

УДК 551.55+551.58

DOI: <https://doi.org/10.15407/ugz2020.01.059>**I. Гаднадь<sup>1,2</sup>, К. Тар<sup>1</sup>, Й. Молнар<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Дебреценський університет, Дебрецен, Угорщина<sup>2</sup>Закарпатський угорський інститут ім. Ференца Ракоці II, Берегове, Україна**СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У СВІТІ, ЄВРОПІ ТА В УКРАЇНІ, ЗОКРЕМА НА ЗАКАРПАТТІ**

Мета публікації – висвітлити та узагальнити деякі аспекти сучасного стану вітрової енергетики та окреслити можливі перспективи її розвитку, насамперед залежно від кліматичних ресурсів, а також економічних чинників. Розглянуто сучасний стан використання енергії вітру в світі, Європі та в Україні (зокрема на Закарпатті) за показниками введених в експлуатацію вітрових електростанцій та потужностей встановлених вітротурбін. На основі літературних джерел та кліматичних баз даних розглянуто стан розвитку вітрової енергетики як вагомого чинника протидії глобальним змінам клімату та поліпшення загального стану енергетичної безпеки світу. Узагальнено перспективи подальшого розвитку вітроенергетики. Виділено території України, особливо Карпатський регіон, які характеризуються найвищим вітроенергетичним потенціалом і мають сприятливі умови для виробництва електроенергії сучасними вітровими електростанціями з високим ступенем ефективності. Для дослідження кліматичних умов використання вітрової енергії на Закарпатті проаналізовано гомогенізовані ряди швидкості вітру кліматичної бази даних CARPATCLIM. На основі даних Global Wind Atlas показано територіальний розподіл показників потужності та швидкості вітру на висоті 10 м, 50 м та 100 м в області. Крім кліматичних умов, у статті аналізуються й інші аспекти впровадження вітрової енергетики на Закарпатті, насамперед природоохоронні, які пов'язані з унікальністю природних цінностей краю.

**Ключові слова:** відновлювані джерела енергії; вітрова енергетика; швидкість вітру; вітроелектростанція (ВЕС); Україна; Закарпаття.

**I. Hadnagy<sup>1,2</sup>, K. Tar<sup>1</sup>, J. Molnar<sup>2</sup>**<sup>1</sup>University of Debrecen, Debrecen, Hungary<sup>2</sup>Ferenc Rákóczi II. Transcarpathian Hungarian Institute, Berehove, Ukraine**ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF WIND POWER IN THE WORLD, EUROPE AND UKRAINE, ESPECIALLY IN TRANSCARPATHTIA**

The purpose of this publication is to highlight and summarize some aspects of the current state of wind energy and to outline the possible prospects for its development, primarily depending on climate resources and economic factors. The article deals with the modern state of utilizing wind energy in the world, Europe, and Ukraine on the basis of indices of wind power stations and wind turbines that were put into operation. Literary sources and climatic databases give grounds to estimate the development of wind energy as a significant factor to counteract global climate changes, as well as improvement of the general state of energy security in the world. This work generalizes the future development of wind energy. The author has determined those Ukrainian territories, especially the Carpathian region, that are characterized by the highest wind-energy potential and have favourable conditions to produce electricity at modern highly efficient wind power stations. To research climatic conditions of using wind energy in Transcarpathia homogenized rows of wind speed from the CARPATCLIM climatic database were analysed. Global Wind Atlas data helped us analyse the territorial distribution of wind power indices and wind speed at the altitude of 10 m, 50 m, and 100 m. In addition to climatic conditions, the article analyses environmental aspects of implementing wind energy in the region as well, which can be accounted for by the unique character of the region's nature. Scientific novelty of the obtained results. The article substantiates the possibility of using wind energy in Transcarpathia according to the indicators of climatic conditions. The results of the study can be of value when planning wind power projects and making investment decisions. Detailed characterization of wind resources of the territory is possible on the basis of a comprehensive approach using hydrodynamic modeling, with additional, short-term, expedition, instrumental measurements of wind speed and direction, preferably at several altitudes above the top. The purpose of this publication is to highlight and summarize some aspects of the current state of wind energy and to outline the possible prospects for its development, primarily depending on climate resources and economic factors.

**Keywords:** renewable energy sources; wind energy; wind speed; wind power station; Ukraine; Transcarpathia.

© I. Гаднадь, К. Тар, Й. Молнар, 2020

### Актуальність теми дослідження

Історія використання людиною енергії вітру налічує вже кілька тисяч років. Однак, тільки в останні чотири десятиріччя цей відновлюваний вид енергії став предметом інтенсивних досліджень та інвестицій. Період, починаючи з 1980-х років, є часом модернізації використання вітрової енергії. Нині вітроенергетика набуває ознак ключових галузей світової економіки та вирізняється найшвидшим нарощуванням потужностей з-поміж усіх енергетичних технологій у світі. Значне технічне зростання в галузі спостерігається з 2000-х років. За останні 20 років у світі потужність введених в експлуатацію вітрових електростанцій зросла в 65 разів [1]. Тому аналіз сучасного стану вітроенергетики набуває надзвичайної актуальності.

### Стан вивчення питання, основні праці

В Україні дослідження потенціалу відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та проблем у сфері альтернативної енергетики проводять вчені та фахівці Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, Інституту відновлюваної енергетики НАН України, Української вітроенергетичної асоціації та інші.

Питанню вивчення вітрових ресурсів України присвячено значну кількість наукових праць Л. Дмитренка і С. Барандича [2], Є. Макаровського і В. Зінича [3] (вітроенергетичний потенціал України), а також Г. Півняка і Ф. Шкрабця (проблеми розвитку вітроенергетики) [4]. Дослідники розглядають вітрові ресурси і на регіональному рівні, наприклад, В.І. Осадчий, О.А. Скриник, О.Я. Скриник (оцінка сучасного стану вітрових ресурсів Українських Карпат) [5], Н.М. Москальчук і М.М. Приходько (оцінювання вітроенергетичного потенціалу Карпатського регіону, перспективи вітроенергетики на Прикарпатті) [6] та інші. В роботі О.О. Волкової, О.С. Третякова, І.Г. Черваньова [7] викладено методику застосування для конкретної ділянки моделі прогностичного розрахунку середніх швидкостей вітру для потреб вітроенергетики на основі ГІС-технологій та її результати.

У статті проаналізовано роботи провідних українських та закордонних учених, бази даних, періодичні видання спеціалізованих організацій та нормативно-правові акти, які присвячені питанням вітроенергетики світу, Європи та України.

Мета цієї публікації – висвітлити та узагальнити деякі аспекти сучасного стану вітрової

енергетики та окреслити можливі перспективи її розвитку, насамперед залежно від кліматичних ресурсів, а також економічних чинників.

### Виклад основного матеріалу

#### *Стан вітрової енергетики у світі*

За даними Всесвітньої ради з вітроенергетики (GWEC) загальна потужність встановлених вітротурбін у світі на кінець 2018 р. досягла 591,5 ГВт (*рис. 1*). У 1998 р. ця цифра становила всього 10,2 ГВт. Завдяки інвестиціям у вітроенергетику протягом 2018 р. генеруючі потужності зросли на 51,3 ГВт, що означає збільшення на 9,6%. Наразі рекордним залишається 2015 рік, коли загальна потужність введених у світі в експлуатацію вітротурбін становила 63,5 ГВт, що порівняно з попереднім роком означає зростання на 14,0% [8, 9].

