

УДК 004.94

DOI: 10.31673/2412-9070.2025.040304

**Н. М. АУШЕВА**, доктор техн. наук, професор;

ORCID: 0000-0003-0816-2971

**О. В. КАРДАШОВ**, аспірант,

ORCID: 0000-0003-1767-7846

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВИЗНАЧЕННЯ ПРОСТОРОВОГО РОЗПОДІЛУ ШВИДКОСТІ ВІТРУ НА ОСНОВІ ДЕТЕРМІНОВАНИХ ТА ГЕОСТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ

*Метою статті є визначення просторового розподілу швидкості вітру за допомогою детермінованого методу інтерполяції радіально базисних функцій (RBF) та геостатистичних методів інтерполяції – простого кригінгу (Simple Kriging), та ординарного кригінгу (Ordinary Kriging), та проведення аналізу точності даних моделей інтерполяції відносно вхідної вибірки даних. Предметом дослідження є статистичні показники та методи валідації даних методів інтерполяції RBF, Simple kriging, Ordinary kriging. Було створено вибірку даних про швидкість вітру з 533 точок на території України, рівномірно розподілених з кроком 50 км, шляхом кореляції даних реаналізу NASA Power моделі MERRA-2 з вибіркою даних з 70 точок стаціонарних метеорологічних станцій на висоті 10 м. Обидва вхідні набори даних формувалися за період 10 років (2011-2020 років) у зимовий період, де на кожен день припадало 8 записів про швидкість вітру. Процес кореляції було виконано за допомогою моделі машинного навчання, методом Random Forest. На корельованій вибірці даних було проведено інтерполяцію швидкості вітру методами RBF, Simple Kriging, Ordinary Kriging і було отримано три вихідні растрові зображення з визначеною швидкістю вітру для кожного пікселя зображення. У результаті проведених досліджень, згідно статистики кросс-валідації методів інтерполяції, було визначено що метод Ordinary Kriging є найбільш точним для прогнозування швидкості вітру серед обраних методів інтерполяції. Аналіз точності моделювання виконувався за допомогою метрик RMSE, ME, MSE, RMSSE, ASE та за допомогою візуального порівняння діаграм розсіювання співвідношення прогнозованих та виміряних значень, діаграм розподілу та діаграм розсіювання стандартизованої похибки, для геостатистичних методів інтерполяції. За метрикою RMSE було визначено відносні одиниці точності методів інтерполяції, де для ординарного кригінгу приймається значення 100% точності, водночас метод RBF досягає 92,6%, а простий кригінг - 88,2% точності відносно ординарного кригінгу.*

**Ключові слова:** просторовий розподіл швидкості вітру; дані реаналізу; MERRA-2; метеорологічні дані; радіальні базисні функції; методи інтерполяції; простий кригінг; ординарний кригінг; кросс-валідація; моделювання.

### Вступ

Вітрова енергетика в рамках галузі відновлювальної енергетики є актуальним напрямком для проведення досліджень в Україні, оскільки в майбутньому виконуватиме важливу задачу з децентралізації джерел генерації електроенергії. Згідно з оцінками інституту відновлювальної енергетики НАН України, максимальний вітроенергетичний потенціал становить 831 ГВт. З них для суходолу 726 ГВт, для офшорних ділянок 105 ГВт [1]. До 2022 року встановлена потужність вітрових електростанцій становила близько 2 ГВт, з яких 70% припадає на тимчасово окуповані території України [2]. Виходячи з потреби у диверсифікації джерел генерації енергії та великого потенціалу розвитку вітроенергетичної галузі, необхідно забезпечити економічно вигідні умови для встановлення ВЕС. Дану задачу може виконувати ГІС-модель за умови коректного визначення комплексу складових, до яких відносять обмежуючі ділянки для розмі-

щення ВЕС та карту розподілу швидкості вітру за цільовою територією, яка повинна ґрунтуватися на надійних статистичних даних про швидкість вітру.

### *Постановка проблеми*

В Україні мережа стаціонарних метеорологічних станцій не є рівномірно розподіленою за територією та не створює достатньої щільності для коректного проведення процесу інтерполяції за наявними строковими даними про швидкість вітру. З цією метою до строкових даних метеостанцій додаються дані реаналізу супутникового зондування поверхні Землі, серед яких є вибірки даних про швидкість вітру на різних висотах з ресурсу NASA POWER [3]. Але, дані реаналізу, у свою чергу, мають суттєві похибки у точності визначення швидкості вітру, пов'язані із завищенням та заниженням пікових швидкостей. Для підвищення точності отриманої вибірки даних реаналізу застосовується алгоритм кореляції даних реаналізу зі строковими даними метеостанцій, що виконує кореляцію швидкості вітру в кожній точці вхідної вибірки за допомогою моделі штучного інтелекту, шляхом співставлення пар значень з двох вибірок [4]. Просторовий розподіл швидкості вітру є однією з найважливіших складових у процесі розрахунку доцільності розміщення ВЕС та потенційного об'єму виробітку електроенергії впродовж року. З цією метою доцільно провести дослідження точності різних методів інтерполяції даних, які дозволяють виконувати просторовий розподіл. Задача кореляції і верифікації, як даних реаналізу, так і даних отриманого просторового розподілу є надзвичайно важливим етапом для визначення доцільних ділянок для розміщення і проектування ВЕС, і є актуальною задачею в умовах сучасного стану вітроенергетичної галузі України.

