

Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ОШУРОК ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ



УДК: 551.553.6; 551.554; 551.556.3

**ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНІ РЕСУРСИ УКРАЇНИ В СУЧАСНИХ КЛІМАТИЧНИХ
УМОВАХ**

11.00.09 – метеорологія, кліматологія, агрометеорологія

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата географічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у відділі фізики атмосфери Українського гідрометеорологічного інституту Державної служби України з надзвичайних ситуацій та Національної академії наук України.

Науковий керівник: кандидат фізико-математичних наук,
старший науковий співробітник
Скриник Олег Ярославович,
Український гідрометеорологічний інститут
ДСНС України та НАН України, старший науковий
співробітник відділу фізики атмосфери

Офіційні опоненти: доктор географічних наук
Шевченко Ольга Григорівна,
Київський національний університет імені Тараса
Шевченка МОН України, географічний факультет,
доцент кафедри метеорології та кліматології

кандидат географічних наук
Семергей-Чумаченко Аліна Борисівна,
Гідрометеорологічний інститут Одеського державного
екологічного університету МОН України, доцент
кафедри метеорології та кліматології

Захист відбудеться 15 квітня 2021 року об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 26.001.22 у Київському національному університеті імені Тараса Шевченка за адресою: 03127, м. Київ, пр. Академіка Глушкова, 2-А, географічний факультет, ауд. 312.

З дисертацією можна ознайомитись у Науковій бібліотеці імені М. Максимовича Київського національного університету імені Тараса Шевченка за адресою: 01033, м. Київ, вул. Володимирська, 58, к. № 12 та на офіційному сайті Науково-консультаційного центру за посиланням: <http://scc.univ.kiev.ua/abstracts/>.

Відгуки надсилати за адресою: 01601, м. Київ, вул. Володимирська 64/13, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, спеціалізована вчена рада К 26.001.22, Погорільчук Н.М.

Автореферат розіслано «9» березня 2021 року.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради К 26.001.22,
кандидат географічних наук



Погорільчук Н.М.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Метеорологічна та кліматологічна інформація про вітер використовується для вирішення багатьох прикладних задач у таких сферах як будівництво, екологія, морське судноплавство, авіація та, насамперед, вітроенергетика. Зокрема, для виробників вітрової електроенергії важливими є кліматологічні дані щодо просторово-часового розподілу характеристик вітру у шарі висотою до ~200 метрів. Втім, вітер характеризується надзвичайно високою мінливістю як у часі, так і в просторі, зумовленою одночасним впливом великої кількості чинників. З огляду на це, просторова щільність метеорологічних та аерологічних станцій на території України, на яких проводять виміри швидкості й напрямку вітру, є недостатньою для детального аналізу наявних вітрових ресурсів. Одним із варіантів проведення коректної просторової деталізації вимірних даних є залучення спеціальних методів моделювання, що враховують не лише характер регіональної циркуляції атмосфери, але й такі чинники як рельєф місцевості, тип підстильної поверхні та термічну стратифікацію атмосфери.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Матеріали досліджень дисертаційної роботи отримані в ході виконання науково-дослідної роботи відділу фізики атмосфери Українського гідрометеорологічного інституту ДСНС та НАН України „Теоретичні та експериментальні дослідження атмосферних процесів різних просторово-часових масштабів (з урахуванням природних та техногенних чинників) з метою вдосконалення моніторингу та прогнозування метеорологічних явищ” (2016–2020 рр.), № держреєстрації 0116U000740.

Мета і завдання дослідження. Метою є проведення кліматологічного оцінювання сучасного стану вітроенергетичних ресурсів на території України. **Об'єкт дослідження** – вітровий режим на території України у період з 1981 по 2010 роки. **Предмет дослідження** – просторово-часовий розподіл швидкості, напрямку та енергетичного потенціалу вітру.

Для реалізації мети дослідження поставлено наступні **завдання**:

- Створити цифрову базу даних строкових вимірювань і спостережень за основними метеорологічними величинами на 207 метеостанціях України за період 1981–2010 рр. та виконати їх обробку.
- Провести аналіз характеристик вітру на метеорологічних станціях моніторингової мережі України у період дослідження.
- Створити архів вертикальних профілів метеорологічних величин, отриманих з даних реаналізу.
- Провести верифікацію діагностичної метеорологічної моделі CALMET за фактичними даними про швидкість і напрям вітру.
- Розрахувати поля швидкості вітру для усієї території України на заданих вертикальних рівнях за весь період дослідження з високою просторовою і часовою роздільною здатністю з використанням моделі CALMET та провести аналіз осереднених у часі полів швидкості та питомої потужності вітру.
- Розробити кліматологічний Атлас сучасного стану вітроенергетичних ресурсів України.

Методи досліджень. Реалізація більшості задач, пов'язаних із формуванням баз даних метеовеличин та обробкою вхідної та вихідної метеорологічної інформації, була здійснена з допомогою власних програмних кодів, написаних на мовах програмування Fortran та VBA (Visual Basic for Applications), що дозволило автоматизувати розрахунки. Інструментом для заповнення тривалих пропусків у рядах даних та побудови представлених у роботі карт в автоматизованому режимі слугував модуль Surfer Scripter, який працює через запуск скриптів на базі прикладного програмного забезпечення Surfer 10. Налаштування процесу розрахунків з використанням метеорологічного препроцесора CALMET здійснено у передбачених для цього ініціалізаційних файлах, які є необхідними для активації та запуску програмного коду, реалізованого на мові Fortran. Більшість розрахунків проведено на віддаленому комп'ютері/кластері, що входить у розрахунковий модуль УкрГМІ. Аналіз швидкості та напрямку вітру на вибраних метеорологічних станціях, порівняння часових рядів та оцінка точності моделювань у ході верифікації розрахункової моделі виконано з допомогою статистичних методів. Використовуючи скрипти на мові програмування Python, результати статистичного аналізу візуально представлені у вигляді графіків часових рядів, гістограм частотного розподілу та роз вітрів.

Наукова новизна отриманих результатів.

