вітру (а саме за таких здійснювалось вимірювання рівнів шуму) на більшій частині території рівень фонового шуму досягає досить високих значень, більших за рівень «комфарту» у 45 дБ. На ділянках поблизу населених пунктів спостерігається деяке підвищення рівня фонового шуму. Таким чином, відповідно до типу вітроагрегату, рівень шуму може перекриватися фоновим рівнем і розміщення ВЕУ не буде чинити істотний акустичний вплив на населення. Найменші значення рівня фонового шуму належать зонам лісових насаджень, де рослинність виконує функцію природного бар'єру. Якщо між вітроагрегатом та приймачем існуватиме бар'єр, це значно знизить рівень шуму. Єдина вимога – вилучення можливості «затінення» вітру таким бар'єром (у такому випадку рівень виробітку буде знижуватися), що може бути досягнуто шляхом розміщення вітроагрегатів на достатній відстані від бар'єру.

Дана карта (Рис. 3.10) дає змогу оцінити розподіл значень рівнів звуку в межах території дослідження, визначити основні закономірності, а також є основою для створення інших карт акустичних характеристик. Так, наприклад, володіючи даними про розподіл швидкостей вітру, можна

побудувати результуючу поверхню фонового шуму, що ґрунтується вже на даних залежності вимірних фонових рівнів звуку від швидкості вітру (чим більшою є швидкість вітру, тим більше значення фонового шуму). Така результуюча карта може стати корисною для уточнення і більшого наближення значень до дійсних. Існує також можливість побудови карти шляхом додавання потенційного виробітку енергії і перевищення фонового рівня шуму, що зможе давати повнішу оцінку потенційного розташування вітроагрегатів.

Оцінка впливу на орнітофауну. Вітроенергетика може чинити негативний вплив на птахів, порушуючи місця їх гніздування і годівлі, а також приносячи загибель або каліцтва через зіткнення з обертовими лопатями вітроустановок. Вітроенергетичні установки можуть впливати на місцеві та сезонні міграції популяцій птахів. Через високу швидкість польоту та часто погану видимість на висоті польоту мігруючі птахи мають менше можливостей оминати ВЕУ [154].

Починаючи з 80-тих років ХХ ст. розробники вітрових електростанцій спільно з вченими-біологами вивчають негативну дію агрегатів на птахів та кажанів та можливості зменшення цього впливу. При цьому думки дослідників розходяться. Так дослідження, проведені в Європі та США, показали, що в середньому кількість зіткнень птахів з вітроустановками не перевищує двох випадків на одну ВЕУ на рік. Ці цифри можна порівняти з мільйонами птахів, що гинуть щороку через інші причини, пов'язані з людиною, наприклад, на високовольтних лініях електропередач, через пестициди і в результаті зіткнень з автомобілями [148].

При цьому слід розуміти, що кількість птахів, що гинуть через інші види енергії, є значно більшою. В результаті однієї тільки аварії на нафтовому танкері «Еххон Valdez» (в затоці Принс Вільям на Алясці) загинуло понад 500 тисяч перелітних птахів, що майже в тисячу разів більше, ніж загибель птахів від всіх вітрових електростанцій в Каліфорнії за рік. Дослідження у Флориді показало, що робота однієї вугільної електростанції з чотирма

димарями тільки за один вечір під час осінньої міграції призвела до загибелі 3-х тисяч птахів [97].

Важливо враховувати вплив вітроагрегатів на конкретні види. Так, якщо вітроенергетичну станцію розташовано у ареалі проживання рідкісного виду, занесеного до Червоної книги України, чисельність особин цього виду може непропорційно зменшуватись. Заходи по збереженню таких видів є пріоритетними.

Повертаючись до статистичних даних, слід відмітити, що часто дані по окремим станціям не відображають ситуації в цілому. На деяких станціях вплив на птахів не був помічений. Так, на Ажигольській ВЕС (Миколаївська область) за 5 років спостережень спеціалістами не було помічено жодного випадку смертності представників фауни від ВЕС [16]. Це наводить на висновок, що смертність птахів прямо залежить від виду і способу розташування електростанції.

Детальніше розглянемо причини загибелі птахів. Згідно з [42] виділяються такі групи потенційних загроз з боку ВЕС:

1. Пряме зіткнення (з лопатями під час руху або нерухомими, опорами вітроустановок, лініями електропередач, інфраструктурними спорудами).
2. Турбування птахів (під час будівництва та експлуатації).
3. Втрата біотопів внаслідок розміщення ВЕС на пташиних територіях (гніздових, кормових, місць скупчень).
4. Створення перешкод під час перельотів, особливо в традиційних місцях переміщення птахів (міграційні потоки, кормові перельоти, переміщення в місцях ночівель, міграційних скупчень, линьки тощо).

Перераховані впливи можуть бути прямими (такі, що безпосередньо призводять до загибелі птахів) або непрямими (зменшення загальної чисельності птахів в районі ВЕС, зниження числа гніздових пар, перерозподіл птахів між територіями, зникнення/поява деяких видів птахів в локальних поселеннях) [42].

Вітроенергетичні компанії співпрацюють з групами із захисту навколишнього середовища з метою зниження рівня загибелі птахів. Спільними зусиллями у різних країнах світу розробляються заходи, що можуть бути використані для зменшення смертності птахів від вітроагрегатів. До них належать:

- Вимкнення частини агрегатів на час міграції птахів (для певних територій, такий захід є певною мірою ефективним, бо у цей самий час швидкість вітру є незначною (наприклад у Каліфорнії, станція Алтамонт Пасс [153])).

- Вимкнення агрегатів на час прольоту групи птахів. Такий захід здійснюється за допомогою радіолокаційних спостережень району розташування ВЕС. Спеціалізовані радіолокаційні станції на працюючих ВЕС можуть працювати в режимі раннього оповіщення, моніторингу та мінімізації ризиків, забезпечуючи своєчасне попередження персоналу електростанції про наближення пташиних зграй.

- Обмеження розташування вітроагрегатів у місцях підвищеної активності птахів (так, більшість птахів обирають для польотів місця у районі крутих схилів, де утворюється турбулентний рух повітря вгору (можливості для планування), вітрові коридори у міжпагорбових сідловинах, тощо).

- Встановлення вітроагрегатів висотою, більшою за висоту переважних польотів птахів (зі збільшенням висоти зростає також і швидкість вітру). Проте висота міграції птахів може досягати значних висот, навіть вищих за висоту найвищої вітроенергетичної установки.

- Обмеження випасання худоби під вітроагрегатами.

- Введення нових технологій. Сучасні вітроенергетичні установки, лопаті яких повертаються повільніше, ніж у більш ранніх моделей, спричиняють набагато менше випадків зіткнення. До того ж, одна сучасна нова ВЕУ здатна замінити декілька більш старих, що дає змогу зменшити

щільність розташування установок, і, як наслідок, навантаження на орнітофауну.

- Застосування відлякуючих заходів, зміни у дизайні (фарбування лопатей, використання ілюмінації, тощо).
- Збільшення порогу роботи вітроагрегатів (до 5 м/с). Такий захід дещо зменшує виробіток, але при цьому зменшує смертність птахів (за сильного вітру невеликі птахи і кажани намагаються не літати) (такий захід було введено у Пенсильванії).
- Створення нових середовищ існування для птахів (забезпечення прокорму у місцях, віддалених від вітроагрегатів) (Великобританія, вітростанція «Beinn an Tuirc» [153]).

Як правило, птахи помічають нові споруди, які з'явилися в ареалі їх проживання, вчаться їх уникати (особливо обертові лопаті) і продовжують тут годуватися і розмножуватися. Проблеми більш вірогідні, якщо вітроустановки розміщені на маршрутах міграції великої кількості птахів або в особливо привабливих місцях годівлі або гніздування. Цих проблем можна уникати шляхом ретельного вибору місця розміщення вітроустановок. Тому необхідним при проектуванні агрегатів є врахування особливостей гніздування та міграції птахів.

Вітроенергетична промисловість бере на себе широкий огляд розповсюдження та міграційних шляхів для зменшення впливу вітроелектростанцій.

Деякі національні асоціації вітрової енергетики прийняли правила, що регламентують підходи до вирішення проблеми безпеки для птахів і кажанів. Наприклад, Австралійська асоціація вітрової енергетики для оцінки ризику зіткнень «настійно рекомендує проводити ретельне дослідження активності птахів і кажанів протягом усього року ...», включаючи цільові дослідження, «необхідні для збору даних про те, яким чином птахи і кажани використовують місця, передбачувані для будівництва

вітроустановок і прилеглі до них ділянки ... » [97]. Частина досліджень, згаданих вище, є сезонно обмеженими (або можуть тривати більше одного сезону). Тому важливо, щоб екологічні дослідження були заплановані ще на стадії розробки вітроенергетичного проекту.

Такі спостереження можуть здійснюватися також за допомогою радіолокаційних станцій. Вони дозволяють скласти деталізовану базу даних по птахам і кажанам для висот, де вони можуть потрапити під гвинти ротора вітрової електростанції, що допоможе визначити кількісні характеристики ризиків їх смертності. Радіолокаційна станція також може поставляти деталізовану інформацію про пересування птахів і кажанів в оточенні вітроелектростанції в радіусі від 5,5 до 7,5 кілометрів і на висотах до 3 кілометрів [108].

Для комплексної оцінки впливу проектованої електростанції на орнітофауну, необхідно дослідити видовий склад території дослідження, виявити найбільш вразливі види та ареали їх мешкання.

Орнітофауна Харківської області представлена понад 280 видами, що в систематичному відношенні належить до 53 родин і 18 рядів. З них близько 180 видів гніздяться, 50 видів зустрічається на прольоті, 20 видів – залітні, 10 видів зимуючих.

В лісах області мешкає численна спільнота птахів. До них належать соловей звичайний, вальдшнеп, сорокопут-жулан, зеленушка, дятел (великий, середній і малий), шпак звичайний, синиця, сойка, ворон. Поширені денні хижаки: яструб-тювик, канюк, балабан, змієїд, орел-могильник, сокіл-сапсан, котрі занесені до Червоної книги України. Серед інших птахів, що знаходяться під охороною, слід відмітити філіна, а також чорного лелеку, якого спостережено на прольоті. У лісах також мешкають кажани, що селяться у дуплах та щілинах дерев. Зустрічаються занесені до Червоної книги вечерниця гігантська та мала, нічниця ставкова.

У степовій частині поширені жайворонок польовий, щеврик польовий, перепілка і куріпка сіра. На схилах селяться бджолоїдка золотиста,

сиворакша. Рідко зустрічаються занесені до Червоної книги України лунь степовий та польовий, орел степовий, боривітер степовий та дрохва.

До водно-болотяних угідь приурочені крижень, чирок-свистунок, попелух червоноголовий, чернь чубата, гуска сіра, лебідь, занесені у Червону книгу України лежень, кулик-довгоніг, кроншнепи великий та тонкоклювий, сірий журавель тощо [125].

Дослідження останніх років показують, що Харківська область, незважаючи на свою бідність водно-болотними угіддями і віддаленість від морських узбереж, дуже важлива для мігруючих тундрових видів гусей, білолобої гуски (*Anser albifrons*) і тундрового підвиду гуменника (*Anser fabalis rossicus*), забезпечує їх зручними місцями стоянок під час весняного прольоту. Особливо охоче гуси використовують для зупинок великі водосховища в степовій частині області і на межі степу і лісостепу (Краснопавлівське, Орельківське, Червонооскільське і Печенізьке). Неподалік від цих водойм розташовані сільськогосподарські угіддя, куди ці птахи літають годуватися [150].

Таким чином, на території дослідження найбільша кількість представників орнітофауни зосереджена біля берегів водосховища та в межах лісів. Тому необхідним є встановлення агрегатів на деякому віддалені від цих територій. Втім, для більшості видів птахів небезпека зіткнення з ВЕУ є незначною через невелику висоту польотів та зосередженість біля водойм. В степових же ділянках на плакорі, де й знаходиться найперспективніша місцевість, різноманіття птахів є меншим. Найбільшою є небезпека впливу саме на хижих птахів, занесених до Червоної книги.

Про специфіку поширення мігруючих видів птахів можна судити з картографічних даних [83, 105], на основі яких було побудовано орієнтовну карту міграцій птахів в межах ділянки (Рис. 3.11). Територією дослідження проходить Дніпровський шлях міграції птахів. Напрямок прольоту орієнтований вздовж Червонооскільського водосховища.

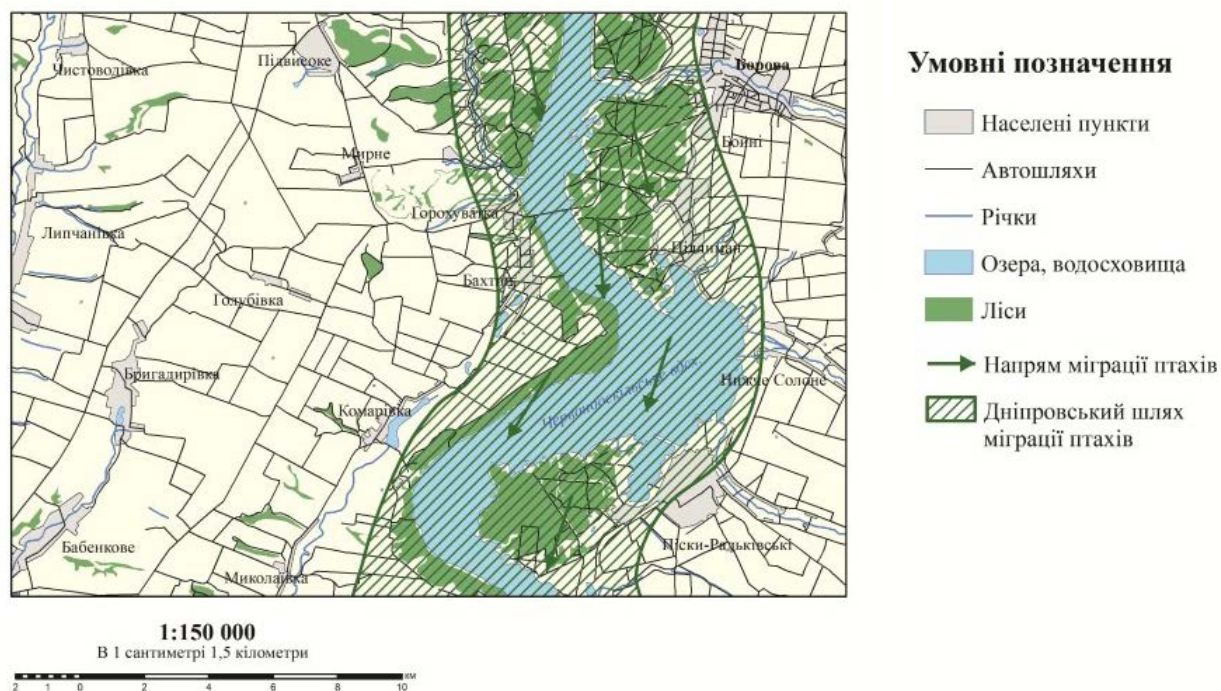


Рис. 3.11 Сезонні міграції птахів в межах території дослідження

Це свідчить про те, що на значних висотах напрямок основної частини зграй буде так само зорієнтовано з півночі на південь. Таким чином, при конструюванні вітроелектростанції слід розраховувати розташування агрегатів таким чином, щоб зменшити вплив на птахів.

Але, як вже зазначалося, для більш об'єктивної оцінки ситуації, слід провести комплексне спостереження за міграціями, гніздуванням і поширенням птахів та кажанів на місцевості перспективного розташування ВЕС. Особливу увагу при цьому слід приділяти хижим птахам степу та перелітним підвидам гусей.

Огляд електричної мережі. Під час проектування ВЕС специфіка підключення до місцевої електромережі значною мірою визначає стратегію розвитку вітроенергетики. Тому у нашій роботі проводиться огляд існуючих електромереж на території дослідження та аналіз варіантів підключення вітроагрегатів.

Підключення до електромережі є досить складною процедурою і потребує залучення державних структур, які відповідають

за енергозабезпечення. У таких структурах розробляється проект підключення.

Вітроустановки можуть мати проблеми з мережевою інфраструктурою, оскільки вартість лінії електропередачі і розподільчого пристрою для підключення до енергосистеми можуть виявитися занадто великими. Проблема частково вирішується, якщо вітроустановка підключається до місцевої мережі. У цьому випадку використовується існуюче силове і розподільче устаткування, а ВЕС створює деякий підпір потужності. Якщо вітростанцію або вітроустановку підключати зі сторони низької напруги до трансформатору, від якого відбувається живлення району, то режим роботи полегшується, так як знижується потужність, що споживається із мережі. З цієї ж причини зменшуються втрати енергії та напруги у лінії електропередачі, що з'єднує трансформатор із основною мережею. Трансформаторна підстанція і зовнішня лінія електропередачі виявляються менш навантаженими, хоча загальне споживання потужності може бути вищим. З'являється можливість регулювання напруги (можливо у сучасних конструкціях вітроустановок).

За нормативами, прийнятими у країнах Європи та США, частка потужності вітроелектростанції у системі має не перевищувати значення у 20 % від потужності, що споживається. За значень, більших за 10 %, можуть виникати проблеми із забезпеченням стійкості системи [12].

Вітрова енергія надає більше нестабільності і невизначеності в енергосистему. Це має як позитивний, так і негативний потенційний вплив на надійність і ефективність енергосистеми. Однак, використання великої кількості вітрової енергії зазвичай означає негативний вплив і витрати на її інтеграцію. Виробництво вітрової енергії може вимагати використання додаткових резервів потужності. Короткостроковий резерв має різну термінологію в різних енергосистемах, як, наприклад, регулювання / резерви, що постійно сліднують за навантаженням, або, вторинні / третинні резерви, які можуть бути використані протягом декількох хвилин.

З результатів досліджень, існує важлива проблема, а саме, нестабільність вітрової енергії в період 1-6 годин. Інерційний відгук, контроль частоти (у секундному масштабі часу) і швидке автоматичне балансування (у масштабі часу від секунд до хвилин) не є критичними проблемами при інтеграції вітрової енергії у великі енергосистеми в даний час. Ці проблеми можуть бути важливими для невеликих систем, або ізольованих середніх систем (як, наприклад, в Ірландії), і можуть стати істотними для великих систем енергопостачання з високими рівнями інтеграції вітрової енергії.

Завдяки сучасній технології нові вітроелектростанції здатні керувати навантаженням на систему: підтримка енергопостачання при падінні напруги, постачання системи реактивною потужністю, контроль граничного напруження, участь в роботі системи через контроль потужності і швидкості зміни графіка навантаження.

Посилення електричної мережі може бути необхідним для передачі великих потоків енергії і підтримки стійкого і адекватного профілю напруги. Це звичайно необхідно, якщо нове виробництво енергії встановлюється в місцях зі слабкими або перевантаженими мережами, далеко від центрів навантаження, або там, де немає мереж, наприклад, у морі.

При плануванні ліній передач (для вітрової енергії) найбільш ефективним рішенням за вартістю, у разі необхідності значного посилення існуючої електричної мережі, є будівництво нової мережі – замість модернізації існуючих мереж у кілька етапів [57].

З'єднувальна мережа вітроелектростанцій може бути виконана за магістральним, радіальним чи змішаним принципом. Взаємне розташування установок та дистанції між ними обумовлені в основному двома факторами: одиничною потужністю та формою рози вітрів на ділянці, що розглядається.

У випадку розташування установок у лінію, що є характерним для гірських перевалів, узбереж морів чи великих озер, офшорних

вітропарків на морській косі, застосовується магістральна схема. Роза вітрів при цьому, як правило має стійку витягнуту форму з чітко вираженими домінуючими напрямками, і лінія установок розташовується перпендикулярно бісектрисі сектора, який обмежує ці напрями. Відстані між окремими ВЕУ в цьому випадку можуть складати лише 3-4 діаметри колеса вітроагрегату, так як турбулентні сліди від вітроагрегату не здійснюють впливу на роботу сусідніх установок.