### *Аналіз останніх досліджень і публікацій*

Оскільки кількості стаціонарних метеорологічних станцій недостатньо для коректного проведення інтерполяції швидкості вітру територією України, то виникає необхідність у використанні додаткових джерел вхідних даних для моделі інтерполяції. Одним з таких джерел є вибірки даних, отримані за допомогою реаналізу даних супутникового зондування поверхні Землі моделями MERRA, MERRA-2. Авторами публікації [5] проводилися тестування за цими моделями і було визначено що моделі MERRA, MERRA-2 мають тенденцію до значного просторового зміщення результуючих даних. У роботі [6] демонструються переваги нового методу реаналізу даних ERA5 над традиційним методом MERRA-2. До обох вибірок даних було застосовано корелювання за допомогою методу середнього зміщення з двома версіями глобального вітрового атласу GWA2, GWA3. Стаття [7] демонструє перевагу методу реаналізу даних ERA5 на прикладі результатів просторової кореляції даних з коефіцієнтом 0.55 у порівнянні зі стаціонарними станціями, а у міжрічному масштабі 0.68. Водночас, дослідники у роботі [8], порівнюючи методи ERA5 та MERRA-2, приходять до висновку, що метод MERRA-2 залишається актуальним для довгострокових спостережень завдяки стабільності даних і ширшому використанню в попередніх дослідженнях, незважаючи на переваги у точності ERA5 для більшості випадків.

Процес інтерполяції за створеною вхідною вибіркою може здійснюватися за допомогою двох груп методів – детермінованих та геостатистичних методів інтерполяції. Для більшості випадків геостатистичні методи інтерполяції, до яких відносять групу методів кригінгу, забезпечують вищу точність інтерполяції, порівняно з групою детермінованих методів, що демонструється у статті [9]. Автори роботи [10] доводять, що серед протестованих методів просторової інтерполяції метеорологічних даних на півночі Туреччини, зокрема серед методів IDW, RBF та найближчого сусіда (Natural neighbor), найефективнішим виявився метод IDW2.

До групи геостатистичних методів інтерполяції даних відносяться методи кригінгу, що описані у роботі [11]. Simple Kriging, згідно з яким є відомою константа середнього значення швидкості вітру, може ефективно використовуватися лише для інтерполяції метеорологічних параметрів у регіонах із рівномірним розподілом даних і низькою просторовою варіацією [12]. Ordinary Kriging, у свою чергу, використовує середнє значення швидкості вітру, обчислене в околі вхідних точок, що дозволяє застосовувати цей метод для територій з неоднорідними погодними умовами та рельєфом, що демонструється у дослідженні [13], де даний метод засто-

совувався для моделювання карт розподілу швидкості вітру з використанням вхідної вибірки даних з 35 метеостанцій.

**Мета дослідження** - порівняльний аналіз визначення просторового розподілу швидкості вітру на основі детермінованого та геостатистичних методів інтерполяції просторових даних з метою оцінки їхньої точності та здатності відображати просторову варіабельність.

### *Основна частина*

Оскільки порівняльна статистика точності просторового розподілу швидкості вітру, що виконується на вхідних даних, що відображають метеорологічний стан за допомогою знімку в один час, у визначеній даті, є недостатньо репрезентативною, до вхідного набору даних було включено дані про посезонні спостереження впродовж тривалого інтервалу часу.

Вхідний набір даних базується на строкових спостереженнях стаціонарних метеорологічних станцій Інституту відновлювальної енергетики НАН України, розташованих у 70 точках на території України, і складається з вимірювань швидкості вітру на висоті 10 м. Для кожної метеостанції, за кожен день спостережень, присутні 8 знімків на добу з інтервалом у 3 години, впродовж 2011-2020 років [14], за зимовий період. З причин нерівномірного розподілу метеостанцій та їхньої недостатньої щільності у багатьох областях України, було взято додатковий набір вхідних даних реаналізу дистанційного зондування Землі з ресурсу NASA Power, створений моделлю MERRA-2 [15]. Цей набір даних складається з 533 точок, рівномірно розташованих територією України та близьким прикордонням, з інтервалом у 50 км між кожною точкою. Ресурс надає можливість отримання вибірки даних з різної висоти – 10 м, 50 м, 100 м. У кожній точці сітки цього датасету були записані дані за аналогічними параметрами, з даними стаціонарних метеостанцій – на висоті 10 м, 8 знімків на добу з інтервалом у 3 години, за 2011-2020 роки, за зимовий період.

