

УДК 551.582.2, 551.583.1

В.І. Осадчий, О.А. Скриник, О.Я. Скриник, Р.Ю. Радченко

ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНІ РЕСУРСИ УКРАЇНСЬКИХ КАРПАТ

На основі даних спостережень Гідрометслужби України проведено оцінку сучасного стану (за період 1981-2010 рр.) вітроенергетичних ресурсів Українських Карпат. Побудовано детальні, з просторовою роздільною здатністю $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ ($\approx 10 \times 10$ км), карти вітроенергетичного потенціалу регіону на висотах 10, 30 та 50 м над поверхнею землі. Проведено порівняльний аналіз отриманих результатів із аналогічними розрахунками за базовий кліматологічний період 1961-1990 рр. Виявлено різке зменшення вітрових ресурсів у сучасний період. Обґрунтовано статистичну значущість виявлених змін.

Ключові слова: Карпатський регіон, вітроенергетичні ресурси, зміни клімату.

Вступ

Важливими елементами підтримки сталого розвитку нашої країни є розробка, упровадження та ефективне використання відновлювальних та нетрадиційних джерел енергії, особливо таких як вітрова та сонячна енергії. Проблема набуває особливої актуальності саме в сьогоденні, коли енергетична незалежність нашої країни надзвичайно пріоритетна.

В Україні проблематиці альтернативних джерел енергії приділено чимало уваги. Створено профільні дослідницькі та учбові заклади, розробляються та впроваджуються національні урядові програми. На основі статистичної інформації (зокрема й метеорологічної) профільними організаціями НАН України було створено атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України [1]. Проведено районування території України за показниками вітроенергоресурсів [2].

Мета роботи — уточнити наявні оцінки вітрових ресурсів (енергетичного потенціалу вітрової енергії) у регіоні Українських Карпат на основі детальнішої та сучаснішої кліматологічної інформації, а також оцінити вітрові характеристики й виявити їх можливі зміни за період з 1961 по 2010 рр.

Основою проведеного дослідження стали результати міжнародного дослідницького проекту CARPATCLIM [3], у якому брав участь Український гідрометеорологічний інститут (УкрГМІ) ДСНС України та НАН України. У результаті роботи проекту було отримано гомогенізовані ряди даних практично всіх метеорологічних величин усіх станцій регіону за період з 1961 по 2010 рр. з добовою часовою роздільною здатністю. Використовуючи спеціалізоване кліматологічне

програмне забезпечення MISH [4], було проведено просторову інтерполяцію гомогенізованих даних у вузли регулярної сітки з просторовою роздільною здатністю $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ ($\approx 10 \times 10$ км). Детальнішу інформацію про методику опрацювання даних, алгоритми гомогенізаційного та інтерполяційного програмного забезпечення можна знайти на офіційному сайті проекту CARPATCLIM [3] та в [5]. Слід зазначити, що результати роботи проекту пройшли експертну оцінку в Об'єднаному дослідницькому центрі Європейської комісії (JRC) і на їх основі вже було отримано та опубліковано низку результатів про клімат Карпатського регіону [6-9 тощо].

Отже, основний вихідний емпіричний матеріал — проінтерпольовані у вузли регулярної сітки середні добові та максимальні за добу значення швидкості вітру за період 1961-2010 рр., які приведені до висоти 10 м над поверхнею землі і до висоти шорсткості 0,1 м. Для уточнення результатів розрахунків вітроенергетичного потенціалу залучено також строкові виміри вітру на станціях (за строки 03, 12 та 21 год).

Середня багаторічна швидкість вітру

Певні висновки щодо вітрових ресурсів регіону можна отримати із аналізу середньої річної швидкості вітру. Тому перед розрахунком вітроенергетичного потенціалу для кожної інтерполяційної точки було розраховано середні річні значення швидкості для кожного року з 1961-2010 рр. З метою оцінки сучасного стану вітрових характеристик клімату та їх можливих змін із досліджуваного періоду виділено два проміжки: базовий кліматологічний період (1961-1990 рр.) та сучасний (1981-2010 рр.). Розраховані значення середньої річної швидкості вітру осереднено

за вказаними інтервалами (рис. 1 а, б) і розраховано аномалії (різницю значень, осереднених за періоди 1981-2010 рр. та 1961-1990 рр.), рис. 1 в.