У випадку розташування вітроелектростанції на суходолі у степовій зоні, де роза вітрів є більш рівномірною, може бути застосована радіальна схема підключення з головною підвищувальною підстанцією у геометричному центрі парку (при цьому приєднання до прилеглої електричної мережі зазвичай здійснюється за допомогою комбінованої кабельно-повітряної лінії електропередачі, оскільки на території вітроелектростанції повітряні ЛЕП, як правило, не використовуються). За рівномірної рози вітрів дистанція між окремими установками у всіх напрямках має бути однаковою, відповідно до довжини турбулентного сліду від вітроагрегата, який простягається паралельно напрямку вітру. Потрапляння установки у турбулентний повітряний потік різко знижує її аеродинамічний коефіцієнт корисної дії [13].

Енергозабезпечення Харківської області здійснюється від електричних станцій Північної електроенергетичної системи України, із загальною потужністю генеруючих електростанцій 3408,97 МВт [93].

Територією Борівського району проходить одна лінія електропередач напругою понад 700 кВт (із Придніпровської ДРЕС до Нововоронезької АЕС). Ще одна подібна лінія проходить територією Ізюмського району приблизно на такій самій відстані до ділянки нашого дослідження (Слов'янська ДРЕС – Київська ТЕЦ-6). Мережа менших ЛЕП охоплює район дослідження у кількох місцях. Одна лінія електропередач розташована у безпосередній близькості до точки встановлення анемометру [94].

Енергопостачання місцевих споживачів району дослідження здійснюється за рахунок притоку потужності та електроенергії з північного

заходу, де розташована Зміївська ТЕС, та з ТЕЦ у місті Борова та Червонооскільської ГЕС. В цілому район достатньо забезпечений електроенергією.

В рамках дослідження на основі даних, отриманих по результатам звернення до АК «Харьковоблэнерго» та наявних картографічних даних, було побудовано карту електромережі на ділянці дослідження (Рис. 3.12).

У розподільній мережі є повітряна ЛЕП «Комарівка – Ізюм», виконана в габаритах 35 кВ, яка може бути використана у схемі приєднання ВЕС до енергосистеми.

Найближча підстанція (ПС) – ПС Комарівка 35/10 кВ на два трансформатори по 2,5 МВА. Варіанти підключення до підстанції: 10 МВт окремою ВЛ-35 кВ та 3 МВт окремою ВЛ-10 кВ.

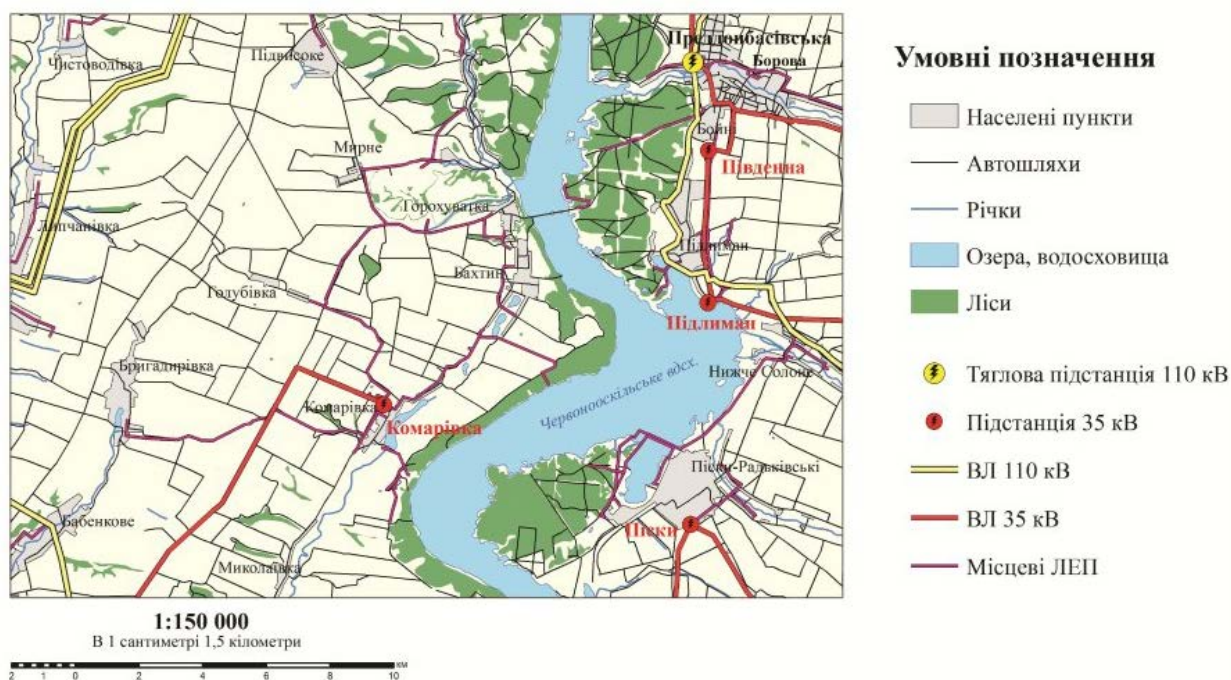


Рис. 3.12 Електромережі в межах території дослідження

Висновки до розділу 3

1. Запропоновано та апробовано на модельній ділянці методику оцінки ПРП для характерної ділянки Лісостепу. На основі обраної у попередньому розділі методики здійснено побудову статистичної поверхні середніх швидкостей вітру, кожній точці якої відповідає певне розраховане значення середньої швидкості для місцевості. За результатами моделювання побудовано карту розподілу середньорічних швидкостей вітру на модельній ділянці.

2. Визначено, що найбільші швидкості вітру в межах тестової ділянки спостерігаються на плакорі, у північній його частині, яка характеризується найбільшими висотами у даній місцевості. Попри тривіальність цього результату, він має методичне значення, пересвідчуючи у реальності моделі. Найнижчі покази швидкості – поблизу с. Підлиман (через значну лісистість та невеликі абсолютні висоти).

3. Здійснено дослідження просторових обмежень будівництва вітроелектростанції. Такі обмеження регулюються законодавством України, а також рекомендаціями щодо розвитку галузі у інших країнах. До об'єктів, що, згідно цих документів, мають бути віддалені від вітроенергетичних станцій належать: населені пункти, водоохоронні об'єкти, лісові масиви, інженерні споруди, аеропорти та воєнні об'єкти, природоохоронні території. Окремо досліджувався вплив на орнітофауну, можливості підключення до електромережі та фонові акустична ситуація на території.

4. На основі законодавчих обмежень було побудовано карту лімітуючих факторів для ділянки дослідження.

5. Останнім етапом оцінки ПРП території для потреб вітроенергетики стала побудова інтегральної карти зон, не придатних для розміщення вітроагрегатів в межах модельної ділянки.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [33–37, 204].

РОЗДІЛ 4

МОДЕЛЮВАННЯ ВАРІАНТІВ РОЗМІЩЕННЯ ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ НА ОСНОВІ РОЗРАХУНКУ ПРИРОДНО-РЕСУРСНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТЕРИТОРІЇ

4.1 Моделювання варіантів стратегії розвитку вітроенергетики

Вибір конкретної моделі розвитку вітроенергетики у регіоні є досить кропітким процесом і потребує детального аналізу наявних ресурсів та умов. Детально розглянемо два варіанти розвитку вітроенергетики для ділянки дослідження.

Варіант 1. Розвиток вітроенергетики без модернізації електромереж. За цією стратегією фінансування на етапі проектування та встановлення вітроелектростанції є мінімальним. Таким чином, при виборі місця розташування вітроагрегатів має враховуватися необхідність максимального обмеження витрат на використання землі, транспортні мережі, підключення до місцевої електромережі, але при цьому оптимально поєднуватися із необхідністю отримання найвищих значень виробітку. Вітроагрегати мають бути встановлені у зоні 200 метрів від наявних ліній електропередач, із врахуванням обмеженості підключення через можливість перевантаження мереж. Невелика кількість вітроагрегатів, придбання ВЕУ, бувших у використанні.

В межах цієї стратегії розрахунки проводилися для ВЕУ Enercon E-40 (Додаток Ж), яка досить широко застосовується для використання енергії вітру в сільській місцевості, на значних відкритих ділянках. Висота вежі складає 44 м, діаметр вітроколеса – 40 м. Дана установка дозволяє використання швидкостей вітру в значеннях від стартового 2,5 м/с до критичного 33 м/с. Розрахункова швидкість вітру для установки складає 13 м/с, за таких значень швидкості вітру і вище розрахункова потужність установки становить 500 кВт. Орієнтовна ціна б/у установки: 100–130 тис. євро.

Варіант 2. Достатнє фінансування для проектування повноцінної вітроенергетичної станції, можливості до вибору місць із найбільшим потенційним виробітком енергії.

Для даної стратегії необхідним є використання оптимального сучасного вітроагрегату. В процесі вибору вітроенергетичної установки було розглянуто широкий діапазон моделей найвідоміших виробників. Кожна компанія має свої позитивні та негативні якості. Вихідними ж параметрами для вибору в нашому випадку виступали невисокі значення початкової швидкості вітру (так як середні швидкості вітру на нашій ділянці належать до низьких згідно Європейських стандартів), відповідно невисокі значення номінальної швидкості вітру (для нашої території розрахункові номінальні швидкості вітру становлять 10-12 м/с). За такими параметрами було обрано вітроенергетичну установку Enercon E-115 (Додаток Ж). Висота вежі складає 92,5 м, діаметр вітроколеса – 115 м. Дана установка дозволяє використовувати значення швидкості вітру у діапазоні від стартового 2 м/с до критичного 28-34 м/с. Розрахункова швидкість вітру для установки складає 12 м/с, за таких значень швидкості вітру і вище розрахункова потужність установки становить 2500 кВт. Орієнтовна ціна нової установки: 2,5 млн. євро.

Важливим параметром, який також має бути враховано під час проектування вітроенергетичної станції є отримання земельної ділянки для спорудження ВЕУ.

Власне під вітроенергетичну установку необхідно 200-400 квадратних метрів, має бути також врахована дорога до неї, довжина якої залежить від загальної схеми доріг.

Якщо ВЕС розташовується на родючих землях, то проміжки між ВЕУ використовуються за своїм прямим сільськогосподарським призначенням. У США і Європі фермери отримують орендну плату за надання землі під вітроустановки, продовжуючи займатися своєю прямою справою: вирощуванням сільськогосподарських культур і тваринництвом. При цьому орендодавець погоджується з перспективним шумовим впливом та ризиком

через поламку ВЕУ. При чому в договорах передбачається 100 % рекультивація землі після закінчення терміну служби ВЕУ. Але найчастіше ВЕУ розташовуються на землях непридатних для сільського господарства.

В межах ділянки дослідження проблема вилучення земель з використання є істотною насамперед для першої стратегії розвитку вітроенергетики. В рамках другої стратегії планується розташування ВЕУ у будь-якій місцевості (незалежно від дійсного способу використання земель). Для першої стратегії місце розташування агрегатів має обиратися ще й виходячи з мінімального вилучення земель (тобто на територіях пасовищ, схилів, не придатних для використання, тощо). Тип користування визначався за космічними знімками та поверхнею висот місцевості.

Перше завдання, яке постає в рамках розробки стратегії розвитку вітроенергетики у районі дослідження – це вибір оптимальної кількості вітроагрегатів.

Зазвичай більш економічно вигідним є встановлення однієї великої вітрової системи замість кількох малих, але тим не менш існують причини для встановлення кількох вітроагрегатів:

1. Невеликі вітроагрегати, як правило, краще пристосовані до більш низької середньої швидкості вітру, яка переважає більшу частину часу.

2. Обмеження у навантаженні на місцеву електромережу. В разі поламки одного з вітроагрегатів, перепад напруг є меншим, якщо агрегат має порівняно незначну потужність у загальному виробітку і може компенсуватися іншими ВЕУ станції.

3. Необхідність дотримання інтервалу між вітроагрегатами. Для горизонтальної вітроустановки інтервал у 10 разів більше діаметру ротора є прийнятною дистанцією. Промислові станції дотримуються дистанції від 7 до 10 діаметрів ротора, якщо установка знаходиться з підвітряного боку відносно один одного з переважаючим напрямком вітру, або від 3 до 5 діаметрів перпендикулярно переважному напрямку. Це мінімальні рекомендовані відстані. Але навіть на такій дистанції все ще може бути значне порушення

вітру, як було зазначено останнім часом у ряді досліджень продуктивності вітроелектричних станцій. Іншим важливим моментом є те, що електростанції мегаватного класу, як правило, встановлюються на височинах або у відкритих місцях з вираженим переважаючим напрямом вітру. Невеликий вітряк, може бути розташований у місцевості, де вітер дме з усіх сторін протягом усього року, навіть з переважаючим напрямком вітру. Через це, мінімальна відстань в 10 разів більше діаметру ротора є оптимальним варіантом для декількох окремо розташованих невеликих агрегатів.

З метою отримання кращого виробітку агрегатів, особливо вищого класу, топологічно їх необхідно зорієнтувати так, щоб агрегати не перекривали і не порушували течії вітру один для одного. Тому найкраще орієнтувати агрегати перпендикулярно основному напрямку вітру у районі дослідження. З рози вітрів (Рис. 3.2) можна визначити, що найбільша повторюваність належить кільком напрямкам. Проте у нашому випадку у разі розташування агрегатів в одну лінію, агрегати будуть розташовані перпендикулярно двом протилежним напрямкам. Тому необхідним є подвійне врахування напрямку, тобто додавання повторюваностей протилежних напрямків. Таким чином, внаслідок сумування ми отримуємо: $(P_n + P_d) = 2896$; $(P_n C_x + P_d Z_x) = 2344$; $(C_x + Z_x) = 3732$; $(P_n Z_x + P_d C_x) = 2985$. Тому вітроагрегати задля отримання найвищого виробітку мають бути розташовані в ряд з півночі на південь.

Варіант 1. За даними, які було надано АК «Харківобленерго», місцеві електромережі мають можливість додатково прийняти максимальну потужність у 10 МВт або 2 МВт. Таким чином, на ділянці дослідження може бути максимально встановлено 20 агрегатів Enercon E-40 потужністю 500 кВт кожен або 4 агрегати у разі підключення лінією 10 кВ.

Дана вітроелектростанція може бути підключена до мережі 35 кВ до відкритого розподільчого пристрою 35 кВ підстанції Комарівка, або за допомогою вхідних ліній до повітряних ліній електропередач ВЛ-35 кВ Комарівка-Ізюм. Таким чином, ВЕС має бути розміщена у зоні 200 м від ПС Комарівка або відповідної ЛЕП.

Відстань між агрегатами задля забезпечення уникнення впливу турбулентного сліду від сусідніх агрегатів має складати від мінімального 200 метрів до максимального 400 метрів.

Підстанція Комарівка знаходиться недалеко (близько 800 метрів) від водосховища, розташованого в улоговині, заліснені улоговини розташовані також на північ та на південь від підстанції. Через це безпосередньо біля підстанції швидкості вітру є дещо нижчими (4,5-5 м/с). З наближенням до вододілу середньорічні швидкості вітру підвищуються, досягаючи свого максимального значення у 5,4 м/с (для зони 200 метрів біля ВЛ-35 кВ) біля автошляху Т2109.

Щодо лімітуючих параметрів, основне обмеження, яке виникає в разі розвитку цієї стратегії – це наявність залісненої улоговини на південь від ПС Комарівка та селища Комарівка на південний схід від зони можливого встановлення агрегатів. Крім того, ВЛ-35 кВ розташована безпосередньо вздовж автошляху, а віддаленість агрегатів від автошляхів має становити не менше 110 м. Таким чином, можливість підключення за цією стратегією до ПС Комарівка відпадає через поєднання обмежуючих параметрів. Найсприятливішою залишається зона поблизу ВЛ-35кВ на вододілі. При цьому слід обирати ділянку якомога північніше (у цьому напрямку зростають швидкості вітру).

Задля зменшення витрат на виведення угідь із землевикористання, в рамках даної стратегії передбачається розташування агрегатів на землях, виведених із сівозміни, кам'янистих місцях, пасовищах та схилах. Крім того, можуть бути використані землі автошляхів (грунтові дороги, ті що вийшли з ужитку тощо).

Для забезпечення якомога меншого впливу на орнітофауну, агрегати мають бути віддалені від лісових насаджень, водних об'єктів. В межах розрахунку лімітуючих параметрів така дистанція вже була врахована. Так як положення вітроелектростанції не зачіпає основного шляху міграції птахів у районі дослідження, необхідності у переміщенні агрегатів не виникає.

Проте задля зменшення ймовірності зіткнення з птахами агрегати слід розміщувати на значній відстані один від одного (в даному випадку 400 метрів цілком відповідає вимогам) і топологічно перпендикулярно напрямку основного міграційного шляху (тобто, із заходу на схід).

Залишається необхідність обрати спосіб під'єднання. Для цього необхідно, щоб трансформаторна підстанція ВЕС відповідно до умов стратегії знаходилася на відстані не більше 200 метрів від ВЛ-35 кВ. Спосіб під'єднання (магістральний чи радіальний) залежить від загальної довжини кабельної лінії між вітроагрегатами за кожного зі способів під'єднання.

Варіант 2. У разі підключення на максимальну потужність у 10 МВт, максимально можна встановити 4 агрегати Enercon E-115 потужністю 800 кВт. Відстань між агрегатами має складати від мінімального 575 метрів до максимального 1 150 метрів.

За цим варіантом розвитку планується можливість модернізації місцевих мереж. Таким чином, існує можливість підключення до місцевої підстанції, але з підвищенням рівня її напруги шляхом встановлення більшої кількості трансформаторів і відповідної заміни ЛЕП. Обмеження при цьому пов'язані саме з фінансуванням.

Основний фактор вибору місця розташування агрегатів за цією стратегією – найвищі швидкості вітру, які спостерігаються у північно-західній частині території дослідження недалеко від селища Мирне і перехрестя автошляхів Т2109 і Т2105, де середньорічні швидкості вітру досягають значень більше 5,5 м/с.

Перешкоджаючі параметри – наявність заліснених ділянок та населених пунктів (Мирне та Гороховатка). Вплив на орнітофауну є неістотним в разі достатнього віддалення від лісів та встановлення агрегатів якомога західніше. За цією стратегією можна розглядати кілька ділянок біля перехрестя автошляхів Т2109 і Т2105.

4.2 Моделювання потенційного виробітку енергії

Для цього на основі даних про розподіл вітрів, поверхонь середніх швидкостей вітру, технічних характеристик вітроенергетичної установки та шару, у якому було вказано точку розміщення вітроагрегата, було підраховано потенційний виробіток електроенергії. Розрахунок проводився у середовищі програми WindFarm.

Для обчислення енергії, яка буде вироблятися вітроагрегатом, необхідно здійснити подвійне інтегрування за всіма напрямками і швидкостями вітру, за яких цей агрегат працюватиме.

Роза вітрів містить автоматично обраховану інформацію щодо профілю вітру для кожного сектору. Для висоти вітроколеса значення швидкостей вітру обраховується за логарифмічним законом. Таким чином отримується значення швидкостей вітру у місці встановлення анемометру на висоті вітроколеса. Далі, задля розрахунку значення швидкості вітру у конкретному місці, використовується розрахована матриця швидкостей вітру для всієї території. Наступним етапом є поєднання розподілу швидкостей вітру по секторам з повторюваністю кожного напрямку протягом року. Відповідно до кривої виробітку енергії вітроагрегату (значення виробітку в залежності від швидкості вітру) розраховується потенційний виробіток енергії у кВт·год (4.1).

$$W = \frac{\pi}{8} D^2 T_p \int_0^\infty V^3 \eta(V) f(V) dV, \quad (4.1)$$

де

D – діаметр вітроколеса (м);

ρ – середня густина вологого повітря (кг/м³);

T – період часу (зазвичай рік);

$\eta(V)$ – ККД установки для швидкості V .