У регіональному відношенні найбільшу кількість цільових інвестицій та найбільшу загальну потужність вітропарків (261,1 ГВт) спостерігаємо в Азії (з Океанією). З десяти країн світу з найбільшими вітроенергетичними потужностями у цьому макрорегіоні розташовані дві держави – Китай (211,4 ГВт) та Індія (35,1 ГВт). На другому місці Європа (189,7 ГВт, в т. ч. на Європейській Союз припадає 179,0 ГВт). Далі йде Америка (загальна потужність – 165,1 ГВт, з них 126,6 ГВт припадає на Сполучені Штати Америки, 14,8 ГВт – на Бразилію, 12,8 ГВт – на Канаду). На країни Африки та Близького Сходу припадало 5,7 ГВт.

У 2018 р. 90 країн здійснювали виробництво електроенергії на ВЕС, з них 33 держави володіють вітровими парками з генеруючою потужністю понад 1 ГВт [8 - 11] (*рис. 2*).

#### *Стан вітроенергетики в Європі*

Згідно з даними звіту Європейської вітроенергетичної асоціації (EWEA), у 2018 р. в Європі було введено в експлуатацію нові вітротурбіни загальною потужністю 11,6 ГВт, що становить 22,0% від світових потужностей, введених в експлуатацію того року (*рис. 3*). Загальна потужність, засвідчивши зростання у 6,5%, на кінець 2018 р. досягла 189,7 ГВт, що складає 32,0% світового показника [10, 11].

У Європі знаходяться дві з п'яти країн, що мають найбільші вітроенергетичні потужності в світі, Німеччина та Іспанія, в яких працюють 43,7% вітрових турбін макрорегіону [8, 10]. Вітроенергетичні потужності Німеччини становлять 59,3 ГВт, Іспанії – 23,5 ГВт, Великобританії

– 20,9 ГВт, Франції – 15,3 ГВт, Італії – 10,0 ГВт [10].

Протягом останніх 10 років нові потужності, введені в експлуатацію в Європі, майже рівномірно зростали. Слід зазначити, що частка України у введених в експлуатацію вітроенергетичних потужностях Європи в 2018 р. складала лише 0,3% (0,53 ГВт). Серед сусідніх країн цей показник був більшим лише у Польщі (5,86 ГВт) та у Румунії (3,03 ГВт). Менш потужними вітровими парками володіла Угорщина (0,33 ГВт), Росія (0,14 ГВт), Білорусь (0,03 ГВт), Словаччина (0,003 ГВт) та Молдова [9 – 13].

### Потенціал відновлюваної енергетики та вітроенергетики України

На початок XXI ст. Україна посідає одне з перших місць у світі за рівнем споживання енергії на одиницю ВВП; енергоємність ВВП України в 2,6 рази перевищує середньосвітові показники [14]. Енергетична промисловість є однією з базових в економіці України і ґрунтується на спалюванні вугілля, природного газу, нафти і нафтопродуктів, а також використанні атомної та гідроенергії. Кількість виробленої в країні електроенергії у 2018 р. становила 159,4 млрд кВт·год (на 17,2% менше ніж 2007 р., коли цей показник становив 196,3 млрд кВт·год). З них 53,1% виробили атомні електростанції (АЕС), 30,0% – теплові електростанції (ТЕС), 7,5% – гідроелектростанції (ГЕС), 1,8% – вітроелектростанції (ВЕС), сонячні електростанції (СЕС), електростанції з використанням біомаси та 7,7% – інші [13, 15].

Екологізація енергетичної та інших галузей, освоєння й використання відновлюваних і альтернативних джерел енергії («чиста енергетика») є пріоритетною серед цілей збалансованого розвитку, вона також сприяє зменшенню рівня залежності від критичного імпорту енергетичних ресурсів. Україна до процесу використання альтернативних видів енергії активно долучається і щороку нарощує темпи розвитку відновлюваної енергетики. У 2010 – 2018 роках використання відновлюваної енергії в Україні зростало удвічі швидшими темпами, ніж традиційна енергетика, що базується на викопних та термоядерних ресурсах. У 2018 р. зафіксовано динамічний розвиток української «зеленої» енергетики. За рік встановлено 848 МВт нових потужностей, що генерують електроенергію з ВДЕ. Загалом, на кінець 2018 р. в країні працювало 2274 МВт потужностей (рис. 4), які генерують «чисту» електроенергію, що у 1,6 рази більше, ніж на кінець 2017 р. [15].

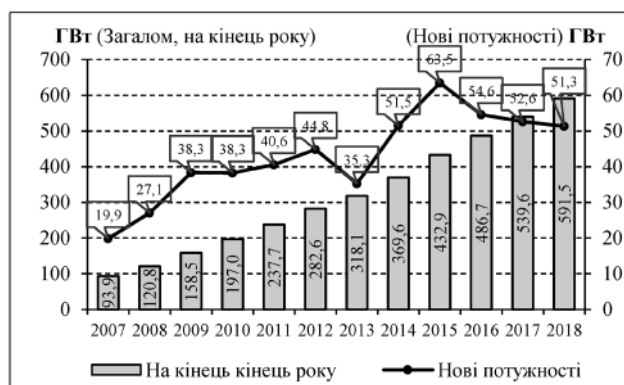


Рис. 1. Загальна потужність ВЕС у світі та щорічні показники введених в експлуатацію нових потужностей (ГВт, 2007–2018 роки; за даними GWEC [8])

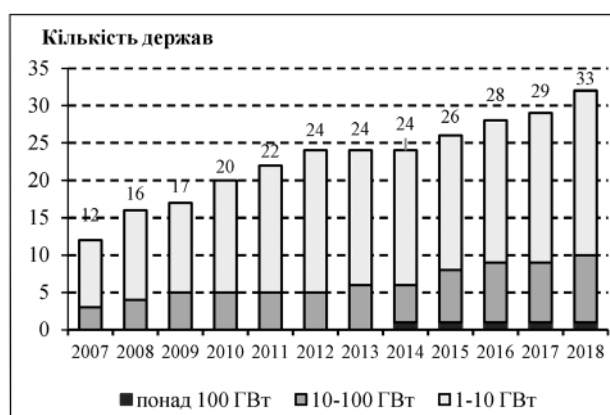


Рис. 2. Загальна кількість держав з генеруючою потужністю ВЕС понад 1 ГВт (2007–2018 роки; за даними GWEC [8])

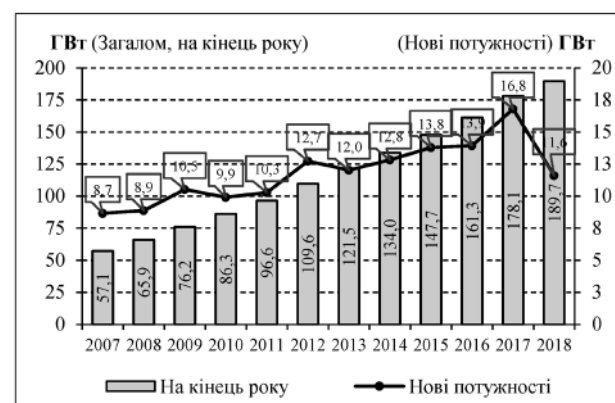


Рис. 3. Загальна потужність ВЕС в Європі та щорічні показники введених в експлуатацію нових потужностей (ГВт, 2007–2018 роки; за даними EWEA [10])