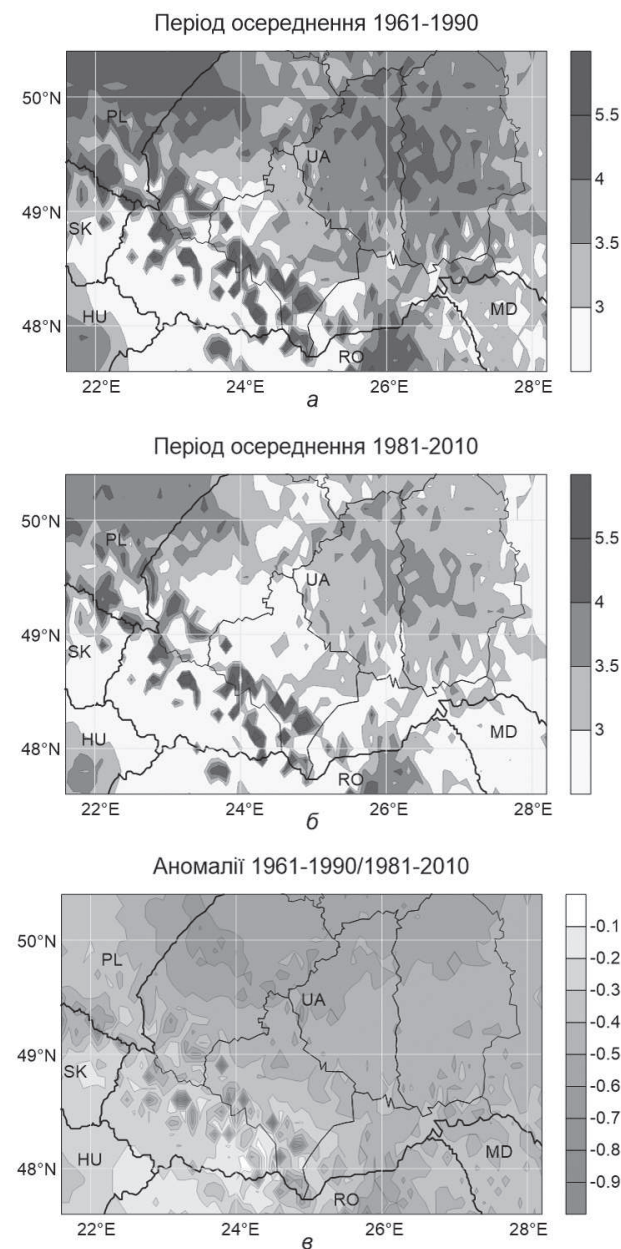


Рис. 1. Середня багаторічна швидкість вітру та її аномалії ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

На побудованих картах (рис. 1 а, б) ізолінії швидкості вітру вибрано згідно з умовами економічно вигідного використання вітроенергетичних установок (ВЕУ) залежно від середньої річної швидкості вітру [10]: при $V < 3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ — безперспективні для будь-яких типів ВЕУ, при $3 \leq V < 3,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ — малоперспективні, при $3,5 \leq V < 4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ — перспективні для ВЕУ малої потужності, при $4 \leq V < 5,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ — перспективні для ВЕУ малої та середньої потужності,

при $V > 5,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ — перспективні для будь-яких ВЕУ. Аналіз отриманих результатів (рис. 1 б) свідчить про наявність невеликих територій, крім високогірних ділянок Карпатського хребта у Львівській, Тернопільській і Хмельницькій областях (Подільська височина), де може бути економічно вигідним використання ВЕУ невеликої потужності (наприклад, у малих фермерських чи приватних господарствах).

Порівняльний аналіз отриманих результатів за періоди 1961-1990 та 1981-2010 рр. та розрахованих аномалій показує різке зменшення середньої річної швидкості вітру в сучасний період порівняно із стандартним (базовим) періодом. Суттєві зміни (від $0,4$ до $0,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, що перевищує середнє квадратичне відхилення розподілу річних значень вітру) спостерігаються на більшій частині досліджуваного регіону (вся північно-східна частина). У Передкарпатті швидкість вітру зменшилась на $0,3-0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Найменші зміни спостерігаються в Закарпатті — $0,2-0,3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. На піках Карпатського хребта теж зафіксовано суттєве зменшення швидкості вітру (до $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Слід зазначити, що зменшення швидкості вітру відмічалось і в період 1961-1990 рр. порівняно із раннішим періодом 1936-1960 рр. [11].

Для обґрунтування статистичної значущості виявлених змін було використано два незалежних методи: t-критерій Стюдента [12] та W-критерій Вілкоксона [13]. На рис. 2 (а, б) представлено результати розрахунків критеріїв для кожної інтерполяційної точки. Зазначимо, що нульова гіпотеза про рівність середніх значень двох вибірок відкидається з імовірністю $1-\alpha$, якщо при заданому рівні значущості (α) розраховане значення t-критерію Стюдента більше за відповідне критичне значення (t_α), а розраховане значення W-критерію Вілкоксона менше за відповідне критичне значення (W_α).

Як показують результати розрахунків незалежних статистичних тестів, виявлені зміни середньої річної швидкості вітру є статистично значущими практично для всього досліджуваного регіону. Єдиний виняток — невелика територія на півдні української частини Карпатського хребта. Альтернативна гіпотеза (про значущість відмінностей середніх значень) може вважатися справедливою з високою ймовірністю, оскільки розраховані значення критеріїв практично на всій досліджуваній території є більшими (меншими у випадку критерію Вілкоксона) критичного значення за рівня значущості $0,001$.

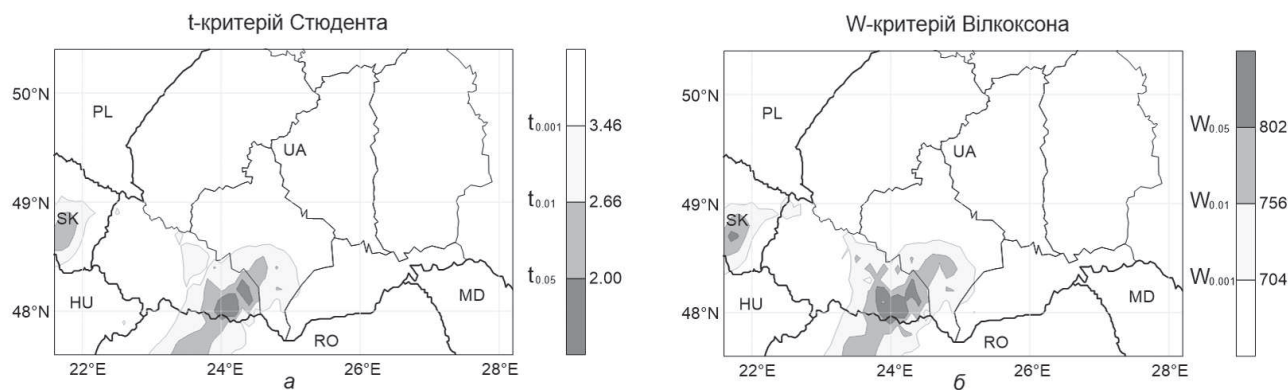


Рис. 2. Статистична значущість аномалій середньої багаторічної швидкості вітру (розраховані значення статистичних критеріїв)

Вітроенергетичний потенціал на стандартній висоті флюгера (10 м)

Однією із основних характеристик вітроенергетичних ресурсів досліджуваної території є питома потужність вітру (вітроенергетичний потенціал), яка за означенням виражається формулою [10]:

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

де ρ – густина повітря (у роботі використано значення $\rho = 1,225 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$), V – модуль швидкості вітру. Формула дає «миттєве» значення потужності, якщо V є миттєвою швидкістю.

