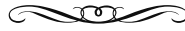


УДК 911.9:504.062.2

О.О. Волковая

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна



## МОЖЛИВОСТІ УТОЧНЕННЯ ТА ПЕРЕВІРКИ РЕЗУЛЬТАТІВ КАРТОГРАФІЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ШВИДКОСТЕЙ ВІТРУ НА ЛОКАЛЬНОМУ РІВНІ

Розглянуто методичні підходи, узагальнено вітчизняний і світовий досвід проведення верифікації методик оцінки ресурсів вітрової енергії для локальної території. Наведено формули і дані, необхідні для здійснення перевірки результатів моделювання.

**Ключові слова:** ГІС-моделювання, верифікація, середні швидкості вітру, вітроенергетичний потенціал.

O. Volkovaia

### POSSIBILITIES OF SPECIFICATION AND VERIFICATION OF CARTOGRAPHIC MODELING RESULTS OF WIND SPEEDS AT THE LOCAL LEVEL

The article deals with methodical approaches, generalized national and world experience in verification of methodologies for assessment of wind energy resources for the local area. The formulae and data required to carry out verification of modeling results are given.

**Keywords:** GIS modeling, verification, average wind speed, wind and energy potential.

A.A. Волковая

### ВОЗМОЖНОСТИ УТОЧНЕНИЯ И ПРОВЕРКИ РЕЗУЛЬТАТОВ КАРТОГРАФИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СКОРОСТЕЙ ВЕТРА НА ЛОКАЛЬНОМ УРОВНЕ

Рассмотрены методические подходы, обобщён отечественный и мировой опыт проведения верификации методик оценки ресурсов ветровой энергии для локальной территории. Приведены формулы и данные, необходимые для осуществления проверки результатов моделирования.

**Ключевые слова:** ГИС-моделирование, верификация, средние скорости ветра, ветроэнергетический потенциал.

**Вступ, вихідні передумови.** Останнім часом у світі значна увага приділяється розвитку й використанню нетрадиційних і відновлювальних джерел енергії, зокрема вітропотенціалу. Середній показник зростання світового вітроенергетичного сектору на рік складає більше 26 %. В Україні є достатні передумови для масштабного розвитку і освоєння вітроенергетики, проте важливим є обґрунтований вибір ділянки розміщення, що включає урахування характеристик місцевості. На даний час розроблено численні методики моделювання вітрових характеристик, що можуть бути застосовані й до лісостепоного типу місцевості (значна частка території Харківської області). Проте будь-яке моделювання завершується перевіркою отриманих результатів. Представлена робота заснована на оцінюванні даних зарубіжних і вітчизняних досліджень, пов'язаних із розрахунками вітроенергетичного потенціалу, і містить способи статистичного аналізу та екстраполяції на певну територію метеорологічних характеристик, отриманих в одній точці спостереження.

**Метою** статті є узагальнення сучасних підходів до верифікації результатів моделювання вітроенергетичних характеристик для локальної ділянки вибору точки потенційного розміщення вітроагрегату.

**Виклад основного матеріалу.** У процесі здійснення розрахунку прогностичних енергетичних характеристик вітру для локальної території опти-

мальним є поєднання математичних і картографічних методів моделювання. Картографічне представлення статистичних розрахунків дає змогу візуалізувати їх результати у вигляді, оптимальному для дослідження, позбавляє помилок і прорахунків, дає уявлення про точність математичного моделювання та його географічну вірогідність [3]. Втім, те континуальне представлення даних, яке може надавати картографічна модель (на відміну від дискретного математичного представлення), потребує певних додаткових операцій переходу (інтерполяції даних). Саме у процесі операції переходу і виявляється небезпека отримання невірогідних результатів моделювання, що дослідник може не взяти до уваги. У разі проведення точкових розрахунків така похибка може бути неістотною через нерівномірність її розподілу. Але 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.

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 вітропотоків. 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.