Над сформованою вибіркою даних реаналізу було проведено процес кореляції даних, з відповідною вибіркою даних з метеостанцій. За допомогою моделі регресії Random Forest було скорельовано значення швидкості вітру у кожному вузлі вибірки даних реаналізу, за допомогою співставлення з відповідними вузловими точками вибірки даних метеостанцій [4]. У результаті роботи процесу кореляції, згідно з двома метриками – значення середньоквадратичної похибки RMSE покращилися на 1.1, значення коефіцієнта детермінації R2 в середньому покращилося на 0.75, що підтверджує підвищення точності кореляції. Після проведення процесу кореляції вхідної вибірки даних з NASA POWER було сформовано результуючий датасет шляхом обчислення середнього арифметичного значення у кожному з 533 вузлів.

Вибірка методів для порівняння точності просторового розподілу швидкості вітру складається з детермінованого методу інтерполяції радіальних базисних функцій (RBF) і геостатистичних методів інтерполяції – простого кригінгу (Simple Kriging) та ординарного кригінгу (Ordinary Kriging). Для виконання процесу інтерполяції цими методами було застосовано інструмент Geostatistical Wizard з комплексу програмного забезпечення для геоінформаційних систем ArcGIS Pro [16]. Результатом виконання даних методів інтерполяції є растровий шар в ArcGIS Pro, з температурною мапою (heat map) розподілу швидкості вітру територією України, де для кожного пікселя вихідного зображення визначено, обчислене відповідним методом інтерполяції, значення швидкості вітру на основі вхідної вибірки даних.

**Радіальні базисні функції (RBF).** Даний метод є методом жорсткої інтерполяції, згідно з яким утворена поверхня проходить через кожне обчислене значення. Від обраної базисної функції буде залежати спосіб проходження поверхні відносно точок. На відмінну від методу інтерполяції IDW, метод RBF при обчисленні здатний моделювати інтерпольовані значення нижчі або вищі відносно пікових мінімальних та максимальних значень вхідних даних.

Для кожної вузлової точки даний метод використовує базисну функцію з набору  $n$ -кількості. У загальному вигляді предиктор можна описати:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i \phi(\|s_i - s_0\|) + \omega_{n+1}, \quad (1)$$

де  $\phi(r)$  - це радіальна базисна функція;  $r = \|s_i - s_0\|$  - це Евклідова відстань між спрогнозованим значенням  $s_0$  і положенням кожної точки вхідних даних  $s_i$ , а  $\omega_i$  - ваги, які треба оцінити [17].

Для виконання моделювання було обрано базисну функцію Completely Regularized Spline виду:

$$\phi(r) = - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(-1)^n (\sigma \cdot r)^{2n}}{n!n} = \ln(\sigma \cdot r / 2)^2 + E_1(\sigma \cdot r / 2)^2 + C_E, \quad (2)$$

де  $E_1$  - це експоненційна інтегральна функція,  $C_E$  - це Ейлерова константа [18].

Значення базисного параметра було встановлено на 2.808764, що було знайдено шляхом мінімізації значення RMSE, з використанням кросс-валідації.

Обидва розглянуті види геостатистичної інтерполяції – простий кригінг та ординарний кригінг реалізують одну і ту ж загальну статистичну модель виду:

$$Z(s) = \mu + \varepsilon(s), \quad (3)$$

де  $\mu$  - це середнє значення обчислювальної величини з вхідної вибірки, що в даному випадку є швидкістю вітру і визначається або глобально або локально;  $\varepsilon(s)$  - це величина шуму або похибки, що залежить від положення  $s$ .

**Простий кригінг (Simple Kriging).** Цей метод відноситься до методів геостатистичної інтерполяції і базується на мінімізації дисперсії прогнозу. Згідно з цим методом середнє значення вимірюваної величини є заздалегідь відомим і на відмінну від ординарного кригінгу, спрогнозоване значення обчислюється не за локальними значеннями вхідної вибірки, а за глобальним значенням константи  $\mu$  в рамках усієї області для інтерполяції. Прогнозоване значення для швидкості вітру у точці  $s_0$  виражається за допомогою формули:

$$\hat{Z}(s_0) = \mu + \sum_{i=1}^n \lambda_i (Z(s_i) - \mu), \quad (4)$$

де  $N(h)$  - набір попарних відстаней  $i - j = h$ ,  $Z(s_i)$  та  $Z(s_j)$  - це значення у просторових точках  $i$  та  $j$ , відповідно [17].

Simple Kriging базується на застосуванні просторової автокореляції і для кількісної оцінки розраховується емпірична варіограма:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2|N(h)|} \sum_{N(h)} (Z(s_i) - Z(s_j))^2, \quad (5)$$

де  $N(h)$  - набір попарних відстаней  $i - j = h$ ;  $Z(s_i)$  та  $Z(s_j)$  - це значення у просторових точках  $i$  та  $j$ , відповідно [17].

Даний метод не враховує трендові компоненти, такі як рельєф чи лінія узбережжя морів, а отже, глобальне середнє значення швидкості вітру негативно впливає на точність моделювання. Його застосування може бути обґрунтованим для регіонів, що обмежені сталими метеорологічними та рельєфними умовами. Тим не менш, даний метод дозволяє використовувати середній профіль вітру, визначений стаціонарними метеостанціями за певну кількість років для своєї математичної моделі та порівняно з універсальним кригінгом спрощує процедуру кросс-валідації за рахунок зниження кількості вхідних параметрів.