Для кліматичної оцінки вітроенергетичного потенціалу територій використовують осереднені характеристики, отримані осередненням за «статистичним ансамблем» значень V чи часовим осередненням за достатньо довгий проміжок часу. У роботі використано останній тип осереднення. Зауважимо, що метеорологічна інформація, яку отримують на станціях, є, як правило, дискретною в часі, оскільки виміри проводять тільки в певні строки (8 раз на добу). Тому остаточна робоча формула для розрахунку має вигляд:

$$\bar{P} = \frac{\rho}{2n} \sum_{i=1}^n V_i^3, \quad (1)$$

де $\bar{P}$ – осереднене за часовим проміжком значення питомої потужності вітру, V_i – виміряні значення модуля швидкості за цей проміжок, n – кількість вимірів.

Оцінка вітроенергетичного потенціалу на основі середніх добових значень швидкості вітру

На першому етапі дослідження було проведено оцінку вітроенергетичного потенціалу на основі середніх добових значень вітру ($\bar{P}_d$). Тобто, у формулі (1) у якості «виміряних» значень модуля

швидкості використано середні добові значення. Незважаючи на те, що такі оцінки є не зовсім коректними, вони служили базою для подальших розрахунків. На наступних етапах було проведено уточнення цих результатів, яке враховує добовий хід швидкості вітру.

Алгоритм розрахунку середніх багаторічних значень питомої потужності вітру за періоди 1961-1990 та 1981-2010 рр. та оцінка статистичної значущості виявлених змін були аналогічними до вищеописаної схеми розрахунків середньої багаторічної швидкості вітру.

На рис. 3 (а, б) представлено розраховані оцінки середньої багаторічної питомої потужності вітру відповідно для періодів 1961-1990 та 1981-2010 рр., на рис. 3 (в) – її аномалії. Чітко проявляється різке зменшення питомої потужності вітру в сучасний період порівняно із 1961-1990 рр. Виявлено тенденцію, що чим більші значення потенціалу, тим суттєвіші зміни відбулися. Так, найбільше зменшення вітроенергетичного потенціалу спостережено на піках гірського хребта та на Подільській височині, де вітрові ресурси є більшими порівняно із прилеглими територіями.

На рис. 4 представлено розрахунки тестів, які визначають статистичну значущість виявлених змін. Враховуючи функціональну залежність між питомою потужністю вітру і його швидкістю, результати статистичних критеріїв є практично аналогічними до результатів, представлених на рис. 2.

Уточнення оцінок вітроенергетичного потенціалу

Кліматичні оцінки вітроенергетичного потенціалу, отримані на основі середніх добових значень модуля швидкості вітру, є не зовсім коректними. Як правило, вони є заниженими, оскільки