Вперше:

- Створено цифровий архів строкових вимірів 12-ти метеорологічних показників на 207 метеорологічних станціях України за період 1981–2010 рр., що може бути безпосередньо залучений для проведення різного роду моделювань та кліматологічних досліджень;
- На основі створеного архіву сформовано базу даних приведених до умов відкритої місцевості строкових вимірів швидкості вітру;
- Проведено кліматологічне оцінювання вітроенергетичних ресурсів України на різних вертикальних рівнях з високою просторовою роздільною здатністю (2.5 км) на основі використання емпіричної бази даних строкових вимірів на 207 метеорологічних станціях у поєднанні із застосуванням сучасної добре апробованої метеорологічної діагностичної моделі CALMET.

Удосконалено:

- Атлас вітроенергетичних ресурсів України;
- Алгоритм відтворення вертикальних профілів метеовеличин на основі даних реаналізу;
- Методику заповнення пропусків у рядах строкових даних.

Дістали подальший розвиток:

- Методологія верифікації мезомасштабних метеорологічних моделей на основі реальних вимірів;
- Методи розрахунку параметру шорсткості підстильної поверхні;
- Кліматологічна інформація (знання) щодо просторово-часового розподілу характеристик вітру на території України у період сучасного клімату;
- Прикладна інформація про наявні запаси вітрової енергії на різних висотах.

Практичне значення одержаних результатів. Сформовані архіви даних є важливим джерелом метеорологічної інформації на приземному рівні та у вищих

шарах атмосфери (в межах її граничного шару), і можуть бути використані для вирішення багатьох прикладних задач у метеорології та кліматології, як наприклад, для моделювання процесів атмосферного переносу та дисперсії забруднювальних домішок чи дослідження екстремальності сучасного клімату України. Проведений у дисертаційній роботі аналіз дозволив систематизувати знання щодо сучасного вітрового режиму на території України. Розроблений Атлас вітроенергетичних ресурсів має практичну цінність для потенційних виробників вітрової електроенергії як у промислових обсягах, так і у приватних господарствах.

Особистий внесок здобувача. Постановка мети, завдань дисертаційної роботи, методологія їх реалізації, структура подачі у тексті дисертації матеріалів та результатів дослідження та ідеї щодо покращення ефективності виконання поставлених задач були обговорені спільно із науковим керівником. Особисто автором здійснено аналіз літературних джерел за темою дисертації та результатів, отриманих у ході дослідження. Практична частина виконаної автором роботи, полягала у наступному: обробці вхідної метеорологічної інформації; формуванні баз даних метеовеличин; підготовці вхідних файлів для проведення комп'ютерних моделювань; написанні програм для автоматизації розрахунків; візуалізації одержаних результатів та створенні Атласу вітрових ресурсів.

Використані у дослідженні ідеї відображені в наукових публікаціях, у яких тією чи іншою мірою присутній особистий внесок автора, зазначений у переліку праць.

Апробація результатів. Зміст та результати досліджень, проведених у рамках дисертаційної роботи, представлені на: XIV міжнародній науковій міждисциплінарній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Шевченківська весна – 2016» (Київ, 2016); Міжнародній науковій конференції молодих вчених «Сучасний стан та якість навколишнього середовища окремих регіонів» (Одеса, 2016); Всеукраїнській конференції молодих учених «Метеорологія, гідрологія, моніторинг довкілля в контексті екологічних викликів сьогодення» (Київ, 2016); XIII міжнародній науковій міждисциплінарній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Молоді науковці – географічній науці» (Київ, 2017); The 15th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI) (Каунас, 2018); II міжнародній науковій конференції «Рельєф і клімат» (Чернівці, 2018); II міжнародній науково-практичній конференції «Вплив кліматичних змін на просторовий розвиток територій Землі: наслідки та шляхи вирішення» (Херсон, 2019); Міжнародній науково-практичній конференції «Рельєф, клімат та поверхневі води як об'єкти природничо-географічних досліджень» (Київ, 2019).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 13 наукових праць: 3 статті у фахових періодичних виданнях України, 1 стаття у міжнародному науковому журналі (індексованому у міжнародних наукометричних базах Scopus і Web of Science), 8 публікацій у збірниках тез наукових конференцій та 1 стаття, у якій додатково відображені отримані результати.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел (217 найменувань) та додатків. Загальний обсяг роботи становить 203 сторінки, у тому числі 73 рисунки, 7 таблиць та 4 додатки (30 сторінок). Основний текст містить 134 сторінки (5.5 д. а.).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **першому розділі** «Сучасний стан вивчення проблеми щодо кліматологічного оцінювання вітрового режиму та вітроенергетичних ресурсів» розглянуто основні напрями кліматологічних досліджень характеристик вітру як у сучасний період, так і в історичному розрізі. Також приділено увагу інструментальній базі та теоретико-методологічним аспектам визначення швидкості й напрямку вітрових потоків у метеорології, прикладному аспекту застосування інформації про вітер у вітроенергетиці, а також оцінці довгострокових (кліматичних) змін швидкості вітру у різних регіонах земної кулі.

З огляду на наукові праці ранніх періодів (починаючи з 60-х років ХХ ст.), актуальними питаннями досліджень були: оцінка вітрового режиму окремих територій, порівняння вимірів швидкості й напрямку вітру приладами з різним інтервалом осереднення, дослідження вертикальних профілів швидкості вітру, оцінка впливу лісосмуг на структуру повітряного потоку та інтенсивність турбулентного обміну в атмосфері, а також дослідження різних типів місцевої циркуляції. Результати кліматологічних досліджень вітру та оцінювання його енергетичного потенціалу для території України були опубліковані у працях науковців Українського гідрометеорологічного інституту, Одеського державного екологічного університету, Київського національного університету імені Тараса Шевченка та інших науково-дослідних та освітніх установ. Варто зазначити, що поширеною практикою при проведенні даного роду досліджень було і залишається використання двопараметричного розподілу Вейбула як апроксимаційної функції частотного розподілу швидкості вітру. З метою більш об'єктивного просторового аналізу, у багатьох роботах виміри швидкості вітру було приведено до умов відкритої місцевості на основі інформації про шорсткість підстильної поверхні, яку визначають різними способами: базуючись на вимірах швидкості вітру у вертикальному профілі, на основі аналізу дисперсії турбулентних флуктуацій швидкості, з даних про положення і лінійні розміри оточуючих об'єктів або використовуючи табличні значення.