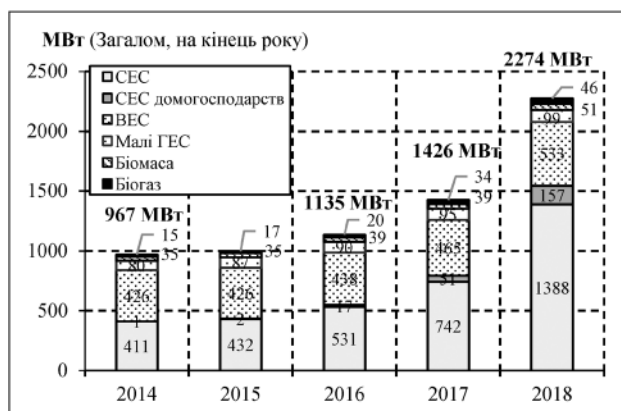


Рис. 4. Встановлена потужність об'єктів відновлюваної електроенергетики України, що працюють за «зеленим» тарифом (2014 – 2018 роки, [15])

За 12 місяців 2018 р. об'єкти відновлюваної енергетики, яким видано «зелений» тариф, виробили 2,88 млрд кВт·год електроенергії [15]. «Зелений» тариф – це спеціальний завищений тариф, згідно з яким відбувається придбання електроенергії від об'єктів, які виробляють її з використанням ВДЕ. У більшості європейських держав «зелений» тариф був запроваджений ще на початку 90-х років, Верховна Рада України внесла відповідні зміни до Закону «Про електроенергетику» (575/97-ВР) лише 1 квітня 2009 року. Цими змінами було станні кілька років було ухвалено численні позитивні рішення та угоди про приєднання, що стимулюють використання відновлюваних джерел енергії. Зокрема, 15 березня 2006 р. Кабінет Міністрів України затвердив «Енергетичну стратегію України на період до 2030 року», у якій виробництву відновлюваної енергії відводиться пріоритетна роль, а освоєння нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії розглядається як важливий фактор підвищення рівня енергетичної безпеки та зниження антропогенного впливу на довкілля. Наголошено, що масштабне використання потенціалу нетрадиційної енергетики має не тільки внутрішньодержавне, а й міжнародне значення. Згідно з цією стратегією, частка енергії з нетрадиційних та відновлюваних джерел в паливно-енергетичному балансі України у 2030 р. має досягнути 8 – 12% загального споживання [16].

Україна однією з перших приєдналася до Паризької угоди в межах Рамкової конвенції ООН про зміну клімату (UNFCCC) щодо регулювання заходів зі зменшення викидів діоксиду вуглецю з 2020 р. Це означає, що країна готова до нового етапу розвитку відновлюваної

енергетики, зокрема до орієнтації національної економіки на модель функціонування з низьким рівнем викидів вуглекислого газу. 10 травня 2016 р. Президент України підписав Указ №200/2016 «Питання приєднання України до Статуту Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA)», яким доручив подати заяву щодо членства країни в IRENA [17]. Європейський Союз директивою 2009/28/ЕК від 23 квітня 2009 р. намітив підвищити до 2020 р. частку відновлюваних джерел у загальному обсязі виробництва енергії до 20%.

Україна у 2010 р. приєдналася до європейського Енергетичного співтовариства (ратифіковано Законом України №2787 від 15 грудня 2010 р.), таким чином держава виконує покладенні зобов'язання стосовно сприяння використанню електроенергії, виробленої за допомогою ВДЕ на внутрішньому ринку електроенергії.

Енергія, вироблена за рахунок ВДЕ у 2018 р., (гідроенергія, лише малі ГЕС; енергія вітру, Сонця; біомаса і біогаз) забезпечує 1,8% енергоспоживання України, 0,7% якої припадає на енергію вітру (ВЕС) [13]. Довгостроковими цілями до 2020 р. вітроенергетика має забезпечувати 3,0% загального виробництва електроенергії (із введеною в експлуатацію потужністю приблизно 2000 МВт), а до 2030 р. – 4,5–6,0% (3000–4000 МВт) [16].

Для розвитку вітроенергетики найбільш придатні території, де коливання швидкості вітру якомога менші, а середня його швидкість перевищує 3 м/с [18]. Значна частина України має сприятливі умови для виробництва електроенергії сучасними вітровими електростанціями з високим ступенем ефективності, передусім південні та гірські регіони держави: це узбережжя Чорного та Азовського морів і високогір'я Карпат, Подільська височина, Донецька височина, а також Кримський півострів. У північних та північно-західних регіонах (Полісся), у долинах гірських річок і на Закарпатській низовині через низьку швидкість вітру вітроелектростанції не доцільно будувати, що обґрунтовано у низці праць та публікацій, зокрема науковці Українського гідрометеорологічного інституту та Інституту відновлюваної енергетики НАН України розробили районування території України за показниками вітрового потенціалу [2-6, 19-21 та ін.].

У незалежній Україні програма будівництва сучасних вітроелектростанцій розпочалася в 1997 р.

Відповідно до Указу Президента №159 «Про будівництво вітроелектростанцій» від 2 березня 1996 р. було розроблено комплексну державну програму будівництва вітроелектростанцій та інтеграції виробленої ними електроенергії в енергомережу. Згідно з планами, до 2010 р. загальна потужність введених в експлуатацію вітротурбін мала досягти 1990 МВт, проте ця програма не була реалізована. Крім того, в Україні прийнято закон для стимулювання розвитку вітроенергетики [22]. Отже, впродовж останніх років значна увага приділяється оцінці вітрового потенціалу території країни для ефективного впровадження ВЕУ. Ресурси вітрової енергії в Україні, разом з існуючою енергопостачальною інфраструктурою і потребою в енергії, створюють достатнє підґрунтя для її розвитку.

Згідно з даними UWEA (Ukrainian Wind Energy Association – Українська Вітроенергетична Асоціація) у 2018 р. загальна потужність вітроелектростанцій України становила 620,6 МВт (у 2017 р. досягла 552,9 МВт), і вона посідала 38

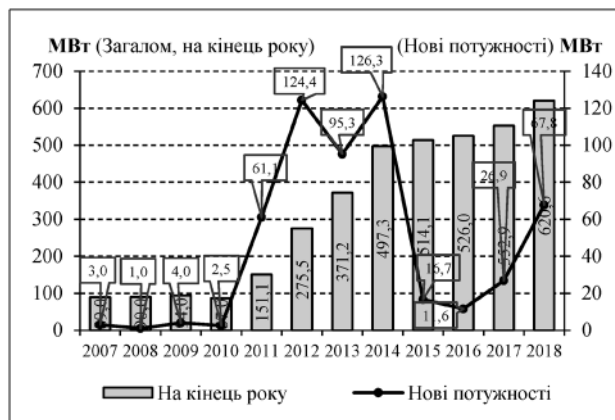


Рис. 5. Загальна потужність вітроелектростанцій в Україні та щорічні показники введених в експлуатацію нових потужностей (МВт, 2006 – 2018 роки; дані EWEA)

місце з-поміж держав світу, що використовують вітрову енергію, а в Європі 21 місце [8, 13].