В межах першої стратегії необхідно було розрахувати виробіток енергії на конкретних ділянках. Відстань між агрегатами розрахунково складала 300 метрів (Рис. 4.1). Так як постала необхідність встановлення

вітроагрегатів перпендикулярно міграційного руху птахів, а також через те, що виробіток енергії прогнозовано має бути більшим, було вирішено проводити розрахунок для схеми під'єднання магістрального типу. Вітроагрегати розташовано в одну лінію вздовж автошляху Т2109 із можливістю розташування підвищувальної підстанції у будь-якій частині ВЕС. При цьому точки встановлення агрегатів обиралися виходячи із необхідності використання земель несільськогосподарського призначення або таких, що не відносяться до оброблюваних земель. Проте, через те, що в межах досліджуваної території для розташування 20 вітроагрегатів не вистачає таких ділянок, частина агрегатів була розташована в межах оброблюваних земель. Тож, на ділянках, що не входять до сільськогосподарських угідь, розташовані вітроагрегати №1, 2, 3, 4, 13 та 20. Таким чином досягається оптимальне співвідношення виробітку енергії та витрат на оренду угідь. Нумерація агрегатів за магістрального типу під'єднання здійснювалась у порядку під'єднання до електромережі.

Виробіток енергії по результатах склав 15,992 ГВт·год (Табл. 4.1). Найвищий показник виробітку належить агрегату №14.

Додатково було проаналізовано виробіток в разі розташування агрегатів за радіальним принципом, що недостатньо відповідає меті нашого дослідження. Агрегати було встановлено недалеко від підстанції Комарівка (перехрестя шляхів). Загальний виробіток для 20 агрегатів склав 15,695 ГВт·год (Табл. 4.1). Найбільше значення – агрегат №2, який було розташовано з краю ВЕС на найбільш відкритій ділянці. Менший виробіток пов'язаний у першу чергу із нераціональним розташуванням вітроагрегатів відносно середніх швидкостей вітру на території (обрати краще положення не дозволяє радіальний принцип розташування). Окрім того, слід враховувати можливість появи турбулентного сліду, який в межах програми не було обраховано. Наявність «тіньового ефекту» може спричинити зменшення у загальному виробітку енергії вітроелектростанцією у 2 та більше рази.

Для цілей другої стратегії було обрано розташування агрегатів у шаховому порядку (через досить рівномірний розподіл рози вітрів та значну розосередженість агрегатів) на відстані 800 метрів один від одного (Рис. 4.2). Внаслідок аналізу кількох можливих положень було обрано оптимальний варіант розміщення недалеко від селища Гороховатка. За результатами обчислень було отримане значення загального виробітку, яке склало 37,850 ГВт·год (Табл. 4.1). Найвище значення отримав агрегат №4, який серед інших агрегатів займає найвище за абсолютною висотою положення.

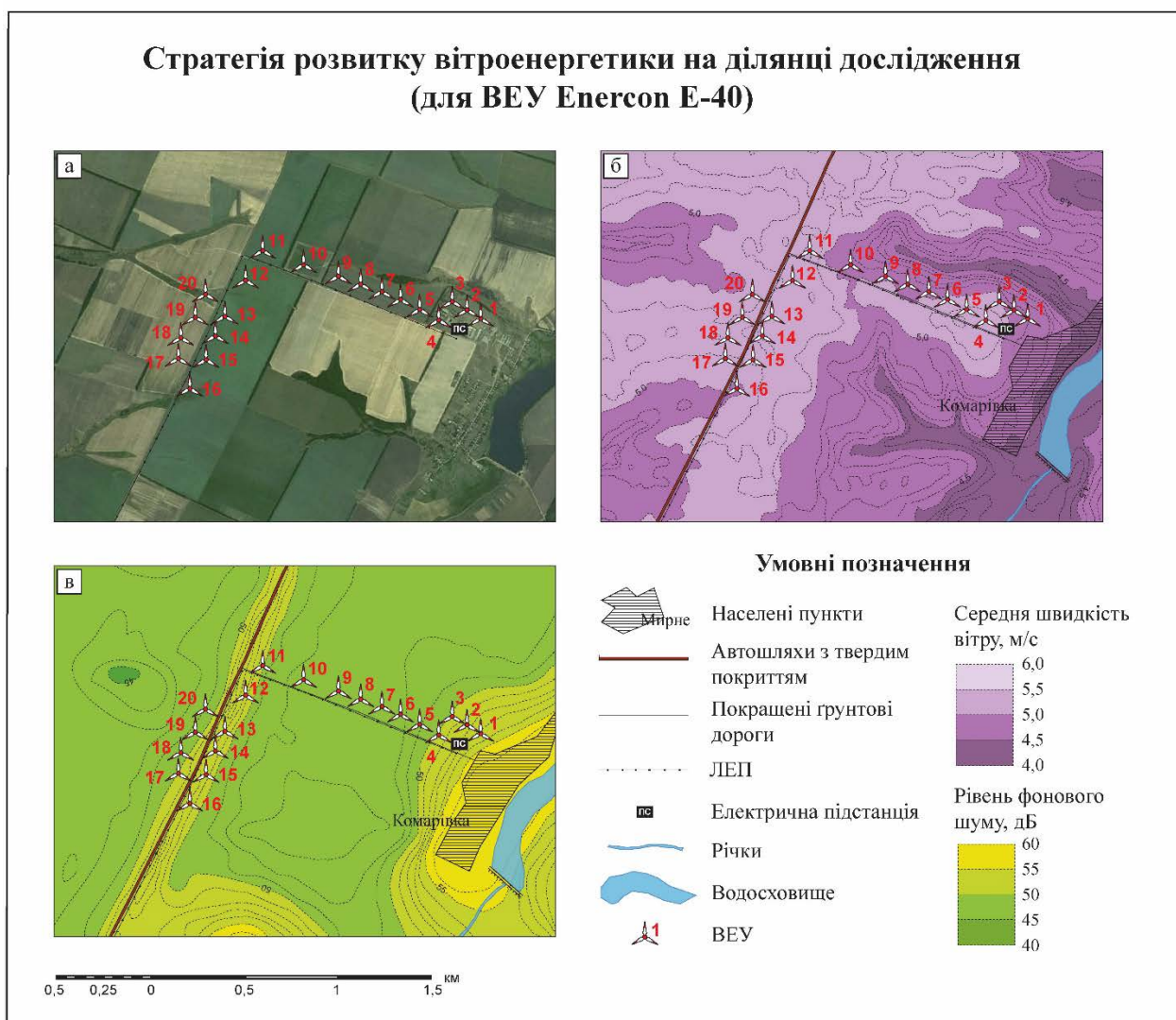


Рис. 4.1 Космічний знімок (а), середньорічні швидкості вітру (б) та рівень фонового шуму (в) для ділянки розташування ВЕУ згідно стратегії 1 (магістральний принцип)

Стратегія розвитку вітроенергетики на ділянці дослідження (для ВЕУ Enercon E-115)

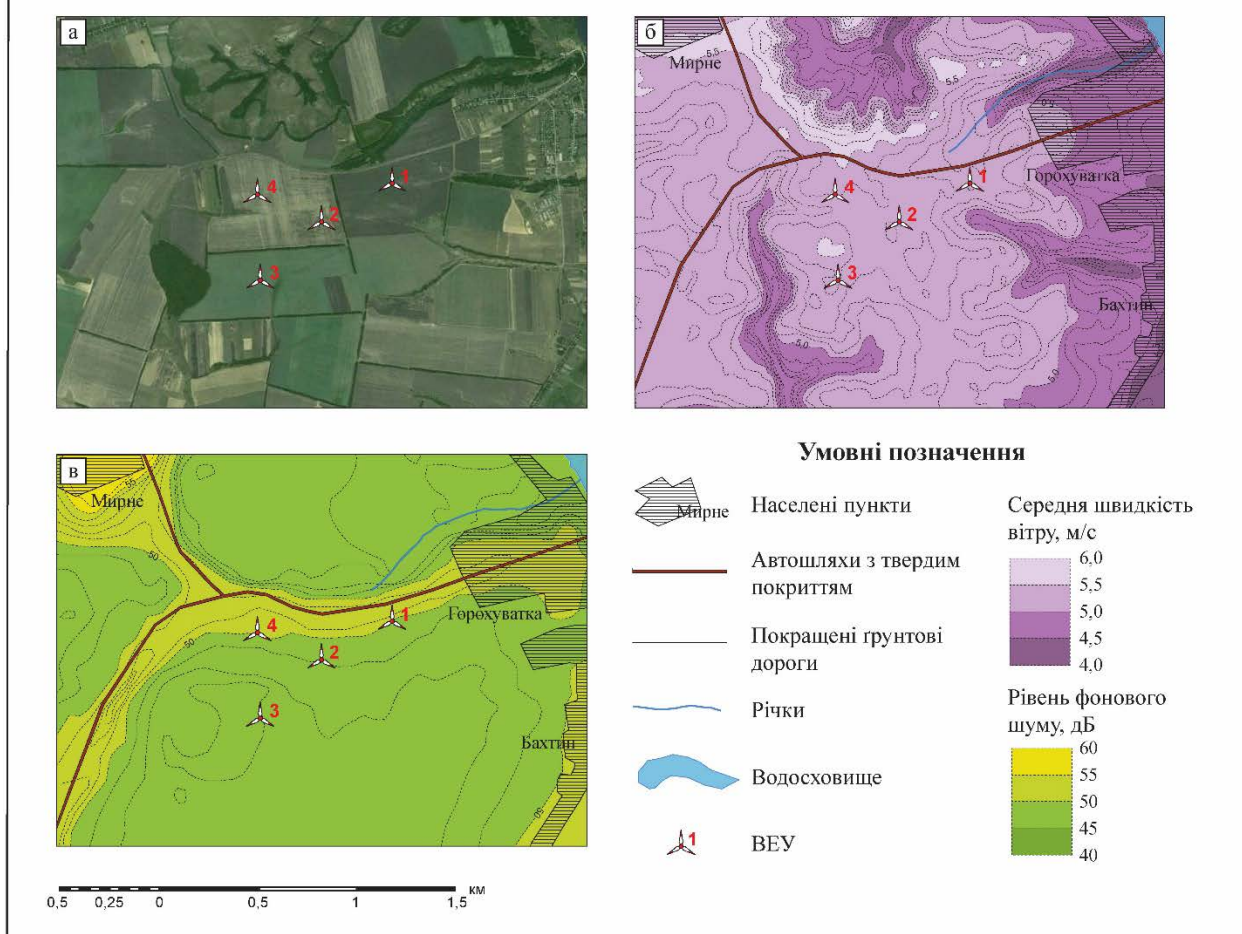


Рис. 4.2 Космічний знімок (а), середньорічні швидкості вітру (б) та рівень фонового шуму (в) для ділянки розташування ВЕУ згідно стратегії 2

Слід звернути увагу на отримані значення виробітку за всіма стратегіями. За однакової сумарної потужності, виробіток енергії більш потужними агрегатами є істотно більшим. Проте, для остаточного вибору даної стратегії необхідно провести економічну оцінку проекту за всіма стратегіями, адже витрати на розвиток за другою стратегією є значно більшими. Тим не менш, значення виробітку за першою стратегією є так само істотними і може давати значний прибуток, із врахуванням меншої вартості вітроагрегатів, підключення, тощо.

Таблиця 4.1

Середньорічний виробіток енергії

	Стратегія 1		Стратегія 2
	<i>За магістральним принципом</i>	<i>За радіальним принципом</i>	
<i>№ БЕУ</i>	<i>Виробіток енергії, ГВт·год</i>	<i>Виробіток енергії, ГВт·год</i>	<i>Виробіток енергії, ГВт·год</i>
1	0,783	0,809	9,222
2	0,774	0,836	9,475
3	0,772	0,822	9,561
4	0,822	0,791	9,592
5	0,804	0,791	-
6	0,769	0,799	-
7	0,734	0,799	-
8	0,750	0,721	-
9	0,747	0,763	-
10	0,758	0,761	-
11	0,826	0,821	-
12	0,849	0,744	-
13	0,857	0,747	-
14	0,861	0,749	-
15	0,822	0,806	-
16	0,791	0,759	-
17	0,804	0,704	-
18	0,848	0,827	-
19	0,823	0,819	-
20	0,798	0,827	-
Всього	15,992	15,695	37,850

В рамках першої стратегії вивчається потенційний виробіток за двома принципами під'єднання. Особливу увагу ми приділяємо магістральному типу, адже він відповідає вимозі часткового розташування на землях несільськогосподарського призначення, врахування «тіньового ефекту» вітроагрегатів та міграції птахів. Але радіальний принцип є більш поширеним у багатьох країнах, тому було вирішено провести розрахунки для

порівняння. Отримані значення вказують на те, що розташування за радіальним принципом спричинює отримання менших показів виробітку, незважаючи на те, що в цьому разі ВЕС розташована на ділянці з вищими швидкостями вітру (не враховувався земельний кадастр – розташовано на сільськогосподарських угіддях).

Таким чином, по результатах розрахунків виробітку енергії, можна стверджувати, що досліджувана ділянка є досить перспективною для розвитку вітроенергетики.

4.3 Моделювання рівнів шуму

В даний час для визначення рівня шуму від вітроустановок користуються тільки розрахунковими методами. Метод безпосередніх вимірів рівня шуму не дає інформації про гучність вітроустановки, так як ефективного методу відділення шуму вітроустановки від шуму вітру в даний момент не знайдено.

Під час аналізу акустичної ситуації важливо врахувати наступні фактори: рівень інтенсивності, частота, розподіл частот і форм джерела шуму; характер місцевості між джерелом та приймачем (розчленування, рельєф, наявність бар'єрів); вид приймача (житлова забудова, території ПЗФ, промислова забудова, тощо). Крім того, важливими є характеристики власне вітроагрегату (такі дані приводять розробники ВЕУ) [196].

В межах роботи акустичний вплив вітроагрегатів аналізувався з кількох напрямів. По перше, це просторовий розподіл шуму від вітроагрегатів. Для цього на основі технічних характеристик відповідних вітроагрегатів, даних щодо рельєфу, розчленування, шорсткості поверхні, у програмному середовищі WindFarm, було розраховано поверхню розподілу рівнів шуму від ВЕУ для швидкості вітру 8 м/с на висоті 10 метрів над землею поверхнею. За цієї середньої швидкості попередньо здійснювалося вимірювання фонового шуму місцевості дослідження. Основою для

розрахунку поверхні слугувало те, що звук у природі розповсюджується сферично. Здійснювалося врахування перешкод (ефект віддзеркалення).

Для першої стратегії (Рис. 4.3, а, б) розрахунок проводився для агрегату Enercon E-40, із значенням шуму 101 дБ на висоті 10 метрів у точці встановлення вітроагрегату. Розрахунок проводився як для варіанту встановлення ВЕС радіального типу, так і для варіанту встановлення магістрального типу.

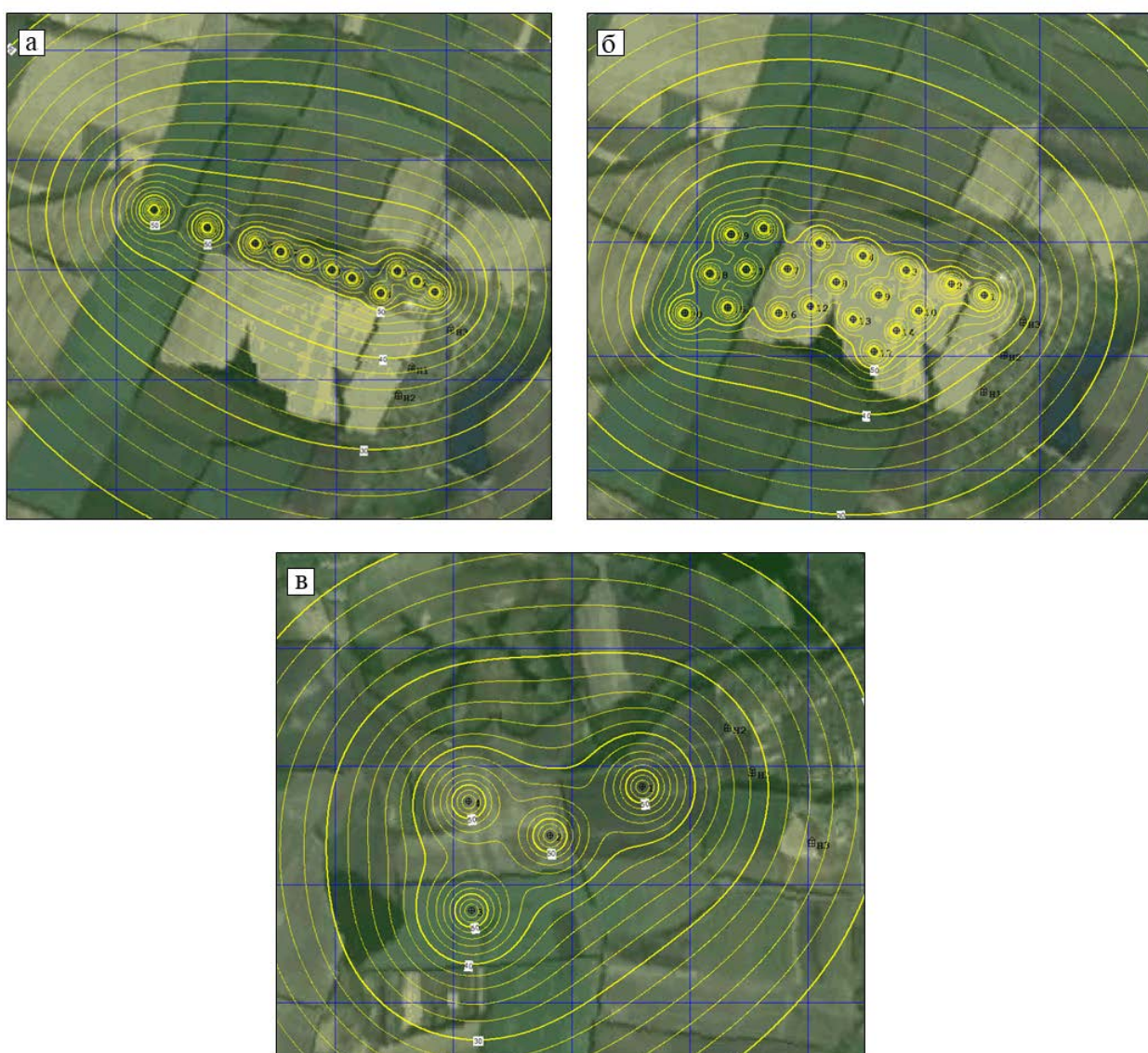


Рис. 4.3 Акустичне навантаження ВЕУ для магістрального (а), радіального (б) типу підключення стратегії 1 та стратегії 2 (в)

Для другої стратегії (Рис. 4.3, в) вихідними даними слугували характеристики Enercon E115: значення вихідного шуму у 107,5 дБ на висоті 10 см над землею поверхнею. За результатами моделювання можна прийти до висновку, що звук від вітроагрегатів на території дослідження є неістотним (менше 20 дБ) на відстані 2 кілометрів від ВЕУ. Але при цьому слід враховувати кількість агрегатів – чим ближче один до одного будуть вони розташовані, тим більшим буде сукупний акустичний вплив.

У цього твердження є й протилежне значення – адже таким чином агрегати будуть займати меншу територію, і можуть бути більше віддалені від населених пунктів. Таким чином, можна побачити, що хоча більш потужні установки (стратегія 2) генерують і вищі рівні звуку, проте, внаслідок їх значної розосередженості та меншої кількості, вже на відстані 1 кілометра вплив вітроелектричної за другою стратегією прирівнюється до акустичного навантаження станції в рамках першої стратегії.