Масова заміна флюгерів на анемометри та анеморумбометри, а також зміна кількості строків вимірювань на метеостанціях стали предметом досліджень у контексті впливу вище перерахованих факторів на однорідність часових рядів даних вимірювань. Зокрема, виявлено систематичне завищення флюгером показів швидкості вітру при швидкостях понад 7 м/с, що пов'язують із нелінійністю шкали флюгера. Як було показано у ряді робіт, зміна частоти спостережень впливає на однорідність часових рядів лише у районах з чітко вираженою місцевою циркуляцією (характерним добовим ходом).

Для потреб вітроенергетики актуальною є інформація про вітер у нижньому 200-метровому шарі атмосфері, де за багатьма оцінками відбувається найшвидше зростання швидкості вітру та, відповідно, його енергетичного потенціалу. Безпосередньо отримати її можна завдяки вимірюванням у вертикальному профілі на встановлених моніторингових вежах або з допомогою наземних приладів дистанційного зондування (содари, лідари). У разі відсутності необхідної інструментальної бази, приземну швидкість екстраполюють на задані висоти з

допомогою, наприклад, степеневі чи логарифмічної функцій. Результати опублікованих досліджень вказують на залежність темпів зростання швидкості вітру з висотою не лише від шорсткості підстильної поверхні, але й термічної стратифікації граничного шару атмосфери (ГША). Остання особливість врахована у модифікованому варіанті логарифмічного профілю.

Відтворення просторового поля вітру у точках із заданим регулярним кроком здійснюють використовуючи методи інтерполяції або з допомогою спеціальних моделей. Згідно опублікованих робіт, їх можна умовно розділити на 4 типи: моделі, що базуються на рівнянні збереження маси (WindMap, CALMET); лінійні моделі вітрового потоку, побудовані на теорії Джексона і Ханта (WAsP, MsMicro); моделі обчислювальної гідродинаміки (Meteadyn, WindSim); чисельні прогностичні моделі (WRF, MM5). Найбільшою точністю характеризується останній тип моделей, у яких система рівнянь руху атмосферного повітря розв'язується у найбільш повній формі. Вхідною інформацією для цих моделей часто слугують дані глобальних циркуляційних моделей (GFS, ECHAM5) або дані реаналізу (наприклад, NCEP-NCAR, ERA-Interim, MERRA), що є, по-суті, результатом моделювання із застосуванням техніки асиміляції даних вимірювань. Варто зазначити, що у зв'язку з потребою значних обчислювальних ресурсів, чисельні гідродинамічні моделі, як правило, використовують при моделюванні з грубою просторовою роздільною здатністю, яка не дозволяє вловити дрібномасштабні особливості підстильної поверхні. Дану проблему вирішують шляхом додаткового моделювання (динамічного чи статистичного) на дрібнішій розрахунковій сітці із залученням отриманих даних у якості початкових/граничних умов (downscaling).

Опубліковані результати досліджень довгострокової динаміки швидкості вітру показують низхідні тренди у більшості регіонах земної кулі із середнім темпом зменшення на ~ -0.14 м/с за декаду (stilling effect). У цілому зменшення середньої приземної швидкості зафіксовано у тропічних та помірних широтах обох півкуль, а збільшення над полярними регіонами ($>70^\circ$ широти), над океанами та деякими прибережними районами. Згідно проведених досліджень виявлено, що найбільше зменшення припадає на діапазон помірних та сильних вітрів. У низці робіт зниження середньої швидкості вітру пов'язують не лише з циркуляційним чинником, але й такими факторами як збільшення шорсткості підстильної поверхні та наявність систематичної похибки внаслідок некоректної роботи приладів.

На сьогоднішній день з допомогою деяких із вище перерахованих моделей проведено оцінювання вітроенергетичного потенціалу у багатьох країнах світу, створено відповідні веб-ресурси, в тому числі і з глобальним покриттям (наприклад, Global Wind Atlas). Втім, незважаючи на це, проведення подібних досліджень для території України із залученням усієї повноти даних метеорологічних спостережень за сучасний кліматичний період залишається актуальним питанням.

У **другому розділі** «Вітер на території України в період сучасного клімату: основні чинники вітрового режиму, характеристики та кліматологія» проаналізовано взаємозв'язок приземного вітру із полями атмосферного тиску та представлено основні статистичні характеристики вітрового режиму на території України.

На початковому етапі дослідження узято багаторічні дані атмосферного тиску на 179 метеорологічних станціях України за сучасний кліматичний період 1981–2010

рр. та отримано осереднене у часі поле цієї величини (рис. 1а). Розглянуто також просторовий розподіл середнього приземного поля вітру на основі даних 85 станцій (рис. 1б), на яких закритість горизонту не перевищує 10° на кожному з румбів.

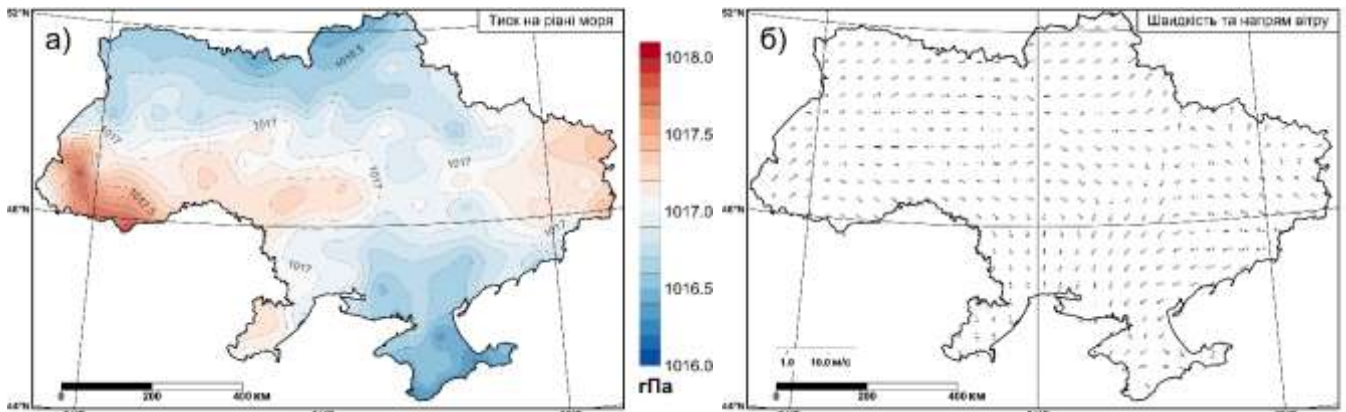


Рис. 1 Просторовий розподіл: а) середнього багаторічного тиску на рівні моря, б) середнього результуючого вектору приземного вітру (висота ~ 10 м) за 1981–2010 рр.