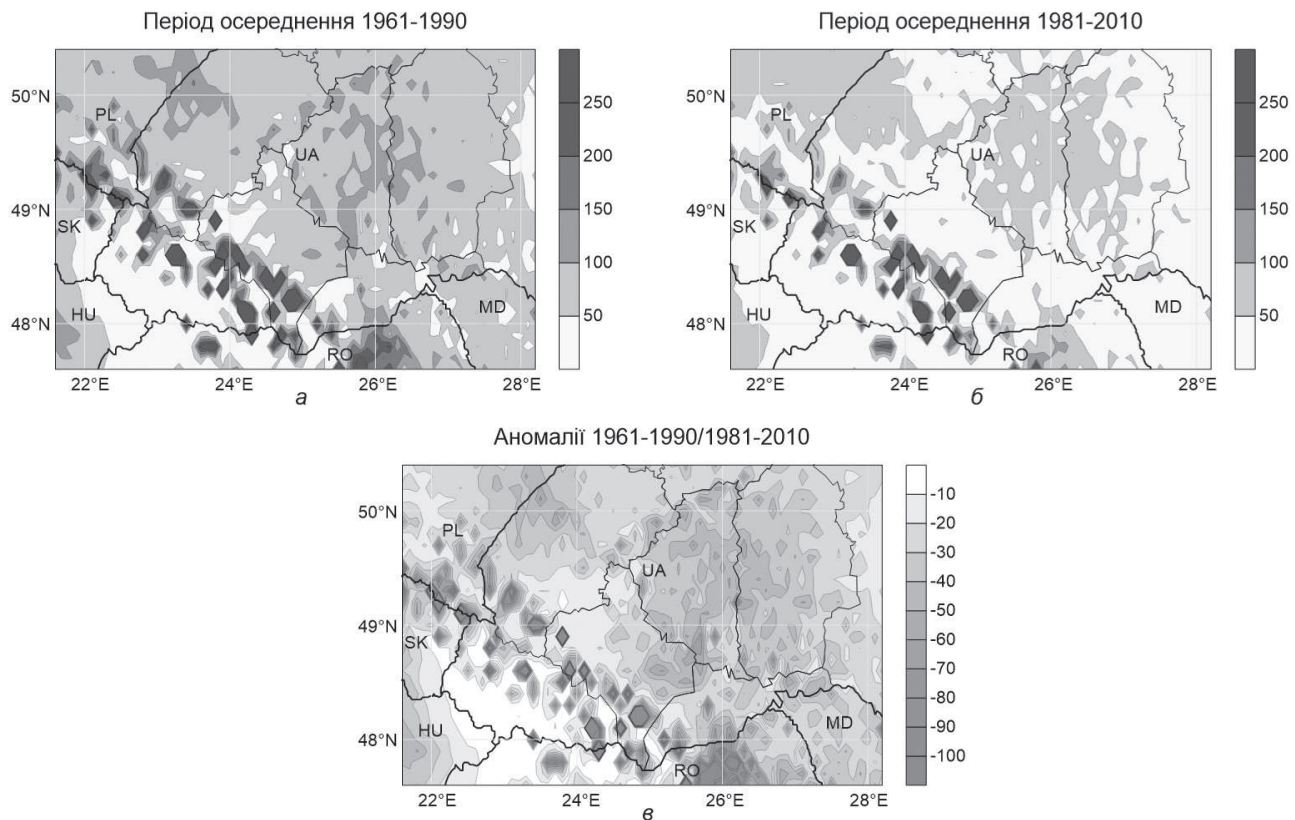


Рис. 3. Середня багаторічна питома потужність вітру на висоті 10 м, розрахована на основі середніх добових значень швидкості (а, б), та її аномалії (в) ($Вт \cdot м^{-2}$)

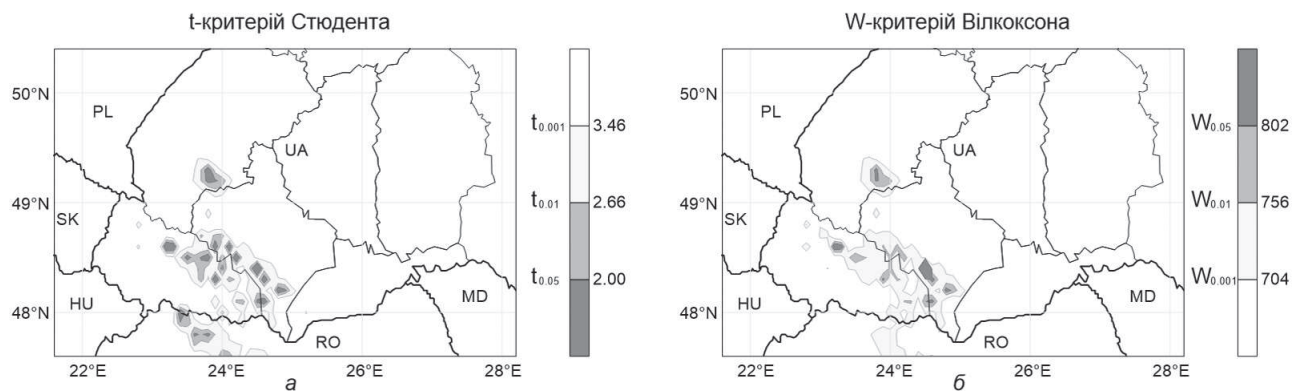


Рис. 4. Статистична значущість аномалій середньої багаторічної питої потужності вітру на висоті 10 м (розраховані значення статистичних критеріїв)

ки не враховують добовий хід швидкості вітру. Адже куб середнього добового значення модуля швидкості є зазвичай меншим за середнє добове значення кубів строкових вимірів. Очевидно, що необхідна корекція отриманих вище результатів. Для уточнення будемо використовувати два різних методи, виходячи із наявної метеорологічної інформації. Кожен із методів має свої переваги й недоліки, але їх сукупне використання дасть змогу отримати достовірніші оцінки вітроенергетичного потенціалу регіону.

Уточнення оцінок з використанням строкових вимірів на станціях (метод І). Для уточнення отриманих результатів було використано строкові значення швидкості (за строки 03, 12 та 21 год) щодоби періоду 1961–2010 рр. для кожної метеорологічної станції досліджуваного регіону (всіх 39 станцій). Використання вказаних строкових вимірів, які враховують добовий хід модуля швидкості вітру, дозволяє оцінити вітроенергетичний потенціал точніше. Проблема полягає в тому, що ці значення не використовувались безпосередньо

в роботі проекту CARPATCLIM, а тому вони не пройшли контроль якості, не є гомогенізованими і для них не проводилась інтерполяція. Тому безпосереднє уточнення оцінок вітроенергетичного потенціалу на їх основі можливе лише для станцій. Провести повне опрацювання строкових вимірів за схемою роботи проекту неможливо на цьому етапі, оскільки в УкрГМІ відсутні аналогічні дані країн сусідів. Тому результати інтерполяції будуть мати значні помилки на краю області, що значно знизить цінність результату.

Отже, використовуючи строкові виміри швидкості вітру для кожної із 39 станцій регіону, було розраховано середні добові значення як середні арифметичні вказаних строкових значень. Потім для кожної станції було розраховано дві величини $\bar{P}_{cl}$ та $\bar{P}_d$, які є середніми багаторічними питомими потужностями швидкості вітру, розрахованими на основі строкових та добових значень швидкості відповідно. Наша мета – знайти статистичну залежність між $\bar{P}_{cl}$ та $\bar{P}_d$, яку можна буде поширити на розраховані раніше значення $\bar{P}_d$ в кожній інтерполяційній точці. На рис. 5 представлено діаграму розсіювання розрахованих $\bar{P}_{cl}$ та $\bar{P}_d$ для періоду 1981–2010 рр. Очевидною є лінійна залежність між величинами (про що також може свідчити й велике значення коефіцієнта кореляції Пірсона). Слід зазначити, що коефіцієнти регресійного рівняння трішки відрізняються для періодів осереднення 1961–1990 та 1981–2010 рр.