Другий напрям, розрахунок рівнів шуму, який має генеруватися установкою, для конкретних точок розташування житлових будівель. Для цього спочатку було розраховано рівень шуму від агрегату. Далі це значення накладалося на рівень фонового шуму у точці. Через специфічну природу звуку, таке додавання має здійснюватись за формулою (4.2).

$$L_{p_{рез}} = 10 \cdot \log(10^{\frac{L_{p1}}{10}} + 10^{\frac{L_{p2}}{10}} + \dots + 10^{\frac{L_{pn}}{10}}), \quad (4.2)$$

де

$L_{p_{рез}}$ – сумарний рівень звуку;

L_p – рівень виміряного звуку.

Точки виміру рівнів звуку у будівлях обиралися за визначними точками найближчих населених пунктів (крайові точки). Для першої стратегії відраховувалися значення шуму для села Комарівка, для другої – Гороховатка. Фоновий шум на території Комарівки був дещо вищим. Результати розрахунків (Табл. 4.2) дають можливість стверджувати, що акустичний вплив агрегатів за обома стратегіями розташування є незначним

у порівнянні з фоновими рівнями шуму, основною складовою яких є шум вітру. Перевищення дозволених рівнів шуму у разі використання другої стратегії є незначним, для першої стратегії – дещо вищим.

Окремо слід відмітити, що за магістральним принципом акустичний вплив у деяких випадках виявився вищим, ніж у разі розташування за радіальним принципом. Це було спричинене більшою віддаленістю від населених пунктів. Але слід враховувати, що значна концентрація вітроагрегатів може спричинити підвищення сумарного рівня шуму.

Таблиця 4.2

Рівні шуму для конкретних точок житлової забудови

Стратегія 1 (с. Комарівка)			
За магістральним принципом			
<i>№ будівлі</i>	<i>Шум ВЕУ, дБ</i>	<i>Фоновий шум, дБ</i>	<i>Результуючі рівні шуму, дБ</i>
1	38,31	53,9	54,018
2	35,22	53,8	53,860
3	42,38	54,1	54,383
За радіальним принципом			
<i>№ будівлі</i>	<i>Шум ВЕУ, дБ</i>	<i>Фоновий шум, дБ</i>	<i>Результуючі рівні шуму, дБ</i>
1	37,30	53,9	53,994
2	39,34	53,8	53,953
3	40,77	54,1	54,297
Стратегія 2 (с. Гороховатка)			
<i>№ будівлі</i>	<i>Шум ВЕУ, дБ</i>	<i>Фоновий шум, дБ</i>	<i>Результуючі рівні шуму, дБ</i>
1	31,65	50,0	50,063
2	32,48	50,1	50,174
3	25,22	50,0	50,014

Таким чином, було визначено обмеження щодо розміщення вітроагрегатів, а також отримано основу для проведення моделювання варіантів розміщення вітроагрегатів із врахуванням акустичних вимог. Так, якщо значення перевищення у населеній зоні є більшим за 10 дБ, встановлення вітроагрегатів є небажаним і потребує додаткових заходів.

Висновки до розділу 4

1. Розглянуто два варіанти розвитку вітроенергетики на локальній ділянці: із застосуванням двох типів вітроагрегатів: нових та тих, що раніше були у використанні. Розраховано виробіток енергії для кожної стратегії та типу під'єднання. Визначено, що за екстенсивної стратегії виробіток буде більшим. За однакової сумарної потужності, виробіток енергії більш потужними агрегатами є істотно більшим. Проте, для остаточного вибору даної стратегії необхідно провести економічну оцінку проекту за всіма стратегіями, адже витрати на розвиток за другою стратегією є значно більшими. Тим не менш, значення виробітку за першою стратегією є так само істотними і може давати значний прибуток, із врахуванням меншої вартості вітроагрегатів, підключення, тощо.

2. Проведено моделювання акустичного навантаження на місцеве населення для обох стратегій, яке виявило, що навіть за екстенсивної стратегії розвитку вітроенергетики сумарні рівні шуму не будуть перевищувати фонових рівнів на модельній ділянці.

Результати запропонованої методики оцінки вітроенергетичного потенціалу і похідних стратегій представлені у вигляді карт, розрахунків, цифрових даних. Етапність дослідження може стати методичною вказівкою до виконання подібних досліджень для локальних ділянок зі складною орографією і строкатістю ландшафтів.

Основні положення цього розділу викладені у публікаціях автора [209].

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі імплементовано та удосконалено методику оцінки природно-ресурсного потенціалу території для розвитку вітроенергетики на топічному рівні на ділянках з різним поєднанням фізико-географічних умов та з урахуванням необхідної економічної інфраструктури, доведено доцільність впровадження у методику конструктивно-географічного підходу аналізу ландшафтів. Було отримано наступні результати:

1. Теоретично обґрунтовано та запропоновано спосіб обрання варіанту оптимального врахування комплексу фізико-географічних та екологічних чинників при оцінюванні потенціалу вітроенергетики на топічному рівні, у порівнянні з більш високими й загальними регіональним і локальним рівнями, що є необхідним для моделювання розміщення вітроагрегату у певній точці перспективної ділянки.

2. Обґрунтовано вибір та вдосконалення методики моделювання вітропотoku й визначення вітропотенціалу. Обрано модель MS-Micro/3, яка показала найменші показники похибки та забезпечує достатню достовірність результатів для ділянок із складною орографією й строкатою ландшафтною структурою, типовою для Лівобережного Лісостепу України.

3. Проведено порівняльний аналіз основних моделей прогнозування середньої швидкості вітру та величини похибки кожної моделі в залежності від орографії та шорсткості місцевості.

4. Удосконалено й апробовано спосіб отримання параметрів території, потрібних для моделювання вітропотoku, шляхом комплексного застосування польової ландшафтної зйомки, статистичних розрахунків та геоінформаційних технологій.

5. Встановлено, що в складних фізико-географічних умовах Лівобережного Лісостепу України слід ретельно визначати ділянки розміщення вітроагрегатів, так як вітроенергетичний потенціал істотно

залежить від сукупності декількох природних чинників: рельєфу, рослинного покриву та наявності водних об'єктів.

6. Встановлено залежність просторово-часового розподілу вітропотoku від структури рельєфу і співвідношення з нею рози вітрів і, відповідно, енергетичної ефективності вітроагрегату. Визначено, що серед типових ділянок флювіального рельєфу (вододіл, його схил, поверхня водосховища) найбільш перспективною для використання енергії вітру є найвищі ділянки та прибровочні частини навітряних схилів, що розташовані на плакорі, найменші – у тиловому шові схилу й частині водосховища.

7. Хоча підтверджено, що домінуючим параметром при проектуванні виробітку енергії є абсолютна висота місцевості, водночас встановлено, що за умови сприятливого впливу комплексу інших чинників, середні швидкості вітру можуть сягати технологічних значень навіть у точках місцевості, що не характеризуються домінуючими висотами. Потенційний виробіток енергії обернено залежить від шорсткості та прямо – від відкритості пануючому (статистично протягом року) вітрові.

8. Запропоновано методику вибору місця встановлення вітроагрегату шляхом картографічного моделювання та вилучення з подальшого розгляду зон обмеження, спричинених розселенням та інфраструктурою. Складено відповідні карти розповсюдження лімітуючих факторів. Натомість, навіть із врахуванням таких обмежень, загальна площа території, придатної для розвитку вітроенергетики, виявляється достатньою для вибору місця розташування вітроагрегатів із врахуванням найбільшого потенційного виробітку енергії.

9. На основі проведених особисто польових вимірів акустичних рівнів шуму запропоновано використовувати для розміщення вітроагрегатів найбільш акустично навантажені ділянки, де рівень фонового шуму території здатен перекривати шум працюючої вітроелектростанції.

10. Виявлено, що в межах Приоскільської тестової ділянки, що є регіональним шляхом сезонної міграції перелітних птахів, можна

уникнути негативного екологічного ефекту через розташування ланцюга вітроагрегатів перпендикулярно щодо шляху міграції та достатнього віддалення від основних ареалів їх мешкання чи відпочинку (територія поблизу Червонооскільського водосховища). Натомість наголошено, що необхідним є довгостроковий (не менше 1 року) моніторинг місцевої орнітофауни для визначення можливих загроз та заходів для їх усунення.

11. Доведено, що на території, прилеглій до тестової ділянки у Борівському районі Харківської області, існують гарні передумови для розвитку вітроенергетики. Отримані значення потенційного виробітку вітроустановок вказують, що в разі їх встановлення у даній місцевості, загальний час роботи вітроагрегата в перерахунку на повне навантаження становитиме від 1,6 тис. годин в разі встановлення вітроагрегатів типу Enercon E-40, і до 3,7 тис. годин для ВЕУ типу Enercon E-115, що, на думку міжнародних експертів з вітроенергетики, є досить високим показником.

12. Виявлено, що в разі розвитку стратегії, заснованої на використанні старих менш потужних вітроагрегатів, менший виробіток буде економічно компенсовано за рахунок зменшення відводу (закупівлі, оренди) землі, забезпечення більш економної стратегії підключення до електромережі. Але при цьому вибір місць розташування вітроагрегатів мусить уточнюватись відповідно до змін параметрів місцевості та з урахуванням висоти ротора вітрової турбіни.

13. В рамках аналізу електромережі виявлено, що місцеві підстанції, як правило, здатні прийняти максимальну потужність у 10 МВт, що створює обмеження для масштабного розвитку вітроенергетики, але дозволяє побудову середньомасштабних вітроенергетичних станцій.

14. Проведено порівняльний аналіз акустичного впливу вітроелектростанцій в межах різних стратегій розвитку вітроенергетики. Виявлено, що менші значення досягаються при використанні більш потужних вітроагрегатів.

У результаті проведеного дослідження переконливо продемонстровано, що моделювання природних передумов вітроенергетичного потенціалу та його застосування на основі даних дистанційного зондування у поєднанні з польовою зйомкою з використанням сучасних ГІС-технологій дозволяє не тільки пришвидшити процес обробки вхідних даних, але й визначити специфічні закономірності, які не можна було отримати у традиційний спосіб, та забезпечити використання енергії вітру з найбільшою ефективністю.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Абракітов В. Е. Картографування шумового режиму центральної частини міста Харкова / В. Е. Абракітов. – Харків : ХНАМГ, 2010. – 266 с.
2. Агапова Е. Л. Математическое и картографическое моделирование потенциала энергетических ресурсов ветра на региональном и локальном уровне / Е. Л. Агапова, А. А. Волковая // Магілєўскі мерыдыян. – Могилев, 2015. – Том 15-16. – Вып. 1-2 (31-32) – С. 40-48.
3. Адаменко Я. Вітроенергетичні ресурси Карпатського регіону / Я. Адаменко, В. Довгополий, М. Михайлів // Нетрадиційні енергоресурси та екологія України : Зб. наук. праць. – 1996. – С. 23-26.
4. Арманд Д. Л. Экономическое значение и основные принципы использования природных богатств / Д. Л. Арманд, И. П. Герасимов // Природные ресурсы Советского Союза, их использование и воспроизводство. – М., 1963. – 276 с.
5. Атлас природных условий и естественных ресурсов Украинской ССР. – М. : ГУГК, 1987. – 184 с.
6. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України / ред. кол. А. О. Бриль, П. Ф. Васько, В. Т. Довга [та ін.]. – К. : Ін-т електродинаміки НАНУ, 2001. – 41 с.
7. Атлас Харьковской области / [редколегия: И. И. Залюбовский, И. Ю. Левицкий, Н. А. Гвоздь и др.]; под ред. И. С. Руденко – К.: Укргеодезкартография, 1993. – 45 с.
8. Ачкасова О. О. ГІС-модельовання швидкостей вітру центральної частини Вовчанського району Харківської області / О. О. Ачкасова, О. С. Третьяков // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – 2009. – Вип. 9. – С. 13-17.
9. Баймиров М. Е. Математическое моделирование энергии ветра / М. Е. Баймиров // Вестник Астраханского государственного технического университета. – 2007. – № 4. – С. 260-262.

10. Бакланов П. Я. Новые подходы и методы оценки природно-ресурсного потенциала региона / П. Я. Бакланов // Країни і регіони на шляху до збалансованого розвитку : Зб. наук. праць. – 2003. – С. 186-191.

11. Безруких П. П. Ветроэнергетика. Справочное и методическое пособие / П. П. Безруких. – М. : ИД «Энергия», 2010. – 315 с.

12. Безруких П. П. Ветроэнергетика. Вымыслы и факты. Ответы на 100 вопросов / П. П. Безруких. – М. : Институт устойчивого развития Общественной палаты Российской Федерации/Центр экологической политики России, 2011. – 74 с.

13. Беляков П. Ю. Анализ структур и применяемости главных схем электрических соединений современных сетевых ветропарков / П. Ю. Беляков, Р. М. Панов // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2009. – № 4. – С. 39-44.

14. Беранек Л. Л. Акустические измерения / Л. Л. Беранек ; пер. с англ. Н. Н. Андреев. – М. : Изд. иностр. лит., 1952. – 626 с.

15. Бодня О. В. Проектування національних природних парків за інженерним та географічним алгоритмами (на прикладі НПП «Дворічанський») / О. В. Бодня // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – 2011. – Вип. 14. – С. 18-20.

16. Болтенков А. С. Вітроенергетика: стан і перспективи / А. С. Болтенков, С. А. Величко // Географія. – 2008. – № 6. – С. 4-8.

17. Будзьяк. Еколого-економічні проблеми використання нетрадиційних та відновлювальних джерел енергії (на прикладі вітрової енергії): Автореф. Дис. канд. екон. наук / В.М.Будзьяк; Рада по вивч. продукт. сил України. – К., 2000. – 18 с.

18. Вайн Ф. Ветряная электроэнергия / Ф. Вайн, Т. Ван де Веккен // Руководство по практическому применению качества энергии. – 2006. – № 3. – С. 1-20.

19. Васильев Ю. С. Экология использования возобновляющихся энергоисточников / Ю. С. Васильев, Н. И. Хрисанов. – Л. : Издательство Ленинградского университета, 1991. – 343 с.

20. Величко С. А. Природно-ресурсне забезпечення гібридних геліо-вітроенергетичних установок в межах рівнинної території України: дис. на здобуття наук. ступеня канд. геогр. наук: спец. 11.00.11 «Конструктивна географія та раціональне використання природних ресурсів» / С. А. Величко. – Харків, 2006. – 296 с.

21. Величко С. А. Аналіз просторово-часового розподілу швидкостей вітру на території Харківської області як основа оцінки вітроенергетичного потенціалу / С. А. Величко, О. С. Третьяков // Матер. 4-ї Міжнародної міждисциплінарної науково-практичної конференції «Сучасні проблеми гуманізації та гармонізації управління». – Харків : Вид-во ХНУ, 2003. – С. 314-315.

22. Величко С. А. Енергетика навколишнього середовища України (з електронними картами): навч.-метод. посібник для магістрантів / С. А. Величко ; наук. ред. І. Г. Черваньов. – Харків : ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2003. – 52 с.

23. Ветроэнергетика / под ред. Д. де Рензо ; пер. с англ. Я. И. Шефтера. – М. : Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.

24. Ветроэнергетика. Руководство по применению ветроустановок малой и средней мощности / В. М. Каргиев, С. Н. Мартыросов, В. П. Муругов [и др.] ; под ред. В. М. Каргиева. – М. : Интерсоларцентр, 2001. – 62 с.

25. Вітроенергетичні установки та вітроелектричні станції: терміни та визначення понять – ДСТУ 3896:2007. – [Чинний від 2009-01-01]. – К. : Держстандарт України, 2008. – 23 с. – (Національний стандарт України).

26. Водний кодекс України : станом на 1 верес. 2012 р. / Верховна Рада України. – Офіц. вид. – К. : Парламентське видавництво, 2012. – 246 с. – (Бібліотека офіційних видань).

27. Волеваха М. М. Енергетичні ресурси клімату України / М. М. Волеваха, М. І. Гойса. – К. : Наукова думка, 1967. – 137 с.

28. Волковая О. О. Моделирование ветрового потенциала локальной ділянки Лісостепу для потреб вітроенергетики з використанням ГІС-технологій / О. О. Волковая, О. С. Третьяков, І. Г. Черваньов // Український географічний журнал. – Київ, 2015. – №4. – С. 10-16.

29. Волковая О. О. Можливості уточнення та перевірки результатів картографічного моделювання швидкостей вітру на локальному рівні / О. О. Волковая // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2015. – Вип. 22. – С. 40-43.

30. Волковая О. О. Проблеми використання ГІС для моделювання вітроенергетичних ресурсів на локальному рівні / О. О. Волковая // Географія, екологія, туризм: теорія, методологія, практика: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 25-річчю географічного факультету ТНПУ (21-23 травня 2015 року). – Тернопіль: СМП «Тайп», 2015. – С. 143-145.

31. Волковая О. О. Питання просторового моделювання шумового забруднення від ВЕС / О. О. Волковая // Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи: матер. щорічн. наук. конф. студентів та аспірантів, присвяч. пам'яті проф. Г. П. Дубинського, Харків, 6-8 квітн. 2011 р. – Харків, 2011. – Вип. 4. – С. 16-17.

32. Волковая О. О. Моделирование виробітку енергії вітрогенераторами: методичний посібник / О. О. Волковая, О. С. Третьяков. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2013. – 40 с.

33. Волковая О. О. Застосування ГІС при розробці стратегії розвитку вітроенергетики на рівні адміністративного району / О. О. Волковая, О. С. Третьяков // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2013. – Вип. 17. – С. 9-12.

34. Волковая А. А. Геоинформационное моделирование фонового шума местности для определения воздействия ветроэнергетики на окружающую среду / А. А. Волковая // XXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов»: Материалы

международного молодежного научного форума «Ломоносов – 2014» [Электрон. ресурс]. / МГУ им. Ломоносова. – Электрон. данные. – Москва, 2014. – электрон. диск (CD-ROM).

35. Волковая О. О. Дослідження фоновому шуму території для потреб вітроенергетики / О. О. Волковая // Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи: матер. щорічн. наук. конф. студентів та аспірантів, присвяч. пам'яті проф. Г. П. Дубинського, Харків, 5-6 квітн. 2013 р. – Харків, 2013. – Вип. 6. – С. 120-122.

36. Волковая О. О. Територіальний розподіл вітроенергетичного потенціалу: вплив географічних чинників / О. О. Волковая // Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи: матер. щорічн. наук. конф. студентів та аспірантів, присвяч. пам'яті проф. Г. П. Дубинського, Харків, 5-6 квітн. 2012 р. – Харків, 2012. – Вип. 5. – С. 13-14.

37. Волковая О. О. Моделювання просторового розподілу фоновому шуму для потреб вітроенергетики / О. О. Волковая // Охорона довкілля: матер. IX Всеукр. наук. Таліївських читань, Харків, 19-29 квітн. 2013 р. – Харків, 2013. – С. 39-41.

38. Геоінформаційне картографування в Україні: концептуальні основи і напрями розвитку / Л. Г. Руденко, Т. І. Козаченко, Д. О. Ляшенко та ін. – К.: Наук. думка, 2011. – 104 с.

39. Герасимов И. П. Советская конструктивная география. Задачи, подходы, результаты / И. П. Герасимов // Проблемы конструктивной географии. – М.: Наука. – 1976. – 208 с.

40. Германович В. Альтернативные источники энергии. Практические конструкции по использованию энергии ветра, солнца, воды, земли, биомассы / В. Германович, А. Турилин. – СПб.: Наука и техника, 2011. – 320 с.

41. Голиков А. П. Харьковская область, региональное развитие: состояние и перспективы: монография / А. П. Голиков, Н. А. Казакова, М. В. Шуба; под ред. В. С. Бакирова. – Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. – 224 с.

42. Горлов П. І. Аналіз міжнародного досвіду вивчення впливу вітрових електростанцій на птахів / П. І. Горлов, В. Д. Сіохін // Біологічний вісник МДПУ. – 2012. – № 1. – С. 37-44.

43. Гродзинський М. Д. Пізнання ландшафту: місце і простір. Монографія. У 2-х кн. / М. Д. Гродзинський. – К. : КНУ, 2005. – Т.1. – 431 с.