Переважна більшість ВЕС сконцентровані на територіях з потенційно високою потужністю вітрової енергії. У 2018 р. з наявних генеруючих потужностей 532,8 МВт знаходилося на материковій частині України, з них 138,1 МВт

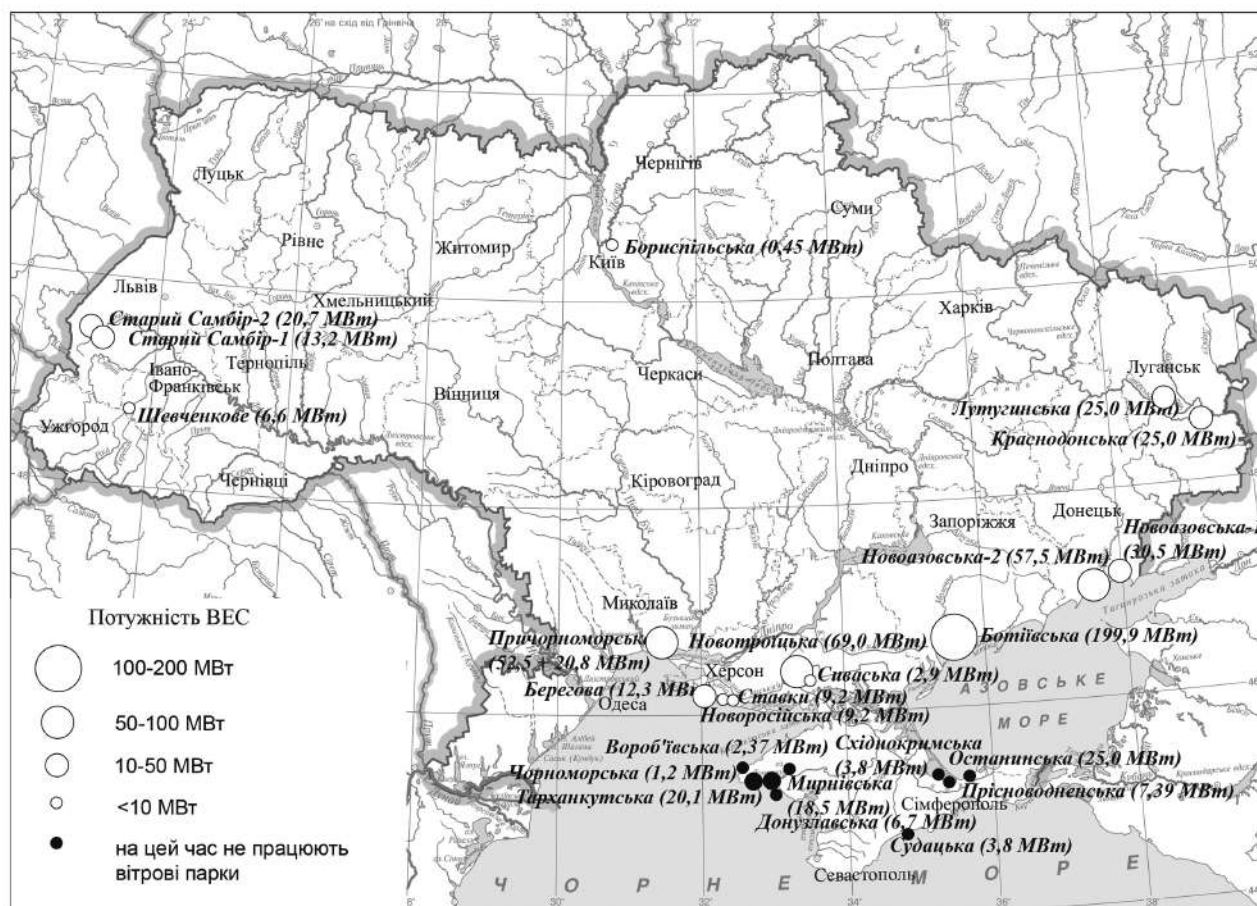


Рис. 6. Потужності збудованих в Україні ВЕС (2018 рік)

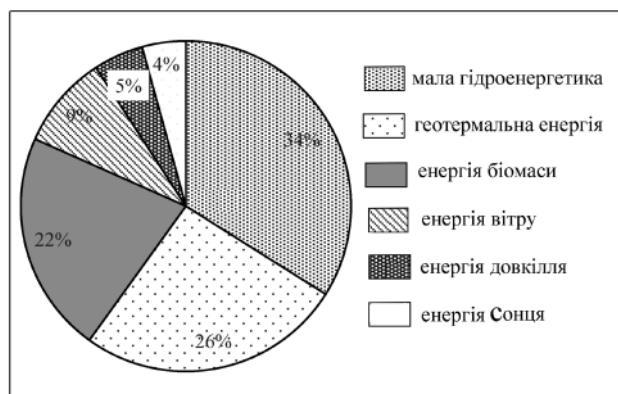


Рис. 7. Структура технічно-досяжного енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії Закарпатської області (за даними Програми енергоефективності та енергозбереження [27])

– в зоні проведення ООС (Операції об'єднаних сил) у Донецькій та Луганській областях. На Кримському півострові потужність збудованих вітроелектростанцій з 2013 р. не змінилася і становить 87,8 МВт [12, 13]. Після 2014 р., коли було введено в експлуатацію вітрові генератори загальною потужністю 126,3 МВт, у 2018 р. цей показник досяг лише 67,8 МВт [13] (рис. 5).

На кінець 2018 р. в Україні функціонувало 12 вітропарків, найбільшими з яких є Ботівська, Новотроїцька, Новоазовська-2 та Причорноморська ВЕС (рис. 6) [12, 13].

Протягом останніх років зростає зацікавленість інвесторів сектором української вітроенергетики. Серед держав-інвесторів насамперед можна виділити Німеччину, Польщу, Литву, Туреччину та Китай. Для сприяння подальшим інвестиціям за підтримки Данського енергетичного агентства було розроблено інтерактивну карту проектів відновлюваної енергетики та енергоефективності України – UAMAP 2.0 [23].

Стосовно моделей понад 450 діючих вітрових турбін варто відзначити, що переважно це сучасні зразки «мегаватного» класу: 50,0% з них це турбіни «Vestas» (V47, V112, V136), 35% – турбіни «Fuhrländer» (FWT FL 2500), 10% – турбіни WTU (2.0, 2.5, 3.2, 3.6) та Enercon (E70). Решта 5% – це вітрові турбіни меншої потужності інших виробників (Turbowinds T600-48, USW56-100, Bonus, NORDEX N43/600), а в Криму були встановлені також турбіни типу «Unison 2,0» (по 2,0 МВт кожна) [10, 12, 13].

Кількість електроенергії, виробленої ВЕС, за останні кілька років значно зросла. Якщо у 2009 році вона становила всього 41,4 млн кВт·год [20],

то у 2018 році вже досягла 1181,1 млн кВт·год, з них було продано за «зеленим» тарифом [12, 13]. З квітня 2014 р. сонячні та вітрові електростанції, що знаходяться на Кримському півострові, через відомі причини не постачають електроенергію до Об'єднаної енергетичної системи (ОЕС) України.

Обсяг електроенергії, виробленої за рахунок енергії вітру у 2018 р., достатній для забезпечення понад 246 тисяч українських домогосподарств за середнього споживання 400 кВт·год електроенергії на місяць [13]. Вітроенергетика відіграє провідну роль в процесі декарбонізації економіки України.

### Потенціал відновлюваної енергетики та вітроенергетики Закарпаття

Якщо в контексті відновлюваної енергетики розглядати окремо Закарпатську область, то варто відзначити, що в рейтингу областей України за сумою нормованого потенціалу на основі даних технічно-досяжного енергетичного (ТДЕ) потенціалу відновлюваних джерел енергії Закарпаття посідає друге місце [25]. У Програмі енергоефективності та енергозбереження (ПЕЕ) на 2016 – 2020 роки у Закарпатській області [26, 27] наголошено, що ТДЕ потенціал ВДЕ становить 3,27 млн тонн умовного палива за рік, що дорівнює 8,5% від загальнодержавного потенціалу. В області споживається 1,29 млн тонн умовного палива за рік. Тобто, враховуючи ТДЕ потенціал ВДЕ можна забезпечити енергоспоживання області на 253%. Структуру ТДЕ потенціалу ВДЕ області узагальнено на рис. 7.