**Безпосередні виміри на місцевості.** 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 вітрогенератора.

Натомість, швидкість вітру у даній місцевості постійно змінюється. Така варіативність може спричинити появу проблем у прогнозуванні загального показника вітрової енергії на місцевості та в отриманні об'єктивних показників швидкостей вітру під час вимірювання на місцевості. Проте, хоча швидкість вітру неперервно змінюється, вона залишається найбільш постійною у діапазонах, які добре відображені на спектрі Ван дер Ховена (рис.1), де фактично показано кількість варіацій швидкостей вітру відповідно до конкретного часового проміжку (частоти). Найчастіше період усереднення показників вітру обирається таким чином, щоб опинитися у часовому діапазоні з досить постійними середніми швидкостями вітру. Як бачимо, один рік є оптимальним проміжком часу.

**Порівняння отриманих даних із даними пунктів постійних метеоспостережень.** 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 на відкритій місцевості, а от відкритість метеостанцій частіше за все виявляється порушеною (через тривале існування в одному місці та зміну довкілля через забудову, лісонасадження тощо). 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 з урахуванням затіненості метеостанції.

Методики врахування затіненості так само різняться. Так, у роботі [4] пропонується проведення розрахунку, що базується на системному використанні даних обстеження метеостанцій і енергетичних роз вітрів. У разі затіненості сектору виробіток електроенергії ВЕУ оцінюється 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 із розгляду (якщо, природно, для неї відсутні спостереження за період, попередній до часу виникнення перешкоди).

**Аналіз частотного розподілу швидкостей вітру.** Швидкість вітру стохастично змінюється, тому більш прийнятним є опис характеристик вітру відповідними статистичними методами. Розрахунок параметрів розподілу Вейбулла є поширеною практикою. Так, у роботі [1] 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. Важливо знати не конкретну швидкість вітру у певний мо-

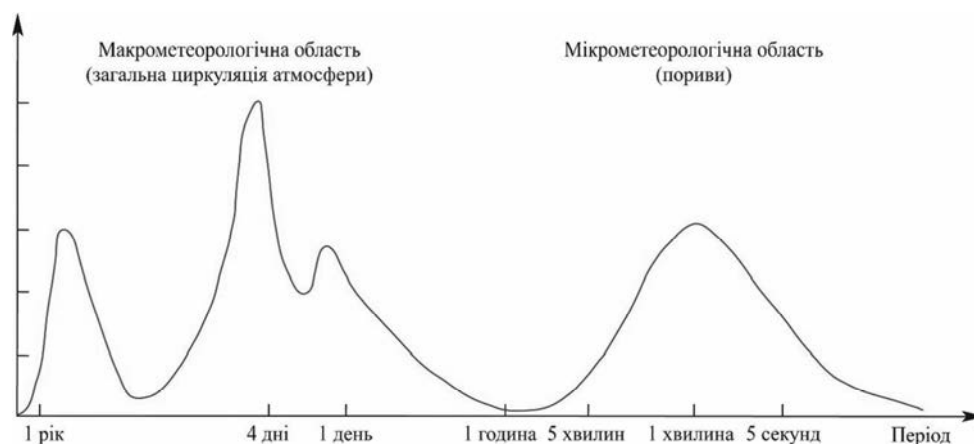


Рис.1. Спектр Ван дер Ховена [6]

мент, а те, як змінюється середня швидкість вітру за певний період і як поширюється навколо середнього значення. Такі закономірності зручно відображати у вигляді графіка (рис.2).

Метод, який зазвичай використовується розробниками ВЕС, полягає у вимірюванні швидкості вітру з інтервалом у 10 хвилин переважно щонайменше протягом календарного року для певної точки місцевості. Кожне значення у подальшому сортується у вузькі інтервали швидкостей вітру. Ця процедура називається «бінінгом» даних (скорочено «бін»). На рис.2 було використано «бін» шириною 1 м/с.

Відносна частота є часткою вимірювань швидкості вітру в кожному «біні». Її можна розглядати як імовірність того, що виміряна швидкість вітру потрапить саме в даний інтервал «біну». Відносна

частота визначається таким чином, щоб загальна площа під кривою дорівнювала 1.

Середня швидкість вітру позначається  $V_{\text{сеп}}$  і може бути розрахована за формулою:

$$V_{\text{сеп}} = \sum_{i=1}^n V_i p(V_i) \quad (1)$$

де  $V_i$  позначає центральне значення швидкості вітру  $i$ -го «біну»,  $p(V_i)$  є імовірністю (або відносною частотою) потрапляння вимірюваного значення в  $i$ -ий «бін».

