

## ВІТРОВІ РЕСУРСИ ТЕРНОПІЛЬСЬКОЇ ОБЛАСТІ

В.І. Осадчий<sup>1</sup>, О.Я. Скринник<sup>1</sup>, Д.О. Ошурок<sup>1</sup>, О.А. Скринник<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Український гідрометеорологічний інститут ДСНС та НАН України, просп. Науки 37, м. Київ 03028, Україна, e-mail: osad@uhmi.org.ua, skrynyk@uhmi.org.ua, dimaoshurok@gmail.com

<sup>2</sup>Національний університет біоресурсів та природокористування України, вул. Героїв Оборони 15, м. Київ 03041, Україна, e-mail: skrynyk@nubip.edu.ua

Проведено кліматологічне оцінювання вітрового режиму та вітроенергетичних ресурсів Тернопільської області за період 1981–2010 рр. Для аналізу використано строкові дані, отримані на мережі станцій гідрометеорологічної служби України, дані реаналізу ERA-Interim, залучено діагностичну метеорологічну модель CALMET. Розраховано основні статистичні показники вітрового режиму на станціях області та значення вітроенергетичного потенціалу у вузлах розрахункової сітки з просторовою роздільною здатністю 2,5 км на висотах 10, 30, 50, 70, 90 і 110 м. Виконано порівняльний аналіз розрахованого просторового розподілу вітроенергетичного потенціалу з раніше опублікованими оцінками. Показано ефективність використання моделі CALMET для визначення вітроенергетичних ресурсів обмежених територій невеликих просторових масштабів зі складним рельєфом. Виявлено райони, які можуть бути перспективними для виробництва вітрової електроенергії як у промислових обсягах, так і в приватних господарствах.

**Ключові слова:** вітровий режим, вітроенергетичні ресурси, метеорологічний препроцесор CALMET, Тернопільська область.

**Вступ.** Швидкість та напрям вітру є важливими характеристиками клімату [8]. Ці показники дають інформацію про напрям і швидкість переміщення повітряних мас, про перенесення тепла та вологи, впливають на інтенсивність випаровування з підстильної поверхні та ін. Характеристики вітру є також надзвичайно важливими для вирішення прикладних завдань. Вітроенергетика (розрахунок вітроенергетичного потенціалу), будівництво (розрахунок вітрового навантаження на висотні будівлі та конструкції), екологія (розрахунок здатності атмосфери до перенесення та розсіювання забруднювальних домішок), авіація (визначення впливу вітру на літальні апарати) – далеко не повний перелік прикладних сфер застосування метеорологічної інформації про вітер.

У статті розглянуто кліматологічні аспекти дослідження характеристик вітру, важливих для потреб вітроенергетики.

**Мета роботи** – кліматологічне (за період 1981–2010 рр.) оцінювання сучасного стану вітрових ресурсів Тернопільської області та відпрацювання методики розрахунку вітроенергетичного потенціалу обмежених територій невеликих просторових масштабів із складним рельєфом на основі використання діагностичної мезомасштабної метеорологічної моделі CALMET [17].

Кліматологічні дослідження вітрового режиму всієї території України чи її окремих частин проводили і раніше [3, 8]. За невеликим винятком [7, 9, 13], результати цих досліджень в основному стосуються періоду 1961–1991 рр. або ще ранішого. Отже, інформація про сучасний стан вітрового режиму потребує певного оновлення. Активнішими є

дослідження аспектів вітрового режиму, що важливі для вітроенергетики, оскільки ця галузь швидко розвивається в нашій країні. Розроблено різні методи оцінювання просторового та часового розподілу вітрового енергетичного потенціалу на окремих частинах території України [4, 6, 10, 11]. За значеннями вітропотенціалу проведено районування всієї території країни [5], створено карту його географічного розподілу [1]. Проте ці результати [1, 5] отримано за недостатньої просторової роздільної здатності моделі, що ускладнює їх практичне використання.

**Вітровий режим Тернопільської області в період “сучасного” клімату. Емпіричні дані.** Для дослідження сучасного стану вітрового режиму Тернопільської області було використано строкові дані щодо швидкості та напрямку вітру на висоті флюгера (~10 м над землею поверхнею), які отримано на 4 метеорологічних станціях (Кременець, Тернопіль, Березани та Чортків) за період 1981–2010 рр. Дані взято з оцифрованих таблиць ТМС, що зберігаються у Галузевому державному архіві Центральної геофізичної обсерваторії України. Перед тим як розпочати розрахунки статистичних показників вітрового режиму, з метою вилучення викидів було здійснено найпростіший контроль якості – на перевищення граничних меж. Інших процедур контролю (включаючи перевірку на однорідність часових рядів) не проводили, оскільки методи гомогенізації кліматологічної інформації з такою часовою роздільною здатністю ще недостатньо розроблені.

**Розраховані показники.** Перш за все зазначимо, що для аналізу та інтерпретації даних, отриманих на кожній станції (для всієї вибірки чи для деяких її частин), переважно використовували модель ви-

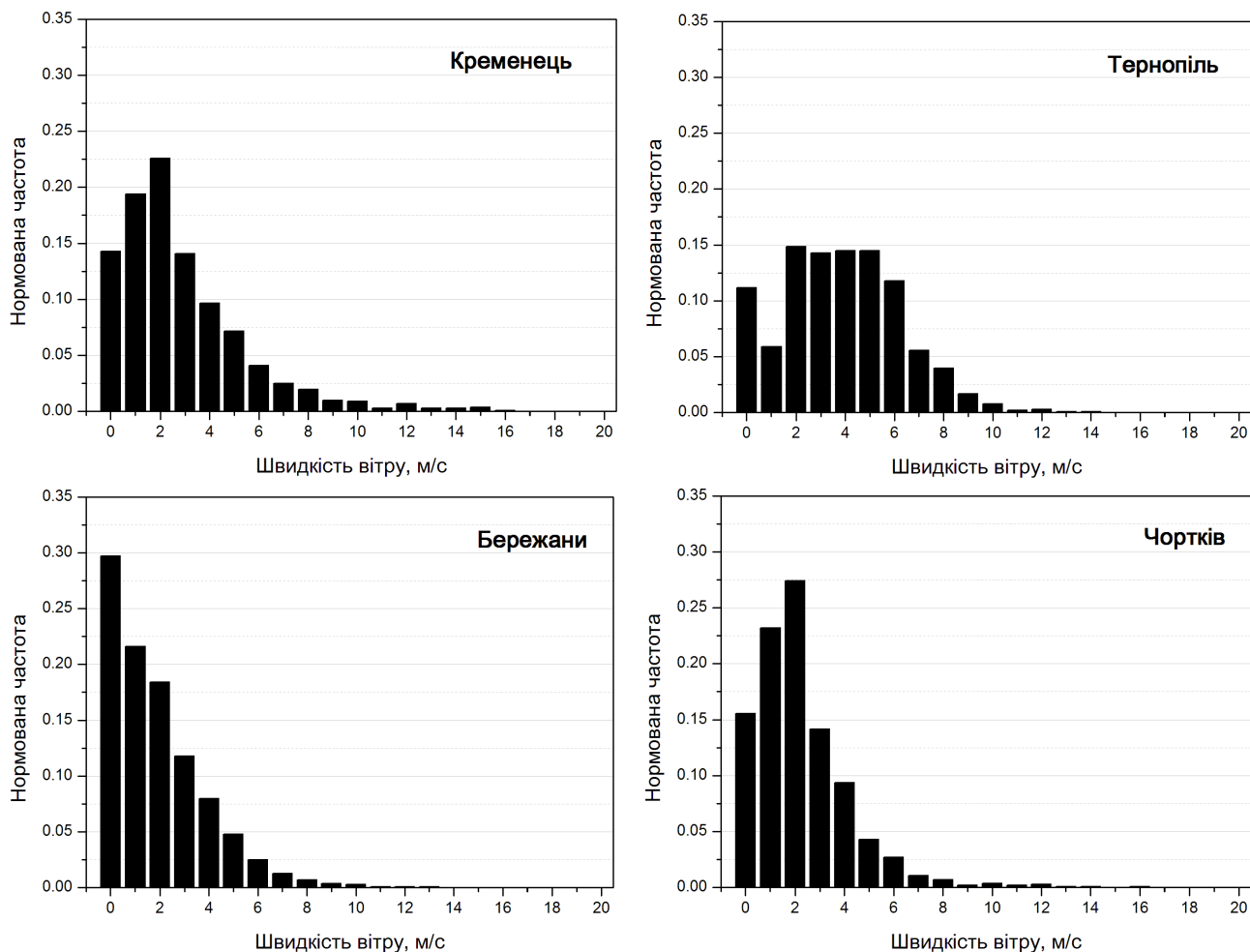


Рис. 1. Гістограми розподілу швидкості вітру на станціях (частоти нормовано на загальну кількість строкових даних за період 1981–2010 рр.)