44. Гук М. І. Клімат Української РСР / М. І. Гук, І. К. Половко, Г. Ф. Прихотько. – К. : Радянська школа, 1958. – 72 с.

45. Двинских С. А. Экология лесопарковой зоны города / Двинских С. А., Ларченко О. В., Максимович Н. Г., Малеев К. И.; под общ. ред. С. А. Двинских. – СПб. : Наука, 2011. – 154 с.

46. Дмитриевский Ю. Д. Методы количественной оценки природных и трудовых ресурсов : учеб. пособие / Ю. Д. Дмитриевский, А. А. Долинин. – Л.: ЛФЭИ, 1980. – 34 с.

47. Домбровская О. И. Синоптические условия сильного ветра на Украине / О. И. Домбровская // Тр. УкрНИГМИ. – 1959. – Вып. 10. – С. 3-14.

48. Екологічний атлас Харківської області. Електронна версія / під ред. А. В. Гриценко. [Електронний ресурс]. – Х.: УкрНДІЕП, 2002. – 1 електрон. опт. диск (CD-ROM): 12 см. – Системні вимоги: Pentium-266; 32 Mb RAM; CD-ROM; Windows 98/2000/NT/XP – назва з контейнера.

49. Енергетична стратегія України до 2030 року [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>.

50. Жовмір М. М. До питання про доцільність будівництва вітрових електростанцій в Україні / М. М. Жовмір, С. В. Шульга // Енергетика и электриф. – 2000. – № 4. – С.36-40.

51. Заварина М. В. Ветер / М. В. Заварина. – Л. : Гидрометеиздат, 1951. – 59 с.

52. Иллюстрированный справочник по возобновляемой энергетике [Электронный ресурс] / В. М. Каргиев, С. Н. Мартиросов, В. П. Муругов [и др.]. – Режим доступа : <http://www.intersolar.ru>.

53. Исаченко А. Г. Теория и методология географической науки : учеб. для студ. вузов / А. Г. Исаченко. – М. : Издательский центр «Академия», 2004. – 400 с.

54. Исаченко А. Г. Ландшафтоведение и физико-географическое районирование: Учеб. / А. Г. Исаченко. – М.: Высш. шк., 1991. – 366 с.

55. Ісаїв Л. Борівщина в минулому та сьогодні : іст.-геогр. нарис / Л. Ісаїв. – Балаклія : Балдрук, 2007. – 286 с.

56. Картографирование ресурсов возобновляемых источников энергии (на примере энергии ветра) / [Новаковский Б. А., Прасолова А. И., Киселева С. В., Рафикова Ю. Ю.] // Геодезия и картография. – 2012. – № 11. – С. 31-39.

57. Кивилуома Ю. Оценка энергосистемы для целей развития ветроэнергетики в Казахстане. Финальный отчет / Ю. Кивилуома, С. Уски-Йоутсенвуо, Х. Холттинен. – Астана, 2011. – 65 с.

58. Киселева С. В. Использование климатических баз данных для оценки природно-ресурсного и технического потенциала ветровой энергии / С. В. Киселева, Ю. Ю. Рафикова // Вестник аграрной науки Дона. – 2010. – Т. 7, № 1. – С. 32-40.

59. Кінаш Р. І. Кореляційний зв'язок між параметрами вітру у Західній Україні для прискореного обстеження площадок під ВЕС / Р. І. Кінаш, О. М. Бурнаєв, В. А. Коваленко // Нетрадиц. і понов. джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні : Матер. І Міжнар. наук.-практ. конф., Львів, 31 трав.-1 черв. 2001. – Львів, 2001. – С. 86-90.

60. Кліматичний Кадастр України / Державна гідрометеорологічна служба УкрНДГМІ. Центральна Геофізична Обсерваторія. – Ч. 2. Атмосферний тиск і вітер. – К., 2006.

61. Клімат України / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. – К. : Видавництво Раєвського, 2003. – 343 с.

62. Козин Л. Ф. Современная энергетика и экология: проблемы и перспективы / Л. Ф. Козин, С. В. Волков. – К. : Наукова думка, 2006. – 312 с.

63. Колбовский Е. Ю. Ландшафтоведение: учебное пособие / Е. Ю. Колбовский. – М.: Академия, 2008. – 336 с.
64. Константинов А. Р. Влияние лесных полос на ветер и турбулентный обмен в атмосфере / А. Р. Константинов, П. А. Воронцов // Тр. УкрНИГМИ. – 1961. – Вып. 26. – С. 99-110.
65. Конструктивно-географические основы рационального природопользования в Украинской ССР. Теоретические и методические исследования / А.М.Маринич, И.А.Горленко, Л.Г.Руденко и др. Отв. ред. А. М. Маринич, М.М. Паламарчук. – К.: Наук. думка, 1990.– 200 с.
66. Коробейников А. А. Система мониторинга шумового загрязнения окружающей среды / А. А. Коробейников // Интеллектуальные системы в производстве. – 2008. – № 2. – С. 64-71.
67. Косовец О. О. Визначення параметрів вітру в Держкомгідрометі України / О. О. Косовец, Н. І. Швень // Энергетика и электриф. – 2000. – № 12. – С. 27-29.
68. Кошляков О. Є. Картографічне моделювання в практиці екологічного моніторингу та екологічного управління / Кошляков О. Є., Диняк О. В., Кошлякова І. Є. // Матер. «III-го Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю». – Вінниця, 2011. – Т. 1. – С. 202-204.
69. Крауклис А. А. Особенности географических градаций топического порядка / А. А. Крауклис // Топологические аспекты учения о геосистемах. – Новосибирск : Наука, 1974. – С. 87-137.
70. Кречмер С. Экспериментальные исследования ветрового и температурного полей в атмосфере / С. Кречмер – Л. : Гидрометеиздат, 1951. – 203 с.
71. Кузнецов М. П. Методи прогнозування виробітку електроенергії вітровими електростанціями / М. П. Кузнецов // Відновлювана енергетика. – 2010. – № 3. – С. 42-48.
72. Куница М. Н. Природно-селитебные отношения в регионе: процессы и функции / М. Н. Куница // Вестник БГУ. –2012. – №4 (2). – С.171-175.

73. Ландсберг Г. Е. Климат города / Г. Е. Ландсберг; пер. с англ. А. Я. Фредмана; под. ред. А. С. Дубова. – Л. : Гидрометеиздат, 1983. – 248 с.
74. Левенко А. С. Энергия солнца и ветра. Расчеты, проектирование и использование экологически чистых преобразователей энергии / А. С. Левенко. – Днепропетровск : ИМА-пресс, 2003. – 64 с.
75. Лукашов Г. А. Методические подходы к оценке энергетического потенциала региона // Нефтегазовое дело. – 2011. – № 2. – С. 347-354 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.ogbus.ru> (дата обращения: 11.01.2016).
76. Мамедов Ф. Ф. Перспективы использования энергии ветра в условиях Азербайджана / Ф. Ф. Мамедов, У. Ф. Самедова // Альтернативная энергетика и экология. – 2009. – № 7 (75). – С. 52-64.
77. Марков С. Б. Опыт построения карт шума в условиях сложной городской застройки с помощью программного комплекса EXNOISE / С. Б. Марков // Автотранспорт : от экологической политики до повседневной практики : Матер. IV Междунар. науч.-практ. конф. – СПб. : МАНЭБ, 2008. – С. 42-48.
78. Минин В. А. Перспективы освоения ресурсов ветровой энергии Кольского полуострова / В. А. Минин, Г. С. Дмитриев, И. В. Минин // Изв. АН. Энергетика. – 2001. – № 1. – С. 45-53.
79. Мировое хозяйство и международные экономические отношения: учебное пособие для вузов / А. П. Голиков, Г. П. Артёменко, Н. В. Багров [и др.]. – Симферополь: Сонат, 2003. – 432 с.
80. Мокін Б. І. Шляхи підвищення ефективності вітроенергетичних установок в місцевостях з малою потужністю вітру / Б. І. Мокін // Тези доп. VII Міжнар. наук.-практ. конф. «Відновлювана енергетика XXI століття». – Крим : МНТЦ вітроенергетики НАН України, 2006. – С. 71.
81. Молодан Я. Є. Аналіз просторових обмежень будівництва вітрових електростанцій з використанням ГІС-технологій / Я. Є. Молодан // Охорона довкілля : Матер. IX Всеукр. наук. Талійських читань, Харків, 19-29 квіт. 2013. – Харків, 2013. – С. 118-121.

82. Морфологическая структура географического ландшафта / [Г. Н. Анненская, А. А. Видина, Н. А. Солнцев и др.]. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1962. – 54 с.

83. Національна доповідь України про стан навколишнього природного середовища [Електронний ресурс]. – Режим доступу : http://nature.org.ua/nr98/ukrvers/indicators/map_18.htm.

84. Національний атлас України / ред. кол. Б. Є. Патон, Т. Г. Руденко, А. П. Шпак [та ін.]. – К. : ДНВП «Картографія», 2007 . – 435 с.

85. Нейман В. О. Методика визначення економічної ефективності роботи ВЕС / В. О. Нейман, Р. Є. Кануннікова // Енергетика и электриф. – 2000. – № 12. – С. 10-13.

86. Новожилов М. А. Оценка ветроэнергетического потенциала районов побережья озера Байкал / М. А. Новожилов, С. В. Соломин // География и прир. ресурсы. – 1994. – № 2. – С. 55-58.

87. Обзор рынка ветроэнергетики Украины 2015 [Электронный ресурс] / УВЕА. – Режим доступа : <http://www.uwea.com.ua/>.

88. Окулов В. Л. Предел Беза-Жуковского для максимального значения коэффициента использования энергии ветра / В. Л. Окулов, Г. А. М. ван Куик // Альтернативная энергетика и экология. – 2009. – № 9 (77). – С. 106-111.

89. Олійник Я. Б. Основи екології / Я. Б. Олійник, П. Г. Шищенко, О. П. Гавриленко. – К. : Знання, 2012. – 558 с.

90. Ордоди М. Дельтапланеризм / М. Ордоди ; пер. с венг. Р. М. Кобаля, Г. Коцки; под ред. А. В. Кареткина. – М. : Машиностроение, 1984. – 168 с.

91. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д. : НГУ, 2015. – 335 с.

92. Офіційний сайт Vaisala [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.vaisala.com/en>.

93. Офіційний сайт Державне підприємство «Національна енергетична компанія «Укренерго» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.ukrenergo.energy.gov.ua>.

94. Офіційний сайт АК «Харківобленерго» [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.oblenergo.kharkov.ua>.

95. Охрана ландшафтов. Толковый словарь. – М. : Прогресс, 1982. – 272 с.

96. Пархоменко О. М. Вітроенергетика. Перспективи та проблеми розвитку / О. М. Пархоменко, Я. О. Серіков // Світлотехніка та електроенергетика. – 2010. – № 1. – С. 66-70.

97. Перспективы мировой ветроэнергетики [Электронный ресурс] / Доклад Гринпис и GWEC. – 2006. – 31 с. – Режим доступа : <http://www.greenpeace.org/russia/ru/press/reports/768786/>.

98. Петлін В. М. Синергетичні залежності в організації природних територіальних систем / В. М. Петлін. – Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2013. – 395 с.

99. Петлін В. М. Теорія природних територіальних систем : [у 4 т.]. Т. 2 : Природні територіальні системи: концепції, парадигми, організація / В. М. Петлін. – Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2016. – 624 с.

100. Петлін В. М. Теорія природних територіальних систем : [у 4 т.]. Т. 3 : Ентропійно-синергетичні основи організації, класифікація і типологія, мінливість, саморегулювання і самоорганізація / В. М. Петлін. – Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2016. – 540 с.

101. Петлін В. М. Теорія природних територіальних систем : [у 4 т.]. Т. 4 : Теоретичні основи антропогенного використання природних територіальних систем. Методика і сучасні напрямки досліджень / В. М. Петлін. – Львів : Видавничий центр ЛНУ імені Івана Франка, 2016. – 436 с.

102. Поздняков А. В. Самоорганизация в развитии форм рельефа / А. В. Поздняков, И. Г. Черванев. – М. : Наука, 1990. – 204 с.

103. Природно-заповідний фонд Харківської області [Електронний ресурс] / О. В. Клімов, О. Г. Вовк, Д. В. Беседіна [та ін.]. – Режим доступу : <http://harkiv.ru>. – Назва з титул. екрану.

104. Прусенков А. С. Основные типы полей ветра и волн в северо-западной части Черного моря / А. С. Прусенков // Метеорология, климатология и гидрология. – 1978. – Вып. 14. – С. 119-122.

105. Пташиний світ України [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://pernatidruzi.org.ua>.

106. Рамазанова З. У. Методика и результаты долгосрочного прогнозирования ветрового энергетического потенциала территорий Крыма / З. У. Рамазанова, К. А. Скульский, Б. Г. Тучинский // Проблемы загальної енергетики. – 2005. – № 12. – С. 40-43.

107. Ребок В. Энергетическое право Украины : краткое руководство / В. Ребок, Е. Бондаренко, Д. Трайс. – К. : Arzinger, 2009. – 67 с.

108. РЛС для обнаружения птиц и летучих мышей [Электронный ресурс] / Компания DeTest. – Режим доступа : <http://www.detect-inc.ru>.

109. Руденко В. П. Географія природно-ресурсного потенціалу України : підручник / В. П. Руденко. – Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2010. – 552 с.

110. Руденко С. В. Природно-ресурсний потенціал фізико-географічних регіонів України: суспільно-географічне дослідження : автореф. дис... канд. геогр. наук: 11.00.02 / С. В. Руденко. – Київ : Б.В., 2013 . – 20 с.

111. Рыженков М. А. Экологические аспекты ветроэнергетики [Электронный ресурс] / М. А. Рыженков, Б. В. Ермоленко, Г. В. Ермоленко // Теплоэнергетика. – 2011. – №11. – С. 72–79. – Режим доступа : <http://rawi.ru/wp-content/uploads/Ermolenko.pdf>.

112. Сахно Б. Г. Комплексна програма будівництва вітрових електростанцій в Україні / Б. Г. Сахно // Нетрадиц. і понов. джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні : Матер. І Міжнар. наук.-практ. конф., Львів, 31 трав.-1 черв. 2001. – Львів, 2001. – С. 124-126.

113. Сиротюк М. І. Поновлювані джерела енергії: навч. посібник / М. І. Сиротюк. – Львів: Видавничий центр Львівського національного університету ім. І.Франка, 2008. – 247 с.
114. Смердов А. А. Статистичні характеристики швидкості вітру в регіоні м. Полтави / А. А. Смердов, Є. М. Бульба // Вісник Полтавської державної аграрної академії. – 2011. – № 1. – С. 153–157.
115. Советский энциклопедический словарь / под ред. А. М. Прохорова. – 3-е изд. – М.: Советская энциклопедия, 1985. – 1600 с.
116. Сочава В. Б. Геотопология как раздел учения о геосистемах / В. Б. Сочава // Топологические аспекты учения о геосистемах. – Новосибирск: Наука, 1974. – С. 3-86.
117. Справочник по климату СССР: Вып. 10. Украинская ССР. Часть 3. Ветер / под ред. Л. С. Березина. – Л.: Гидрометиздат, 1967. – 682 с.
118. Строительство в сейсмических районах Украины. – ДБН В .1.1-12:2006. – [Введ. 2007-01-02]. – К.: Укрархбудинформ, 2006. – 52 с. – (Издание официальное).
119. Тарасов С. Обчислювальна гідродинаміка на службі вітроенергетики / С. Тарасов, Д. Редчиць, О. Польовий // Світогляд. – 2010. – № 6 – С. 24.
120. Твайделл Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 392 с.
121. Точений В. А. Рівноважний підхід до оцінювання параметра вертикального профілю вітру / В. А. Точений // Відновлювана енергетика. – 2010. – № 3. – С. 39.
122. Тучинський Б. Г. Метод оцінки виробітку електроенергії вітроелектричною установкою за даними електронної реєстрації характеристик вітру / Б. Г. Тучинський // Нетрадиц. енергетика в ХХІ веке: Матер. II Междунар. конф., Крым, Ялта, 17-22 сент. 2001. – К., 2001. – С. 95-98.
123. Фурман А. С. Ветроэлектрические станции. Экологические аспекты / А. С. Фурман // Нетрадиц. і понов. джерела енергії як альтернативні

первинним джерелам енергії в регіоні : Матер. І Міжнар. наук.-практ. конф., Львів, 31 трав.-1 черв. 2001. – Львів, 2001. – С. 132-134.

124. Харитонов В. П. Автономные ветроэлектрические установки / В. П. Харитонов. – М. : ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.

125. Харьковская область : Природа, население, хозяйство / А. П. Голиков, В. П. Бабич, А. Л. Сидоренко [и др.] ; под. ред. А. П. Голикова, А. Л. Сидоренко. – 2-е изд., перераб. и доп. – Харьков : Бизнес Информ, 1997. – 288 с.

126. Хілько В. А. Основні принципи визначення економічної ефективності капітальних вкладень у вітрові електростанції / В. А. Хілько // Нетрадиц. і понов. джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні : Матер. І Міжнар. наук.-практ. конф., Львів, 31 трав.-1 черв. 2001. – Львів, 2001. – С. 137-141.

127. Холодов Д. Ефективне використання відновлюваних джерел енергії у Приморському регіоні / Д. Холодов // Економіка України. – 2000. – № 2. – С. 74–76.

128. Черванев И. Г. Математические методы в географии / И. Г. Черванев, А. П. Голиков, А. М. Трофимов. – Харьков: Изд-во при Харьков. гос.ун-те, 1986. – 143 с.

129. Червяков В. А. Концепция поля в современной картографии / В. А. Червяков. – Новосибирск : Наука, 1978. – 151 с.

130. Шаблій О. І. Математичні методи в економічній географії : навч. посібник / О. І. Шаблій. – Львів : Вища шк., 1984. – 136 с.

131. Швебс Г.И. Концепция природно-хозяйственных территориальных систем и вопросы рационального природоиспользования / Г. И. Швебс // География и природные ресурсы. – 1987. – № 4. – С. 30-38.

132. Шефтер Я. И. Использование энергии ветра / Я. И. Шефтер. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 200 с.

133. Шошин В. М. О связи сдвига ветра со стратификацией температуры / В. М. Шошин // Тр. УкрНИИ Госкомгидромета. – 1985. – Вып. 210. – С. 95-99.

134. Шошин В. М. Вертикальные сдвиги ветра в аэропортах Украины / В. М. Шошин, Л. А. Галицкая, Д. Н. Ткаченко // Тр. УкрНИИ Госкомгидромета. – 1986. – Вып. 219. – С. 92-104.

135. Шпак М. В. Природно-ресурсний потенціал Дніпропетровської області в умовах антропогенного пресингу: Автореф. дис ... канд. геогр. наук: 11.00.11 / М. В. Шпак. – Харків: Б.в., 2001. – 20 с.

136. Шульга С. В. Методика розташування ВЕУ в умовах дефіциту даних по вітру / С. В. Шульга, М. А. Бурак, О. В. Пепелов // Нетрадиц. і понов. джерела енергії як альтернативні первинним джерелам енергії в регіоні: Матер. І Міжнар. наук.-практ. конф., Львів, 31 трав.-1 черв. 2001. – Львів, 2001. – С. 153-157.

137. Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий. – ГОСТ 23337-78. – [Введ. 1979-07-01]. – М.: Стандартиформ, 2008. – 44 с. – (Государственный стандарт Союза ССР).

138. Шум. Опис, вимірювання і оцінка шуму на місцевості. – ДСТУ 31296.1:2007. – [Чинний від 2008-04-01]. – К.: Держспоживстандарт України, 2009. – 25 с. – (Національний стандарт України).

139. Щербина О. Енергія вітру / О. Щербина // Енергія для всіх: Техн. довідник. – 2000. – Розд. 2. – С. 33-45.

140. Энергетика сегодня и завтра / под ред. А. Ф. Дьякова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 344 с.