Поширюючи знайдені лінійні залежності на всі інтерполяційні точки (на раніше отримані значення $\bar{P}_d$), було отримано уточнені оцінки багаторічної середньої питомої потужності вітру для періодів 1961–1990 та 1981–2010 рр. та їх аномалії. Результати представлено на рис. 6 (а, б, в).

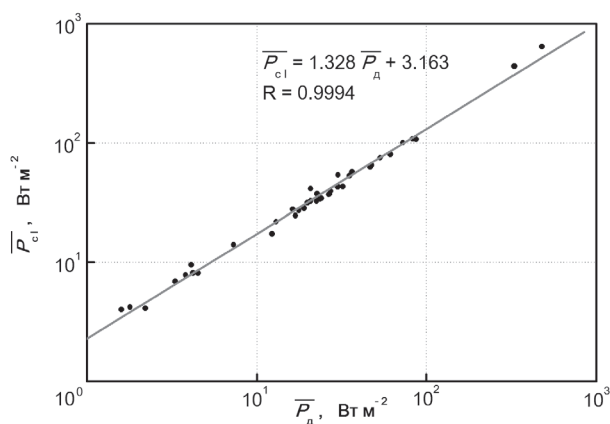


Рис 5. Залежність між багаторічними середніми значеннями питомої потужності вітру розрахованими на основі строкових (P_{cl}) та середніх добових (P_d) значень швидкості вітру (період осереднення 1981–2010 рр.)

Уточнення оцінок з використанням проінтерпольованих значень максимальної за добу швидкості вітру (метод II). Поряд із середніми добовими значеннями модуля швидкості вітру в результаті роботи CARPATCLIM у вузлах інтерполяційної сітки було отримано значення максимальної за добу швидкості вітру. Використовуючи ці значення, можна приблизно визначити мінімальну за добу швидкість і таким чином – добовий хід вітру. Для цього припускалося, що мінімальну швидкість вітру за добу можна визначити за рівністю:

$$V_{\min} = 2V_d - V_{\max} \quad (2)$$

де V_d , $V_{\max}$, $V_{\min}$ – середня, максимальна та мінімальна за добу швидкості вітру відповідно. Якщо в рівності (2) її права частина була від'ємною, то мінімальна швидкість вітру приймалась рівною 0. Розглядаючи V_d , $V_{\max}$ та $V_{\min}$ як «строкові» виміри (які, по-суті, ураховують добовий хід швидкості вітру), було проведено розрахунки середньої багаторічної питомої потужності вітру ($\bar{P}_{cl}$) для 1961–1990, 1981–2010 рр. та їх аномалії. Результати представлено на рис. 6 (з, д, е).

Результати розрахунків статистичної значущості виявлених змін тут і нижче не наведено, оскільки вони є практично ідентичними до рис. 4.

У табл. 1 представлено статистичну інформацію про величину поправок (для всієї області дослідження), отриманих двома методами.

З аналізу даних табл. 1 можна зробити висновки, що використання середніх добових значень вітру замість строкових буде занижувати значення вітроенергетичного потенціалу в середньому на 20–30 %. Такий результат повністю узгоджується із даними [10].

Аналіз даних табл. 1 свідчить також і про достатню «близкість» оцінок вітроенергетичного потенціалу, отриманих методами I і II. Для кількісної характеристики «близкості» розраховано нормалізовану середню квадратичну помилку ε та величину σ за формулами:

$$\varepsilon = \frac{\langle (\bar{P}_{cl} - \bar{P}_{cII})^2 \rangle}{\langle \bar{P}_{cl} \rangle \langle \bar{P}_{cII} \rangle}, \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\langle (\bar{P}_{cl} - \bar{P}_{cII})^2 \rangle}, \quad (4)$$

де $\langle \rangle$ – осереднення за простором (по всіх інтерполяційних точках).

Очевидно, чим ближча величина ε до 0, тим менше відмінностей у розрахованих величинах. Для середніх багаторічних значень питомої по-