Станом на кінець 2018 р. на території області було зосереджено 10 ГЕС, 6 СЕС та одна біогазова енергетична станція. Загальна потужність цих об'єктів становить 90,4 МВт. Найбільшу її частку складають СЕС – 55,7% (50,4 МВт). На території області також діють одна міні ГЕС (до 1 МВт), 8 малих ГЕС (до 10 МВт) та одна ГЕС (понад 10 МВт), їх частка становить 43,2% (39,1 МВт). Електроенергетика на базі біогазу представлена одним об'єктом, частка якого 1,2% (1 МВт) загальної потужності. За 12 місяців 2018 р. об'єктами ВДЕ вироблено 168,8 млн кВт·год електроенергії (на 18,5% більше ніж у 2017 році). Найбільше електроенергії вироблено на ГЕС – 112,0 млн кВт·год (77,7%). СЕС виробили 56,0 млн кВт·год, що складає 21,7% від загального обсягу виробництва. З біогазу було

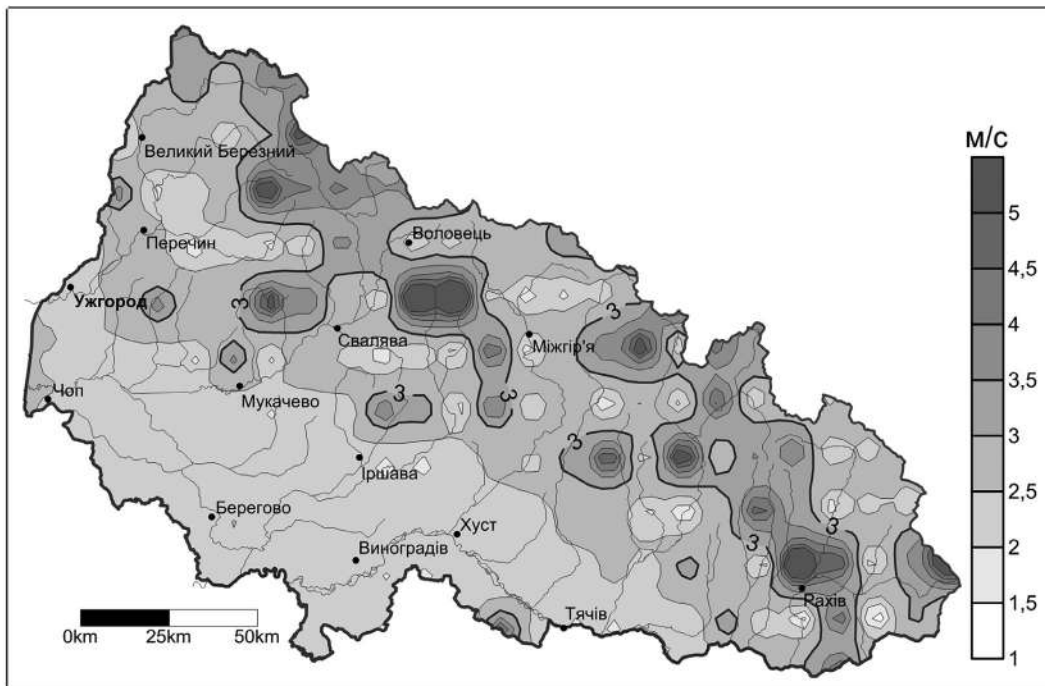


Рис. 8. Карта розподілу середньорічної швидкості вітру (м/с) на висоті 10 м на території Закарпаття за період з 1961 по 2010 роки (за даними CARPATCLIM [29])

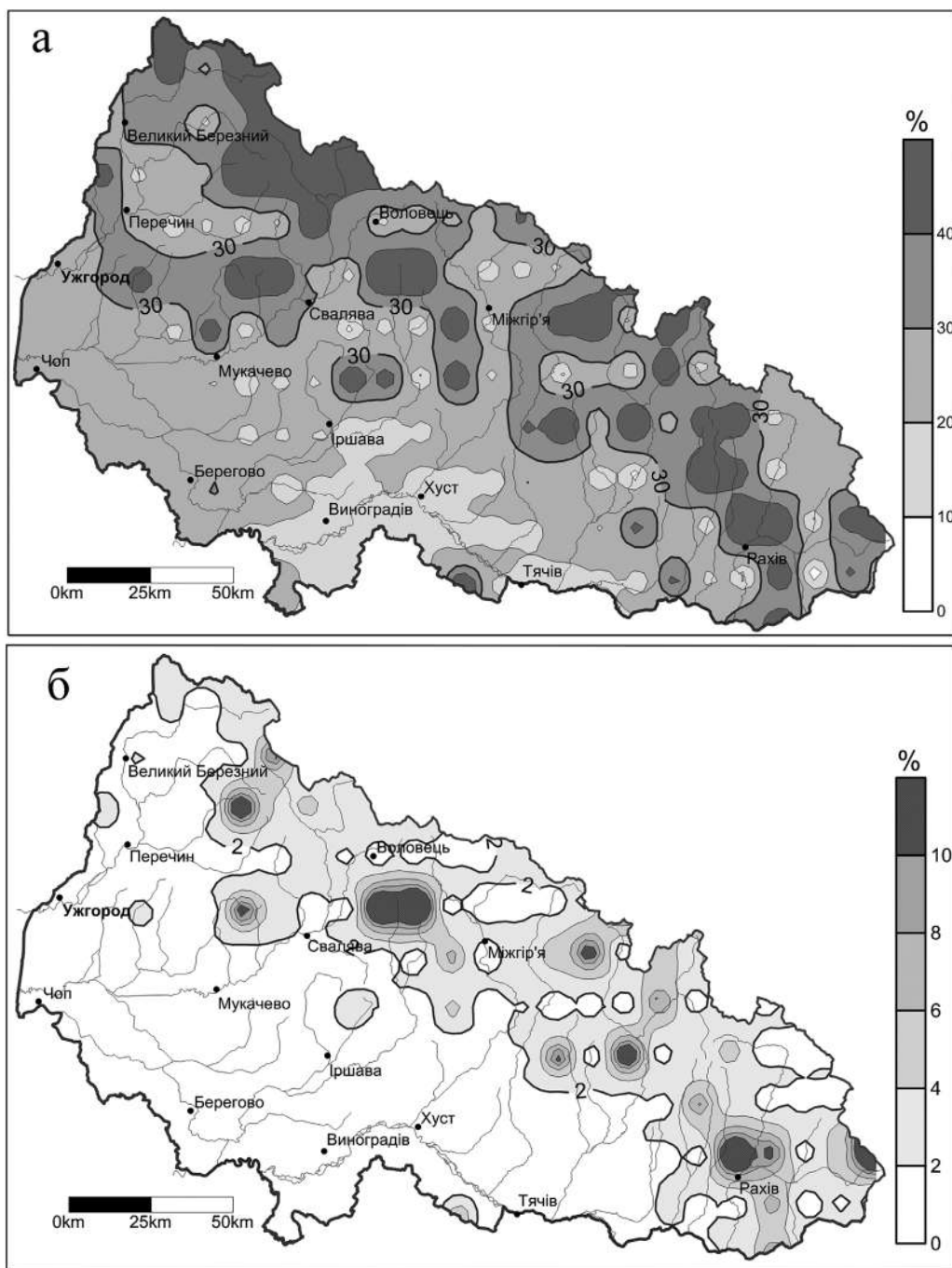
вироблено 0,9 млн кВт·год, що становить менше 1%. Закарпаття використовує приблизно 1,8 млрд кВт·год електроенергії на рік, тобто нині об'єкти ВДЕ області здатні виробляти 9 – 10% від загального споживання електроенергії [27].

Попри те, що в Україні вітроенергетика розвивається доволі швидкими темпами, у Закарпатській області не діє жодна вітрова електростанція. Натомість дані атласу енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії в Україні [19] та проведені дослідження засвідчують, що окремі гірські території мають значний потенціал вітрової енергії [5, 6, 26, 28 та ін.].