141. Энергия ветра: оценка технического и экономического потенциала / Л. Хоффман, Г. Обермайер, А. Ярас, Л. Ярас; пер. с англ. Я. И. Шефтер. – М.: Мир, 1982. – 256 с.

142. Энергия окружающей среды и строительное проектирование / пер. с англ. Г. А. Ивановой; под ред. В. Н. Богословского, Л. М. Махова. – М.: Стройиздат, 1983. – 136 с.

143. Энциклопедия климатических ресурсов Российской Федерации / под ред. Н. В. Кобышевой, К. Ш. Хайрулина. – СПб.: Гидрометеиздат, 2005. – 319 с.

144. Эффективное энергоиспользование и альтернативная энергетика / под ред. А. К. Шидловского. – К. : Українські енциклопедичні знання, 2000. – 302 с.
145. Abbasi S. A., Abbasi T. Impact of wind-energy generation on climate : A rising spectre // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2016. – Т. 59. – Р. 1591-1598.
146. AnemoScope Wind Energy Simulation Toolkit [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.anemoscope.ca>. – Назва з титул. екрану.
147. Athanasios Angelis-Dimakis, Markus Biberacher, Javier Dominguez. Methods and tools to evaluate the availability of renewable energy sources // *Renewable and Sustainable Energy Reviews.* – 2011. – №. 15. – Р. 1182-1200.
148. Erickson W. P. Avian Collisions with Wind Turbines / W. P. Erickson, G. D. Johnson, M. D. Strickland [and others] // *National Wind Coordinating Committee (NWCC) Resource Document.* – 2001. – 67 p.
149. Balynska M. O. The application of difference image technique for change detection on the territory of Mezin national nature park / M. O. Balynska, O. S. Tretyakov, O. O. Volkovaia // *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії.* – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2015. – Вип. 21. – С. 58-66.
150. Banik M. V. Main spring stopover sites of migrating geese in the Kharkiv region, North-eastern Ukraine // *Vogelwelt.* – 2008. – Vol. 129. – P. 195-200.
151. Bañuelos-Ruedas F., Camacho C. A., Rios-Marcuello S. Methodologies Used in the Extrapolation of Wind Speed Data at Different Heights and Its Impact in the Wind Energy Resource // *INTECH Open Access Publisher.* – 2011. – Chapter 4. – P. 97-114.
152. Beaucage P. Evaluation of four numerical wind flow models for wind resource mapping // *Wind Energy.* – 2014. – Vol. 17. – №. 2. – P. 197-208.
153. Bechard M. J. Griffon vulture mortality at wind farms in southern Spain: Distribution of fatalities and active mitigation measures // *Biological Conservation.* – 2012. – Vol. 147. – P. 184-189.
154. Best Practice Guidelines for the Irish Wind Energy Industry / Irish Wind Energy Association. – Naas, 2012. – 123 p.

155. Best practice guidelines for implementation of wind energy projects in Australia / Auswind. – Melbourne, 2006. – 126 p.
156. Bowen A. J. WAsP prediction errors due to site orography / A. J. Bowen, N. G. Mortensen. – Roskilde : Riso National Laboratory, 2001. – 66 p.
157. Calvert K., Pearce J. M., Mabee W. E. Toward renewable energy geo-information infrastructures: Applications of GIScience and remote sensing that build institutional capacity As accepted by Renewable and Sustainable Energy Reviews, doi: 10.1016/j.rser.2012.10.024.
158. Caporale D., De Lucia C. Social acceptance of on-shore wind energy in Apulia Region (Southern Italy) // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2015. – Vol. 52. – P. 1378-1390.
159. Cataldo J. Roughness terrain consideration in a wind interpolation numerical model / J. Cataldo, M. Zeballos // 11th Americas Conference on Wind Engineering. – San Juan, Puerto Rico, 2009.
160. Cristea C., Jocea A. F. GIS Application for Wind Energy // EENVIRO-YRC 2015. – 2016. – Vol. 85. – P. 132-140.
161. Crockford A. Wind Profiles and Forests / A. Crockford, Shiu-Yeung Hui. – Denmark : Technical University of Denmark, 2007. – 90 p.
162. Delicado A., Figueiredo E., Silva L. Community perceptions of renewable energies in Portugal: Impacts on environment, landscape and local development // Energy Transit. Eur. Emerg. Chall. Innov. Approaches Possible Solut. – 2016. – Vol. 13. – P. 84-93.
163. Dong L. Wind power day-ahead prediction with cluster analysis of NWP // Renew. Sustain. Energy Rev. – 2016. – Vol 60. – P. 1206-1212.
164. Dutilleux P., Gabriel J. Assessment of the acoustic noise issues of wind farm projects in the light of the experience gained in Germany. – Wilhelmshaven: DEWI GmbH, 2008.
165. Elkinton M. R. An Investigation of Wind-shear Models and Experimental Data Trends for Different Terrains // Wind Engineering. – 2006. – Vol. 30. – № 4. – P. 341-350.

166. EMD International A/S [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.emd.dk/>. – Назва з титул. екрану.
167. Enevoldsen P. Onshore wind energy in Northern European forests : Reviewing the risks // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2016. – Vol. 60. – P. 1251-1262.
168. Environmental Noise – Nærum : Bruel&Kjaer, 2001. – 60 p.
169. Gade S. Sound Intensity (Theory) / S. Gade. – Nærum : Bruel&Kjaer, 1982. – 39 p.
170. Garcia-Heller V., Espinasa R., Paredes S. Forecast study of the supply curve of solar and wind technologies in Argentina, Brazil, Chile and Mexico // *Renew. Energy.* – 2016. – Vol. 93. – P. 168-179.
171. Getting Started with WAsP 7 / E. L. Petersen, N. G. Mortensen, L. Landberg, I. Troen. – Roskilde : Riso National Laboratory, 2001. – 58 p.
172. Global Wind Atlas [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://globalwindatlas.info/area/Ukraine>.
173. Grassi S., Junghans S., Raubal M. Assessment of the wake effect on the energy production of onshore wind farms using GIS // *Appl. Energy.* – 2014. – Vol. 136. – P. 827-837.
174. Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation [Електронний ресурс] / WMO-№. 8. Geneva. – Режим доступу : http://library.wmo.int/opac/index.php?lvl=notice_display&id=12407#.VYmr9WTwmGM.
175. Hansen A. D., Sørensen P., Blaabjerg F., Becho J. Dynamic modelling of wind farm grid interaction // *Wind engineering.* – 2002. – №. 4. – P. 191-208.
176. Haslet J. Space-time modeling with long-memory dependence : assessing Ireland's wind power resource // *Applied Statistics.* – 1989. – № 1. – P. 1-50.
177. IEC 61400-11 2002-12 «Wind Turbine Generator Systems – Part 11: Acoustic Noise Measurement Techniques».
178. Johnson G. L. Wind Energy Systems / G. L. Johnson. – Kansas : Kansas State University, 2006. – 449 p.

179. Kaplan Y. A. Overview of wind energy in the world and assessment of current wind energy policies in Turkey // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2015. – Vol. 43. – P. 562-568.
180. Kiranoudis C. T., Voros N. G., Maroulis Z. B. Short-cut design of wind farms // *Energy Policy.* – 2001. – Vol. 29. – № 7. – P. 567-578.
181. Kirk-Davidoff D. B., Keith D. W. On the Climate Impact of Surface Roughness Anomalies // *Atmospheric Sci.* – 2008. – Vol. 65. – № 7. – P. 2215-2234.
182. Kumar Y. Wind energy: Trends and enabling technologies // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2016. – Vol. 53. – P. 209-224.
183. Kurbatova T., Khlyap H. State and economic prospects of developing potential of non-renewable and renewable energy resources in Ukraine // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2015. – Vol. 52. – P. 217-226.
184. Langer K. A qualitative analysis to understand the acceptance of wind energy in Bavaria // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2016. – Vol. 64. – P. 248-259.
185. Lee N. Environmental Assessment in Developing and Transitional Countries / N. Lee, C. George. – Wiley New York, 2002. – 290 p.
186. Manwell J. F., McGowan J. G., Rogers A. L. Aerodynamics of Wind Turbines // *Wind Energy Explained.* – 2009. – P. 91-155.
187. Measurements on and modeling of offshore wind farms / ed. by S. Frandsen. – Roskilde: Riso national laboratory, 1996. – 100 p.
188. Möller B. Spatial analyses of emerging and fading wind energy landscapes in Denmark // *For. Transitions Wind Power Plan. Landsc. Publics.* – 2010. – Vol. 27. – № 2. – P. 233-241.
189. Monforti F., Gaetani M., Vignati E. How synchronous is wind energy production among European countries? // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2016. – Vol. 59. – P. 1622-1638.
190. Mudasser M., Yiridoe E. K., Corscadden K. Cost-benefit analysis of grid-connected wind – biogas hybrid energy production, by turbine capacity and site // *Renew. Energy.* – 2015. – Vol. 80. – P. 573-582.

191. Nadaï A., Labussière O. Wind power planning in France (Aveyron), from state regulation to local planning // *Land Use Policy*. – 2009. – Vol. 26. – № 3. – P. 744-754.

192. Performance analysis of wind resource assessment programs in complex terrain [Електронний ресурс] / A. Llombart, A. Talayero, A. Mallet, E. Telmo. – International conference on renewable energies and power quality'06. – Режим доступу : <http://www.icrepq.com>. – Назва з титул. екрану.

193. Renne D. S. Meteorological field measurements at potential and actual wind turbine sites [Електронний ресурс] / D. S. Renne, W. F. Sandusky, D. L. Hadley. – Pacific Northwest Laboratory. – Richland, Washington, 1982. – Режим доступу : <http://rredc.nrel.gov/wind/pubs/candidate/>.

194. Río P. del, Burguillo M. An empirical analysis of the impact of renewable energy deployment on local sustainability // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2009. – Vol. 13. – № 6–7. – P. 1314-1325.

195. Ritter M. Designing an index for assessing wind energy potential // *Renew. Energy*. – 2015. – Vol. 83. – P. 416-424.

196. Rogers A. L. Wind Turbine Acoustic Noise / A. L. Rogers, J. F. Manwell, S. Wright. – Amherst : Renewable Energy Research Laboratory, 2006. – 26 p.

197. Rudenko V. P. Revaluation of the Natural-Resource Potential of Ukraine // *Geography and Natural Resources*. – 2011. – Vol. 32.– №1. – P. 95-97.

198. Ruggiero S., Onkila T., Kuittinen V. Realizing the social acceptance of community renewable energy: A process-outcome analysis of stakeholder influence // *Energy Res. Soc. Sci.* – 2014. – Vol. 4. – P. 53-63.

199. Satellite data to improve the accuracy of statistical models for wind resource assessment, Fabio Veronesi, Stefano Grassi, Martin Raubal – Institute of Cartography and Geoinformation – ETH Zürich 2015.

200. Satkin M. Multi criteria site selection model for wind-compressed air energy storage power plants in Iran // *Renew. Sustain. Energy Rev.* – 2014. – Vol. 32. – P. 579-590.

201. Siyal S. H. Wind energy assessment considering geographic and environmental restrictions in Sweden : A GIS-based approach // *Energy*. – 2015. – Vol. 83. – P. 447-461.

202. Surface meteorology and Solar Energy (SSE) Release 6.0 Methodology [Електронний ресурс] / [P. W. Stackhouse, W. S. Chandler, T. Zhang and others] – June 2, 2016. – Режим доступу: <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/documents/SSE6Methodology.pdf>.

203. Taslimi Renani E., Elias M. F. M., Rahim N. A. Using data-driven approach for wind power prediction : A comparative study // *Energy Convers. Manag.* – 2016. – Vol. 118. – P. 193-203.

204. Tretyakov O. Geoinformational support of wind power development at the local level / O. Tretyakov, O. Volkovaia // *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. – Вип. 19. – С. 117-120.

205. Troen I. European Wind Atlas / I. Troen, E. L. Petersen. – Roskilde : Risø National Laboratory, 1989. – 656 p.

206. U. S. Energy Information Administration: Independent Statistics & Analysis [Електронний ресурс] / U. S. Department of Energy. – Режим доступу : https://www.eia.gov/energyexplained/index.cfm?page=wind_history.

207. VanLuvanee D. Comparison of WAsP, MS-Micro/3, CFD, NWP, and Analytical Methods for Estimating Site-Wide Wind Speeds // *Proceedings from AWEA Windpower*. – 2009.

208. Van der Hoven I. Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0,00007 to 900 cycle per hour // *Journal of Meteorology*. – 1957. – Vol. 14. – № 2. – P. 160-164.

209. Volkovaia O. Environmental impact assessment for two dimensions of wind farms / O. Volkovaia // *Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта – наука – виробництво* – 2017: зб. тез доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції,

присвяченої 10-річчю створення екологічного факультету (Харків, 19-22 квітня 2017 року). – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2017. – С. 51-52.

210. Walter G. Determining the local acceptance of wind energy projects in Switzerland : The importance of general attitudes and project characteristics // Energy Res. Soc. Sci. – 2014. – Vol. 4. – P. 78-88.

211. Watts D., Oses N., Pérez R. Assessment of wind energy potential in Chile : A project-based regional wind supply function approach // Renew. Energy. – 2016. – Vol. 96. – Part A. – P. 738-755.

212. Wind Energy Resource. Atlas of Oaxaca NREL/TP-500-34519. / [D. Elliott, M. Schwartz, R. George and others]. – 2003. – 135 p.

213. Wind energy scenarios for 2030 [Електронний ресурс] // Офіційний сайт EWEA. – Режим доступу : <https://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/reports/EWEA-Wind-energy-scenarios-2030.pdf>.

214. Wind Energy: the facts. Part 1 – Technology [Электронний ресурс] / [J. I. Cruz, N. Fichaux, P. Gardner and others]. – Режим доступу: <https://www.wind-energy-the-facts.org/index-81.html> – 10.12.2014 р. – Заголовок з екрану.

215. Wind Integration Data Sets // Офіційний сайт Національної лабораторії відновлюваної енергії США. [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://www.nrel.gov/grid/wind-integration-data.html>.

216. Wind Power Meteorology / E. L. Petersen, N. G. Mortensen, L. Landberg, H. P. Frank. – Denmark, Roskilde : Riso National Laboratory, 1997. – 46 p.

217. WindFarm from ReSoft [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.resoft.co.uk>. – Назва з титул. екрану.

218. WindSim [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.windsim.com>. – Назва з титул. екрану.

ДОДАТКИ

Додаток А

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. **Волковая О. О.** Застосування ГІС при розробці стратегії розвитку вітроенергетики на рівні адміністративного району / **О. О. Волковая**, О. С. Третьяков // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2013. – Вип. 17. – С. 9-12. – 0,3 д. а. (*Особистий внесок автора: представлено методику та результати вимірів фонові акустичної ситуації на місцевості для оцінки шумового впливу вітрогенераторів – 0,2 д. а.*)

2. Tretyakov O. Geoinformational support of wind power development at the local level / O. Tretyakov, **O. Volkovaia** // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2014. – Вип. 19. – С. 117-120. – 0,4 д. а. (*Особистий внесок автора: представлено результати аналізу методики прогнозування потенційного виробітку енергії для локальних територій та її апробації на території Харківської області – 0,3 д. а.*)

3. Balynska M. O. The application of difference image technique for change detection on the territory of Mezin national nature park / M. O. Balynska, O. S. Tretyakov, **O. O. Volkovaia** // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2015. – Вип. 21. – С. 58-66. – 0,5 д. а. (*Особистий внесок автора: представлено результати інструментального порівняння двох різночасових космічних знімків з метою виявлення та систематизації змін підстильної поверхні (ландшафту, землекористування, забудови і тощо) – 0,3 д. а.*)

4. **Волковая О. О.** Можливості уточнення та перевірки результатів картографічного моделювання швидкостей вітру на локальному рівні /

О. О. Волковая // Проблемы непрерывной географической освіти і картографії. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2015. – Вип. 22. – С. 40-43. – 0,35 д. а.

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації у зарубіжних спеціалізованих виданнях:

5. Агапова Е. Л. Математическое и картографическое моделирование потенциала энергетических ресурсов ветра на региональном и локальном уровне / Е. Л. Агапова, **А. А. Волковая** // Магілєўскі мерыдыян. – Могилев, 2015. – Том 15–16. – Вып. 1-2 (31-32) – С. 40-48. – 0,83 д. а. (*Особистий внесок автора: розкрито особливості математичного та картографічного моделювання енергетичних ресурсів вітру на локальному рівні – 0,43 д. а.*)

Наукові праці у інших наукових періодичних виданнях:

6. **Волковая О. О.** Моделювання вітрового потенціалу локальної ділянки Лісостепу для потреб вітроенергетики з використанням ГІС-технологій / **О. О. Волковая**, О. С. Третьяков, І. Г. Черваньов // Український географічний журнал. – Київ, 2015. – №4. – С. 10-16. – 0,72 д. а. (*Особистий внесок автора: представлено методика і результат застосування моделі прогностичного розрахунку середніх швидкостей вітру для потреб вітроенергетики на основі ГІС-технологій – 0,6 д. а.*)

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. **Волковая О. О.** Питання просторового моделювання шумового забруднення від ВЕС / **О. О. Волковая** // Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи: матер. щорічн. наук. конф. студентів та аспірантів, присвяч. пам'яті проф. Г. П. Дубинського, Харків, 6-8 квітн. 2011 р. – Харків, 2011. – Вип. 4. – С. 16-17. – 0,09 д. а.

8. **Волковая О. О.** Територіальний розподіл вітроенергетичного потенціалу: вплив географічних чинників / **О. О. Волковая** // Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи: матер. щорічн. наук. конф. студентів та аспірантів, присвяч. пам'яті проф. Г. П. Дубинського, Харків, 5-6 квітн. 2012 р. – Харків, 2012. – Вип. 5. – С. 13-14. – 0,1 д. а.

9. **Волковая О. О.** Дослідження фонового шуму території для потреб вітроенергетики / **О. О. Волковая** // Географічні дослідження: історія, сьогодення, перспективи: матер. щорічн. наук. конф. студентів та аспірантів, присвяч. пам'яті проф. Г. П. Дубинського, Харків, 5-6 квітн. 2013 р. – Харків, 2013. – Вип. 6. – С. 120-122. – 0,11 д. а.

10. **Волковая О. О.** Моделювання просторового розподілу фонового шуму для потреб вітроенергетики / **О. О. Волковая** // Охорона довкілля: матер. IX Всеукр. наук. Таліївських читань, Харків, 19-29 квітн. 2013 р. – Харків, 2013. – С. 39-41. – 0,11 д. а.

11. **Волковая А. А.** Геоинформационное моделирование фонового шума местности для определения воздействия ветроэнергетики на окружающую среду / **А. А. Волковая** // XXI Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов»: Материалы международного молодежного научного форума «Ломоносов – 2014» [Электрон. ресурс]. / МГУ им. Ломоносова. – Электрон. данные. – Москва, 2014. – электрон. диск (CD-ROM). – 0,08 д. а.

12. **Волковая О. О.** Проблеми використання ГІС для моделювання вітроенергетичних ресурсів на локальному рівні / **О. О. Волковая** // Географія, екологія, туризм: теорія, методологія, практика: Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 25-річчю географічного факультету ТНПУ (21-23 травня 2015 року). – Тернопіль: СМП «Тайп», 2015. – С. 143-145. – 0,18 д. а.

13. **Volkovaia O.** Environmental impact assessment for two dimensions of wind farms / **O. Volkovaia** // Екологія, охорона навколишнього середовища та збалансоване природокористування: освіта – наука – виробництво – 2017:

зб. тез доповідей XX Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої 10-річчю створення екологічного факультету (Харків, 19-22 квітня 2017 року). – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2017. – С. 51-52. – 0,12 д. а.

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

14. **Волковая О. О.** Моделювання виробітку енергії вітрогенераторами: методичний посібник / **О. О. Волковая**, О. С. Третьяков. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2013. – 40 с. – 1,25 д. а. (*Особистий внесок автора: теорія оцінки вітроенергетичного потенціалу, інструкція до розрахунків у середовищі ГПС.* – 1,0 д. а.)

