

Член-кореспондент НАН України В. І. Осадчий, О. А. Скриник,
О. Я. Скриник

Оцінка сучасного стану вітрових ресурсів Українських Карпат та їх зміни відносно базового кліматичного періоду

На основі даних спостережень Гідрометслужби України проведено оцінку сучасного стану (за період 1981–2010 рр.) вітрових ресурсів Українських Карпат. Побудовано детальні (з високою просторовою роздільною здатністю) карти вітроенергетичного потенціалу регіону на різних висотах над поверхнею землі. Проведено порівняльний аналіз отриманих результатів із аналогічними розрахунками за період 1961–1990 рр. Відзначено різке зменшення вітрових ресурсів у сучасний період. Обґрунтовано статистичну значущість виявлених змін.

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

Важливими елементами підтримки сталого розвитку нашої країни є розробка, впровадження та ефективне використання відновлювальних та нетрадиційних джерел енергії, особливо таких, як вітрова та сонячна енергії. Проблема набула актуальності саме у сьогодні, коли енергетична незалежність нашої країни набуває надзвичайної пріоритетності.

Зазначимо, що в Україні проблематиці альтернативних джерел енергії приділяється багато уваги. Створено профільні дослідницькі та учбові заклади, розробляються та впроваджуються національні урядові програми. Ґрунтуючись на статистичній інформації (зокрема, метеорологічній) профільними організаціями НАН України було складено атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України [1].

Мета роботи — уточнити наявні оцінки вітрових ресурсів у регіоні Українських Карпат на основі детальнішої та сучаснішої метеорологічної інформації, а також виявити їх можливі зміни за період з 1961 по 2010 рр.

Основою проведеного дослідження стали результати міжнародного дослідницького проекту CARPATCLIM [2], в якому брав участь Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України. За результатами 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 [3], 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 [2] та, наприклад, у [4]. 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 щодо клімату Карпатського регіону (наприклад, у [5, 6, 7]).

Отже, вихідним емпіричним матеріалом слугували проінтерпольовані у вузли регулярної сітки середні добові та максимальні за добу значення швидкості вітру за період 1961–2010 рр., які зведені до висоти 10 м над поверхнею землі і до висоти шорсткості 0,1 м.

Вітроенергетичний потенціал на стандартній висоті флюгера (10 м). Розрахунок осереднених характеристик вітроенергетичних ресурсів проводили за формулою [8]:

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

де \bar{P} — осереднене за часовим проміжком значення питомої потужності вітру; ρ — густина повітря (у роботі використано значення $\rho = 1,225 \text{ кг/м}^3$); V_i — виміряні значення модуля швидкості за цей проміжок ($i = 1, \dots, n$); n — кількість вимірів.

У дослідженні припускалося, що зміни швидкості вітру протягом кожної доби періоду можна схарактеризувати трьома значеннями: середнім (V_c), максимальним (V_{\max}) та мінімальним (V_{\min}) за добу. Перші два значення отримані для кожної інтерполяційної точки кожної доби періоду 1961–2010 рр. у рамках роботи проекту CARPATCLIM, мінімальне — визначалось рівністю:

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

Якщо права частина рівності (2) від’ємна, то мінімальна швидкість вітру дорівнювала 0.

Значення V_c , V_{\max} й V_{\min} розглядалися як “виміряні” і на їх основі було проведено розрахунки за формулою (1). Спочатку було розраховано середні річні значення питомої потужності для кожного року періоду 1961–2010 рр. Потім, з метою оцінки сучасного стану вітрових ресурсів та їх можливих змін, із досліджуваного періоду виділялись два проміжки: базовий кліматологічний період (1961–1990 рр.) та сучасний (1981–2010 рр.). Розраховані значення середньої річної питомої потужності вітру осереднювались по вказаних інтервалах (рис. 1, *a* і *б*) і розраховувались аномалії (різниця осереднених значень за періоди 1981–2010 рр. та 1961–1990 рр., (рис. 1, *в*)).