Загалом, середній багаторічний тиск на рівні моря коливається у межах 1016–1018 гПа, а його осереднене поле має форму сідловини. З огляду на представлену у раніше опублікованих дослідженнях інформацію, підвищені значення атмосферного тиску у південно-західній та центральній частині країни зумовлені активним впливом Азорського субтропічного максимуму, а у східних областях – відрогу Сибірського антициклону у холодний період року. Більш низький тиск на півдні пов'язаний із зоною низького тиску над Чорним морем у зимовий період, а на півночі та північному заході – з більш частим проходженням циклонів. Даний розподіл добре узгоджується з осередненим полем вітру. У західній та північній частинах України переважає вітер із західною складовою, на сході – східних румбів, а у південній частині – північних.

Детальний аналіз вітрового режиму на основі частотного розподілу швидкості вітру, роз вітрів (у тому числі сезонних), графіків річного ходу швидкості вітру та її середнього квадратичного відхилення (σ) та графіків добового ходу цих показників у січні, квітні, липні та жовтні проведено за даними 12-ти метеорологічних станцій у різних фізико-географічних районах: зона мішаних лісів (Сарни, Чернігів), лісостеп (Вінниця, Суми), степ (Миколаїв, Донецьк, Мисове), Карпати (Ужгород, Плай, Міжгір'я), Кримські гори (Ай-Петрі, Нікітський Сад). Станції відібрані за критерієм мінімальної закритості горизонту по відношенню до вимірювального приладу.

Переважаючі напрями вітру у цілому співпадають із напрямом середнього результуючого вектору. Причому вітер швидкістю >6 м/с припадає на найбільш часті напрями, за винятком станції Ужгород. Рози вітрів у гірських долинах чи котловинах мають чітко виражений орографічний характер. Певною мірою це стосується і територій, що знаходяться поза межами гір, але потрапляють у зону їх впливу (наприклад, Закарпатська низовина). На Південному березі Криму переважаючий напрям визначається рельєфом місцевості та направленістю бризу одночасно.

З огляду на розподіл основних статистичних характеристик на вибраних станціях, є підстави стверджувати, що найбільша середня річна швидкість приземного вітру за період 1981–2010 рр., у межах близько 5–5.5 м/с, характерна для вершин Карпат та Кримських гір, а також для підвищених прибережних ділянок Чорного і Азовського морів. Для високогірних районів також характерна висока

мінливість швидкості вітру та його поривчастість. Досить низькі середні швидкості спостерігаються у західній частині Полісся, Закарпатській низовині та Південному березі Криму (2–2.5 м/с), а найменші – у щільно закритих гірськими пасмами річкових долинах (1 м/с і менше).

Максимуми річного ходу швидкості вітру та її середнього квадратичного відхилення здебільшого припадають на січень або лютий, а мінімуми – на серпень. Розмах річних змін величини σ , за винятком станцій гірського Криму, є меншим за розмах річних коливань середньої швидкості у рамках місячного інтервалу осереднення. На високогірних станціях (Плай, Ай-Петрі) переважаючий напрям вітру зберігається протягом усіх сезонів року із деяким зменшенням його частки у весняно-літній період. Схожий розподіл характерний і для районів з мезомасштабною циркуляцією (Міжгір'я, Нікітський Сад), де значну роль відіграє орографічний чинник. Рози вітрів на рівнинній території більшою мірою відображають сезонні зміни циркуляційних процесів. Зокрема, навесні добре помітно збільшення частки вітрів східних румбів, а на півдні частим є південний напрям. У літній період на більшій частині рівнини виділяються в основному північно-західні вітри, на півдні – північні, а на сході – північно-східні. Осінні та зимові рози вітрів є наближеними до середніх річних.

Добовий хід швидкості вітру найбільш виражений у весняно-літній період, а найменше – взимку. На станціях, розташованих на незначній висоті над рівнем моря, максимум швидкості припадає на денні години, а мінімум – на нічні або вранішні. Гірські вершини характеризуються практично зворотним добовим ходом, що пов'язано з особливостями вертикального турбулентного обміну в ГША. У районах з бризовою та гірсько-долинною циркуляцією характер добових коливань значно змінюється упродовж року.

У **третьому розділі** «Метеорологічна модель CALMET для розрахунку поля вітру та вхідна інформація» приведено детальний опис основного інструменту для розрахунку вітрових ресурсів – діагностичної (не гідродинамічної) мезомасштабної метеорологічної моделі CALMET, що є частиною (метеорологічним препроцесором) дифузійної моделі CALPUFF. Викладено методику формування баз даних вхідної метеорологічної інформації.

Використана модель дозволяє розраховувати характеристики вітру на різних висотах у вузлах регулярної сітки з високою просторовою та часовою (1-годинною) роздільною здатністю. Розрахунок поля вітру в CALMET на кожному часовому кроці здійснюється у 3 етапи: 1) задання початкового 3-D поля вітру шляхом вертикальної екстраполяції швидкості й напрямку вітру, заданих на наземних станціях, та горизонтальної інтерполяції даних вимірювань на кожному вертикальному рівні методом обернених зважених відстаней; 2) підгонка початкового поля відповідно до ефектів, зумовлених особливостями рельєфу області моделювання (здійснюється через параметризацію кінематичного ефекту, ефекту нахиленого потоку, термодинамічного блокуючого ефекту та схеми мінімізації тривимірної дивергенції); 3) включення даних спостережень у кожній інтерполяційній точці шляхом проведення процедури об'єктивного аналізу. Слід зазначити, що модель може також використовувати результати розрахунків прогностичних моделей, наприклад WRF, на різних етапах моделювання (наприклад, для задання початкового поля).