Додаток Б

Впровадження результатів дисертаційного дослідження

Додаток Б.1



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В. Н. КАРАЗІНА

61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, факс +38 057 705-02-41, тел. +38 057 705-12-47, +38 057 707-52-31,
E-mail: univer@karazin.ua, код ЄДРПОУ 02071205

11.01.2017 № 0202-04
на № _____

АКТ

впровадження результатів наукового дослідження

Даним актом підтверджується впровадження результатів дисертаційної роботи Волкової Олександри Олександрівни за темою «Природно-ресурсний потенціал території для розміщення вітроагрегатів: топічний рівень», поданої на здобуття наукового ступеня кандидата географічних наук зі спеціальності 11.00.11 – конструктивна географія і раціональне використання природних ресурсів.

Термін впровадження: лютий 2014 р. – грудень 2015 р.

Форма впровадження результатів: складові частини навчальних дисциплін «Фаховий практикум», «Основи географічного моделювання».

Характеристика масштабу впровадження: впроваджено у навчальний процес на факультеті геології, географії, рекреації і туризму Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна на постійній основі у вигляді практичних занять.

Новизна впроваджених результатів: застосовано у навчальному процесі методику розрахунку середніх швидкостей вітру та потенційного виробітку енергії вітрогенератору з врахуванням фізико-географічних особливостей території із застосуванням геоінформаційних систем, методику оцінки акустичного впливу та інтерполяції результатів акустичних вимірів.

Ефективність впровадження: Одержані результати є доцільними до використання в практиці фахівців-географів щодо формування професійних навичок та умінь.

Перший проректор

Ю.В. Холін

Декан факультету геології, географії,
рекреації і туризму

В.А. Пересадько

Завідувач кафедри фізичної
географії та картографії

А. П. Голіков



000200



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В. Н. КАРАЗІНА

61022, м. Харків, майдан Свободи, 4, факс +38 057 705-02-41, тел. +38 057 705-12-47, +38 057 707-52-31,
E-mail: univer@karazin.ua, код ЄДРПОУ 02071205

04.11.2016 № 0301-147
на № _____

До спеціалізованої вченої ради
Д 64.051.04
Тітенко Г. В.

Д О В І Д К А

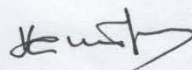
про впровадження результатів дисертаційного дослідження

Волкової Олександри Олександрівни

Результати дисертаційного дослідження **Волкової Олександри Олександрівни** за темою **«Природно-ресурсний потенціал території для розміщення вітроагрегатів: топічний рівень»**, а саме методики розрахунку середніх швидкостей вітру для побудови картографічних творів вітроенергетичних ресурсів Харківської та Донецької областей, були використані при виконанні науково-дослідної роботи: «Карта потреб підвищення енергоефективності малих територіальних громад Харківської та Донецької областей з урахуванням потенціалу нетрадиційних джерел енергії» (державний реєстраційний номер 0115U002974) на кафедрі фізичної географії та картографії Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна.



Проректор з наукової роботи
доктор фізико-математичних наук, професор

 В. О. Катрич

Додаток В

Результати безпосередніх короткоперіодичних вимірів анемометром на території дослідження

Координати: 49°20'19" пн. ш. 37°28'35" сх. д. (Борівський район Харківської області).

Висота встановлення: 22 м (180 м над рівнем моря).

Період вимірів: 5 місяців (з жовтня 2008 року по лютий 2009 року включно).

Виміри здійснювалися під керівництвом к.г.н., доц. кафедри географічного моніторингу та охорони природи Третьякова О. С., за участі працівників та з використанням обладнання французької вітроенергетичної компанії «Nerzh an Avel».

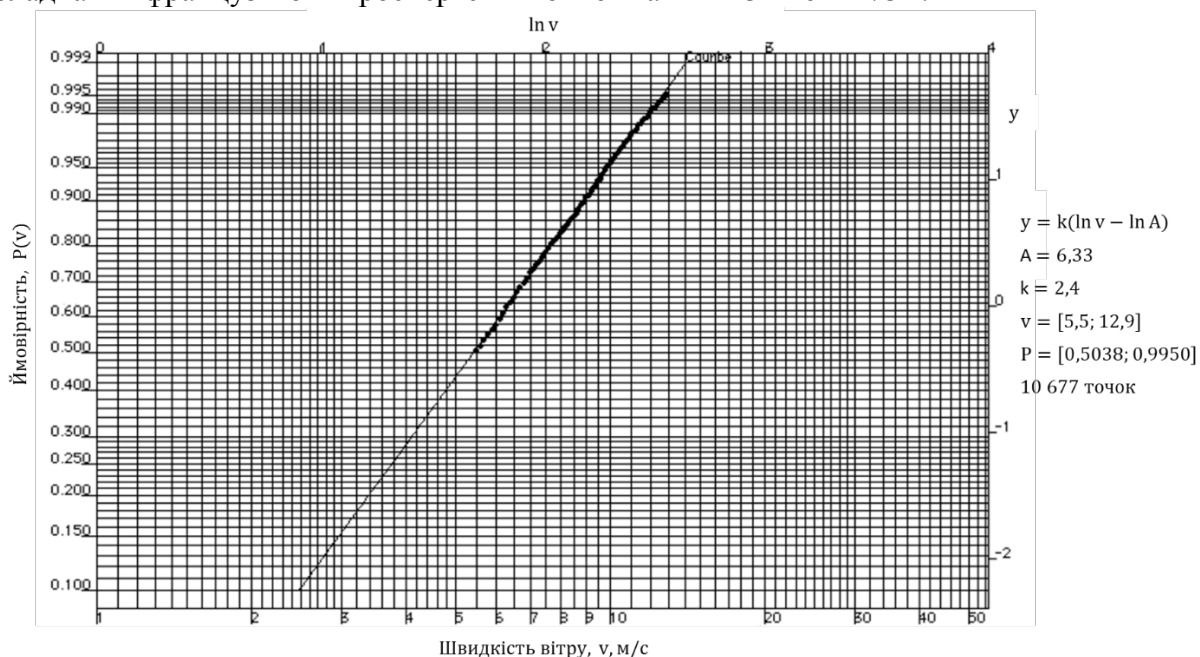


Рис. В.1 Розподіл ймовірності швидкостей вітру (Вейбулла)

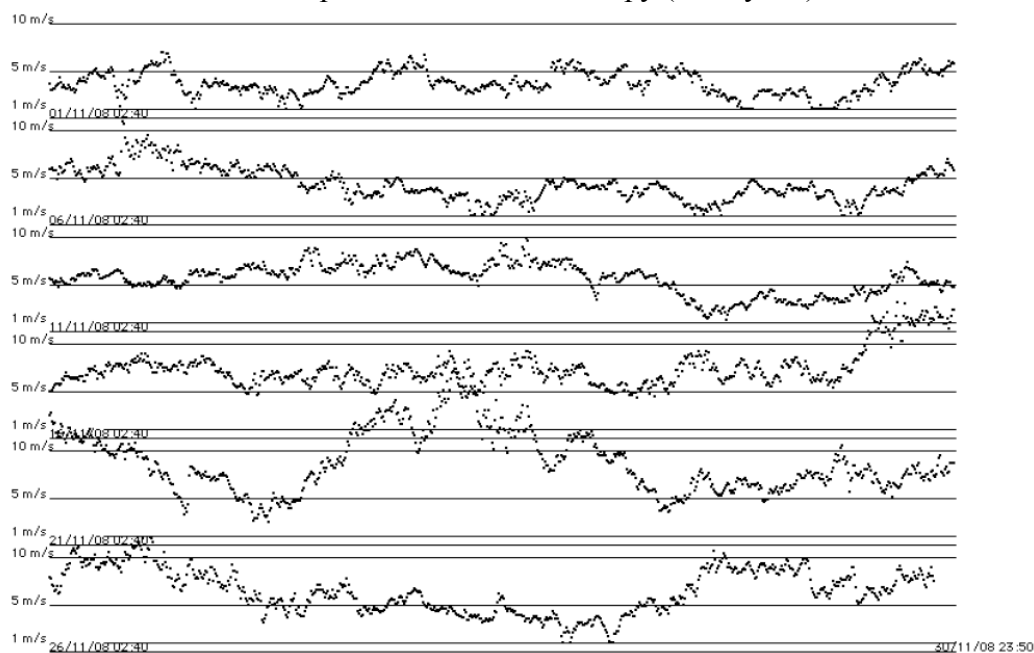


Рис. В.2 Результати вимірів швидкості вітру (листопад 2008 року)

Додаток Г

Вказівки до виконання розрахунків у програмному середовищі WindFarm

Розроблено на основі даних компанії ReSoft: <http://www.resoft.co.uk>

1. Створення проекту у програмному середовищі WindFarm ReSoft. Робота у програмі розпочинається із створення «проекту» - папки у системі комп'ютера, яка групує всю інформацію, необхідну для здійснення аналізу. Після запуску WindFarm виберіть **New Project** з меню **File**. У вікні «New Project», яке відкрилося, необхідно ввести назву проекту (одне слово, латинськими літерами) та вказати його місце розташування. Для підтвердження вибору натисніть «Далее». У наступному вікні Ви побачите атрибути проекту, їх рекомендується не змінювати. Натисніть «Далее». Тепер Ви маєте ввести координати сторін проекту (західної, північної, східної та південної відповідно). За замовчуванням проект матиме координати від 0 до 2000 м у ширину й довжину. Координати можна ввести вручну (наприклад, подивившись у програмі «ГИС Карта»). У цьому ж вікні необхідно ввести хід сітки (*Grid Spacing*); чим меншим він буде, тим точнішою буде карта. Введіть значення 5. Пропустіть решту вікон і натисніть «Готово». Тепер Ви маєте проект з прив'язкою до певних координат.

2. Створення Фонової карти. Фонові карти можуть бути в растровому Windows (*.BMP), JPEG (*.JPG), TIFF (*.TIF), Graphics Interchange Format (*.GIF) або Portable Network Graphics (*.PNG) форматі. Вони використовуються в якості базового шару для створення інших даних у програмі WindFarm. Рекомендується використовувати 8-бітний (або 256 кольорів) колірний формат (бо зображення можуть бути дуже великими). Формат JPEG тільки 24-бітовий, і тому його слід уникати. Ми будемо використовувати формат *.BMP. Фонова карта – це просто растрове зображення карти, космічного знімку, фотографії, тощо. А для того, щоб використовувати його у WindFarm, воно має мати прив'язку до географічних (прямокутних) координат. Існують три способи географічної прив'язки, які використовуються у WindFarm: використовуючи текстовий файл; за допомогою модуля Map Transform для визначення сітки координат на краях карти (це може бути зроблено тільки для неспотвореної, вирівняної за сіткою карти); за допомогою модуля Map Transform з прив'язкою за трьома точками (наприклад, три точки на координатній сітці сканованої карти). Ми скористаємося другим способом. Відкрийте **Tools** → **Map Transform**. У цьому вікні відкрийте необхідне зображення. Зробіть наступні дії: **Action** → **Edit Map Edge Locations**. У цьому вікні введіть координати сторін карти. Збережіть. Закрийте модуль Map Transform.

3. Поверхня висот. Поверхня розподілу – множина точок, координати яких задовольняють певному виду рівнянь, певній функції. Можливості програми WindFarm дають змогу побудувати поверхні розподілу висот і шорсткості, середніх швидкостей вітру, потенційного виробітку енергії. Поверхня висот створюється за допомогою текстового файлу. Оберіть **Tools** → **Data Conversion**. Ви запустили модуль Перетворення даних. У вікні, що відкрилося, поставте відмітку **Height** (Висоти), оберіть Ваш текстовий файл. У пункті формату вихідного файлу оберіть «Generic Gridded Height – XYZ». Натисніть «Далее». У наступному вікні необхідно вказати програмі, які саме рядки вона має використовувати з Вашого текстового файлу. Перше значення - *number of header lines* - це кількість рядків у текстовому файлі, які місять назву (тобто не використовуються програмою), якщо у Вашому файлі координати починаються з першого рядка, ставте значення «0». Наступне значення (титул) теж залиште «0». Поставте відмітку «**Fixed Format**» та введіть у клітинки **Easting**, **Northing** та **Height** відповідні значення початку

та кінця координати довготи, широти та висоти, враховуючи пробіли. Натисніть «Далее». Пропустіть наступне вікно. У вікні «*Height Output Data*» (Вихідні дані висоти) натисніть кнопку «*Initialise from input data*». Програма вивчить Ваш текстовий файл та встановить межі. Оберіть місце збереження та назву файлу («*Browse*»). Встановіть хід сітки «1» (*grid spacing*). Натисніть *Далее* → *Convert*. Ви створили Поверхню висот. Щоб перевірити відображення своєї Поверхні висот, перейдіть *Tools* → *Grid Viewer*. У цьому модулі відкрийте свій файл *.GTH. Зверніть увагу, що при переміщенні курсору над Поверхнею висот на панелі статусу у нижньому лівому кутку відображається значення висоти.

4. Поверхня шорсткості. Відкрийте *Tools* → *Contour Viewer*. У модулі, що відкрився відобразить Вашу Фонову карту. Для цього перейдіть *Options* → *Open Background Map* та оберіть потрібний файл *.BMP. Почніть оцифровувати контури місцевості. Для цього перейдіть *Options* → *Digitise Contours*. У вікні, що відкрилося, поставте відмітку *Roughness Data* (дані шорсткості). Натисніть кнопку «*Browse*» та введіть розташування та назву файлу, який збирається створити. Значення «*Default value*» (значення шорсткості для не оконтуреної місцевості на карті) має бути відмінним від 0, встановіть «0,1». Натисніть «*OK*». Тепер Ви можете розпочати оцифрування контурів. Для цього натисніть на карті та у меню, що відкриється, оберіть «*New contour*». У вікні, що з'явилося, Вам необхідно обрати коефіцієнт шорсткості (z_0) для поверхні, яка буде в межах контуру. Натисніть «*OK*» та почніть оцифровувати контур. Щоб закінчити, натисніть правою кнопкою миші. Відкриється вікно, у якому оберіть «*Close and save contour (form polygon)*» - автоматично сформується полігон. Тепер можна обрати з цього ж меню *New* (Новий контур) чи *Exit* (Вийти). Після завершення оконтурення, збережіть файл. Після цього Ваш файл контурів ще треба конвертувати у Поверхню контурів. Для цього скористайтесь модулем *Data Conversion*. Але цього разу обирайте відмітку *Roughness* (шорсткість). Вам необхідно створити із файла *.CTR файл *.GTR. Перевірити відображення файлу можна так само у модулі *Grid Viewer*.

5. Прив'язка даних до проекту.

Створивши проект, ми можемо прив'язувати і змінювати його дані (Фонова карта, Поверхня висот, Поверхня шорсткості). Прив'яжемо всі створені нами файли до нашого проекту. Виберіть *Edit* → *Project Data*. У вкладці *Map and Feature Data* Ви можете обрати Фонову карту (*Background Map*). Оберіть свій прив'язаний файл. Оберіть вкладку *Terrain Height Data*. Прив'яжіть свою Поверхню висот. Для цього вимкніть «*Flat-height data not required*» та натисніть на кнопку «*Select height data files*». Оберіть свій файл *.GTH. У вкладці *Terrain Roughness Data* так само оберіть Ваш файл шорсткості *.GTR. Натисніть «*OK*». В цьому ж вікні *Edit Project Data* (Налаштування даних проекту) Ви маєте можливість скорегувати дані щодо меж проекту, величини шагу кілометрової сітки, тощо. В разі, якщо Ви змінюєте координати проекту, зміниться рамка, і всі файли, прив'язані до проекту, будуть відображатися в межах цієї рамки. Всі поверхні, які були Вами створені у програмі, автоматично мають координатну прив'язку, тому можуть відображатися у всіх проектах, що охоплюють ті ж самі координати. При зміні координат чи налаштувань проекту, поверхні не обрізуються і не змінюються. Для здійснення операцій над поверхнями користуйтеся модулем *Grid Viewer*.

6. Створення файлу Рози вітрів. Файл Рози вітрів у програмі *Wind Farm* містить всю необхідну інформацію щодо даних розподілу і швидкостей вітру, знятих вимірами анемометра. Файл Рози вітрів завжди містить інформацію щодо розподілу вітрів протягом року, менші чи більші проміжки часу не використовуються. Щоб створити новий файл Рози вітрів оберіть: *Wind Distribution* → *New* → *Distribution*. У вікні, що відкрилося, Ви можете власноруч ввести ім'я Вашого файлу чи надати назву автоматично. Для цього натисніть «*Generate next file name*». Після цього необхідно визначити кількість секторів (максимум 36) – вісей рози вітрів. Встановіть «8». Значення турбуленції потоку залишіть незмінним. У графі «*Reference Height*» встановіть значення висоти розташування анемометру відносно земної поверхні. У цьому ж вікні можна обрати кількість годин

у році та закон розподілення вітру (Релея чи Вейбулла). Натисніть «OK». У наступному вікні підтвердьте редагування Рози вітрів. На екрані з'явиться вікно Рози вітрів, у якому Ви можете змінювати показники. Редагувати можна лише затінені клітинки, двічі клацнувши на них. Натисніть «OK». Тепер ми маємо всі необхідні дані, щоб почати моделювання швидкостей вітру.

7. Характеристики вітрогенератора. Для того, щоб проводити подальші розрахунки у програмі, необхідним є створення файлу, який буде містити всі необхідні дані щодо характеристик вітрогенератора (потужність, геометрія (висота гондоли, діаметр вітроколеса тощо) тяглова сила, шум). У програмі WindFarm такі файли мають розширення *.WTD. Ця операція може бути здійснена за допомогою модуля *Turbine Studio*. Перейдіть **Tools** → **Turbine Studio**. У наступному діалоговому вікні створіть новий файл (**File** → **New**). Тепер перейдіть **Edit** → **Turbine Data**. Перед Вами відкриється вікно, у якому необхідно вручну ввести всі характеристики турбіни (у поля, зафарбовані сірим кольором). Дані щодо вітрогенераторів у відкритому доступі надають розробники ВЕУ, зазвичай їх досить легко знайти на сайтах розробників. Після завершення введення даних характеристик, натисніть **Specify turbine noise**. У даному вікні необхідно ввести всі шумові характеристики турбіни. Якщо Ви маєте обмежені дані, натисніть **Reset to defaults**. Після цього змініть ті характеристик, які є в Вас наявними. Зверніть увагу, що такі дані як частотний розподіл шуму (*Turbine octave data*) вказувати не обов'язково, можете просто обрати у випадаючій вкладці «No». Після завершення всіх редагувань натисніть «OK».

8. Поверхня швидкості вітру. Перед тим, як розпочати моделювання, переконайтеся, що до проекту прив'язана інформація щодо шорсткості та висот, а файл Рози вітрів є відкритим. З меню **Tools** оберіть **Wind Flow**. Перед Вами з'явиться вікно, у якому попереджається про відсутність відкритого шару з анемометром, тому програма автоматично встановить анемометр у центр карти. Щоб створити новий алгоритм, оберіть **File** → **New**. Тепер Ви маєте обрати, створити новий файл алгоритм для MS-Micro чи конвертувати їх із даних WAsP. Оберіть створення для MS-Micro. Перед Вами з'явиться вікно «New Wind Flow File», у якому Ви можете задати ім'я файлу (власноруч чи автоматично). Натисніть «OK». Тепер оберіть **Edit** → **Run Data**. З'явиться діалог, у якому можна встановлювати основні дані для проведення підрахунку швидкостей вітру. Ці дані поділені на 3 вкладки: *General* (загальні параметри), *Map Region* (карта області) *Height and Roughness Data* (дані щодо висот та шорсткості) та *Upstream Z0* (висоти шорсткості).