Порівняльний аналіз отриманих результатів за періоди 1961–1990 рр. й 1981–2010 рр. та розрахованих аномалій показують різке зменшення середньої питомої потужності вітру в сучасний період порівняно із стандартним (базовим) періодом. Істотні зміни спостерігаються на більшій частині досліджуваного регіону (вся північно-східна частина та на піках Карпатського хребта).

Для обґрунтування статистичної значущості виявлених змін використовувались два незалежних методи: t -критерій Стьюдента [9] та W -критерій Вілкоксона [10]. На рис. 2 представлено результати розрахунків критеріїв для кожної інтерполяційної точки. Зазначимо, що нульова гіпотеза про рівність середніх значень двох вибірок відкидається з ймовірністю $1-\alpha$, якщо при заданому рівні значущості (α) розраховане значення t -критерію Стьюдента 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 є статистично значущими практично для всього досліджуваного регіону. Єдиний виняток — невелика територія на півдні української частини Карпатського хребта. Слід зазначити, що альтернативна гіпотеза (про значущість відмінностей середніх значень) може вважатися справедливою з високою ймовірністю, оскільки розраховані значення критеріїв практично

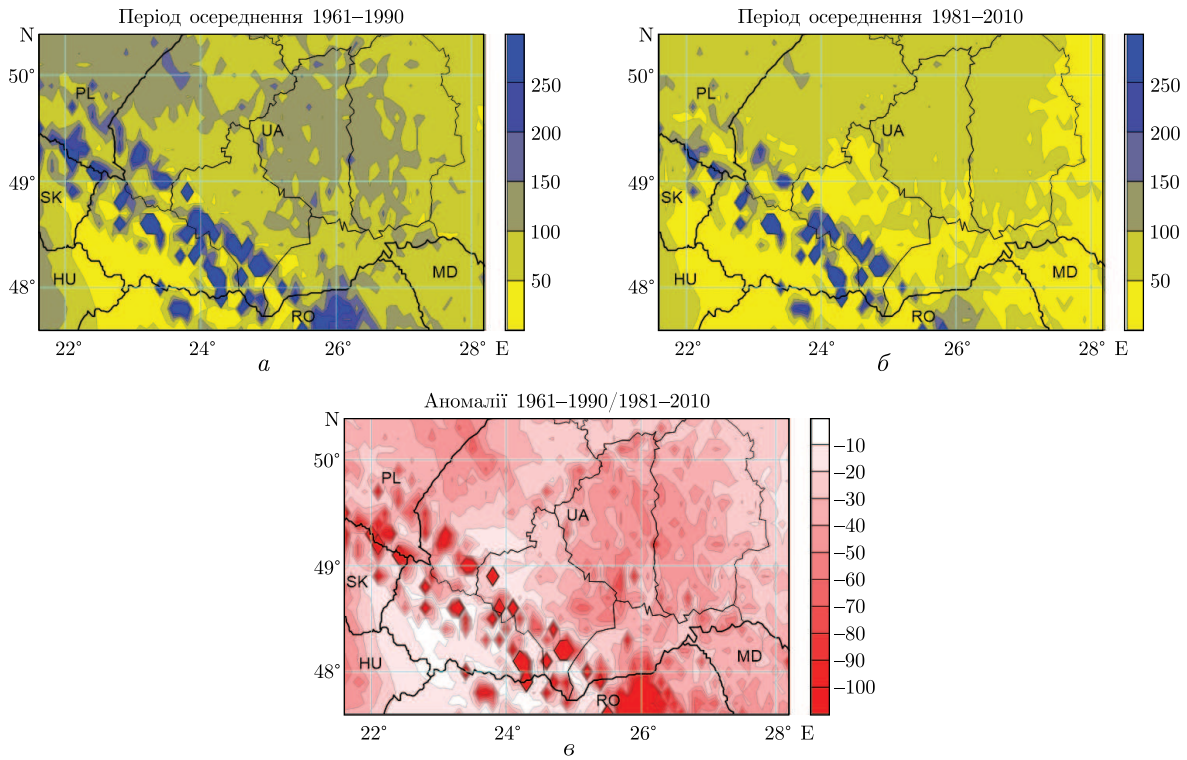


Рис. 1. Середня багаторічна питома потужність вітру (в $\text{Вт}/\text{м}^2$) на висоті 10 м (а, б) та її аномалії (в)