Fig. 1. Wind speed histograms at stations (frequencies are normalized on the total number of observations in the period of 1981–2010)

падкової величини, навіть коли досліджували найпростіші особливості їх часової поведінки – річний та добовий хід. Очевидно, коректнішою є модель випадкової функції, проте вона значно складніша для практичного використання. Вважаємо, що для поставлених завдань модель випадкової величини є цілком достатньою.

Отже, спочатку для кожної станції було проаналізовано всю сукупність строкових даних за весь період 1981–2010 рр. як значення однієї випадкової величини. Гістограми розподілу модуля швидкості вітру та його напрямку (рози вітрів) на кожній станції області (рис. 1, 2) можна інтерпретувати як емпіричні щільності розподілів імовірностей. Вони є найінформативнішими характеристиками вітрового режиму (в межах вибраної математичної моделі емпіричних даних), на основі яких можна розрахувати будь-які інші статистичні показники (див. таблицю).

Розподіли швидкості вітру на станціях Чортків і Кременець практично ідентичні з максимумом у 2 м/с і досить різким зниженням частоти на більших значеннях. На станції Тернопіль максимум розподілу теж припадає на значення 2 м/с, проте

не спостерігається різкий спад частоти. Швидкості вітру в діапазоні 2–6 м/с мають практично однакову частоту/ймовірність. Тільки на станції Бережани зафіксовано не зовсім типовий розподіл з максимумом у 0 м/с. Причиною великої кількості спостережених штилів може бути некоректна робота приладу чи більша закритість горизонту на цій станції. Втім вплив закритості станцій на виміряні значення швидкості вітру не досліджували.

Характер розподілів швидкості цілком визначає основні статистичні показники (див. таблицю).

*Статистичні показники багаторічного (за період 1981–2010 рр.) вітрового режиму Тернопільської області*  
*Statistic parameters of wind conditions in the Ternopil region*  
*(calculated over the period of 1981–2010)*

Станція	Середня швидкість, м/с	Середнє квадратичне відхилення, м/с	Максимальне значення, м/с
Кременець	2,87	2,68	22
Тернопіль	3,83	2,46	20
Бережани	1,92	2,04	21
Чортків	2,25	2,00	24

Найбільше середнє значення швидкості вітру (3,83 м/с) спостерігається на станції Тернопіль, найменше – на станції Бережани (1,92 м/с). Незважаючи на подібність розподілів на станціях Кременець і Чортків, виявлено різницю між їх середніми значеннями (2,87 та 2,25 м/с) та ще більшу різницю між середніми квадратичними відхиленнями (2,68 та 2,0 м/с). Загалом у північно-східній частині області вітер інтенсивніший та мінливіший, ніж у південно-західній, хоча найбільше максимальне із строкових вимірів значення (24 м/с) зафіксовано на станції Чортків.

З аналізу розподілів вітру за напрямом (рис. 2) випливає, що в Тернопільській області переважають вітри із західною та південною складовими. Тільки на станції Чортків спостерігаються вітри із північно-західною складовою. На всіх станціях рози вітрів є дуже подібними, що може засвідчувати відсутність суттєвого впливу місцевої мікроциркуляції.

Як зазначено вище, модель випадкової величини є не зовсім коректною і неповно відображає статистичний/кліматологічний режим вітру. Річ у тім, що існує чітко виражений річний та добовий ходи вітрових характеристик. Однак, розглядаючи строкові дані за весь період 1981–2010 рр. як значення однієї випадкової величини, ми не вловлюємо ці особливості вітрового режиму. Тому для характеристики річного ходу було розглянуто строкові значення окремо для кожного місяця року і розраховано їх статистики (з математичної точки зору для емпіричних даних використовуємо модель сукупності 12 випадкових величин). На рис. 3 представлено результати розрахунку середнього значення та середнього квадратичного відхилення. Розраховано також гістограми розподілу швидкості та напрямку вітру для кожного місяця, проте через обмеженість обсягу публікації результати не наводимо. Характер річних ходів швидкості вітру практично ідентичний для всіх станцій – з максимумом

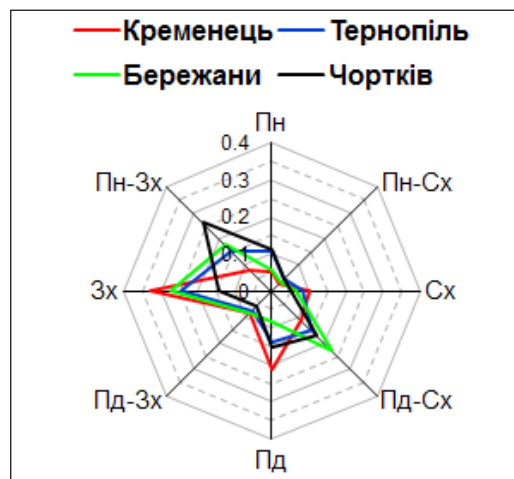


Рис. 2. Розподіл напрямку вітру за 8 румбами на станціях (частоти нормовано на загальну кількість строкових даних за період 1981–2010 рр. без урахування кількості випадків із штилем)

Fig. 2. Wind direction distribution for 8 rhumbs at stations (frequencies are normalized on the total number of observations in the period of 1981–2010 without number of cases with calm conditions)

у січні та мінімумом у серпні. Проте амплітуда річних змін залежить від змінення самих швидкостей: чим вони більші, тим більша амплітуда. Для станцій Тернопіль і Кременець, де спостерігаються великі значення швидкості, амплітуда змін становить ~1,5 м/с, для станцій Бережани та Чортків – близько 1 м/с. Річні ходи середнього квадратичного відхилення практично подібні до річних змін середніх значень, з такими самими амплітудами. Єдиний виняток – станція Тернопіль, де зафіксовано мінімальну амплітуду (< 1 м/с). Особливості річного ходу напрямку вітру не аналізували.

Для дослідження особливостей добового ходу характеристик вітру було розглянуто дані окремо для кожного із 8 строків спостережень для 4 місяців року (січень, квітень, липень і жовтень) за весь

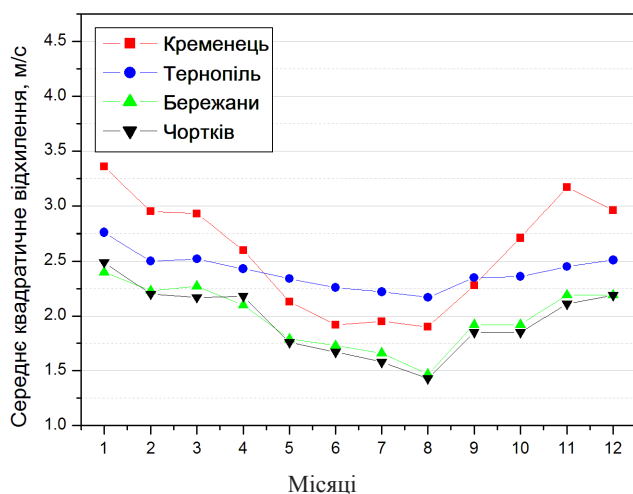
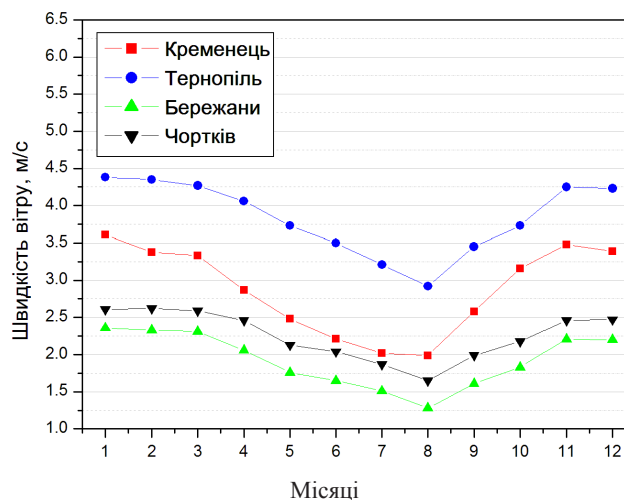