Вхідна метеорологічна інформація для CALMET складається із трьох основних частин: геофізичні дані, виміри наземних метеорологічних станцій (приземний рівень) та дані вертикальних зондувань. Їх підготовка проводиться із залученням ряду препроцесорів, які запрограмовані під роботу з файлами спеціалізованих форматів. Геофізична інформація складається із даних про висоту земної поверхні (цифрова модель рельєфу) та даних щодо рослинного покриву і типів землекористування. У дисертаційному дослідженні, для розрахунків використано набори цих даних з роздільною здатністю ~ 1 км, які отримано із вільно доступних інтернет-ресурсів.

Масиви метеорологічної інформації з наземних станцій мають містити дані про температуру повітря, точку роси, відносну вологість повітря, тиск на рівні моря та станції, хмарність (загальна кількість в балах, висота нижньої межі), шифри погоди, швидкість і напрям вітру та опади з часовим інтервалом 1 година (усього 12 параметрів). Джерелом даних слугували оцифровані таблиці ТМС зі строковими даними 207 станцій України, що функціонували у період з 1981 по 2010 роки включно. Процес підготовки даних наземних вимірювань пройшов через наступні кроки: контроль якості даних; заповнення пропусків та виправлення помилкових значень; часову інтерполяцію та приведення до необхідного формату.

Перший крок реалізовано через перевірку значень на критичні межі та співставлення (фізичну узгодженість) взаємопов'язаних параметрів (наприклад, швидкості й напрямку вітру, кількості та висоти хмарності). Паралельно виконано роботу з аналізу статистики пропущених значень. Було виявлено, що кількість пропусків та помилкових значень становить менше 1% від загальної кількості строкових значень протягом всього періоду досліджень (~ 16.76 млн) для усіх показників, окрім тиску на рівні моря (2.37%) (рис. 2), який на станціях Пожижевська, Плай та Ай-Петрі не розраховано. Порівняно високою (0.98%) є також кількість відсутніх даних щодо напрямку вітру. Основна причина пропусків у рядах даних – перерви у роботі станцій (0.61% від загальної кількості пропусків).

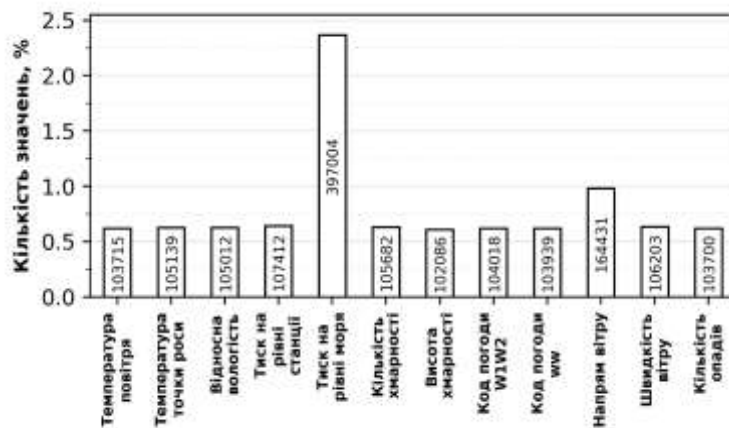


Рис. 2 Сумарна кількість пропущених та помилкових строкових значень на 207 станціях мережі Гідрометслужби України за 1981–2010 рр.

Процедуру виправлення хибних значень та заповнення пропусків проведено для кожного року окремо. Варто зазначити, що в окремі роки дані деяких станцій були відсіянні (станції не використовувались у розрахунках), якщо кількість пропусків перевищувала 20% (2.5 місяці). Дані температури повітря, відносної вологості, тиску на рівні моря та складових вітру відновлені з допомогою інтерполяції даних на

сусідніх станціях методом обернених зважених відстаней. Температура точки роси та тиск на рівні станції розраховані на основі інтерпольованих значень інших параметрів за стандартними формулами. Решту характеристик (хмарність, опади тощо) узято із найближчих за умовами розташування станцій. Інформація щодо результатів обробки вхідних даних наземних станцій графічно зображена на рис. 3.

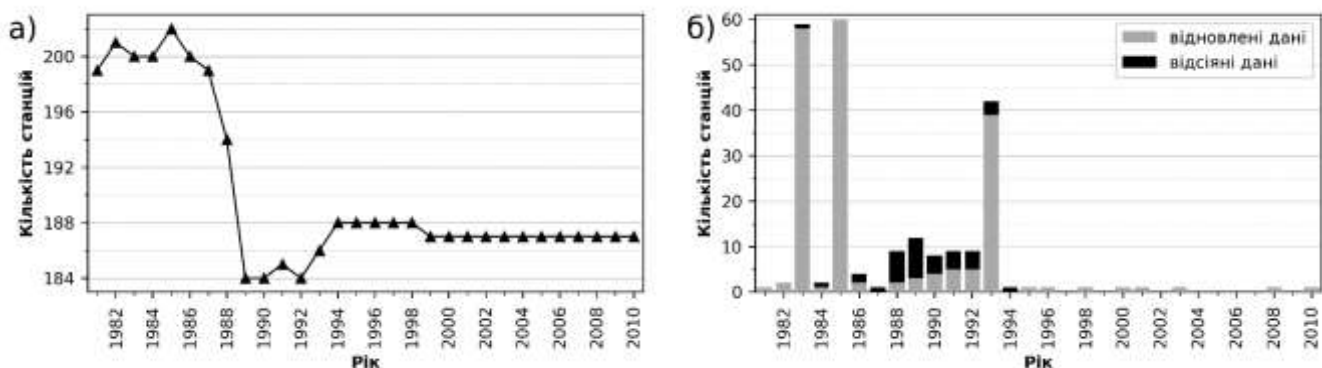


Рис. 3 а) Кількість метеостанцій із вхідною інформацією для CALMET; б) Результат обробки строкових метеоданих за період 1981–2010 рр.