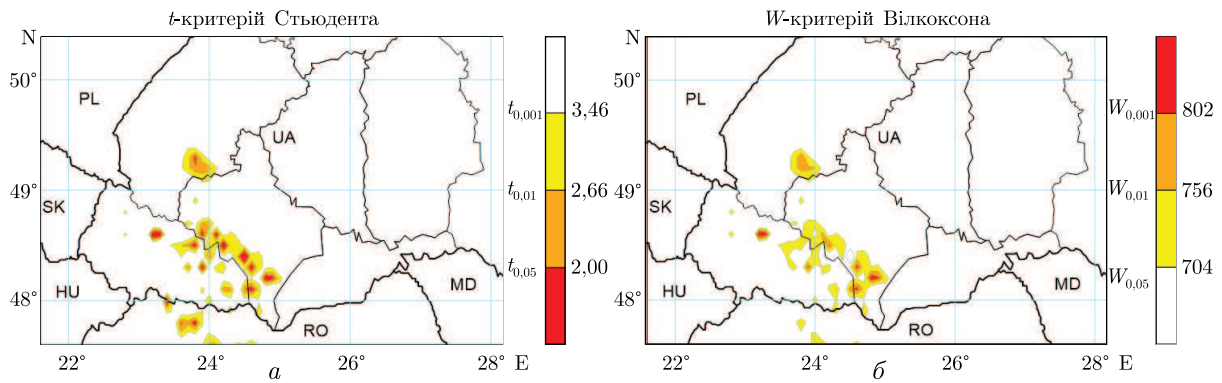


Рис. 2. Статистична значущість аномалій середньої багаторічної питої потужності вітру на висоті 10 м (розраховані значення статистичних критеріїв)