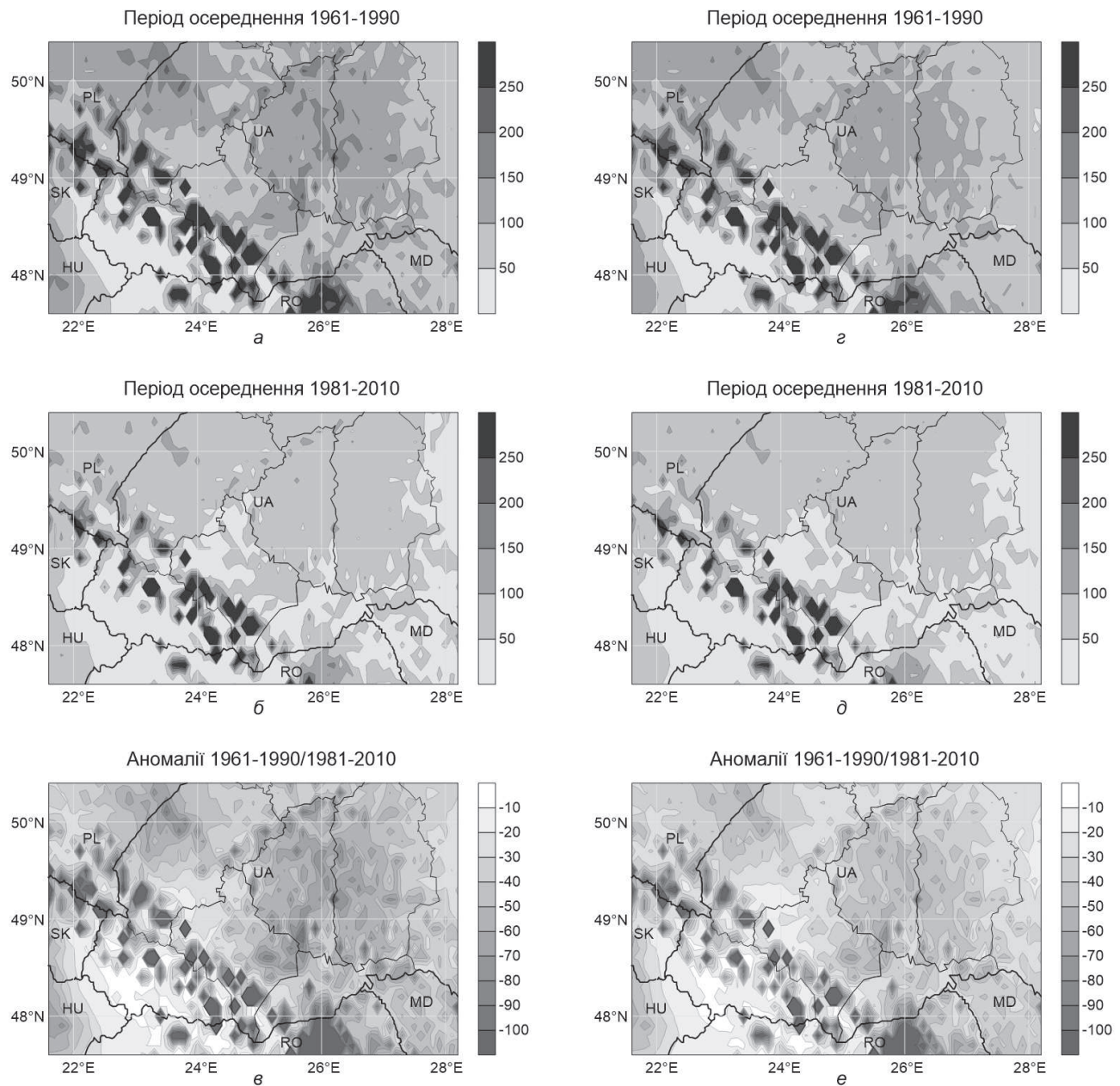


Рис. 6. Оцінки середньої багаторічної питомої потужності вітру на висоті 10 м з урахуванням отриманих поправок методом I (а, б), методом II (в, д) та їх аномалії (е, ф) ($Вт \cdot м^{-2}$)

Таблиця 1

Статистичні характеристики розрахованих поправок

		$\left \overline{P_c} - \overline{P_d} \right , Вт \cdot м^{-2}$			$\left \overline{P_c} - \overline{P_d} \right / \overline{P_c} \cdot 100, \%$		
		серед.	мін.	макс.	серед.	мін.	макс.
Метод I	1961-1990 pp.	39,9	4,8	5106,0	31	27	69
	1981-2010 pp.	23,8	3,6	4386,8	30	24	74
Метод II	1961-1990 pp.	25,4	2,7	4739,5	23	6	75
	1981-2010 pp.	19,1	1,6	4800,3	26	7	73

тужності вітру, розрахованих для періодів 1961-1990 та 1981-2010 рр., ϵ рівна 0,058 та 0,054 відповідно. Величина σ дає наочніше уявлення про міру відмінностей між P_{c1} та P_{cII} . Це, по-суті, певний аналог середнього квадратичного відхилення випадкової величини. Для періодів 1961-1990 та 1981-2010 рр. σ рівна 30,8 та 18,6 Вт·м⁻² відповідно. Таким чином, обидва методи дають досить близькі результати, що підтверджується також і якісним аналізом отриманих карт (рис. 6).

Оцінка вітроенергетичного потенціалу на висотах 30 та 50 м над поверхнею землі

Ураховуючи, що оцінки вітроенергетичного потенціалу, які отримано за допомогою методів I та II, практично не відрізняються, запропонований підхід з використанням максимальної за добу швидкості вітру було використано і для розрахунку вітроенергетичного потенціалу на інших висотах.

Вертикальні профілі вітру в нижній частині атмосфери апроксимувалися такими простими функціональними залежностями як логарифмічною та степеневою:

$$V(h_2) = V(h_1) \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)}, \quad (5)$$

$$V(h_2) = V(h_1) \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha, \quad (6)$$

де h_1 та h_2 — висоти над поверхнею землі, z_0 — висота шорсткості ($z_0 = 0,1$ м), α — безрозмірний параметр, що залежить від характеристик стану атмосфери та шорсткості підстильної поверхні. У вітроенергетиці, оцінюючи швидкості вітру на різних висотах, найчастіше використовують значення α рівні $1/7 \approx 0,14$ та $0,2$ [10]. Зауважимо, що логарифмічний профіль (5) є добре обґрунтованим тільки для нейтрально стратифікованого приземного шару атмосфери. Тому розрахована на основі формул (5) і (6) (за сталих значень α) швидкість, а отже і питома потужність вітру буде не зовсім точно відображати реальні значення. Все ж, як перше наближення, такий підхід можна використовувати.

На рис. 7 як приклад представлено результати розрахунку середньої багаторічної питомої потужності вітру для двох періодів 1961-1990 та 1981-2010 рр. на висотах 30 та 50 м та їх аномалії, використовуючи логарифмічний вертикальний профіль.