Вихідний результат двох перших етапів обробки – цифрова база даних строкових вимірів на метеостанціях. Третій етап – безпосередня підготовка масивів метеоінформації до зчитування моделлю CALMET. Цей крок реалізований з допомогою програми, написаної на мові програмування Fortran.

Дані вертикальних зондувань, незважаючи на те, що вони є пріоритетним джерелом вхідної інформації для CALMET на висотах, на жаль не могли бути задіяними у розрахунках через дуже низьку якість даних (тривалі пропуски та недостатня частота зондувань, що має бути не більше 12 годин) та слабе просторове покриття аерологічних станцій (1 станція на площу $\sim 250 \times 250$ км²). Як альтернативний варіант, використано дані реаналізу ERA-Interim з горизонтальним кроком $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ на 17-ти вертикальних рівнях від земної поверхні до ізобаричної поверхні 500 гПа з часовою дискретністю 4 рази за добу. У процесі обробки дані на ізобаричних рівнях нижче висоти рельєфу були відфільтровані використовуючи спрощену барометричну формулу Лапласа. На основі оброблених даних створено архів вертикальних профілів температури повітря, точки роси та параметрів вітру за період 1981–2010 рр.

У **четвертому розділі** «Верифікація метеорологічної моделі CALMET» представлено процедуру оцінки точності обраної моделі при розрахунку полів вітру у різних за своїми фізико-географічними та ландшафтними особливостями просторових доменах моделювання. Слід зазначити, що важливою умовою вибору областей була наявність принаймні однієї аерологічної станції для верифікації результатів на різних висотах.

З метою верифікації моделі вибрано 4 області – Київську (рівнинний рельєф, значна лісистість), Дніпропетровську (рівнина, переважає степова рослинність), Закарпатську (переважно гори вкриті лісами) та АР Крим (переважає степовий ландшафт, але є гірські масиви та вплив Чорного і Азовського морів) (рис. 4). Усього задіяно дані 73 наземних метеорологічних станцій, 4-х станцій радіозондування та дані реаналізу ERA-Interim (вхідна інформація на висотах).

Приведені параметри відповідають за врахування (значення 1)/не врахування (значення 0) ефектів, зумовлених впливом рельєфу (IKINE, ISLOPE, IFRADJ і IOBR), задають тип вертикальної екстраполяції швидкості вітру (IEXTRP, 4 або -4 означає використання логарифмічного профілю вітру, модифікованого функцією термодинамічної стійкості), задають радіус впливу даних спостережень при проведенні процедури об'єктивного аналізу (R1, R2, RMAX1, RMAX2), а також можуть змінювати вагові коефіцієнти в інтерполяційній формулі (збільшувати/зменшувати вплив даних вертикальних зондувань або ж вимірів наземних метеостанцій на різних рівнях) (параметр BIAS). У табл. 1 не включені параметри IKINE та TERRAD (задає радіус впливу особливостей рельєфу), оскільки їх значення незмінні у всіх розрахункових тестах (IKINE=0, TERRAD=10 км).

Кількісні характеристики точності розрахованих компонент вітру (зональної (u) та меридіональної (v)) та модуля швидкості оцінені з допомогою наступних статистичних метрик та індексів: систематична помилка, середня абсолютна помилка, середня квадратична помилка, коефіцієнт кореляції Пірсона, фактор 2-х, фактор 5-ти та індекс узгодженості. Останні три показники широко використовуються в прикладній метеорології для оцінювання результатів моделювань. Наприклад, фактор 2-х та 5-ти вказують на відсоток змодельованих значень, що потрапляють у задані межі, а індекс узгодженості показує наскільки добре дисперсія розрахованих швидкостей узгоджується із дисперсією фактичних значень.

На рівні 10 м найбільш близькими до реальних значень на станціях Київ і Алушта виявились результати моделювань з використанням лише даних наземних станцій (розрахункові тести 5 та 6). Залучення у розрахунок обох груп даних з однаковою вагою є більш обґрунтованим у Кривому Розі (тест 2) та Плаї (тест 1), хоча на останній станції доцільним також є використання лише даних реаналізу (тест 8). Загалом, модель демонструє кращу точність у районах з відносно рівним рельєфом (Київ, Кривий Ріг) (рис. 5). У гірській місцевості точніші результати отримані в Алушті, незважаючи на низькі коефіцієнти кореляції (у межах 0.43-0.45). У Плаї, де простежуються проблеми із відтворенням екстремальної швидкості вітру, систематичне заниження модуля швидкості на майже 4 м/с.

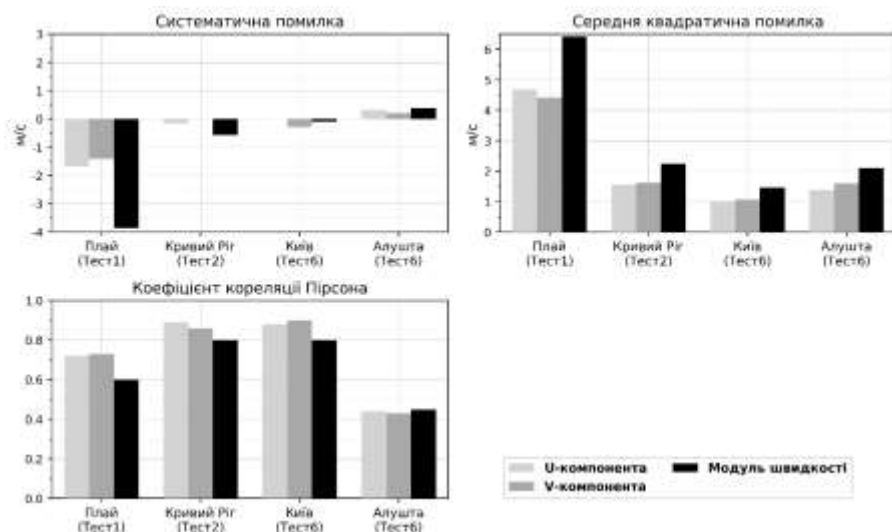


Рис. 5 Систематична помилка, середня квадратична помилка та коефіцієнт кореляції Пірсона компонент (u, v) та модуля швидкості вітру на висоті 10 м

У вертикальному профілі чіткі відмінності між точністю розрахункових тестів прослідковуються лише на нижніх рівнях. Спостерігається стійка тенденція до збільшення точності змодельованих швидкостей вітру із висотою. Вертикальні профілі швидкості найкраще відтворені у Києві, а найгірше – у Кривому Розі (рис. 6), що ймовірно зумовлено значною розбіжністю даних реаналізу та даних радіозондування, які слугували матеріалом для верифікації.