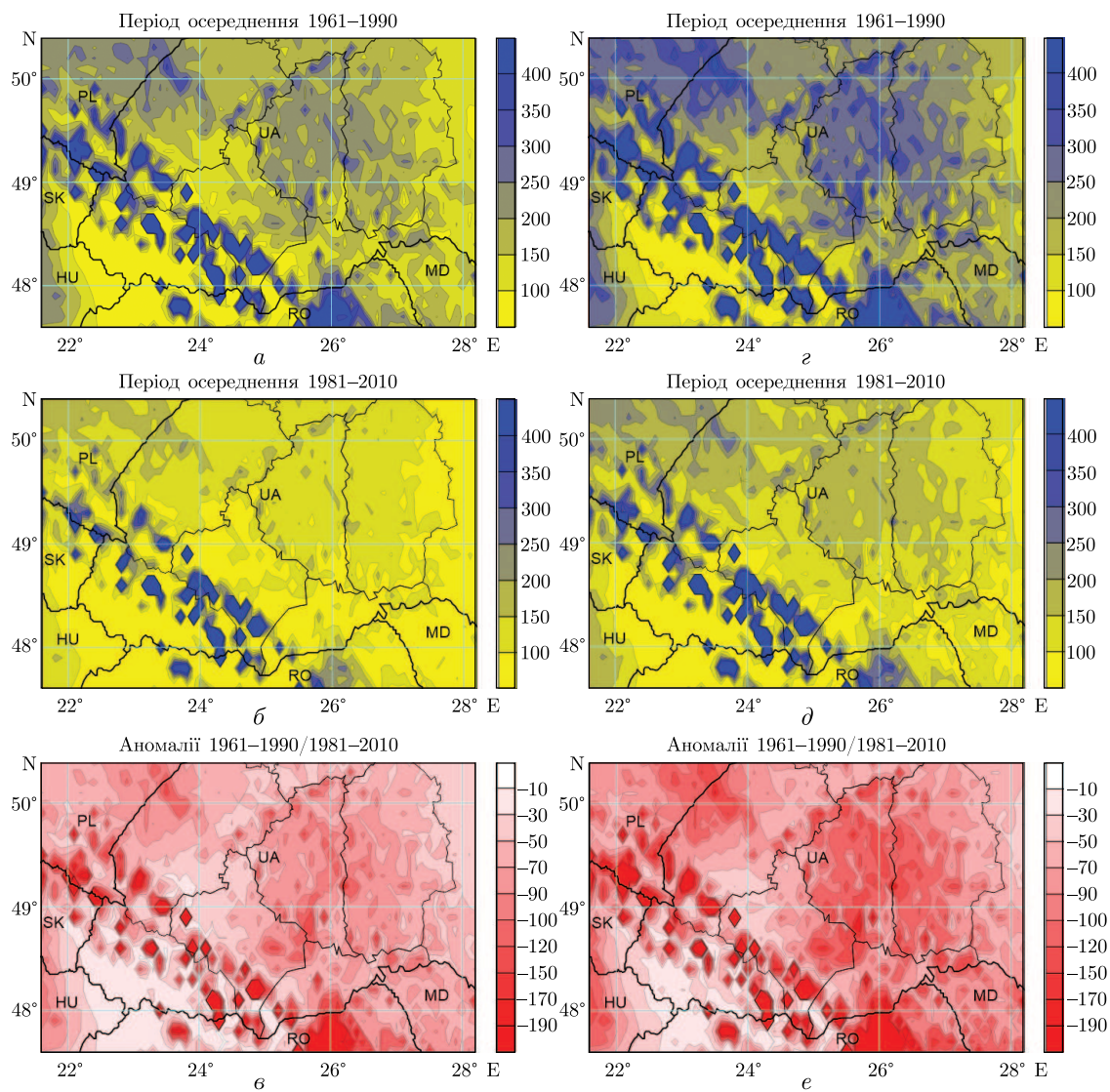


Рис. 3. Оцінки середньої багаторічної питомої потужності вітру (в W/m^2) та її аномалії на висоті 30 м (*a*, *б*, *в*) та 50 м (*з*, *д*, *е*) у разі використання логарифмічного профілю вітру

Таблиця 1. Кількісні характеристики (ε й σ) відмінностей значень середньої багаторічної питомої потужності вітру, розрахованих при різних вертикальних профілях швидкості

висота 30 м, період 1961–1990 рр.				висота 30 м, період 1981–2010 рр.			
	(3)	(4) $\alpha = 0,14$	(4) $\alpha = 0,2$		(3)	(4) $\alpha = 0,14$	(4) $\alpha = 0,2$
(3)		141,4	15,7	(3)		133,8	14,9
(4) $\alpha = 0,14$	0,452		157,1	(4) $\alpha = 0,14$	0,875		148,7
(4) $\alpha = 0,2$	0,005	0,549		(4) $\alpha = 0,2$	0,009	1,062	
<i>a</i>				<i>б</i>			
висота 50 м, період 1961–1990 рр.				висота 50 м, період 1981–2010 рр.			
	(3)	(4) $\alpha = 0,14$	(4) $\alpha = 0,2$		(3)	(4) $\alpha = 0,14$	(4) $\alpha = 0,2$
(3)		219,8	80,0	(3)		208,0	75,7
(4) $\alpha = 0,14$	0,679		299,8	(4) $\alpha = 0,14$	1,313		283,7
(4) $\alpha = 0,2$	0,068	1,182		(4) $\alpha = 0,2$	0,132	2,287	
<i>в</i>				<i>г</i>			

Примітка. – значення ε , що розраховані за формулою (5); – значення σ , що розраховані за формулою (6).

на всій досліджуваній території є більшими (меншими у випадку критерію Вілкоксона) критичного значення за рівня значущості 0,001.