Рис. 3. Річний хід швидкості вітру та її середнього квадратичного відхилення

Fig. 3. Yearly cycle of wind speed and its standard deviation



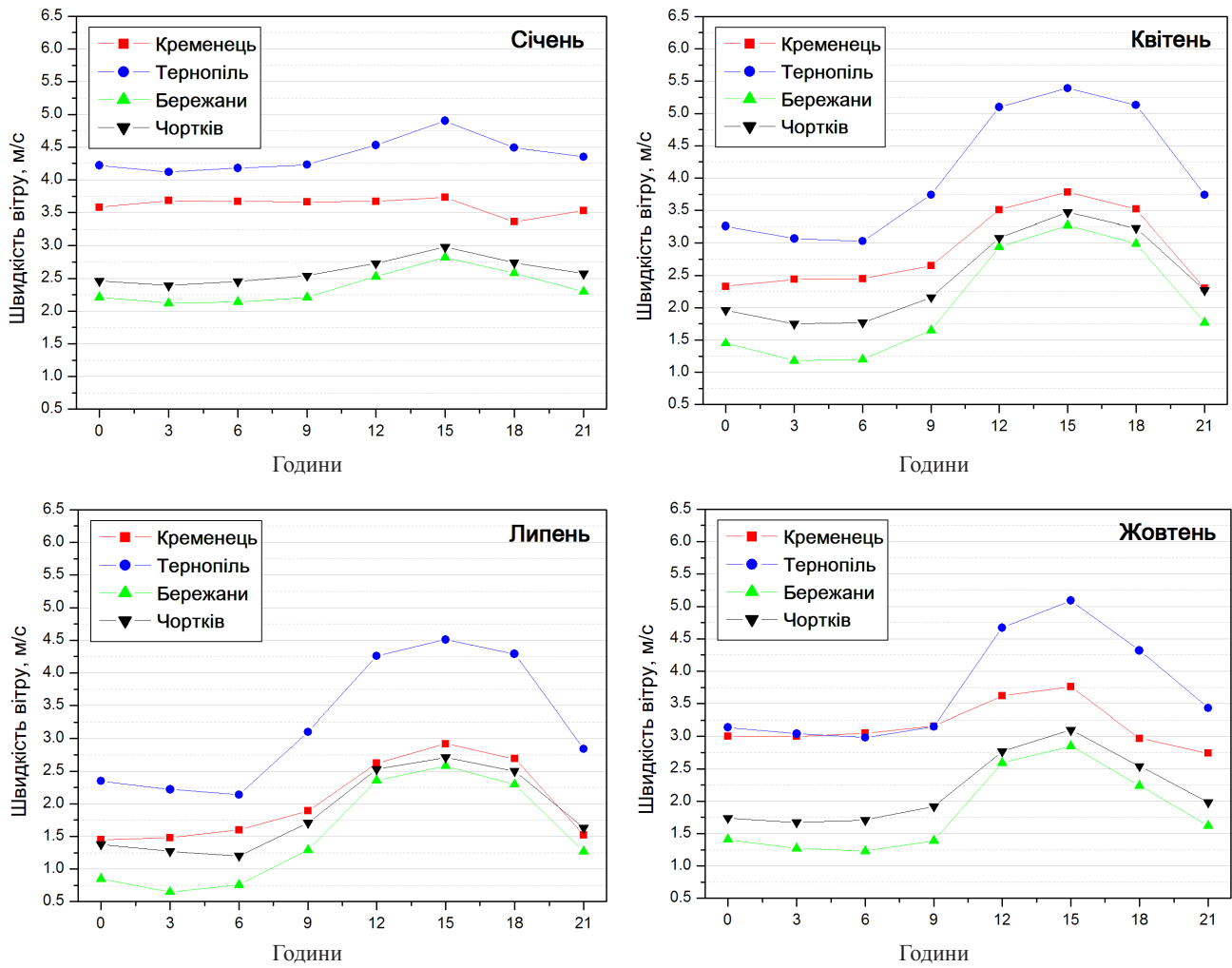


Рис. 4. Добовий хід швидкості вітру за окремі місяці  
 Fig. 4. Daily cycle of wind speed for particular months

період дослідження. Математична модель даних у цьому випадку – сукупність 8 випадкових величин. На рис. 4 показано середній за весь період добовий хід для зазначених місяців.

Найчіткіше добовий хід швидкості спостерігається в теплий період року, коли підстильна поверхня добре прогрівається у світлий період доби, інтенсифікує турбулентне перемішування в граничному шарі атмосфери і, відповідно, відбувається інтенсифікація переміщення повітряних мас. Амплітуда добового ходу в теплий період року на всіх станціях приблизно однакова і становить ~2 м/с. Узимку амплітуда спадає до 1 м/с і менше. В усі місяці максимальну швидкість вітру протягом доби зафіксовано о 15 год.

**Вітроенергетичні ресурси Тернопільщини. Загальна постановка проблеми.** Для вітроенергетики критично важливо знати просторовий (і в горизонтальному, і у вертикальному напрямках) та часовий розподіл вітроенергетичного потенціалу ( $P$ ). Коректне аргументоване оцінювання реальних значень цього показника надзвичайно важливе, оскільки він входить до складу нормативних документів, які є складовими передпроектної та проектної документації з

розробки та експлуатації об'єктів вітроенергетики [12]. Інакше кажучи, знання просторового розподілу потенціалу необхідне для локалізації місць встановлення вітроенергетичних установок (ВЕУ), його часового розподілу – для розрахунку не миттєвого, а деякого стійкого значення, яке б характеризувало певний період часу.

Вітроенергетичний потенціал, або питома потужність вітру [2], – це кінетична енергія атмосферного повітря, яке проходить за одиницю часу через переріз одиничної площі у вертикальному напрямку до земної поверхні:

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 \cdot ([P] = \text{Вт/м}^2), \quad (1)$$

де  $\rho$  – густина повітря (яку для задач вітроенергетики вважають сталою – 1,226 кг/м<sup>3</sup>);  $v$  – модуль швидкості вітру. Очевидно, що швидкість вітру – це основна величина, яку необхідно знати для визначення  $P$ . Зауважимо, що  $P$  – це повна потенційно доступна енергія, яка існує в природі. Проте ВЕУ можуть утилізувати лише деяку її частину, яку саме – залежить від технічних характеристик цих установок (від 15 до 30 %).

Вітер (швидкість і напрям) у фіксованій точці простору в приземній атмосфері має значні флуктуації на різних часових масштабах: від декількох секунд і хвилин через турбулентність до десятків років і більше внаслідок кліматичних коливань і змін. З огляду на функціональну залежність (1), аналогічні коливання матиме і вітроенергетичний потенціал. Тому на практиці усереднюють цю величину для отримання стійкої характеристики потенціалу.

Якщо для модуля  $v$  (а отже, і для  $P$ ) у фіксованій точці простору використовувати модель випадкової величини, заданої щільністю розподілу ймовірностей  $f(v)$ , то її середнє значення слід розрахувати за формулою

$$\langle P \rangle = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} v^3 f(v) dv. \quad (2)$$

Зазначимо, що формулу (2) практично завжди наводять у науково-методичній літературі з вітроенергетики як основу для розрахунків.

Якщо для показників вітру використовувати модель випадкової функції (яка є природнішою), то можна усереднювати за часом:

$$\bar{P} = \frac{1}{2T} \rho \int_0^T v^3 dt \quad (3),$$

де  $T$  – період усереднення. У разі дискретних у часі вимірів показників вітру отримаємо

$$\bar{P} = \frac{1}{2T} \rho \int_0^T v^3 dt \approx \frac{1}{2N} \rho \sum_{i=1}^N v_i^3, \quad (4),$$

де  $N$  – кількість вимірів за проміжок часу  $[0, T]$ . З формули (4) випливає, що, чим точніші виміри показників вітру в часі та чим більша кількість дискретних вимірів, тим достовірніші оцінки осередненого значення вітроенергетичного потенціалу.