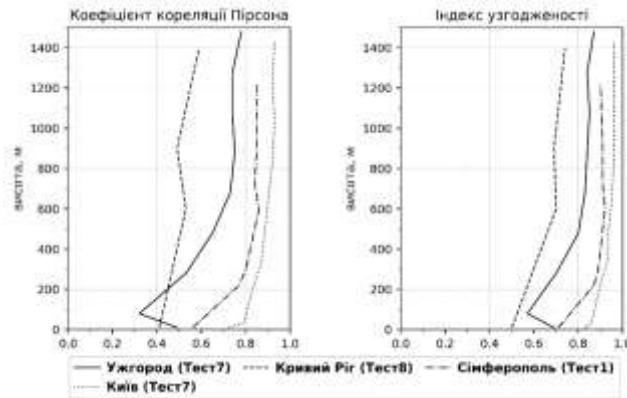


Рис. 6 Вертикальні профілі коефіцієнту кореляції Пірсона та індексу узгодженості реальних і змодельованих даних модуля швидкості вітру

У п'ятому розділі «Розрахунок сучасного стану вітроенергетичних ресурсів України на основі використання метеорологічної діагностичної моделі CALMET» представлено методику та результати приведення вимірів швидкості вітру до умов відкритої місцевості, розрахунку вітроенергетичних ресурсів та аналіз отриманих результатів.

У зв'язку з тим, що роздільна здатність вхідних даних про тип рослинності й землекористування є досить грубою для коректного врахування в моделі параметру шорсткості (z_0) на метеостанціях, вплив шорсткості підстильної поверхні був усунутий шляхом приведення строкових вимірів швидкості до умов відкритого горизонту ($z_0 = 0.1$ м). Для цього було встановлено значущий статистичний зв'язок між середньою багаторічною швидкістю вітру та середнім кутом закритості горизонту (β) на станціях (коефіцієнт кореляції Пірсона $r = -0.58$). Слід зазначити, що β є єдиною кількісною характеристикою, доступною у метеорологічних довідниках, яка може бути використана для оцінки z_0 . Наступним кроком було визначення статистичної залежності між величинами β та z_0 за інформацією на 10-ти метеостанціях. Параметр шорсткості визначено на основі інформації про середню висоту перешкод навколо метеомайданчиків. Величину z_0 на решті станцій розраховано з допомогою наступної апроксимаційної функції, що описує залежність між обома параметрами:

$$z_0 = z_{0\max} \left(1 - \exp\left(\frac{-\beta^2}{a^2}\right) \right) \quad (1)$$

де $z_{0\max} = 2$ м, a – підгоночний параметр, рівний 11.84 (в град.). Коефіцієнт детермінації апроксимованих значень $R^2 = 0.955$.

Коригування вимірів швидкості вітру відповідно до однорідних умов шорсткості та одного вертикального рівня (10 м) проведено за формулою:

$$U_r = U_s \frac{\ln(60/z_{0(d)}) \ln(10/z_{0(r)})}{\ln(z_s/z_{0(d)}) \ln(60/z_{0(r)})} \quad (2)$$

де U_s – швидкість, виміряна на висоті z_s , $z_{0(d)}$ – висота шорсткості, яка характеризує окремий румб (сектор), а $z_{0(r)}$ – значення, що відповідає умовам відкритої місцевості.

За результатами розрахунків сформовано окрему базу даних та побудовано просторовий розподіл середньої величини перерахованих швидкостей вітру (рис. 7б). Отриманий розподіл характеризується менш різкими просторовими змінами та більшою на ~ 0.35 м/с швидкістю порівняно з даними вимірювань (рис. 7а).

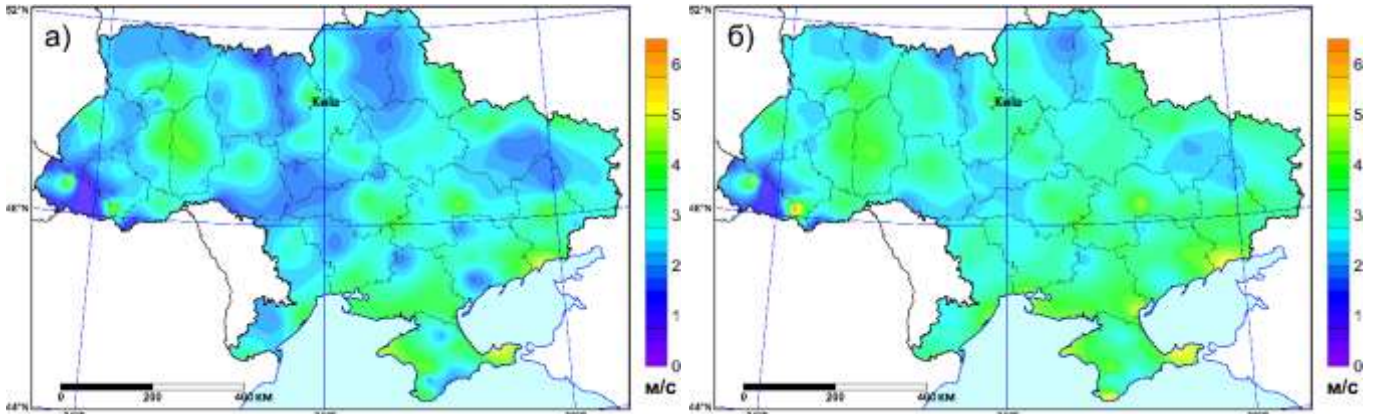


Рис. 7 Середня за 1981–2010 рр. швидкість вітру на 184 метеорологічних станціях: а) за даними вимірювань, б) приведена до умов відкритого горизонту

Розрахунок запасів вітрової енергії проведено на шести вертикальних рівнях – 10, 40, 80, 120, 160 та 200 м з просторовим кроком 2.5 км у 25 прямокутних областях (відповідно до адміністративних областей України), що були об'єднані у єдину область на кожному часовому кроці з допомогою процедури гармонізації розрахованих значень за формулою:

$$U_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N U_{ij}^k \quad (3)$$

де U_{ij} – гармонізоване значення швидкості вітру у точці ij , U_{ij}^k – швидкість у цій же точці в k -ій області, а N – кількість перекриттів.