**Ординарний кригінг (Ordinary Kriging).** Даний геостатистичний метод інтерполяції базується на такій гіпотезі, що математичне значення інтерпольованої величини є заздалегідь невідомим, але є сталим локально, у границях радіусу варіограми:

$$\hat{Z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i (Z(s_i)). \quad (6)$$

Ваги  $\lambda_i$  у формулі (6) визначаються таким чином, щоб загальна сума дорівнювала 1, а дисперсія похибки інтерполяції була мінімальною за умови:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1. \quad (7)$$

Даний метод дозволяє адаптивно враховувати зміни локального середнього значення, які спричинені зміною у характері рельєфу поверхні, погодними фронтами, сезонними коливаннями швидкості вітру, що є характерними для окремих районів. Крім того, метод надає більш гнучкий спосіб обчислення просторового розподілу для даних з обмеженою загальною статистикою вхідної вибірки даних.

Результат моделювання просторового розподілу швидкості вітру територією України за скорельованою вхідною вибіркою даних наведено на рис. 1.

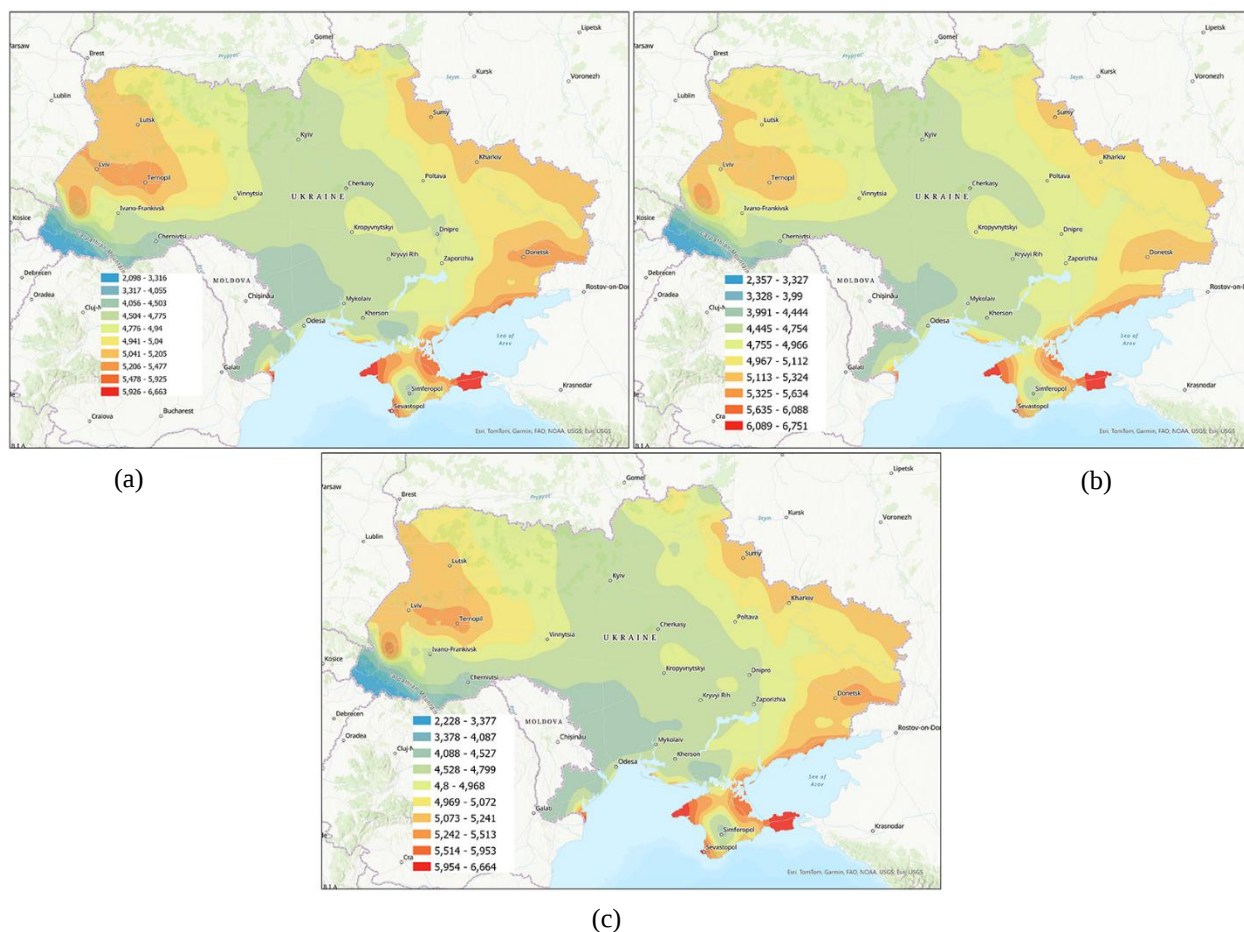


Рис. 1. Просторовий розподіл швидкості вітру територією України, виконаний методами – (a) RBF, (b) Simple Kriging, (c) Ordinary Kriging

Перед проведенням аналізу точності використаних методів необхідно зазначити, що результати інтерполяції швидкості вітру для гірських районів не можуть бути репрезентативними з причин кардинальної різниці у вітровому режимі з різних сторін гірських схилів, а отже, в таких умовах вибірка вхідних даних, що містить крок між вузлами сітки у 50 км, не може забезпечити коректність просторового розподілу швидкості вітру [19].