За умови, що для оцінювання вітроенергетичного потенціалу розглядають проміжки часу тривалістю декілька років чи десятиліть, для яких можна припустити певну стаціонарність та ергодичність випадкової функції  $v(t)$  (знехтувавши добовим і річним ходом), отримуємо:

$$\langle P \rangle \approx \bar{P}.$$

На практиці швидкість вітру для розрахунку  $P$  беруть з вимірів і спостережень на мережі метеорологічних станцій, інколи залучають дані аерологічних зондувань, які регулярно проводить гідрометеорологічна служба України. Слід зауважити, що регулярна мережа метеостанцій є основним, але не єдиним джерелом інформації про вітер. Можна використовувати супутникові дані чи дані спеціальних (нерегулярних) вимірювань та ін. Проте методи космічного зондування ще недостатньо точно відновлюють профілі вітру в приземному шарі атмосфери, а проведення спеціальних (не регулярних) вимірів є доволі дорогими і нетривалими, що не дає змоги отримати стійкі характеристики.

Виникає основна проблема: мережа станцій дискретна в просторі, а самі вимірювання дискретні в часі. Іншими словами, вимірювання вітрових характеристик проводять 8 разів на добу на метеорологічних станціях з 10-хвилинним усередненням та від 2 до 4 разів на добу – на аерологічних, і тільки у певних точках простору, відстані між якими досить значні. Зауважимо, що для вітроенергетики проблема дискретності вимірів у часі не є такою гострою (3-годинного інтервалу достатньо, щоб провести часову інтерполяцію усереднених за 10 хв значень показників вітру з мінімальними похибками). Складнішою є проблема дискретності вимірів у просторі. Наприклад, середня відстань між метеостанціями на території України дорівнює  $\sim 50$ , а між станціями аерологічного зондування  $\sim 300$  км. Для різних областей України ситуація може бути ще складнішою, наприклад, у Тернопільській області є тільки 4 метеорологічні станції. Ураховуючи, що площа області становить  $13\,823$  км<sup>2</sup>, легко визначити, що на 1 станцію припадає площа  $\sim 3456$  км<sup>2</sup>, тобто виміри на 1 станції мають характеризувати територію, співвимірну з квадратом  $\sim 60 \times 60$  км<sup>2</sup>. Очевидно, що така кількість станцій є недостатньою, особливо в умовах складного рельєфу. Тому основним завданням, що виникає, є поширення вимірюваної інформації у будь-яку іншу точку досліджуваної області в горизонтальному та вертикальному напрямках (адже більшість ВЕУ розміщують на висотах, які перевищують висоту флюгера), або, іншими словами, потрібно проведення інтерполяції та екстраполяції.

Очевидно, така постановка задачі не нова, існує надзвичайно велика кількість методів просторової інтерполяції (різної складності та різної специфікації/спрямованості). Проте для визначення показників вітру задача значно ускладнюється, оскільки вони залежать від великої кількості чинників, що дуже змінюють їх і в просторі. Це характер глобальної та регіональної атмосферної циркуляції (великомасштабний баричний градієнт), рельєф місцевості, типу підстильної поверхні (її шорсткості), час доби та сезон року, наявність великих водних об'єктів поблизу. Не всі методи просторової інтерполяції враховують перелічені чинники.

У вітроенергетиці з метою поширення вимірюваної на станціях інформації про вітер у вищі шари приземного шару екстраполяцію проводять на основі простих формул (експоненціальний чи логарифмічний профіль). Однак при цьому не враховують добову, а також річну динаміку цих профілів. Звичайно можна використовувати дані вертикального зондування, але їх кількість недостатня для коректного відтворення (горизонтальної інтерполяції) поля вітру на висотах у приземному шарі.

Пропонуємо метод розрахунку просторового розподілу вітру на основі метеорологічного пре-процесора CALMET. На нашу думку, метод трудомісткий, але доволі простий у застосуванні і має

низку переваг порівняно із звичайними методами просторової інтерполяції та екстраполяції на основі зазначених вище вертикальних профілів.

**Метеорологічний препроцесор CALMET.** CALMET – метеорологічний препроцесор відомої дифузійної моделювальної системи CALPUFF, рекомендованої державною агенцією США з охорони навколишнього середовища (US EPA) для моделювання процесів атмосферної дифузії на різних просторових масштабах [19]. CALMET – діагностично не гідродинамічна метеорологічна модель, тобто просторовий розподіл вітру визначають за допомогою інтерполяції без залучення рівнянь гідродинаміки. Втім під час розрахунку показників вітру враховують багато ефектів, за якими можна “вловити” вплив основних чинників (таких як рельєф, шорсткість підстильної поверхні, тип температурної стратифікації та ін.) на швидкість і напрям вітру.

Зазначимо, що для проведення розрахунків з використанням моделі CALMET необхідно підготувати великий обсяг вхідної геофізичної та метеорологічної інформації для вибраної області моделювання. Вхідні геофізичні дані – це дані щодо висоти земної поверхні (цифрова модель рельєфу, DEM-дані), типу рослинності й землекористування (LULC дані), які застосовують для визначення параметра шорсткості, альbedo, вегетаційного індексу та інших важливих характеристик підстильної поверхні. Вхідна метеорологічна інформація складається з даних наземних станцій (необхідними є дані щодо атмосферного тиску, температури повітря, відносної вологості, висоти нижньої межі хмар, їх бальності, напряму й швидкості вітру) і вертикальних зондувань (вертикальні профілі тиску, температури, відносної вологості, напряму та швидкості вітру). Метеорологічна інформація, отримана на наземних станціях, повинна мати 1-годинну часову роздільну здатність, тому перед використанням строкових даних у моделі було проведено їх часову лінійну інтерполяцію. Дані вертикальних зондувань треба отримувати не більше як із 12-годинним інтервалом.

Отже, поле вітру в моделі CALMET розраховують у два етапи, а з урахуванням розрахунку початкового поля – у три етапи.

На підготовчому етапі розраховують початкове поле вітру. Дані наземних станцій екстраполюють у вищі шари розрахункової сітки. Екстраполяцію здійснюють на основі теорії подібності Моніна–Обухова для приземного шару атмосфери:

$$v(z) = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \left( \frac{z}{z_0} \right) - \Psi_M \left( \frac{z}{L} \right) + \Psi_M \left( \frac{z_0}{L} \right) \right], \quad (5)$$

де  $v(z)$  – модуль швидкості вітру на висоті  $z$ ;  $u_*$  – динамічна швидкість;  $k$  – стала Кармана ( $k \approx 0,4$ );  $\Psi_M$  – функція стійкості атмосфери, аналітичний запис якої відомий [17];  $L$  – масштаб Моніна–Обухова;  $z_0$  – параметр шорсткості підстильної поверхні. Усі масштабні параметри формули (5)

визначають на підставі вхідної метеорологічної інформації [17]. Як зазначено вище, у вітроенергетиці для визначення швидкості вітру на висотах у приземному шарі використовують логарифмічний профіль, проте не враховують його залежність від типу температурної стратифікації/атмосферної стійкості (не враховують наявність у формулі функції  $\Psi_M$ ).

Після екстраполяції значення горизонтальних компонент вітру (дані вертикальних зондувань та проекстрапольовані наземні дані) інтерполюють у вузли розрахункової сітки на кожному із вертикальних рівнів методом зважених обернених квадратів відстаней.

На першому етапі підганяють розраховане початкове поле до особливостей рельєфу області моделювання, тобто до дрібномасштабних особливостей земної поверхні. Тут початкове поле вітру модифікують, використовуючи параметризацію таких ефектів:

- кінематичного, спричиненого рельєфом, – обтікання перешкод і прискорення потоків на їх вершинах;

- схилових потоків уздовж схилів гірських масивів; за наявності гірських масивів або височин розраховують додаткові переміщення атмосферного повітря вниз/вверх по схилах через різницю в густині повітря, що виникає внаслідок радіаційного вихолодження чи прогрівання;

- термодинамічного блокувального – ефект параметризують у термінах локального числа Фруда; якщо це число не перевищує деяке критичне значення і наявна вертикальна складова швидкості (uphill component), потік модифікують/підганяють до горизонтального потоку (нівелюють вертикальну складову) з напрямом, дотичним до підстильної поверхні (локальної топографії);

- мінімізації тривимірної дивергенції.

Детальний фізико-математичний опис ефектів наведено у статті [17].