Оцінка вітроенергетичного потенціалу на висотах 30 й 50 м над поверхнею землі. Для оцінки питомої потужності вітру на цих висотах вертикальні профілі вітру в нижній частині атмосфери апроксимувалися простими функціональними залежностями — логарифмічною і степеневою:

$$V(h_2) = V(h_1) \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)}, \quad (3)$$

$$V(h_2) = V(h_1) \left(\frac{h_2}{h_1}\right)^\alpha, \quad (4)$$

де h_1 й 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 швидкість вітру на різних висотах, найчастіше використовують значення α , які дорівнюють $1/7 \approx 0,14$ та $0,2$ [8]. Зауважимо, що логарифмічний профіль (3) є добре обгрутованим тільки для нейтрально стратифікованого приземного шару атмосфери. Тому розрахована на основі формул (3) й (4) (при сталих значеннях α) швидкість, а отже, і питома потужності вітру будуть не зовсім точно відображати реальні значення. Але як перше наближення вказаний підхід можна використовувати.

Як приклад на рис. 3 представлено результати розрахунку середньої багаторічної питомої потужності вітру для двох періодів 1961–1990 рр. й 1981–2010 рр. на висотах 30 й 50 м та їх аномалії в разі використання логарифмічного вертикального профілю. Результати розрахунків статистичної значущості виявлених змін не наведено, оскільки вони є практично ідентичними до рис. 2.

Для кількісної характеристики відмінностей у результатах, отриманих при різних вертикальних профілях вітру, було розраховано нормалізовану середню квадратичну помилку ε та величину σ за формулами:

$$\varepsilon = \frac{\langle (\overline{P}_I - \overline{P}_{II})^2 \rangle}{\langle \overline{P}_I \rangle \langle \overline{P}_{II} \rangle}, \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\langle (\overline{P}_I - \overline{P}_{II})^2 \rangle}, \quad (6)$$

де $\langle \rangle$ — осереднення по простору (по всіх інтерполяційних точках); \overline{P}_I й \overline{P}_{II} — розраховані значення питомої потужності при різних вертикальних профілях вітру. Результати розрахунків демонструє табл. 1. Найкращу узгодженість показують результати, отримані в разі використання логарифмічного та степеневого (з показником 0,2) вертикальних профілів.

Аналізуючи розраховані нами оцінки вітроенергетичного потенціалу для різних висот для періодів 1961–1990 рр. й 1981–2010 рр., можна констатувати, що, незважаючи на різке зменшення вітрових ресурсів у регіоні Українських Карпат у період сучасного клімату, все ж існують певні території, де вітрова енергетика може бути економічно перспективною. Найбільші значення питомої потужності, які можуть досягати $10\text{--}20$ кВт/м², традиційно спостерігаються на піках гірського хребта. Певним потенціалом володіють також Львів-

ська, Тернопільська та Хмельницька області. Тут існують території, де значення питомої потужності на висоті 30 м досягають 200–250 Вт/м², а на висоті 50 м — до 300 Вт/м².

Таким чином, використання детальнішої і сучаснішої метеорологічної інформації в сукупності із новими методами контролю її якості та просторової інтерполяції, дозволило отримати більш повну інформацію про енергетичний потенціал регіону, виділити конкретні райони з найбільш ефективним виробництвом вітрової енергії. Отримана інформація може мати практичне використання і є важливою для безпосередніх виробників нетрадиційних джерел енергії.