У загальних параметрах можна визначати тип підрахунку та висоти, для яких проводитиметься підрахунок (над поверхнею землі). У комірці «**No of Wind Directions**» необхідно вказати кількість напрямів вітру (має збігатися з кількістю напрямів у розі вітрів). У комірці «**Calculation Heights**» введіть значення висот над землею поверхнею (у метрах), для яких має проводитися розрахунок швидкостей вітру. Вкладка *Height and Roughness Data* використовується для підрахунку висоти поверхні, де дані відсутні. *Edge height* – це висота навколишньої плоскої поверхні. *Minimum height* – рідко використовується, але дає можливість уникнути занадто малих (від'ємних) відхилень значень. Ці дані залишіть незмінними. Натисніть «OK». Оберіть **Edit** → **Analysis Data**. Перед Вами з'явиться діалог з трьома вкладками: *Wind Profile*, *Wind Climate*, *Turbine*. Відмітьте комірку «**Wind Rose file**», щоб використовувати для підрахунку файл рози вітрів. Вкажіть розташування файлу. Перейдіть на вкладку *Turbine* і оберіть файл характеристик вітрогенератора. Натисніть «OK». Тепер Ви встановили всі необхідні параметри для підрахунку Поверхні швидкості вітру. Перейдіть **Run Calculate** → **Wind Flow**. Автоматично буде виконано розрахунок вітрового профілю і відобразяться результати. Тепер необхідно створити вихідні дані. Для цього перейдіть **Run** → **Create Output Data**. Відмітьте комірки *Wind speeds* та *Energy density*. Натисніть «OK». Після цього можна закрити модуль *Wind Flow*.

Додаток Д

Методика проведення натурних акустичних вимірів і побудови карти розподілу рівня фонового шуму на ділянці в межах Борівського та Ізюмського районів Харківської області

ЗМІСТ

1. Об'єкт дослідження
 2. Мета дослідження
 3. Загальні положення
 4. Характеристики що оцінюються та розрахункові співвідношення
 5. Умови, порядок, місце проведення, види та етапи дослідження
 6. Обробка, аналіз та оцінка результатів дослідження
 7. Матеріально-технічне забезпечення дослідження.
 8. Метрологічне забезпечення дослідження.
- Список використаних джерел

1. Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є рівень фонового шуму та акустична ситуація в цілому на ділянці (далі по тексту «ділянці, що досліджується») в межах Борівського та Ізюмського районів Харківської області площею 275 км², обмеженій населеними пунктами: Мирне на півночі; Комарівка на півдні, Бахтин на заході, Голубівка на сході.

Крайні точки:

ПнЗх: 49°22'26" Пн.ш., 37°21'53" Сх.д.

ПнСх: 49°22'26" Пн.ш., 37°37'30" Сх.д.

ПдСх: 49°15'20" Пн.ш., 37°37'30" Сх.д.

ПдЗх: 49°15'20" Пн.ш., 37°21'53" Сх.д.

2. Мета дослідження. Метою дослідження є проведення натурних акустичних вимірів і побудова карти розподілу рівня фонового шуму на ділянці, що досліджується.

3. Загальні положення. Дослідження проводяться в рамках наукової роботи із вивчення перспективних наслідків впливу роботи вітроенергогенераторів на навколишнє середовище.

4. Характеристики що оцінюються та розрахункові співвідношення

Оцінці підлягає рівень фонового шуму L_a (дБА) та акустична ситуація в цілому на ділянці, що досліджується. Величина рівню шуму L_a (дБА) безпосередньо зчитується з показників шумоміру. За результатами трьох замірів знаходиться середнє значення L_a сер.(дБА) у точці заміру. За результатами опрацювання замірів у 10 точках будується карта розподілу рівня фонового шуму на ділянці, що досліджується.

5. Умови, порядок, місце проведення, види та етапи дослідження. Дослідження ділянки проводяться у денний час на відкритій місцевості за погодних умов, що дозволяють проводити вимірювання шуму. А саме відсутність: опадів, грому та блискавки, вітру швидкістю більш ніж 10 м/с, джерел звуку, що є тимчасовими на даній місцевості (трактори, автотранспорт, літаки та інше). За швидкості вітру більш ніж 1 м/с необхідно застосовувати екран для захисту мікрофону приладу від вітру. Переміщення по

ділянці здійснюється на велосипеді (або автомобілі). Враховуючи великий час необхідний на переміщення від м. Харкова до м. Ізюм та назад, великий обсяг ділянки, що досліджується, та тривалий час проведення замірів, кількість точок заміру на місцевості обмежена до 10.

Назви точок та їх координати наводяться в таблиці (Табл. Д.1) та на космічному знімку, що додається (Рис. Д.1).

Вимірювання рівню шуму здійснюється у відповідності з вимогами ГОСТ 23337-78 (СТ СЭВ 2600-80) «Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий». Планується проведення вимірювання тільки постійного шуму.

Вимірювання проводяться тільки на частотній характеристиці А шумоміру. Під час вимірювань необхідно дотримуватися вимог інструкції з експлуатації виробу.

Вісь мікрофону приладу, при вимірюваннях, повинна знаходитися в вертикальному положенні. Сам прилад для виміру шуму необхідно розташовувати на відстані 1200–1500 мм від поверхні ґрунту, на дистанції не менш ніж 500 мм від обслуговуючого персоналу. Необхідно уникати розташування прибору у межах зони «звукової тіні» (безпосередньо біля парканів, стін будівель).

Перемикач часової характеристики роботи приладу повинен бути встановлений в положення «ПОВІЛЬНО». Час вимірювання рівню шуму повинен складати не менше трьох хвилин. У кожній точці виміру повинно бути здійснено не менше трьох обліків.

Під час вимірювання рівню шуму персонал, що проводить заміри, повинен дотримуватися тиші. При проведенні вимірювань апаратура не повинна підпадати під дію вібрації, магнітних та електричних полів та інших небажаних факторів, що можуть впливати на результати вимірювань.

Під час дослідження, персонал здійснює переміщення на заплановану (на карті) точку вимірювання, здійснює її корегування з врахуванням особливості місцевості (якщо точка знаходиться посеред водойми або у важкодоступному місці). Координати відкоригованої точки записуються і вона позначається на карті. Після чого проводиться по три заміри рівню шуму. Час одного заміру повинен бути не менш трьох хвилин.

Результати замірів рівня шуму заносяться до колонки 3 (Табл. Д.2).

Після чого здійснюється переміщення до наступної точки вимірювання і операції повторюються до тих пір, поки не будуть пройдені всі точки, які заплановані.

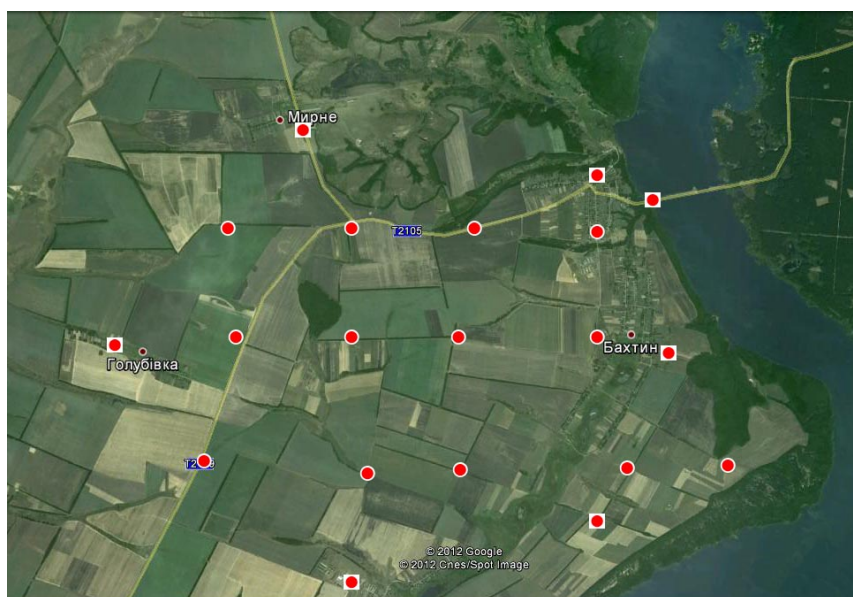


Рис. Д.1 Розміщення точок зняття вимірів на ділянці дослідження

Таблиця Д.1

Характеристика точок зняття вимірів

№ точки	Опис точки вимірювання	Координати точки вимірювання.	Уточнення точки вимірювання, та її опис	Уточнені координати точки вимірювання	Примітка
1.	Розвилка доріг T2105 та T2109				
2.	Розвилка дороги T2109 та дороги на н.п. Голубівка				
3.	Крутий поворот дороги T2109 в н.п. Бахтин				
4.	1 км по дорозі T2109 на захід від розвилки дороги T2109 та дороги T2105, біля лісосмуги				
5.	2.5 км по дорозі T2109 на захід від розвилки дороги T2109 та дороги T2105. Поворот ґрунтової дороги біля гаю.				

Таблиця Д.2

Бланк результатів вимірів рівня звуку на території дослідження

Номер точки виміру	Номер виміру	Рівень звуку L_a , дБА	Середнє значення рівня звуку L_a сер, дБА.
1	2	3	4
1.	1.		
	2.		
	3.		
2.	1.		
	2.		
	3.		

6. Обробка, аналіз та оцінка результатів дослідження

Необхідно врахувати, що проведені виміри у зв'язку з низьким класом похибки приладу (3 клас) є орієнтовними.

За даними колонки 3 (Табл. Д.2) розраховується середнє значення рівня звуку L_a сер, дБА. Розрахунок ведеться за формулами (Д.1, Д.2).

$$L_a \text{ сер} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_i} - 10 \lg n \quad (\text{Д.1})$$

де

L_i – i -й рівень звуку L_a , (дБА), що визначається з колонки 3 (Табл. Д.2);

$i = 1, 2 \dots n$;

$10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_i}$ – сумарний рівень звуку, дБА, що визначається за допомогою таблиці (Табл. Д.3).

Таблиця Д.3

Значення добавки для розрахунку сумарного рівня звуку, дБА

Різниця двох рівнів, що сумуються	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20
Добавка до більш високого рівня	3,0	2,5	2,0	1,8	1,5	1,2	1,0	0,8	0,6	0,5	0,4	0,2	0

Складання рівнів звуку здійснюється послідовно, починаючи з максимального в наступному порядку:

1. Розраховують різницю двох рівнів, що складаються.
 2. Визначають добавку до більш високого рівня з двох рівнів, що складаються в залежності від отриманої різниці цих рівнів (Табл. Д.3).
 3. Здійснюється додавання отриманої добавки та більш високого рівня з двох рівнів, що сумуються.
 4. Аналогічні дії здійснюються з отриманою сумою та третім рівнем і т.д.
- Якщо різниця між найбільшим і найменшим рівнем не перевищує 7 дБ (дБА), то середнє значення рівне $L_{a \text{ сер, (дБА)}}$ визначають як середньоарифметичне значення всіх рівнів за формулою (Д.2).

$$L_{a \text{ сер}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i \quad (\text{Д.2})$$

Розрахунки заносяться до колонки 4 (Табл. Д.2).

7. Матеріально-технічне забезпечення дослідження.

- 7.1 Навігаційний пристрій.
- 7.2 Шумомір Iso-Tech SLM-1352A, з інструкцією з експлуатації.
- 7.3 Ноутбук ASUS EeePC.
- 7.4 Транспортний засіб (велосипед) для переміщення на місцевості.
- 7.5 Додаткові елементи живлення шумоміру.
- 7.6 Компас.
- 7.7 Карта місцевості масштабу 1:100000, для занесення розташування та координат точок вимірювання.

8. Метрологічне забезпечення дослідження.

- 8.1 Шумомір Iso-Tech SLM-1352A, 3 класу точності, діапазон вимірювань: 30-130 дБ, похибка: $\pm 1,5$ дБ, забезпечений блоками частотної корекції А та С і часових характеристик «ШВИДКО» та «ПОВІЛЬНО».

Список використаних джерел

1. ГОСТ 23337-78 (СТ СЭВ 2600-80) «Шум. Методы измерения шума на селитебной территории и в помещениях жилых и общественных зданий».
2. ГОСТ 31296.2-2006 «Шум. Описание, измерение и оценка шума на местности».
3. IEC 61400-11 2002-12 «Wind Turbine Generator Systems – Part 11: Acoustic Noise Measurement Techniques»
4. ISO-TECH Sound level meter SLM-1352A. Instruction manual.

Додаток Е

**Результати проведення натурних (польових) акустичних вимірів
в межах Борівського та Ізюмського районів Харківської області**

Таблиця Е.1

Результати вимірів рівня звуку за точками

Номер точки виміру	Назва точки виміру	Координати точки		Висота точки	Номер виміру	Полеві виміри				Запис приладу	
		Широта	Довгота			Максимальний рівень звуку L_{a0max} , дБА	Мінімальний рівень звуку, L_{a0min} , дБА	Середнє значення рівня звуку $L_{a0сер}$, дБА.	Максимальний рівень звуку L_{amax} , дБА	Середнє значення рівня звуку $L_{aсер}$, дБА	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
1.	Дорога 0 м	49°16 47,82 Пн.ш.	37°25 23,16 Сх.д.	157 м	1	84,4	47,9	66,2	84,0	59,8	
2.	Дорога 15 м	49°16 47,58 Пн.ш.	37°25 23,94 Сх.д.	154 м	1	71,6	40,0	55,8	71,0	52,0	
3.	Дорога 30 м	49°16 47,34 Пн.ш.	37°25 24,66 Сх.д.	156 м	1	69,4	42,8	56,1	66,0	52,0	
4.	Поворот на Голубівку	49°18	37°26	168 м	1	похибка вимірів				69,0	53,4
		58,02	58,92		2	63,9	51,9	57,9	63,0	57,7	
		Пн.ш.	Сх.д.		3	65,1	51,1	58,1	65,0	56,0	
5.	Голубівка (околиця)	49°19 3,96 Пн.ш.	37°26 32,76 Сх.д.	168 м	1	60,3	43,6	52,0	65,0	50,5	
6.	Голубівка (центр)	49°19 06,60 Пн.ш.	37°26 24,84 Сх.д.	165 м	1	62,0	54,9	58,5	66,0	57,4	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
7.	Анемометр	49°20 19,92 Пн.ш.	37°28 35,40 Сх.д.	179 м	1	69,6	53,4	61,5	69,0	57,7
8.	Край лісу	49°20 14,7 Пн.ш.	37°29 47,04 Сх.д.	162 м	1	60,0	41,5	50,8	59,0	47,4
9.	В лісі				1	60,0	46,2	53,1	60,0	49,5
10.	Гороховатка	49°20 33,96 Пн.ш.	37°31 17,52 Сх.д.	132 м	1	60,5	44,3	52,4	70,0	50,1
11.	Магазин	49°20 33,00 Пн.ш.	37°31 45,84 Сх.д.	107 м	1	83,0	34,7	58,9	83,0	47,3
12-1.	Міст	49°20 31,38 Пн.ш.	37°32 19,74 Сх.д.	76 м	1	73,4	48,3	60,9	71,0	53,5
12-2.	Середина мосту	49°20 35,46 Пн.ш.	37°32 53,34 Сх.д.	79 м	1	74,2	43,0	58,6	71,0	49,1
13.	Поворот	49°19 1,38 Пн.ш.	37°31 29,58 Сх.д.	107 м	1	51,2	45,8	48,5	53,0	48,2
14.	Ферма	49° 20 1,38 Пн.ш.	30°31 33,12 Сх.д.	131 м	1	42,5	35,5	39,0	47,0	37,5

Додаток Ж
Технічні характеристики вітроагрегатів,
які були використані у дослідженні

За даними виробника: <https://www.enercon.de>

Таблиця Ж.1

Основні характеристики ВЕУ

Модель вітроагрегату	Enercon E-40	Enercon E-115
Номинальна потужність	500 кВт	2500 кВт
Мінімальна швидкість вітру (запуск ВЕУ)	2,44 м/с	2 м/с
Номинальна швидкість вітру (робота у номінальному режимі)	14 м/с	12 м/с
Максимальна швидкість вітру (зупинення ВЕУ)	25 м/с	28-34 м/с
Діаметр ротора	40,3 м	115 м
Висота опори	65, 44, 50, 55 м	92,5-149 м

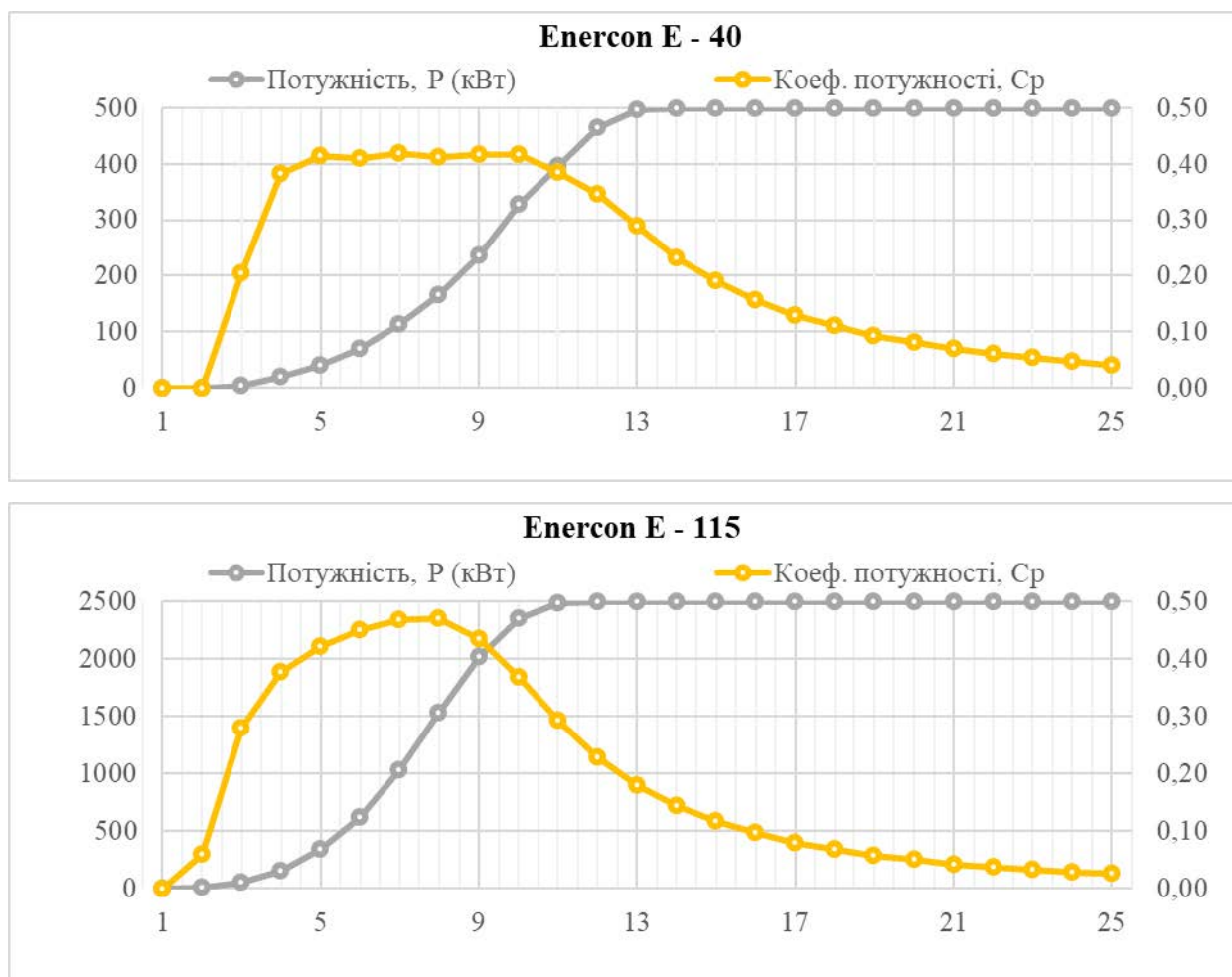


Рис. Ж.1 Зміна потужності та коефіцієнту потужності ВЕУ Enercon E-40 та Enercon E-115 в залежності від швидкості вітру