На другому етапі дані метеорологічних спостережень за вітром (дані наземних метеорологічних станцій та дані радіозондувань) включають у розраховані поля і проводять процедуру об'єктивного аналізу для отримання фінального поля вітру. Дані спостережень (у кожній інтерполяційній точці) включають на кожному окремому вертикальному шарі на основі формули

$$(v_1, v_2)_{ij2} = \frac{(v_1, v_2)_{ij1} / R^2 + \sum_{k=1}^N (v_{1obs}, v_{2obs})_k / R_k^2}{1 / R^2 + \sum_{k=1}^N 1 / R_k^2},$$

де  $(v_1, v_2)_{ij2}$  – остаточні значення горизонтальних компонент вітру в інтерполяційному вузлі  $ij$ ;  $(v_1, v_2)_{ij1}$  – значення горизонтальних компонент вітру в цьому інтерполяційному вузлі після першого етапу (з включеними ефектами впливу земної поверхні);  $R$  – ваговий коефіцієнт, значення якого задає користувач;  $(v_{1obs}, v_{2obs})_k$  значення

компонент швидкості вітру на станції з індексом  $k$ ;  $R_k$  – відстань від  $k$ -ї станції до інтерполяційного вузла  $ij$ ;  $N$  – кількість станцій, які лежать в околі вузла  $ij$  (його радіус задає користувач).

Зауважимо, що другий етап проводять, оскільки початкове поле вітру можна розраховувати не лише на підставі даних наземних станцій та вертикальних зондувань. Можливі інші способи розрахунку чи задання початкового поля, наприклад, використання результатів інших, як правило, прогностичних метеорологічних моделей, приміром WRF. Однак такий спосіб розрахунку складний і затратний у часі.

**Область моделювання. Вхідна геофізична та метеорологічна інформація.** Для проведення розрахунків вибрано прямокутну область у конічній проекції Ламберта, оптимальній для всієї території України (рис. 5). Область моделювання включає територію Тернопільщини та прилеглі території. Розрахункову сітку вибрано з просторовим кроком 2,5 км та 6 вертикальними рівнями 10, 30, 50, 70, 90 та 110 м, що охоплюють основні висоти розташування ВЕУ.

Як цифрову модель рельєфу для проведення розрахунків використано глобальні дані SRTM30 [18], що отримані Геологічною службою США (USGS, US Geological Service) у 2000 р. на основі компіляції/комбінування даних SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) і даних GTOPO30. Горизонтальна роздільна здатність  $\sim 1$  км. Рис. 5 побудовано з використанням SRTM30.

Як дані щодо типу рослинності та землекористування використано глобальні дані Global (Eurasia) Land Cover Characteristics Data Base Version 2.0 (USGS Global format) [16], отримані Геологічною службою США у 1999 р. Дані наведено у рівновеликій азимутальній проекції Ламберта, оптимізованій для Європи. Просторова роздільна здатність  $\sim 1$  км. Дані розраховано на підставі обробки супутникових знімків, отриманих за допомогою приладу AVHRR протягом проміжку часу з квітня 1992 по березень 1993 р.

Вхідну метеорологічну інформацію (дані наземних станцій) отримано з оцифрованих таблиць ТМС. Для проведення розрахунків використано дані всіх 4 станцій Тернопільської області. Для уникнення крайових ефектів також залучено дані станцій сусідніх областей, а саме: Ямпіль, Кам'янець-Подільський, Броди, Івано-Франківськ та Коломия (рис. 5). Всі станції входять до регулярної мережі гідрометслужби України. На жаль, даних вертикального зондування, що проводять на аерологічних станціях Львів, Чернівці та Шепетівка, які бажано б було використати у розрахунках, немає в електронному вигляді, а їх оцифрування – справа надзвичайно трудомістка. Тому як альтернативу для вертикальних зондувань було використано дані реаналізу ERA-Interim з просторовою роздільною здатністю  $0,25^\circ \times 0,25^\circ$  і часовим кроком 6 год. Реаналіз ERA-Interim містить архів даних геофізичних величин, отриманих у ході асиміляції даних (узгодження результатів прогностичних

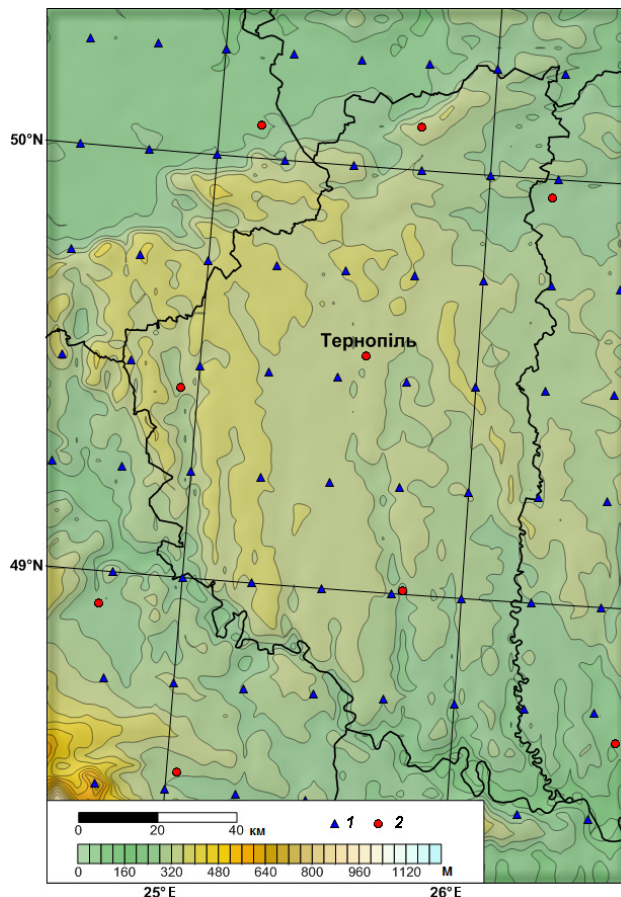


Рис. 5. Область проведення розрахунків та її рельєф: 1 – місце розташування метеорологічної станції; 2 – локалізація даних реаналізу, використаних у розрахунках

Fig. 5. The domain and its relief. Location of meteorological stations (1) and reanalysis data; that have been used in calculations (2)

моделей із даними фактичних спостережень) на базі прогностичної моделі IFS (версія Cy31r2) за період з 1979 р. по теперішній час. Механізм створення бази даних реаналізу детально описано у статті [14]. Дані реаналізу ERA-Interim є у вільному доступі на сайті Європейського центру середньострокових прогнозів (ECMWF) [15]

**Результати та їх обговорення.** Основний результат – розраховане поле вітру (швидкості та напрямку) на вказаних висотах із 1-годинним часовим кроком за весь період 1981–2010 рр. Це надзвичайно великий обсяг інформації, який може слугувати основою для подальших розрахунків не тільки вітроенергетичного потенціалу, а й інших показників, важливих для вітроенергетики. Наприклад, можна розрахувати час (кількість годин) за досліджуваний період, коли спостерігали швидкість вітру з оптимального діапазону для роботи тої чи іншої ВЕУ для будь-якої вузлової точки області моделювання, або економічну ефективність встановлення конкретної ВЕУ у тій чи іншій точці області. Нижче наведено тільки результати усередненого значення енергетичного потенціалу за весь період на підставі формули (4) (рис. 6).