Дану проблему здатне вирішити або точкове розміщення метеостанцій з врахуванням особливостей рельєфу, з достатньою щільністю, але недоліком такого підходу є те, що строкові дані не вбудовуватимуться в існуючу статистику за минулі десятиліття. Іншим способом є застосування моделей глибокого навчання, що враховують у математичній моделі дані про рельєф, що, зокрема, розглядається у дослідженні [20]. До таких регіонів в Україні належать Карпати та Кримські гори, що відображено на рис. 2.

Для порівняльної оцінки точності виконання інтерполяції було використано метрики RMSE, ME, MSE, RMSSE, ASE, які були отримані на основі крос-валідації. Згідно з даними метриками, найкраща відповідність моделі емпіричним даним є такою, де значення RMSE є найменшими, а значення RMSSE мають незначне відхилення від 1.

Результати, наведені у таблиці, показують:

- найменше значення RMSE – 0,138403726 має метод ординарного кригінгу, метод RBF демонструє незначне зростання середньоквадратичної похибки RMSE на 0.011;
- дані за метрикою середньої похибки ME показують, що жодна з моделей не є систематично завищеною або заниженою;
- метрика RMSSE демонструє, що модель ординарного кригінгу коректно оцінює похибки, маючи значення 0,865058038, що є близьким до ідеального значення 1. Модель простого кригінгу має сильну розбіжність у коректній оцінці похибки;
- простий кригінг екстремально недооцінює похибку, що додатково підтверджується значенням середньої стандартної похибки ASE 0,031889114, яке має сильну розбіжність з RMSE простого кригінгу у 5 разів.

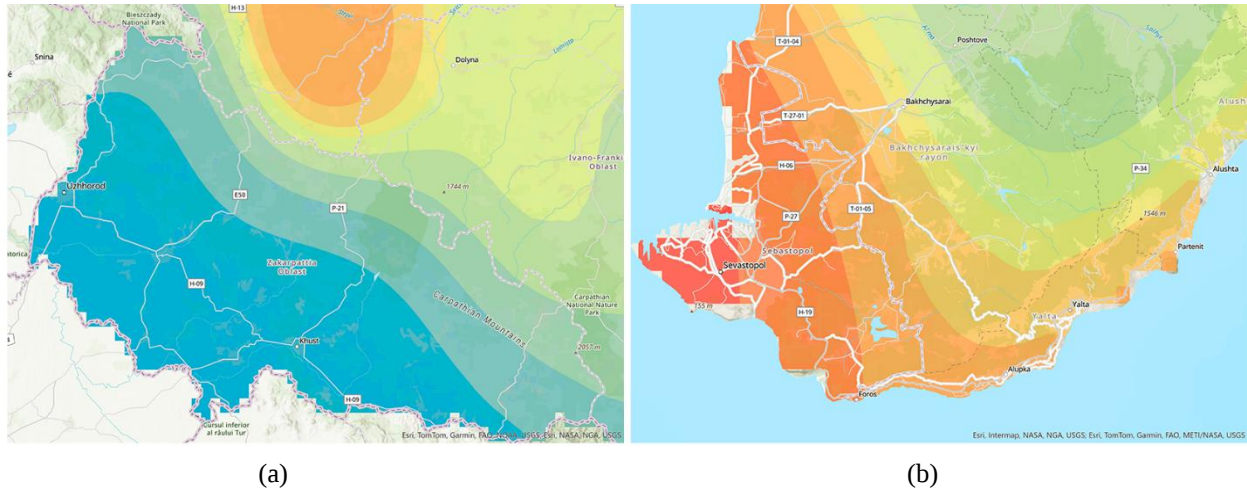


Рис. 2. Гірські райони України, для яких результати інтерполяції не є репрезентативними – (а) Карпати, (б) Кримські гори

### Результати тестування моделей інтерполяції

| Method                 | RMSE        | ME           | MSE          | RMSSE       | ASE         |
|------------------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| Ordinary Kriging       | 0,138403726 | 0,002049511  | 0,014802874  | 0,865058038 | 0,173165408 |
| Radial Basis Functions | 0,149614755 | -0,000764322 | -            | -           | -           |
| Simple Kriging         | 0,157006073 | -0,000216269 | -0,085802687 | 5,395192495 | 0,031889114 |

Додатковими метриками для оцінки точності виконання прогнозу методами інтерполяції є діаграми розсіювання, розподілу статистики крос-валідації та розсіювання стандартизованих похибок у порівнянні з еквівалентним квантилем стандартного нормального розподілу [17]. У методі RBF (рис. 3а) спостерігається невелике відхилення лінії регресії від опорної лінії, у крайніх