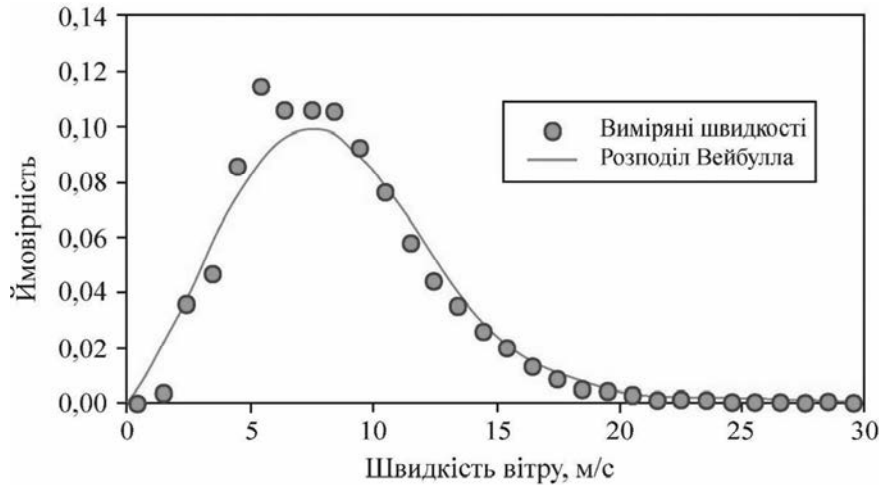


Рис. 2. Вимірюваний розподіл швидкостей вітру і розподіл Вейбулла з параметром масштабу  $c=9,5$  м/с і параметром форми  $k=2,3$ .

Для простоти можна прийняти миттєву швидкість вітру як квазіпостійну складову щодо турбулентних флуктуацій (випадкових коливань) навколо цього (квазіпостійного) значення швидкості вітру. Останнє визначається шляхом усереднення за відповідний проміжок часу. За цей самий проміжок часу мінливість вітру характеризується дисперсією його швидкості, яка дорівнює середньоквадратичному значенню турбулентних флуктуацій. Квадратний корінь з дисперсії є стандартним відхиленням, позначається просто  $\sigma$  і вимірюється у м/с.

Визначення поривчастості у даній точці місцевості забезпечує параметр, відомий як інтенсивність турбулентності  $I$  — відношення стандартного відхилення до середнього значення:

$$I = \frac{\sigma}{V_{\text{сеп}}} \quad (2)$$

Розподіл швидкості вітру іноді може бути представлений за допомогою математичної функції. В аналізі енергії вітру найбільш часто використовується функція — двопараметрична залежність Вейбулла. Для її розрахунку необхідно мати дані вимірів швидкості вітру за якомога більший період [5]. Цей метод являє собою аналітичну двопараметричну залежність, що виражає імовірну тривалість дії швидкостей вітру різних значень, параметри якої варіюють залежно від характеру місцевості.

Для функції розподілу Вейбулла імовірність  $p(V)$  швидкості вітру, що має значення  $V$ , задається рівнянням:

$$p(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right] \quad (3)$$

де  $k$  — параметр форми;  $c$  — параметр масштабу, який вимірюється у м/с;  $V$  — швидкість вітру.

Значення параметрів  $c$  і  $k$  визначаються на етапі апроксимації конкретних даних метеоспостережень. Параметр форми  $k$  можна визначити 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 залежність. Котангенс кута нахилу прямої лінії до осі абсцис дає значення параметра  $k$ . Параметр масштабу розподілу Вейбулла визначається за формулою [2]:

$$c = \frac{1}{V_{\text{сеп}} \Gamma(1 + 1/k)} \quad (4)$$

де  $V_{\text{сеп}}$  — середня швидкість вітру;  $k$  — параметр форми.

Рис. 2 відображає фактичні дані швидкості вітру разом з відповідним розподілом Вейбулла. У разі, коли значення  $k=2$ , розподіл Вейбулла зводиться до однопараметричного розподілу Релея.