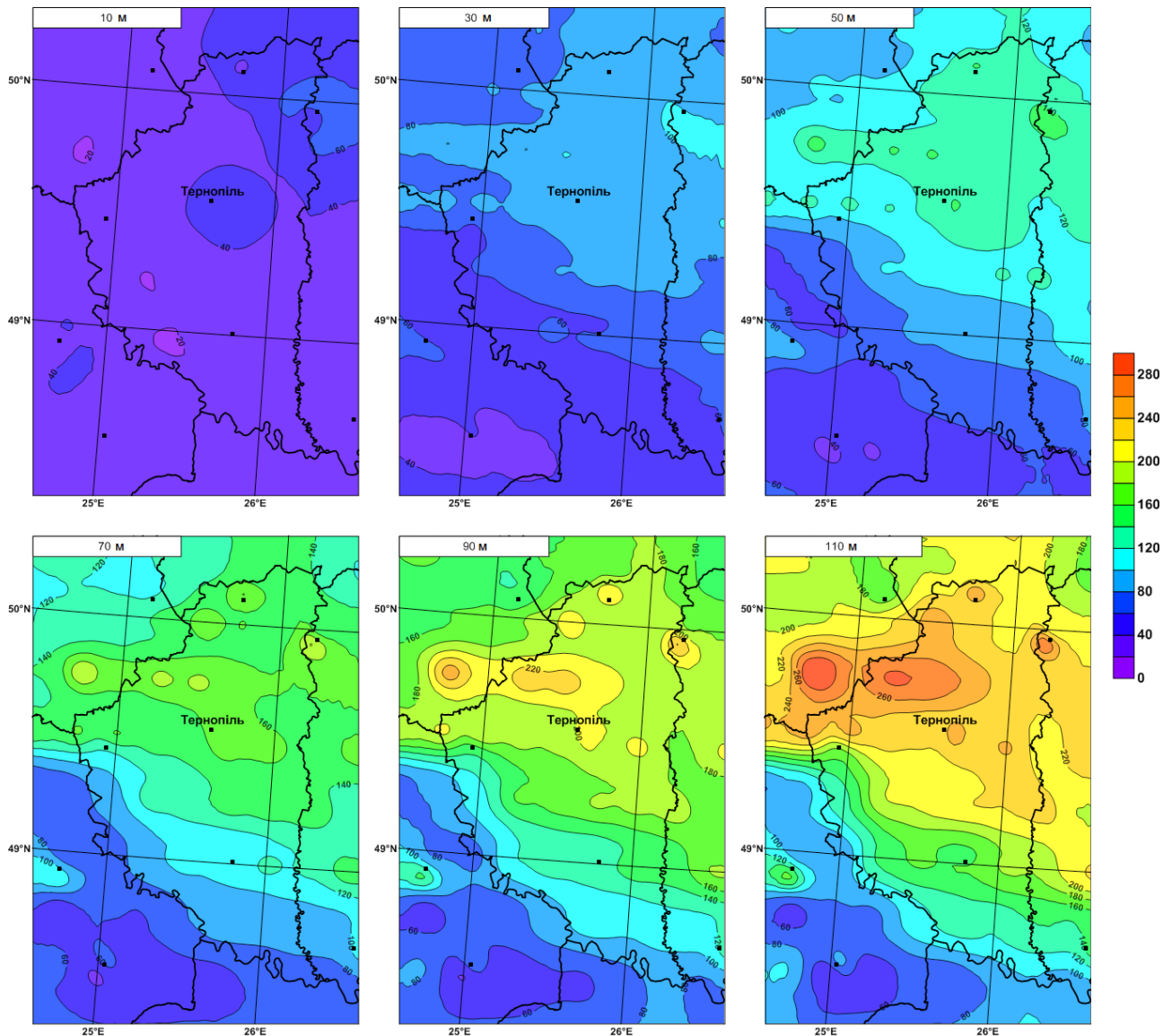


Рис. 6. Вітроенергетичний потенціал ( $W/m^2$ ) Тернопільської області на висотах 10, 30, 50, 70, 90 та 110 м, усереднений за період 1981–2010 рр.

Fig. 6. Mean wind power density ( $W/m^2$ ) in Ternopil region at heights of 10, 30, 50, 70, 90 and 110 m for the period of 1981–2010

З аналізу представлених карт можна зробити висновок щодо існування певної кореляції між значенням  $\bar{P}$  та висотою місцевості. Кореляційний зв'язок збільшується з висотою над землею поверхнею. Чітко прослідковується зона низьких значень у долині р. Дністер. Причому малі запаси вітрової енергії спостерігаються на всіх висотах. Низькі значення вітропотенціалу можуть бути наслідком також “вітрової тіні” від Карпатських гір. Цю гіпотезу підтверджує той факт, що на північному сході області спостерігаються високі значення  $\bar{P}$  за відсутності особливостей рельєфу (височин).

Підвищеним значенням енергопотенціалу (особливо на висотах у приземному шарі) виділяються Кременецькі гори та Гологори (північно-західніше м. Тернопіль). У цих зонах на висоті 110 м зафіксовано максимальні значення вітропотенціалу ( $> 280 W/m^2$ ), зони можна розглядати як найперспективніші місця для встановлення ВЕУ великої

потужності. Крім того, вся північно-східна частина області (частина плато Подільської височини) має досить значні запаси вітрової енергії і може бути придатна для встановлення ВЕУ малої потужності, на малих висотах (10–30 м) і приватних господарствах (значення  $\bar{P}$  сягають 40–80  $W/m^2$  на висоті 10 м та 80–120  $W/m^2$  на висоті 30 м), а також великогабаритних і потужних ВЕУ, що можуть утворювати цілі вітроелектростанції ( $\bar{P} > 200 W/m^2$  на висоті 90 м та  $\bar{P} > 240 W/m^2$  на висоті 110 м).

Утім існують райони, де кореляція між висотою та  $\bar{P}$  відсутня. Наприклад, між долинами річок Золота Липа та Стрипа (західна окраїна області) існує доволі вузьке але значне підвищення рельєфу, однак ми не отримали тут високих запасів вітрової енергії. Можливо, це справді так, і цей факт можна пояснити вітровою тінню від Карпат, а можливо, модель CALMET за використаної просторової дискретності розрахункової сітки та вхідної метеоро-



логічної інформації не дає змоги вловити вказану особливість підстильної поверхні.

Цікавою є залежність просторового розподілу вітроенергетичного потенціалу від висоти. На висоті 10 м розподіл  $\bar{P}$  є більш-менш однорідним і варіює у межах від 20 до 100 Вт/м<sup>2</sup> (амплітуда просторових змін  $\sim 80$  Вт/м<sup>2</sup>). На висоті 110 м різниця між найменшим та найбільшим значеннями  $\bar{P}$  у досліджуваній області вже становить 240 Вт/м<sup>2</sup> (збільшилась утричі). Причиною такої поведінки потенціалу може бути зменшення зони вітрової тіні з висотою.

Виділяється зона навколо метеостанції Ямпіль (північний-захід Хмельницької обл). На нашу думку, це пов'язано із майже повною відкритістю горизонту на цій станції (її закритість  $< 2^\circ$  за всіма румбами). Закритість горизонту (деяка усереднена величина за всіма румбами) на інших станціях коливається в межах від  $5^\circ$  до  $20^\circ$ , максимальні значення – на станціях Чортків ( $10^\circ$ – $15^\circ$ ) і Кам'янець-Подільський ( $15^\circ$ – $20^\circ$ ). Очевидно, що закритість горизонту призводить до заниження виміряних на станціях значень швидкості  $i$ , відповідно, оцінок вітроенергетичних ресурсів.

Проблема впливу закритості горизонту на виміряні значення швидкості вітру, а отже, на оцінку вітроенергетичних ресурсів, є важливою [13]. Проте ми цей вплив не досліджували. Зазначимо, що коректне врахування закритості горизонту на станціях, яка в основному задається висотою шорсткості  $z_0$ , складно здійснити в моделі CALMET, оскільки для визначення цього параметра вона використовує LULC-дані, просторова роздільна здатність яких є доволі грубою ( $\sim 1$  км). Крім того, роздільна здатність розрахункової сітки дорівнює 2,5 км, тому LULC-дані ще й осереднюють по кожній із комірок, щоб отримати значення  $z_0$  у вузловій точці. Очевидно, що існуватиме різниця між цими значеннями і реальними значеннями для кожної із станцій, які можна визначити на підставі інформації про закритість горизонту. Зауважимо, що вплив параметра  $z_0$  на вертикальний профіль вітру в приземному шарі значний. Одним із способів розв'язання цієї проблеми може бути перехід до розрахункової сітки більшої роздільної здатності одночасно із використанням точніших даних щодо типу рослинності та землекористування. З огляду на викладене отримані оцінки можуть бути заниженими і реальні запаси вітрової енергії в Тернопільській області є більшими.

З метою виявлення ефективності запропонованого підходу (із залученням CALMET) проведено якісне порівняння отриманих результатів із раніше опублікованими оцінками вітроенергетичних ресурсів Тернопільської області [1, 10–12]. Кількісне порівняння зробити важко через відсутність оцифрованих даних, відмінність проєкцій, розрахункових сіток. Крім того, оцінку потенціалу в статтях [10, 11] наведено до висоти шорсткості 0,1 м, тому результати можуть суттєво різнитися. У порівняльному аналізі ми звертали увагу

лише на можливість локалізації зон із значними запасами вітрової енергії, що дуже важливо для практичного використання результатів.