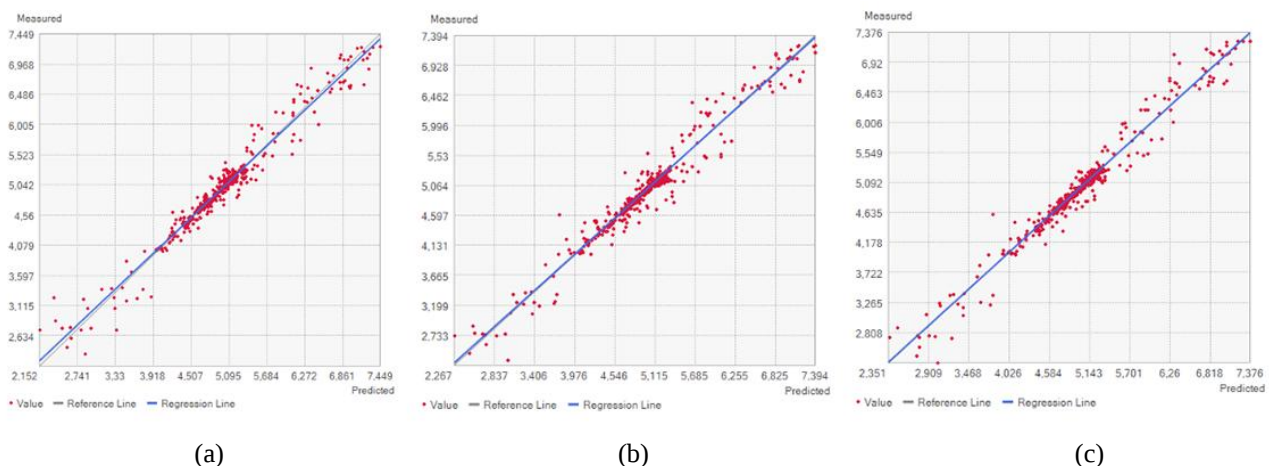


Рис. 3. Діаграма співвідношення між прогнозованими та виміряними значеннями швидкості вітру для методів інтерполяції – (а) RBF, (б) Simple Kriging, (с) Ordinary Kriging

точках присутнє більше розсіювання у порівнянні з геостатистичними методами інтерполяції, що свідчить про вищий показник похибки прогнозу. Метод простого кригінгу (рис. 3b) демонструє щільнішу регресійну залежність та меншу кількість відхилень від опорної лінії. Метод ординарного кригінгу (рис. 3c) найщільніше розташовує точки вздовж опорної лінії та має найменшу кількість екстремальних викидів, особливо у крайніх позиціях.

Метод ординарного кригінгу (рис. 4c) найточніше моделює розподіл даних, оскільки найбільш точно відтворює форму кривої щільності вимірених значень, особливо в зоні основного піку, що відповідає найчастішим значенням швидкості вітру. Методи RBF (рис. 4a) та простий кригінг (рис. 4b) демонструють відхилення як у крайніх ділянках розподілу, так і в області максимального піку щільності, що свідчить про меншу точність відтворення реального розподілу.

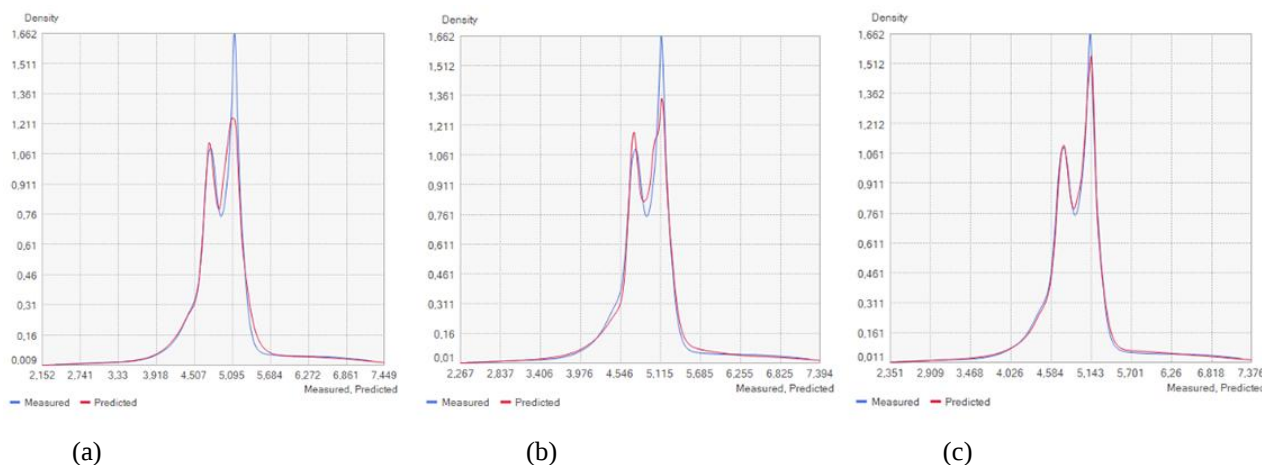


Рис. 4. Діаграма розподілу прогнозованих та вимірених значень швидкості вітру для методів інтерполяції – (a) RBF, (b) Simple Kriging, (c) Ordinary Kriging