В рамках міжнародного дослідницького проекту "Клімат Карпатського регіону" (CARPATCLIM) [29], у якому брав участь Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, було отримано гомогенізовані ряди даних метеорологічних величин, серед них і середньодобових швидкостей та напрямків приземного вітру, з усіх станцій Карпатського регіону за період з 1961 по 2010 роки. За допомогою спеціалізованого кліматологічного програмного забезпечення було проведено гомогенізацію MASH (Multiple Analysis of Series for Homogenization [30]) та просторова інтерполяція

MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis [31]) даних у вузлах регулярної сітки з просторовою роздільною здатністю  $0,1^\circ \times 0,1^\circ$  (що відповідає  $\approx 7 \times 11$  км). До емпіричної бази даних залучено строкові виміри вітру на станціях, за строки 03, 12 та 21 год (UTC). Вихідні дані вітру атласу CARPATCLIM приведені до висоти 10 м над поверхнею землі і до висоти шорсткості 0,1 м. Використовуючи дані вузлів регулярної сітки, на території або близько до межі Закарпаття (всього 216), складено карту розподілу середньорічної швидкості вітру за період з 1961 по 2010 роки (рис. 8).

На основі карти можна констатувати, що найбільші швидкості вітру спостерігаються на вершинах Полонинсько-Чорногірського хребта (Полонина Рівна, Боржава, Красна, Свидовець та Чорногора) та Верховинського Вододільного хребта (у середньому за рік досягає 6 – 9 м/с). За таких умов можливе ефективне розміщення як потужних вітроелектростанцій, так і автономних вітроенергоустановок. На основі даних розрахунку середньорічної швидкості вітру отримано, що умови вітровикористання менш сприятливі у вузьких, захищених долинах та на низовині, де середня швидкість вітру за рік лише в поодиноких місцях перевищує 3 м/с. На низовинах придатними для використання вітру як



**Рис. 9.** Карта просторового розподілу відносної частоти середньодобових швидкостей вітру понад 3 м/с (а) та 10 м/с (б) на висоті 10 м на території Закарпаття за період з 1961 по 2010 роки (за даними CARPATCLIM [29])

енергетичного ресурсу можуть бути окремі місця, насамперед горбогір'я, які значно виступають над навколишньою місцевістю.

Дані **рис. 9** також свідчать про строкатий розподіл середньодобових швидкостей вітру в межах досліджуваної території. На **рис. 9а** видно, що відносні частоти середньодобових швидкостей вітру понад 3 м/с на низовині та у гірських

долинах коливається від 5% до 30%.

У середньому протягом року залежно від місцевості спостерігається приблизно 60 днів (від 20 до 110 днів) з такою середньою швидкістю. Це означає, що для експлуатації вітроелектричних установок із стартовою, мінімальною експлуатаційною швидкістю 3 м/с у середньому придатна лише 1/5 частина року. У гірських



районах відносна частота швидкостей вітру понад 3 м/с перевищує 30%, на найвищих хребтах досягає 90%. Тобто для роботи ВЕУ без частих простоїв найбільше придатні високі гірські хребти, полонини. Відносна частота швидкостей вітру понад 10 м/с перевищує 10% лише на полонинах. Ця швидкість найчастіше відповідає розрахунковій швидкості, за якої вітроустановка досягає номінальної потужності.

Ще детальнішу просторову роздільну здатність щодо потенціалу вітрової енергії мають карти Global Wind Atlas [32], які розроблені для допомоги інвесторам визначити потенційні райони вітрової енергії для виробництва електроенергії практично в будь-якій точці світу, а також виконати попередні розрахунки. За допомогою даних атласу (plot data) складено діаграму територіального розподілу показників середньорічної швидкості та потужності вітру на території області ( $100\% \approx 12\,800 \text{ км}^2$ ) (рис. 10).

У рамках Стратегічного екологічного аналізу (СЕА) Програми фінансування альтернативної енергетики України (USELF) було підготовлено технічний звіт з оцінки потенціалу відновлюваної енергетики в Україні. Один з п'яти технічних звітів присвячено енергії вітру [33]. У звіті розглядається потенціал використання вітрової енергії та визначаються райони зі значними обсягами вітрових ресурсів, в яких реалізація проектів будівництва і експлуатації вітрових електростанцій вважається більш доцільною з технічної і економічної точок зору. В процесі оцінювання були визначені ті райони, в яких розрахунковий рівень щільності вітрової енергії становить більше  $300 \text{ Вт/м}^2$ . Райони з рейтингом  $300\text{--}350 \text{ Вт/м}^2$  вважаються придатними для розвитку вітрової енергетики на 25%, а райони з рейтингом  $>350 \text{ Вт/м}^2$  – на 50%. На основі даних рис. 8 можна констатувати, що майже на 50% території області потужність вітру на висоті 10 м не перевищує  $100 \text{ Вт/м}^2$ . Райони з потужністю  $>300 \text{ Вт/м}^2$  займають відповідно 5% території (на 10 м), 18% (на 50 м) та 30% (на 100 м). Райони з потужністю вітру  $>350 \text{ Вт/м}^2$  (на 100 м) займають 20% території. На окремих гірських хребтах, відкритих височинах та горбогір'ях потужність вітру досягає  $700 \text{ Вт/м}^2$ , але ці райони становлять лише 2% території.

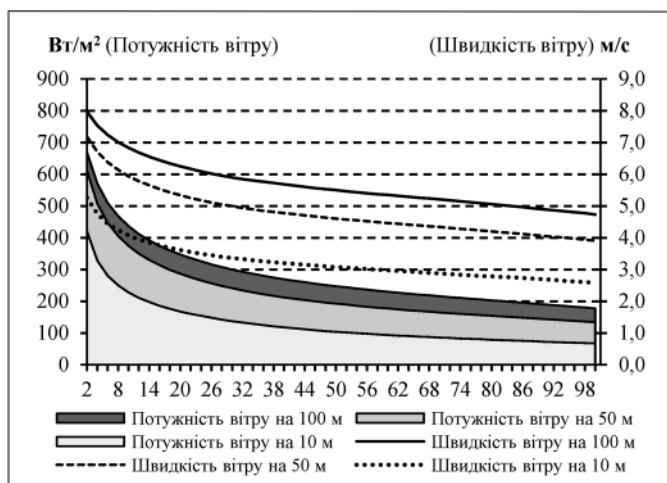


Рис. 10. Територіальний розподіл показників середньорічної швидкості (м/с) та потужності ( $\text{W/m}^2$ ) вітру на висоті 10 м, 50 м та 100 м на Закарпатті (за даними Global Wind Atlas [32])

Перед розробленням проектів будівництва ВЕС на територіях, придатних за метеорологічними показниками, необхідно провести їх комплексний геопросторовий аналіз (ГІС-аналіз) стосовно наявності факторів, які, за твердженнями [34–35], виключають можливість будівництва ВЕС: природні території, що перебувають під охороною, ліси, річки, населені пункти, транспортна мережа, енергомережа та їх буферні зони. Не можна, зокрема, залишати поза увагою інший важливий ресурс гірських територій – ліси. 52,6% території Закарпатської області займають ліси, а 13,9% належать до природоохоронних зон [36]. Найціннішим в Українських Карпатах вважаються букові праліси, площа яких становить  $77971,6 \text{ га}$ , з них 70% розташовані на території Закарпаття. Букові праліси занесені до списку об'єктів Світової спадщини ЮНЕСКО.