Цитована література

1. *Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України*. – Київ, 2001. – 41 с.
2. *CARPATCLIM*. Climate of the Carpathian region [Електрон. ресурс] / Режим доступу: <http://www.carpatclim-eu.org/pages/home/>.
3. *Szentimrey T.* Manual of software MISH. – Hung. Meteorol. Service, 2011. – 32 p. – http://www.met.hu/en/omsz/-palyazatok_projektek/carpatclim/.
4. *Осадчий В. І., Бабіченко В. М., Набиванець Ю. Б., Скрипник О. Я.* Динаміка температури повітря в Україні. – Київ: Ніка-Центр, 2013. – 308 с.
5. *Spinoni J., Szalai S., Szentimrey T., Lakotos M., Bihari Z.* Climate of the Carpathian in the period 1961–2010. – climatologies and trends of 10 variables // *Int. J. Climatol.* – 2014. – doi: 10.1002/joc.4059.
6. *Скрипник 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.
7. *Micu D. M., Dumitrescu A., Cheval S., Birsan M.-V.* Climate of the Romanian Carpathians. – Berlin: Springer, 2015. – 213 p. – <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-02886-6>.
8. *Де Рензо Д.* Ветроэнергетика. – Москва: Энергоатомиздат, 1982. – 271 с.
9. *Урбах В. Ю.* Статистический анализ в биологических и медицинских исследованиях. – Москва: Медицина, 1975. – 296 с.
10. *Большев Л. Н., Смирнов Н. В.* Таблицы математической статистики. – Москва: Наука, 1983. – 416 с.

References

1. *Atlas of power budget of renewable and non-conventional sources of energy*, Kyiv, 2001 (in Ukrainian).
2. *CARPATCLIM*. Climate of the Carpathian region [web-site]: <http://www.carpatclim-eu.org/pages/home/>
3. *Szentimrey T.* Manual of software MISH, Hungarian Meteorological Service, 2011: http://www.met.hu/en/omsz/-palyazatok_projektek/carpatclim/
4. *Ocadchy V. I., Babichenko V. M., Nabyvanets Y. B., Skrynyuk O. Y.* Dynamic of air temperature in Ukraine, Kyiv: Nika-Center, 2013 (in Ukrainian).
5. *Spinoni J., Szalai S., Szentimrey T., Lakotos M., Bihari Z.* *Int. J. Climatol*, 2014: doi:10.1002/joc.4059.
6. *Skrynyuk O. A.* Hydrology, hydrochemistry and hydroecology, 2014, 4: 91–98 (in Ukrainian).
7. *Micu D. M., Dumitrescu A., Cheval S., Birsan M.-V.* Climate of the Romanian Carpathians, Berlin: Springer, 2015: <http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-02886-6>.
8. *De Renzo D. J.* Wind power: recent developments, Moscow, Energoatomizdat, 1982 (in Russian).
9. *Urbakh V. Y.* Statistical analysis in biological and medical research, Moscow: Meditsyna, 1975 (in Russian).
10. *Bolshev L. N., Smirnov N. V.* Statistical tables, Moscow: Nauka, 1983 (in Russian).

Український гідрометеорологічний інститут
ДСНС України та НАН України, Київ
Національний університет біоресурсів
та природокористування України, Київ

Надійшло до редакції 18.03.2015

Член-корреспондент НАН Украины В. И. Осадчий, О. А. Скриник,
О. Я. Скриник

Оценка современного состояния ветровых ресурсов Украинских Карпат и их изменения относительно базового климатического периода

Украинский гидрометеорологический институт ГСЧС Украины и НАН Украины,
Киев

Национальный университет биоресурсов и природопользования, Киев

На основе данных наблюдений Гидрометслужбы Украины проведена оценка современного состояния (за период 1981–2010 гг.) ветровых ресурсов Украинских Карпат. Построены детальные (с высоким пространственным разрешением) 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: ветроэнергетические ресурсы, изменения климата, Карпатский регион.

Corresponding Member of the NAS of Ukraine V. I. Osadchy, O. A. Skrynyk,
O. Y. Skrynyk

Estimation of a modern stage of wind resources in the Ukrainian Carpathians and their changes regarding the base climatological period

Ukrainian Hydrometeorological Institute under the State Emergency Service of Ukraine
and the NAS of Ukraine, Kyiv

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv

Basing on empirical data, we have estimated the modern stage (during 1981–2010) of wind resources in the Ukrainian Carpathians. Detailed (with high spatial resolution) maps of wind potential capacity at different heights are constructed. Comparative analysis of the results against analogous results for 1961–1990 shows a considerable decrease of wind resources in 1981–2010. Statistical significance of the revealed changes is justified.

Keywords: wind resources, climate change, Carpathian region.