У табл. 2 представлено кількісні характеристики відмінностей розрахованих значень середнього багаторічного вітроенергетичного потенціалу на висотах 30 та 50 м за різними вертикальними профілями вітру. Найкращу узгодженість пока-

Таблиця 2

Кількісні характеристики (ϵ та σ) відмінностей значень середньої багаторічної питомої потужності вітру, розрахованих за різними вертикальними профілями швидкості

а) висота 30 м, період 1961-1990 рр.			
	(5)	(6) $\alpha = 0,14$	(6) $\alpha = 0,2$
(5)		141,4	15,7
(6) $\alpha = 0,14$	0,452		157,1
(6) $\alpha = 0,2$	0,005	0,549	

б) висота 30 м, період 1981-2010 рр.			
	(5)	(6) $\alpha = 0,14$	(6) $\alpha = 0,2$
(5)		133,8	14,9
(6) $\alpha = 0,14$	0,875		148,7
(6) $\alpha = 0,2$	0,009	1,062	

в) висота 50 м, період 1961-1990 рр.			
	(5)	(6) $\alpha = 0,14$	(6) $\alpha = 0,2$
(5)		219,8	80,0
(6) $\alpha = 0,14$	0,679		299,8
(6) $\alpha = 0,2$	0,068	1,182	

г) висота 50 м, період 1981-2010 рр.			
	(5)	(6) $\alpha = 0,14$	(6) $\alpha = 0,2$
(5)		208,0	75,7
(6) $\alpha = 0,14$	1,313		283,7
(6) $\alpha = 0,2$	0,132	2,287	

Примітка. значення ϵ , розраховані за формулою, аналогічною до (3); значення σ — за формулою, аналогічною до (4)

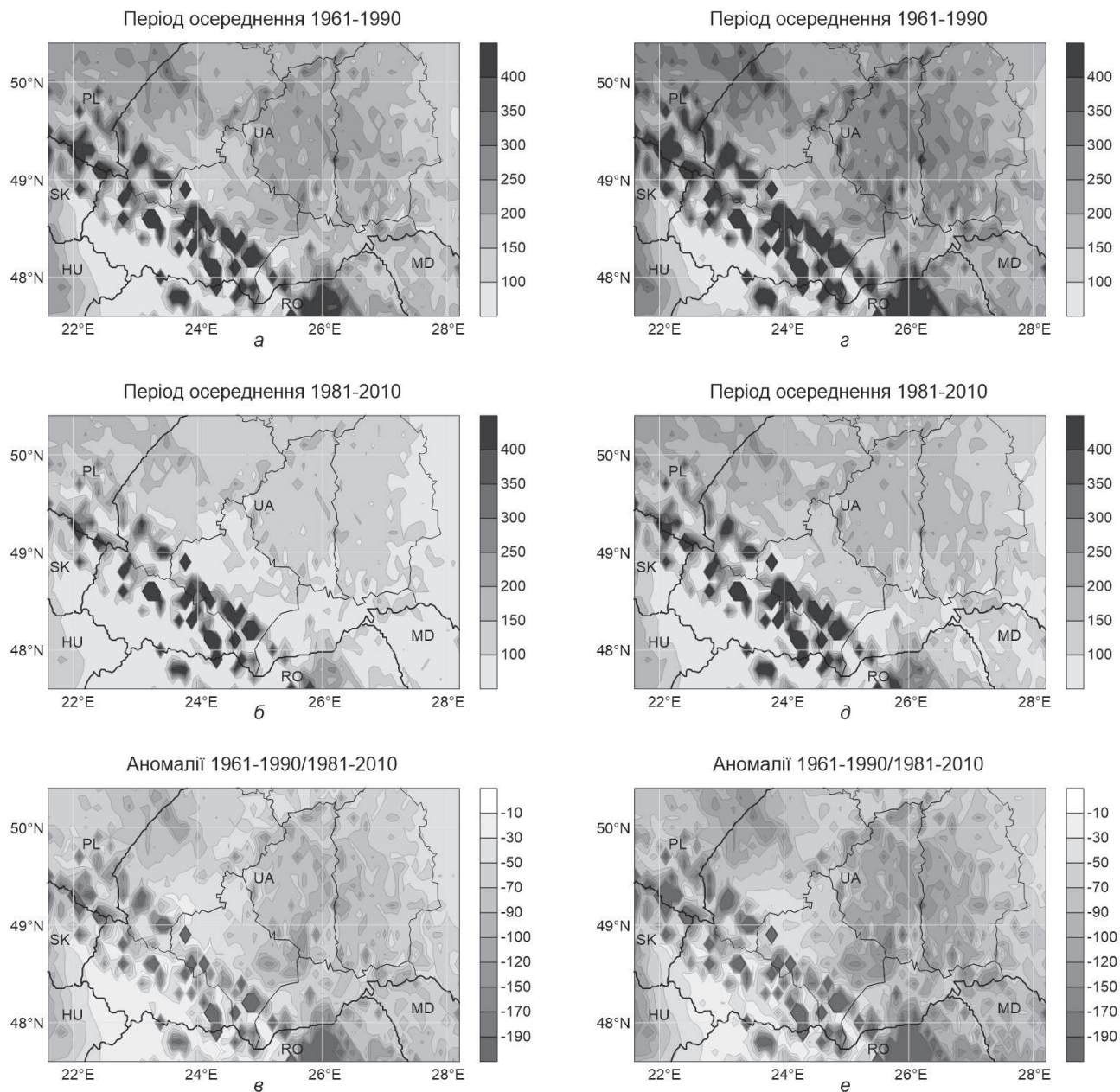


Рис. 7. Оцінки середньої багаторічної питомої потужності вітру та її аномалії на висоті 30 м (а, б, в) та 50 м (г, д, е) з використанням логарифмічного профілю вітру ($Bm \cdot m^{-2}$)

зують результати, отримані в разі використання логарифмічного та степеневого (з показником 0,2) вертикальних профілів.