Крім того, райони з гірською місцевістю і схилами крутизною понад 20 градусів вважаються технічно складними для розвитку вітрової енергетики [33]. Якщо врахувати цей фактор, то для будівництва ВЕС придатні лише 25% території Закарпаття ( $3211 \text{ км}^2$ ) [3].

## Висновки

У статті розглянуто сучасний стан використання енергії вітру та розвитку вітрової енергетики в світі та Україні, зокрема на Закарпатті.

Наведено конкретні дані про потужність встановлених вітротурбін, рейтинги окремих держав

за показниками вітроенергетичних потужностей. Охарактеризовано потенціал відновлюваної енергетики, та вітроенергетики зокрема, в Україні.

Наведено основні положення українського законодавства щодо використання відновлюваних джерел енергії, у тому числі у контексті міжнародного співробітництва. Особливу увагу приділено Закарпатській області, яка за сумою нормованого потенціалу на основі даних технічно – досяжного енергетичного потенціалу посідає друге місце в Україні.

На основі результатів досліджень швидкостей та потужності вітру показано, що вітровий потенціал найвищих гірських хребтів Закарпаття (полонин) є сприятливим для виробництва електроенергії.

У Карпатському регіоні процес планування вітроенергетичних парків потребує наукового та

докладного обґрунтування з урахуванням взятих Україною зобов'язань у природоохоронній сфері.

Слід також враховувати техніко-економічні особливості використання вітроенергетики для промислових і побутових потреб в умовах гірського рельєфу

Обґрунтовано можливості використання енергії вітру на Закарпатті за показниками кліматичних умов. Отримані результати дослідження можуть мати значення при плануванні проектів вітроенергетики та прийнятті інвестиційних рішень.

Детальна характеристика вітрових ресурсів території можлива на основі комплексного підходу з використанням гідродинамічного моделювання, із додатковими, короткотерміновими, експедиційними, інструментальними вимірюваннями швидкості та напрямку вітру, бажано на декількох висотах над поверхнею.

#### References [Література]:

1. *Wind Energy Barometer 2018* (2019). EurObserv'ER. URL: <https://www.eurobserv-er.org/wind-energy-barometer-2019/>
2. Dmytrenko L., Barandych S. (2007). Wind power resources in Ukraine. *Scien. works of the Ukrainian Research Hydrometeorological Institute. Scientific Herald*. Iss. 256, 166–173. [In Ukrainian].  
[Дмитренко Л., Барандич С. Вітроенергетичні ресурси в Україні // *Наук. праці Українського науково-дослідного гідрометеорологічного інституту. Науковий вісник*. 2007. Вип. 256. С. 166–173.]
3. Makarovskiy Ye., Zynych V. (2014). Wind energy potential assessment of Ukraine. *Geographia*, 58 (2), 169–178.
4. Pivnyak H., Skrabets F. (2013). *Alternative energy in Ukraine*: monograph. 109 p. [In Ukrainian].  
[Півняк Г., Шкрабець Ф. Альтернативна енергетика в Україні: монографія. 2013. 109 с.]
5. Osadchyi V.I., Skrynyk O.A., Skrynyk O.Ya. (2015). Estimation of a modern stage of wind resources in the Ukrainian Carpathians and their changes regarding the base climatological period. *Reports of the NAS of Ukraine*. Iss. 8, 95–99. [In Ukrainian].  
[Осадчий В. І., Скриник О. А., Скриник О. Я. Оцінка сучасного стану вітрових ресурсів Українських Карпат та їх зміни відносно базового кліматичного періоду // *Доповіди НАНУ*. 2015. Вип. 8. С. 95–99.]
6. Moskalchuk H.M., Prykhodko M.M. (2017). The assessment of wind energy potential within the Carpathian region of Ukraine. *Scientific Bulletin of NFTU of Ukraine*, Iss.27, 1, 125–128. [In Ukrainian].  
[Москальчук Н. М., Приходько М. М. Оцінювання вітроенергетичного потенціалу Карпатського регіону України // *Наук. вісник НЛТУ України*. 2017. Вип.27. №1. С. 125–128.]
7. Volkovaia O.O., Tretyakov O.S., Chervaniov I.G. (2015). Local forest-steppe area wind potential modeling for the wind energy needs with the use of GIS technology. *Ukrainian Geographic Journal*, 4, 10–16. doi: 10.15407/ugz2015.04.010 [In Ukrainian].  
[Волкова О. О., Третьяков О. С., Черваньов І. Г. Моделювання вітрового потенціалу локальної ділянки лісостепу для потреб вітроенергетики з використанням ГІС-технологій // *Укр. геогр. журн.* 2015, №4. С. 10–16. DOI: 10.15407/ugz2015.04.010]
8. *Global Wind Report 2018*. (2019). GWEC (Global Wind Energy Council). URL: <https://gwec.net/wp-content/uploads/2019/04/GWEC-Global-Wind-Report-2018.pdf>
9. *Renewables 2019. Global Status Report*. (2019). REN21 URL: [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr\\_2019\\_full\\_report\\_en.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf)
10. *Wind in power, European statistics 2018*. (2019). EWEA (European Wind Energy Association) URL: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2018.pdf>
11. *WWEA Annual Report 2017*. (2018). WWEA (World Wind Energy Association). URL: <https://wwindea.org/blog/2018/02/12/2017-statistics/>
12. *Ukrainian wind power sector 2016*. (2017). UWEA (Ukrainian Wind Energy Association). URL: <http://www.uwea.com.ua/>