Ординарний кригінг (рис. 5b) забезпечує кращу відповідність між стандартизованими похибками та теоретичним нормальним розподілом. Метод простого кригінгу (рис. 5a) демонструє суттєві відхилення в крайніх значеннях, особливо у верхньому хвості, що вказує на наявність великих похибок і неточність розподілу. Діаграма стандартизованих похибок є недоступною для методу RBF, оскільки модель даного методу не є вірогіднісною і не базується на статистичних припущеннях про нормальність розподілу похибок.

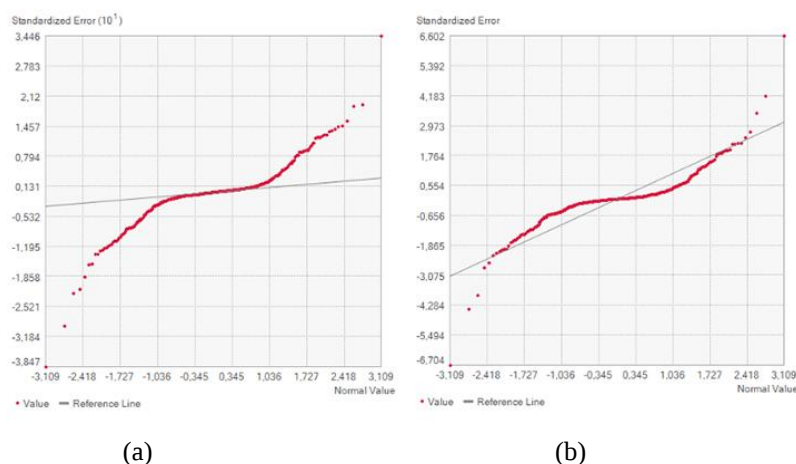


Рис. 5. Діаграма стандартизованих похибок для методів інтерполяції – (a) Simple Kriging, (b) Ordinary Kriging

### Висновки

За результатами просторового розподілу швидкості вітру було проведено порівняльний аналіз точності виконання прогнозування методами інтерполяції RBF, простого кригінгу та ординарного кригінгу. Було визначено, що метод ординарного кригінгу продемонстрував най-

кращу точність прогнозування швидкості вітру. Це підтверджується даними крос-валідації, зокрема, за метриками RMSE, ME, RMSSE. Значення середньоквадратичної похибки RMSE для методу ординарного кригінгу дорівнює 0,138403726, порівняно із значенням 0,149614755 для RBF та із значенням 0,157006073 для простого кригінгу. Значення RMSE ординарного кригінгу на 12% нижче, ніж у простого кригінгу, і на 7,5% нижче, ніж у методу RBF. У відносних одиницях точності ординарний кригінг приймається за 100%, тоді як RBF досягає 92,6%, а простий кригінг - 88,2%. Згідно з метрикою середньої похибки ME всі три методи не мають суттєвого систематичного зміщення моделі, оскільки значення похибки для усіх методів є близьким до 0. Метрика RMSSE продемонструвала екстремальну недооцінку похибок методом простого кригінгу із значенням 5,395192495, водночас, метод ординарного кригінгу показав значення RMSSE 0,865058038, що є відносно незначним відхиленням від ідеального значення 1.