Будь-яке порівняння необхідно супроводжувати екстраполяцією даних щодо швидкостей вітру від відносної висоти положення анемографа до висоти осі вітрогенератора. Детальніше про методику розрахунку вітроенергетичних характеристик території можна дізнатися із роботи автора [6].

Важливим при проведенні моделювання не для точкового розташування вітрогенератора, а для площинного розподілу середніх швидкостей, є визначення ступеня достовірності отриманих даних для території дослідження.

Нами було визначено, що похибка, яка виникає за результатами моделювання у такий спосіб, може варіювати у досить значних межах, відповідно до способу моделювання. Так, похибка у 5 % є прийнятною, хоча у деяких способах моделювання це значення може набувати 10 % і більше. Тому тут важливим є проведення порівняння отриманої по-

хибки із середніми розрахованими похибками для інших моделей.

**Висновки** Здійснений аналіз деяких найбільш розповсюджених способів верифікації дає можливість планування досліджень у галузі прогностичних вітроенергетичних розрахунків і є, водночас, важливою передумовою подальших досліджень автора. Хоча, зазвичай, отримані показники виробітку не є точними (поширена похибка у 5-10 %), саме через моделювання можна виявити основні

властивості розподілу швидкостей вітру на ділянці дослідження. Моделювання 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.

**Рецензент – доктор технічних наук,  
професор І.Г. Черваньов**

### Література:

1. Баймиров М.Е. Математическое моделирование энергии ветра / М.Е. Баймиров // Вестник Астраханского гос. тех. уч. ун-та. – 2007. – № 4. – С. 260–262.
2. Иллюстрированный справочник по возобновляемой энергетике / В.М. Каргиев, С.Н. Мартиросов, В.П. Мурутов и др.]: [Электрон. ресурс]. – Режим доступа: <http://www.intersolar.ru>
3. Кошляков О.С. Картографічне моделювання в практиці екологічного моніторингу та екологічного управління / О.С. Кошляков, О.В. Диняк, І.Є. Кошлякова // Зб. наук. статей III Всеукр. з'їзду екологів з міжнарод. участю. – Вінниця, 2011. – Т. 1. – С. 202–204.
4. Рамазанова З.У. Методика и результаты долгосрочного прогнозирования ветрового энергетического потенциала территорий Крыма / З.У. Рамазанова, К.А. Скульский, Б.Г. Тучинский // Проблемы загалльної енергетики. – 2005. – № 12. – С. 40–43.
5. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки / В.П. Харитонов. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. – 280 с.
6. Van der Hoven I. Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0,00007 to 900 cycle per hour / I. Van der Hoven // Journal of Meteorology. – 1957. – Vol. 14, №2. – P. 160–164.
7. Volkovaia O.O. Geoinformational support of wind power development at the local level / O.O. Volkovaia, O.S. Tretyakov // Проблемы непрерывной географической освіти і картографії. – 2014. – Вип. 19. – С. 117–120.

УДК 504.5(476) + 551.5(476)

**Е.И. Галай**

Белорусский государственный университет, г. Минск



## ДИНАМИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА МИНСКОЙ ОБЛАСТИ ВЫБРОСАМИ СТАЦИОНАРНЫХ ИСТОЧНИКОВ

В статье приведено ранжирование административных районов Минской области по выбросам загрязняющих веществ в атмосферный воздух стационарными источниками относительно среднеобластного уровня за восемнадцатилетний период исследований.

**Ключевые слова:** загрязнение атмосферы, стационарные источники, Минская область.

E. Galai

### DYNAMICS OF THE OPEN AIR POLLUTION BY THE EMISSIONS FROM THE STATIONARY SOURCES IN MINSK REGION

In the article administrative districts of Minsk region are ranged according to the pollutant emissions from the stationary sources in the open air in relation to mid region level for 18-year-long research.

**Keywords:** air pollution, stationary sources, Minsk region.

О.І. Галай

### ДИНАМІКА ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ МІНСЬКОЇ ОБЛАСТІ ВИКИДАМИ СТАЦІОНАРНИХ ДЖЕРЕЛ

У статті наведено ранжирування адміністративних районів Мінської області за викидами забруднюючих речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами відносно середнього обласного рівня за вісімнадцятирічний період досліджень.

**Ключові слова:** забруднення атмосфери, стаціонарні джерела, Мінська область.