Отже, усі оцінки на різних висотах збігаються за порядком величини. Результати, опубліковані в Атласі [1], мають дуже грубу просторову роздільну здатність. Уся територія Тернопільської області належить до однієї виділеної зони за значеннями вітроенергетичного потенціалу. Результати, отримані на базі даних проєкту CARPATCLIM, характеризуються значно більшою просторовою роздільною здатністю. Існує багато розбіжностей між згаданими результатами і нашими. Збігаються зони із значними запасами вітрової енергії (Кременецькі гори, зона північно-західніше Тернополя). Однак є певні розбіжності. Найбільша з них – відсутність потужної вітрової тіні від Карпатських гір у оцінках [10, 11]; виявлено чіткий кореляційний зв'язок (практично детермінований) між висотою та потенціалом, який зумовлений використанням інтерполяційного алгоритму (MISH) [10, 11].

Для встановлення коректнішого методу оцінювання потрібні подальші дослідження із залученням складніших (гідродинамічних) моделей з метою точного відтворення вітрових потоків у складній орографії. На нашу думку, метод із залученням CALMET фізично є обґрунтованішим.

Отже, порівняльний аналіз засвідчує ефективність запропонованого підходу для оцінювання вітроенергетичних ресурсів обмежених територій зі складним рельєфом та локалізації зон із запасами вітрової енергії.

**Висновки.** За строковими даними щодо напрямку та швидкості вітру за період 1981–2010 рр., отриманими на всіх станціях Тернопільської області, оцінено сучасний стан її вітрових ресурсів. Для кожної станції розраховано гістограми розподілів модуля швидкості вітру та його напрямку (рози вітрів), як найінформативніших характеристик вітрового режиму, та їх основних статистичних показників. Розраховано середні за період 1981–2010 рр. річні та добові ходи швидкості для кожного сезону. Загалом виявлено, що вітер у північно-східній частині області інтенсивніший та мінливіший, ніж у південно-західній її частині, переважають вітри із західною та південною складовими. На всіх станціях рози вітрів є дуже подібними, що може свідчити про незначний вплив місцевої мікроциркуляції.

Розрахована інформація має значення для кліматології, проте через істотну мінливість вітрових характеристик у просторі і у часі її важко використовувати у вітроенергетиці. Для встановлення та економічно ефективного використання ВЕУ надзвичайно важливо знати реальний просторовий розподіл вітроенергетичного потенціалу з високою просторовою роздільною здатністю. Запропоновано методику оцінювання вітроенергетичних ресурсів невеликих просторових зон зі складним рельє-

фом із залученням метеорологічного препроцесора CALMET. Препроцесор є частиною відомої дифузійної моделі CALPUFF, яку часто використовують для розв'язання дифузійних задач на різних просторових і часових масштабах. Модель CALMET дає змогу враховувати вплив основних чинників на просторовий розподіл вітру. Ефективність цього підходу перевірено на прикладі Тернопільської області. Для проведення розрахунків зібрано великий обсяг вхідної інформації: метеорологічної (строкові дані за період 1981–2010 рр.) і геофізичної (цифрова модель рельєфу та дані щодо типу рослинності та землекористування). Як альтернативу для аерологічних зондувань використано дані реаналізу ERA-Interim.

Основний результат – розраховано поле вітру для 30-річного періоду з 1-годинною часовою роздільною здатністю та просторовим кроком розрахункової сітки 2,5 км. Це надзвичайно великий обсяг інформації, використання якого дає змогу розрахувати всі показники, що необхідні для вітроенергетики. На підставі цих даних розраховано середній за 1981–2010 рр. вітроенергетичний потенціал на висотах 10, 30, 50, 70, 90 та 110 м. виявлено особливості його просторового розподілу (наприклад, наявність “вітрової тіні” Карпатських гір). На основі розрахунків виділено райони, перспективні для встановлення ВЕУ як у приватних господарствах, так і для промислового виробництва. Найбільші запаси вітрової енергії (особливо на висотах понад 50 м) мають Кременецькі гори та Гологори (північно-західніше м. Тернопіль).

Проведено якісний порівняльний аналіз із аналогічними розрахунками інших авторів. Результати, отримані із залученням препроцесора CALMET, фізично є обґрунтованішими. Цю модель застосовують у різних країнах для широкого спектра просторових і часових масштабів, що, без сумніву, свідчить про її “адекватність”. Однак використання геофізичних даних з доволі грубою роздільною здатністю (~1 км), відсутність даних вертикальних зондувань можуть знижувати точність розрахунків.

У майбутньому необхідно оцінити точність відтворення (інтерполяції та екстраполяції) значень швидкості та напрямку вітру за допомогою запропонованого підходу для невеликих просторових зон із типовими для України рельєфами.

Подібні розрахунки можна провести для всіх областей України й створити атлас сучасного стану запасів вітроенергетичних ресурсів України з високою просторовою роздільною здатністю.

#### Список бібліографічних посилань

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України. К., 2001. 41 с.
2. Ветроэнергетика: [пер. с англ.; под ред. Д. де Рензо]. М.: Энергоатомиздат, 1982. 271 с.

3. Волеваха М.М., Гойса М.І. Енергетичні ресурси клімату України. К.: Наук. думка, 1967. 132 с.
4. Волковая О.О., Третьяков О.С., Черваньов І.Г. Моделирование ветрового потенциала локальной делянки Лисостепу для потреб ветроэнергетики с использованием ГИС-технологий. *Український географічний журнал*. 2015. № 4. С. 10–16.
5. Дмитренко Л.В., Барандіч С.Л. Вітроенергетичні ресурси в Україні. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2007. Вип. 256. С. 166–173.
6. Ефимов В.В., Барабанов В.С., Робустова Р.С., Шокуров М.В., Яровая Д.А. Численное моделирование ветрового энергипотенциала Украины. *Відновлювана енергетика*. 2010. № 1. С. 44–50.
7. Ильин Ю.П. Длиннопериодные колебания показателей гидрометеорологического режима Черноморского побережья Украины. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2015. Вип. 267. С. 88–95.
8. Клімат України: [за ред. В.М. Ліпінського]. К.: Вид-во Раєвського, 2003. 343 с.
9. Мартазінова В.Ф., Іванова О.К. Сучасний клімат Київської області. К.: Аверс, 2010. 70 с.
10. Осадчий В.І., Скриник О.А., Скриник О.Я. Оцінка сучасного стану вітрових ресурсів Українських Карпат та їх зміни відносно базового кліматичного періоду. *Доповіді НАН України*. 2015. Т. 8. С. 95–99.
11. Осадчий В.І., Скриник О.А., Скриник О.Я., Радченко Р.Ю. Вітроенергетичні ресурси Українських Карпат. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2014. Вип. 266. С. 3–8.
12. Сиротюк М., Гринда О. Методичні аспекти оцінювання вітроенергетичного потенціалу. *Вісник Львівського ун-ту. Серія Географія*. 2011. Вип. 39. С. 313–319.
13. Швень Н.І., Петренко К.В. Оцінка вітрових ресурсів на території України, просторово-часовий аспект. *Відновлювана енергетика*. 2007. № 3. С. 40–43.
14. Dee D.P., Uppala S.M., Simmons A.J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., Van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hol E.V., Isaksen L., Kallber P., Kohle M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz V.M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., De Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J.-N. and Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. V. 137. pp. 553–597.
15. ERA Interim, Daily. URL: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/> (Accessed 5 Sep 2017).
16. [http://edc2.usgs.gov/glcc/tab Lambert\\_uras\\_eur.php](http://edc2.usgs.gov/glcc/tab Lambert_uras_eur.php) (Accessed 1 Sep 2015)
17. Scire J.S., Robe F.R., Fernau M.E., Yamartino R.J. A User's Guide for the CALMET Meteorological Model (Version 5). Concord, MA: Earth Tech, Inc., 2000.
18. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). URL: [http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2\\_1/SRTM30/](http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM30/) (Accessed 5 Sep 2017).
19. Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM). URL: [https://www3.epa.gov/scram001/dispersion\\_prefrec.htm](https://www3.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm) (Accessed 5 Sep 2017).

Надійшла до редакції 12.09.2017 р.