13. *Ukrainian wind power sector 2018*. (2019). UWEA (Ukrainian Wind Energy Association) URL: <http://www.uwea.com.ua/>
14. Rudenko L.H., Lisovskyi S.A., Maruniak Eu.O. (2015). The problem of nature management and sustainable development in the works of the Institute of Geography of the National Academy of Sciences of Ukraine. *Ukrainian geographical journal*, 2, 3 – 9. DOI: 10.15407/ugz2015.02.003 [In Ukrainian].  
[Руденко Л.Г., Лісовський С.А., Маруняк Є.О. Проблематика природокористування та сталого розвитку в працях Інституту географії Національної академії наук України // Укр. геогр. журн. 2015. №2. С. 3 – 9. DOI: 10.15407/ugz2015.02.003]
15. *Information on power and volumes of electricity produced by renewable energy companies who have a «green» tariff (as at 01.01.2019)*. (2019). State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine. URL: [http://sae.gov.ua/sites/default/files/4\\_2018.pdf](http://sae.gov.ua/sites/default/files/4_2018.pdf) [In Ukrainian].  
[Інформація щодо потужності та обсягів виробництва електроенергії об'єктами відновлюваної електроенергетики, яким встановлено «зелений» тариф (станом на 01.01.2019) // Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України, 2019 URL: [http://sae.gov.ua/sites/default/files/4\\_2018.pdf](http://sae.gov.ua/sites/default/files/4_2018.pdf)]
16. *Energy Strategy of Ukraine. Energy strategy of Ukraine for the period till 2030 (approved by the order of the Cabinet of Ministers of Ukraine from 24.07.2013. № 1071.)* URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13> [In Ukrainian].  
[Енергетична стратегія України. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. (схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24.07.2013 р. № 1071). URL: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>]
17. *REmap 2030. Renewable Energy Prospect for Ukraine*. (2015). IRENA. URL: [www.irena.org/remap](http://www.irena.org/remap)
18. Sembery P., Tóth L. (2004). *Traditional and renewable energies*. Budapest. 530 p. [In Hungarian].  
[Sembery P., Tóth L. Hagymányos és megújuló energiák. Budapest, 2004. 530 o.]
19. Kudrya S.O., Yatsenko L.V., Dushyna H.P. et al. (2001). *Atlas of the energy potential of renewable and non-traditional energy sources in Ukraine: Wind energy*. Kyiv. 42 p. [in Ukrainian].  
[Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України: Енергія вітру / С. О. Кудря, Л. В. Яценко, Г. П. Душина та ін. Київ, 2001. 42 с.]
20. *REU (Renewable energy in Ukraine)*. (2011). State Agency for Investment and National Projects of Ukraine. URL: [http://www.investin.if.ua/doc/pub/Ovewview\\_Renewable-energy-in-Ukraine\\_230\\_230\\_www.pdf](http://www.investin.if.ua/doc/pub/Ovewview_Renewable-energy-in-Ukraine_230_230_www.pdf)
21. *Climate of Ukraine*. Ed. V.M.Lipinskyi, V.A.Diachuk, V.M.Babichenko (2003). Kyiv. 343 p. [In Ukrainian].  
[Клімат України / За ред. В.М.Ліпінського, В.Я.Дячука, В.М.Бабіченко. Київ, 2003. 343 с.]
22. Law of Ukraine. On Amendments to Some Laws of Ukraine on Stimulating the Development of Ukraine's Wind Power Industry. June 8, 2000, № 1812-III (2000). *Information of the Verkhovna Rada of Ukraine*, 38, 742–743. [In Ukrainian].  
[Закон України. Про внесення змін до деяких законів України щодо стимулювання розвитку вітроенергетики України: від 8 червня 2000 р., №1812-III / Відомості Верховної Ради України. 2000. № 38. С. 742–743.]
23. *Interactive map of energy efficiency and renewable energy projects of Ukraine*. (2017). UAMAP. URL: <http://www.uamap.org.ua/map>
24. Kurbatova T., Khlyar H. (2015). State and economic prospects of developing potential of non-renewable and renewable energy resources in Ukraine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 217–226.
25. Olejko V.M., Strelbitska N.Ye. (2011). Energy potential nonconventional and renewable energy sources of areas of Ukraine. *Energy Saving – Energy – Energyaudit*, 3 (85), 35 – 42. [In Ukrainian].  
[Олейко В. М., Стрельбіцька Н. Є. Енергетичний потенціал НВДЕ областей України // *Енергосбереження – Енергетика – Енергоаудит*. 2011. №3 (85). С. 35 – 42.]
26. Hadnagy I., Tar K. (2019). Determination of Energy Parameters of Near Surface Wind Field in Transcarpathia. *International Journal of Renewable Energy Research*, 9 (1), 437 – 447.
27. *Energy Efficiency and Energy Saving Program of Transcarpathian Region for 2016-2020*. Transcarpathian Regional State Administration. Decision of the Regional Council 17.03.2016 №189, 19. URL: <http://www.carpathia.gov.ua/ua/490.htm> [In Ukrainian].  
[Програма енергоефективності та енергозбереження (ПЕЕ) Закарпатської області на 2016-2020 рр.). Закарпатська обласна державна адміністрація. Рішення обласної ради 17.03.2016 №189. С. 19. URL: <http://www.carpathia.gov.ua/ua/490.htm>]
28. Mandryk O.M. (2016). Analysis of the use of wind and solar energy potential in the Carpathian region. *Ecological safety and balanced resource use*, 1, 158–166. [In Ukrainian].  
[Мандрик О.М. Аналіз використання потенціалу вітрової і сонячної енергії в Карпатському регіоні. *Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування*. 2016. №1. С. 158–166.]
29. *Climate of the Carpathian region*. CARPATCLIM. URL: <http://www.carpatclim-eu.org/pages/home/>
30. Szentimrey T. (2008). Development of MASH homogenization procedure for daily data. *Proceedings of the Fifth Seminar for Homogenization and Quality Control in Climatological Databases*. Budapest, Hungary. WCDMP-No. 71, WMO/TD-NO, 1493. 123–130.
31. Zentimrey T., Bihari Z. (2007). MISH (Meteorological Interpolation based on Surface Homogenized Data Basis). In:

- Tveito E., Wegehenkel M., Wel F., Dobesch H. (Eds.) *COST Action 719 Final Report, The use of GIS in climatology and meteorology*, 54–56.
32. *Global Wind Atlas*. URL: <https://www.globalwindatlas.info/area/Ukraine/Zakarpats'ka>
33. *USELF – Ukraine's Alternative Energy Financing Program. Renewable Energy Potential Assessment Technical Report for Ukraine: Wind Energy*. URL: [http://www.uself.com.ua/fileadmin/documents/U-Wind\\_Technical\\_Report.pdf](http://www.uself.com.ua/fileadmin/documents/U-Wind_Technical_Report.pdf) [In Ukrainian].  
[Програма фінансування альтернативної енергетики України (USELF) – Технічний звіт з оцінки потенціалу відновлюваної енергетики в Україні: Енергія вітру. URL: [http://www.uself.com.ua/fileadmin/documents/U-Wind\\_Technical\\_Report.pdf](http://www.uself.com.ua/fileadmin/documents/U-Wind_Technical_Report.pdf)]
34. Achkasova O.O., Tretyakov, O.S. (2009). GIS-modeling of wind speeds of central part of Vovchans'k district of Kharkiv region. *Problems of Continuous Geographical Education and Cartography*, Iss. 9, 13–17. [In Ukrainian].  
[Ачкасова О.О., Третьяков О.С. ГІС-моделювання швидкостей вітру центральної частини Вовчанського району Харківської області // *Проблеми безперервної географічної освіти і картографії*. 2009. Вип. 9. С. 13–17.]
35. Csikós N., Szilassi P. (2015). Selection of an area suitable for wind farm development using geoinformatics methods on the example of Csongrád district. *Atmosphere*, 1 (60), 98–103. [In Hungarian].  
[Csikós, N., Szilassi, P. Szélerőmű-park kialakítására alkalmas terület kiválasztása geoinformatikai módszerekkel Csongrád megye példáján. // *Léggör*. 2015. №1 (60). 98–103.]
36. Csósz M., Duhay G., Fiskus O. (2005). *Wind energy and nature protection*. Edited by: O. Fiskus. Budapest. 221p. [In Hungarian].  
[Csósz M., Duhay G., Fiskus O. Szélerenergia és természetvédelem. Budapest. 2005, 221o.]
37. *Nature reserve fund of Transcarpathia*. (2019). Department of Ecology and Natural Resources of the Transcarpathian Regional State Administration. URL: [http://ecozakarp.at.gov.ua/?page\\_id=1655](http://ecozakarp.at.gov.ua/?page_id=1655) [In Ukrainian].  
[Природно-заповідний фонд Закарпаття / Департамент екології та природних ресурсів Закарпатської обласної державної адміністрації, 2019. URL: [http://ecozakarp.at.gov.ua/?page\\_id=1655](http://ecozakarp.at.gov.ua/?page_id=1655)]

Стаття надійшла до редакції 10.01.2020

## Передплачуйте Український географічний журнал на 2020 рік

Передплатний індекс 74513.

**ПЕРЕДПЛАТУ** можна здійснити через:

**Державне підприємство по розповсюдженню періодичних видань «Преса»:**

- за електронною версією Каталогу видань України «Преса поштою»
- за друкованим Каталогом видань України «Преса поштою»:
  - на сайті ДП «Преса» [www.presa.ua](http://www.presa.ua)
  - на сайті ПАТ «Укрпошта» [www.ukrposhta.ua](http://www.ukrposhta.ua)
  - у відділеннях поштового зв'язку
  - в операційних залах поштамтів
  - в пунктах приймання передплати,

а також через **ТОВ "АС-Медіа"**:

тел (044) 500-05-06,

E-mail: [info@smartpress.com.ua](mailto:info@smartpress.com.ua)