### Список літератури

1. Кудря С. та ін. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2024. 63 с. ISBN 978-966-999-034-2.
2. Гавриш, О. А., Вижданов, О. С. (2025). Структурний аналіз регіональної енергетичної безпеки України в контексті зниження залежності від викопного палива. *Здобутки економіки: перспективи та інновації*, (17). <https://doi.org/10.5281/zenodo.15202013>.
3. Gelaro R., McCarty W., Suárez Max J. et al. (2017) *The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2)*, *Journal of Climate*, Vol. 30(14). <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>.
4. Ausheva N., Shapovalova S., Petrenko K., Kardashov O., Sofiienko A. (2024). Construction of a spatial distribution model of wind energy characteristics. *Advanced Information Systems*. Vol. 8(4). P.13-19. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.4.02>.
5. Staffell, I. and Pfenninger, S. (2016) Using bias-corrected reanalysis to simulate current and future wind power output. *Energy*. Vol. 114, pp. 1224–1239. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.08.068>.
6. Gruber, K., Regner, P., Wehrle, S., Zeyringer, M., & Schmidt, J. (2022). Towards global validation of wind power simulations: A multi-country assessment of wind power simulation from MERRA-2 and ERA-5 reanalyses bias-corrected with the global wind atlas. *Energy*, 238. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121520>.
7. Mi, X., & Liu, P. (2025). A Comparative Study of Near-Surface Wind Speed Observations and Reanalysis Datasets in China Over the Past 38 Years. *International Journal of Climatology*, 45. <https://doi.org/10.1002/joc.8738>.
8. Olauson, J. (2018). ERA5: The new champion of wind power modelling?. *Renewable Energy*. 126. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.056>.
9. Chen, X., Ye, X., Xiong, X., Zhang, Y., & Li, Y. (2024). Improving the accuracy of wind speed spatial interpolation: A pre-processing algorithm for wind speed dynamic time warping interpolation. *Energy*, 295. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.130876>.
10. Keskin, M., Dogru, A.O., Balcik, F.B., Goksel, C., Ulugtekin, N., Sozen, S. (2015). Comparing Spatial Interpolation Methods for Mapping Meteorological Data in Turkey. *Energy Systems and Management. Springer Proceedings in Energy*. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-16024-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-16024-5_3).
11. Wackernagel, H. (2003) *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Applications*, Springer, Berlin, 387 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-05294-5>.
12. Zaresefat, M., Derakhshani, R., & Griffioen, J. (2024). Empirical Bayesian Kriging, a Robust Method for Spatial Data Interpolation of a Large Groundwater Quality Dataset from the Western Netherlands. *Water*, 16(18), 2581. <https://doi.org/10.3390/w16182581>.
13. Kisuule, N., Cetin, M., Kiggundu, N., Kiozi, J. (2023). Geostatistical Modeling of Wind Speed Distribution in Uganda Using Ordinary Kriging Interpolation Technique. *International Journal of Scientific Advances (IJSCIA)*, 4. <https://www.doi.org/10.51542/ijscia.v4i3.26>.
14. Kudrya, S. (2023), *Wind energy*, The Institute of Renewable Energy, Kyiv, 135 p.
15. NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (2024) *The POWER Project*. Available at:

<https://power.larc.nasa.gov/> (Accessed: 24 February 2025).

+16. *Advancing the power of geography (2024) ArcGIS Geostatistical Analyst*. available at: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/geostatistical-analyst/overview> (Accessed: 24 February 2025).

17. ESRI. (2001). *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*.

[https://downloads2.esri.com/support/documentation/ao\\_/Using\\_ArcGIS\\_Geostatistical\\_Analyst.pdf](https://downloads2.esri.com/support/documentation/ao_/Using_ArcGIS_Geostatistical_Analyst.pdf)

18. Abramowitz, M., Stegun I.A. (1965). *Handbook of Mathematical Functions*. Dover Publications, New York. ISBN 0486612724, 9780486612720.

19. Petrenko, K., Kuznietsov, M., Ivanchenko, I., Karmazin, O. & Borsuk, A. (2023), *Assessment of the possibility of using wind speed reanalysis data for wind energy calculations*, *Vidnovluyana Energetika*, is.3, pp.75–85, [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3\(74\).75-85](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.3(74).75-85).

20. Gao, H., Hu, G., Zhang, D., Jiang, W., Ren, H., & Chen, W. (2024). *Prediction of wind fields in mountains at multiple elevations using deep learning models*. *Applied Energy*, 353. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.122099>.

N. Ausheva, O. Kardashov

### **DETERMINATION OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF WIND SPEED BASED ON DETERMINISTIC AND GEOSTATISTICAL METHODS**

The aim of this paper is to determine the spatial distribution of wind speed using a deterministic interpolation method based on radial basis functions (RBF), as well as geostatistical interpolation methods Simple Kriging and Ordinary Kriging, and to analyze the accuracy of these interpolation models relative to the input data sample. The subject of the research is to encompass the statistical indicators and validation methods for the RBF, Simple Kriging, and Ordinary Kriging interpolation techniques. A dataset of wind speed measurements was generated from 533 locations uniformly distributed across the territory of Ukraine with a spacing of 50 km. This dataset was derived by correlating reanalysis data from the NASA Power MERRA-2 model with observational data from 70 stationary meteorological stations at a height of 10 meters. Both datasets covered a 10-year period (2011–2020) during the winter season, with eight wind speed records per day. The correlation process was performed using a machine learning model Random Forest. Interpolation of wind speed was applied to the correlated dataset using the RBF, Simple Kriging, and Ordinary Kriging methods. As a result, three output raster images were obtained, each depicting wind speed values assigned to every pixel. Based on the conducted analysis and cross-validation statistics of the interpolation methods, it was determined that Ordinary Kriging provides the highest accuracy in wind speed prediction among the evaluated methods. The modeling accuracy was assessed using RMSE, ME, MSE, RMSSE, and ASE metrics, along with visual comparisons of scatter plots of predicted versus observed values, distribution plots, and standardized error scatter plots for the geostatistical interpolation methods. Based on the RMSE metric, the relative accuracy of the interpolation methods was determined, with ordinary kriging taken as the reference at 100% accuracy. In comparison to the ordinary kriging, the RBF method reaches 92.6% accuracy, and simple kriging reaches 88.2% accuracy.

**Keywords:** spatial distribution of wind speed; reanalysis data; MERRA-2; meteorological data; radial basis functions; interpolation methods; Simple Kriging; Ordinary Kriging; cross-validation.