Найбільші значення питомої потужності, які можуть досягати $10-20 \text{ кВт} \cdot \text{м}^{-2}$, традиційно спостерігаються на піках гірського хребта. Певним потенціалом володіють також Львівська, Тернопільська та Хмельницька області. Тут існують території, де значення питомої потужності на висоті 30 м досягають $200-250 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$, а на висоті 50 м — до $300 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2}$.

Висновки

Використання максимально повної метеорологічної інформації дозволило побудувати карти вітроенергетичного потенціалу регіону Українських Карпат з просторовою роздільною здатністю приблизно $10 \times 10 \text{ км}$. Отримані результати можуть бути «першим наближенням» у разі вибору місця розташування ВЕУ потенційними виробниками вітрової енергії. Отримана просторова роздільна здатність — це, напевне, «максимум», який можливо досягнути на основі метеорологічних даних регулярної мережі спостережень Гідрометслужби України, сучасних

методів їх контролю якості та методів просторової інтерполяції. Щільніша інтерполяційна сітка не буде відображати реальні просторові зміни вітрових характеристик. Проте більша деталізація можлива на основі комплексного підходу з використанням чисельного гідродинамічного моделювання вітрових потоків (як, наприклад у [14]), даних вертикального зондування атмосфери та наземних спостережень, бажано із додатковим (короткотерміновим експедиційним) «обстеженням» конкретного регіону за допомогою інструментальних вимірювань.

* *

1. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України. — К., 2001. — 41 с.
2. Дмитренко Л.В., Барандіч С.Л. Вітроенергетичні ресурси в Україні // Наук. пр. УкрНДГМІ. — 2007. — Вип. 256. — С. 166-173.
3. CARPATCLIM. Climate of the Carpathian region [Електрон. ресурс] / Режим доступу: <http://www.carpatclim-eu.org/pages/home/>.
4. Szentimrey T. Manual of software MISH / T. Szentimrey — Hungarian Meteorological Service, 2011. — 32 p. — http://www.met.hu/en/omsz/-palyazatok_projektek/carpatclim/.
5. Осадчий В.І., Бабіченко В.М., Набиванець Ю.Б., Скриник О.Я. Динаміка температури повітря в Україні — К.: Ніка-Центр, 2013. — 308 с.
6. Spinoni J. et al. Climate of the Carpathian in the period 1961–2010: climatologies and trends of 10 variables // Int. J. Climatol. — 2014. doi: 10.1002/joc.4059.
7. Скриник О.А. Сучасний стан вегетаційного періоду в регіоні Українських Карпат та його зміни протягом 1961-2010 рр. // Гідрологія, гідрохімія та гідроекологія. — 2014. — 4. — С. 91-98.
8. Micu D.M., Dumitrescu A., Cheval S., Birsan M.-V. Climate of the Romanian Carpathians. — Springer, 2015. — 213 p. — <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-02886-6>.
9. Osadchy V., Nabyvanets Y., Skrynyk O., Krakovska S. and Skrynyk O. Homogenization of long monthly air temperature time series collected in Ukraine // Proceedings of Seventh Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases and COST ES-0601 “HOME” Action MC Meeting, Budapest, Hungary, 24 – 28 October 2011. — P. 92-98.
10. Де Рензо Л. Ветроэнергетика. — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 271 с.
11. Клімат України / За ред. В.М. Липінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко. — К.: Вид-во Раєвського, 2003. — 343 с.
12. Урбах В.Ю. Статистический анализ. — М.: Медицина, 1975. — 296 с.
13. Большев Л.Н., Смирнов Н.В. Таблицы математической статистики. — М.: Наука. Глав. редакция физико-математической лит-ры, 1983. — 416 с.
14. Ефимов В.В., Барабанов В.С., Шокуров М.В., Робустова Р.С., Яровая Д.А. Численное моделирование ветрового энергипотенциала Украины // Відновлювана енергетика. — 2010. — № 1. — С. 44-50.

Український гідрометеорологічний інститут (УкрГМІ), Київ

Національний університет біоресурсів та природокористування України (НУБіП України), Київ

Національний університет імені Тараса Шевченка, Київ

В.И. Осадчий, О.А. Скриник, О.Я. Скриник, Р.Ю. Радченко

Ветроэнергетические ресурсы Украинских Карпат

На основе данных наблюдений Гидрометслужбы Украины проведена оценка современного состояния (за период 1981–2010 гг.) ветровых ресурсов Украинских Карпат. Построено детальные, с пространственным разрешением $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ ($\approx 10 \times 10$ км), карты ветроэнергетического потенциала региона на разных высотах над уровнем земли. Проведен сравнительный анализ полученных результатов с аналогичными расчетами за период 1961–1990 гг. Отмечено резкое уменьшение ресурсов ветра в современный период. Обосновано статистическую значимость выявленных изменений.

Ключевые слова: Карпатский регион, ветроэнергетические ресурсы, изменения климата.

V.I. Osadchy, O.A. Skrynyk, O.Y. Skrynyk, R.Y. Radchenko

Wind energy resources in the Ukrainian Carpathians

Basing on empirical data, we have estimated a modern stage (during 1981–2010) of wind resources in the Ukrainian Carpathians. Detailed, with high spatial resolution $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ ($\approx 10 \times 10$ km), maps of wind potential capacity at different heights were constructed/built. Comparative analysis of the results against analogous results for 1961–1990 showed considerable decreasing of wind resources in 1981–2010. Statistical significance of revealed changes was justified.

Keywords: Carpathian region, wind resources, climate change.