## ВЕТРОВЫЕ РЕСУРСЫ ТЕРНОПОЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

В.И. Осадчий<sup>1</sup>, О.Я. Скриник<sup>1</sup>, Д.А. Ошурок<sup>1</sup>, О.А. Скриник<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Украинский гидрометеорологический институт ГСЧС и НАН Украины, просп. Науки, 37, г. Киев, 03028, Украина, e-mail: osad@uhmi.org.ua, skrynyk@uhmi.org.ua, dimaoshurok@gmail.com

<sup>2</sup>Национальный университет биоресурсов и природопользования Украины, ул. Героев Оборона, 15, г. Киев, 03041, Украина, e-mail: skrynyk@nubip.edu.ua

Проведена климатологическая оценка ветрового режима и ветроэнергетических ресурсов Тернопольской области за период 1981–2010 гг. Для анализа использованы срочные данные, полученные сетью станций Гидрометслужбы Украины, данные реанализа ERA-Interim и мезомасштабная диагностическая метеорологическая модель CALMET. Рассчитаны основные статистические показатели ветрового режима на станциях области и ветроэнергетический потенциал в узлах регулярной сетки с пространственным шагом 2,5 км на высотах 10, 30, 70, 90 и 110 м. Проведен сравнительный анализ расчетного пространственного распределения ветроэнергетического потенциала с ранее опубликованными результатами. Показана эффективность использования CALMET для определения ветроэнергетических ресурсов ограниченных территорий небольших пространственных масштабов со сложным рельефом. Обнаружены районы, которые могут быть перспективными для производства ветровой электроэнергии как в промышленных объемах, так и в частном хозяйстве.

**Ключевые слова:** ветровой режим, ветроэнергетические ресурсы, метеорологический препроцессор CALMET, Тернопольская область.

## WIND RESOURCES OF THE TERNOPII REGION

V.I. Osadchyi<sup>1</sup>, O.Y. Skrynyk<sup>1</sup>, D.O. Oshurok<sup>1</sup>, O.A. Skrynyk<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ukrainian Hydrometeorological Institute under the State Emergency Service of Ukraine and the NAS of Ukraine, 37, Nauky Ave., Kyiv, 03028, Ukraine, e-mail: osad@uhmi.org.ua, skrynyk@uhmi.org.ua, dimaoshurok@gmail.com

<sup>2</sup>National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 15, Heroyiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine, e-mail: skrynyk@nubip.edu.ua

**Purpose** The main purpose of the study is to climatologically assess (over the period of 1981–2010) wind conditions and wind power resources of the Ternopil region located in the Western part of Ukraine.

**Methodology** We used a complete set of sub daily meteorological data collected at climatological stations located in the domain. The climatological assessment of wind conditions in the Ternopil region was conducted by calculating the simplest statistical parameters of both wind speed and wind direction for every climatological station of the region. To assess wind power resources, we applied a diagnostic meteorological model CALMET that is a meteorological preprocessor for the USEPA approved dispersion model CALPUFF. Using CALMET we have calculated wind field on 2,5 km horizontal grid at vertical levels of 10, 30, 50, 70, 90, 110 m with 1-hour time resolution. The ERA-Interim reanalysis data were used instead of upper air data (radio-sounding) in CALMET. After calculating the wind components, the wind power averaged over 1981–2010 was computed.

**Findings** Our results have a good agreement with the terrain features in almost all parts of the region. The largest wind power potential was found in the north and north-west part of the domain. These areas are higher than the surrounding territory. Low wind power values were identified in the south-west part situated mainly in the Dnister river valley. However, such spatial distribution of wind power resources can also be attributed to the impact of the Carpathian mountains (“wind shadow”).

**Practical value** The comparative analysis of a calculated wind power field with the previously published results has shown the efficacy of CALMET in evaluating the wind resources of a small domain with complicated topography. We have identified the areas on the territory of the Ternopil region that can be used to produce wind electricity.

**Keywords:** wind conditions, wind energy, meteorological preprocessor CALMET, Ternopil region.

### References:

1. Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovliuvanykh ta netradytsiinykh dzherel enerhii Ukrainy. Kyiv, 2001, 41 p. [in Ukrainian].
2. Wind power: [per. with english; ed. D. de Renzo]. Moscow: Energoatomizdat, 1982. 271 p. [in Russian].
3. Volevakh M.M., Hoisa M.I. Enerhetychni resursy klimatu Ukrainy. Kyiv: Nauk. Dumka, 1967, 132 p. [in Ukrainian].
4. Volkovaia O.O., Tretiakov O.S., Chervanov I.H. Modeliuvannia vitrovoho potentsialu lokalnoi dilianky lisostepu dlia potrebitiroenerhetyky z vykorystanniam HIS-tekhnohohii. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal*, 2015, no. 4, pp. 10-16 [in Ukrainian].
5. Dmytrenko L.V., Barandich S.L. Vitroenerhetychni resursy v Ukraini. *Naukovi Praci UkrNDHMI*, 2007, iss. 256, pp. 166-173 [in Ukrainian].

6. Efimov V.V., Barabanov V.S., Robustova R.S., Shokurov M.V., Yarovaya D.A. Chislennoe modelirovanie vetrovogo energopotentsiala Ukrainy. *Vidnovliuvana enerhetyka*, 2010, no. 1, pp. 44-50 [in Russian].
7. Il'in Yu.P. Dlinnoperiodnye kolebaniya pokazateley gidrometeorologicheskogo rezhima Chernomorskogo poberezh'ya Ukrainy. *Naukovi Praci UkrNDHMI*, 2015, iss. 267, pp. 88-95 [in Russian].
8. Klimat Ukrainy: [ed. V.M. Lipinskyi. Kyiv: Vyd-vo Raievskoho, 2003, 343 p. [in Ukrainian].
9. Martazinova V.F., Ivanova O.K. Suchasnyi klimat Kyivskoi oblasti. K.: Avers, 2010, 70 p. [in Ukrainian].
10. Osadchyi V.I., Skrynyk O.A., Skrynyk O.Ya. Otsinka suchasnoho stanu vitrovyykh resursiv Ukrainskykh Karpat ta yikh zminy vidnosno bazovoho klimatychnoho periodu. *Dopovidi NAN Ukraine*, 2015, no. 8, pp. 95-99 [in Ukrainian].
11. Osadchyi V.I., Skrynyk O.A., Skrynyk O.Ya., Radchenko R.Yu. Vitroenerhetychni resursy Ukrainskykh Karpat. *Naukovi Praci UkrNDHMI*, 2014, iss. 266, pp. 3-8 [in Ukrainian].
12. Syrotiuk M., Hrynda O. Metodychni aspekty otsiniuvannia vitroenerhetychnoho potentsialu. *Visnyk Lvivskoho universitetu Seriia Heohrafiia*, 2011, iss. 39, pp. 313-319 [in Ukrainian].
13. Shven N.I., Petrenko K.V. Otsinka vitrovyykh resursiv na terytorii Ukrainy, prostoro-vasovyi aspekt. *Vidnovliuvana enerhetyka*, 2007, no. 3, pp. 40-43 [in Ukrainian].
14. Dee D.P. , Uppala S.M. , Simmons A.J. , Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M.A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A.C.M., Van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A.J., Haimberger L., Healy S.B., Hersbach H., Hol E.V., Isaksen L., Kallber P., Kohle M., Matricardi M., McNally A.P., Monge-Sanz B.M., Morcrette J.-J. , Park B.-K., Peubey C., De Rosnay P., Tavolato C., Thepaut J.-N. and Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. 2011. 137. pp. 553–597.
15. ERA Interim, Daily. Available at: <http://apps.ecmwf.int/datasets/data/interim-full-daily/levtype=sfc/> (Accessed 5 Sep 2017).
16. [http://edc2.usgs.gov/glcc/tab Lambert\\_uras\\_eur.php](http://edc2.usgs.gov/glcc/tab Lambert_uras_eur.php) (Accessed 1 Sep 2015).
17. Scire J.S., Robe F.R., Fernau M.E., Yamartino R.J. A User's Guide for the CALMET Meteorological Model (Version 5). Concord, MA: Earth Tech, Inc., 2000.
18. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). Available at: [http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2\\_1/SRTM30/](http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM30/) (Accessed 5 Sep 2017).
19. Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling (SCRAM). Available at: [https://www3.epa.gov/scram001/dispersion\\_prefrec.htm](https://www3.epa.gov/scram001/dispersion_prefrec.htm) (Accessed 5 Sep 2017).

*Received 12/09/2017*