Середній за часом вітроенергетичний потенціал розраховано наступним чином:

$$\bar{P} = \frac{1}{2N_T} \rho \sum_{i=1}^{N_T} U_i^3 \quad ([P] = \text{Вт/м}^2) \quad (4)$$

де U – модуль швидкості вітру, ρ – густина повітря (задано рівним 1.225 кг/м^3), N_T – кількість вимірів на часовому проміжку $[0 T]$. \bar{P} показує середню величину кінетичної енергії атмосферного повітря, що проходить через перпендикулярний до земної поверхні переріз одиничної площі за одиницю часу.

Середня питома потужність вітру на висоті анемометра (10 м) на більшості території змінюється у межах $30\text{--}60 \text{ Вт/м}^2$. У передгір'ї та долинах Карпат, на Південному березі Криму та більшій частині Полісся, де запаси вітрової енергії $<30 \text{ Вт/м}^2$, доцільно встановлювати автономні установки для приватних господарських потреб. Перспективні місця для встановлення ВЕУ великої потужності є на Керченському і Тарханкутському п-овах, прибережних ділянках поблизу Азовського

моря у Запорізькій та Донецькій областях, локальних підвищеннях Донецького кряжу, Приазовської, Подільської та Волинської височин, високогірній частині Карпат та Криму. У цих районах величина \bar{P} на висоті 80 м оцінена вищою 200 Вт/м^2 . Розподіл вітроенергетичних ресурсів на шести висотах представлено на рис. 8.

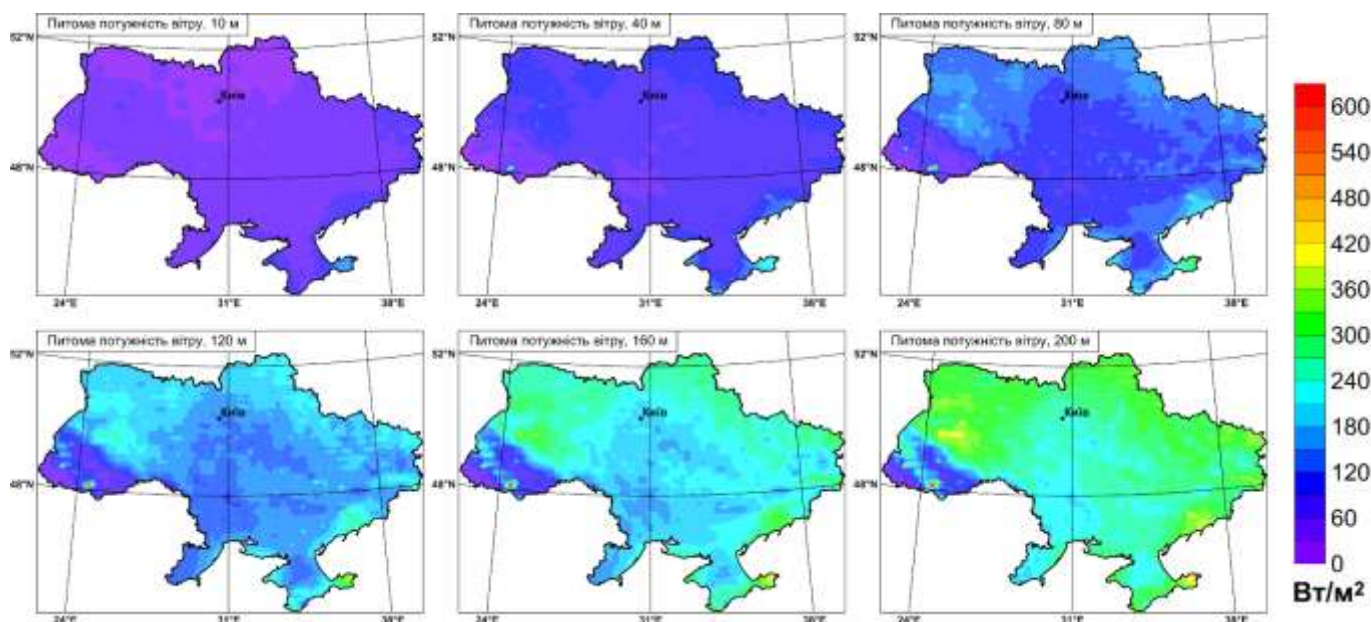


Рис. 8 Вітроенергетичний потенціал на висотах 10, 40, 80, 120, 160 та 200 м, осереднений за період 1981–2010 рр.

Виявлено, що частота робочих швидкостей більшості ВЕУ (3–25 м/с) на високогірних ділянках (70-75%) є дещо нижчою порівняно з рівнинними районами (80-85%), що зменшує ефективність їх роботи.

Амплітуда сезонних коливань вітроенергетичного потенціалу залежить не лише від висоти над земною поверхнею, але й визначається також орографічним чинником (зумовлює її збільшення і має найбільший прояв на гірських вершинах) та близькістю до моря, що сприяє її зменшенню.

Слід зауважити, що отримані карти відображають вітровий режим за умов відкритої місцевості, а отже з метою уточнення даної інформації (отримання фактичних значень) необхідно вводити поправку на шорсткість підстильної поверхні.

Отримані результати графічно представлені у Атласі вітроенергетичних ресурсів України, який містить карти осереднених за сучасний кліматологічний період (1981–2010 рр.) полів швидкості вітру та вітроенергетичного потенціалу на шести заданих висотах, а також кліматологічну інформацію на метеостанціях: частотний розподіл швидкості вітру, рози вітрів, річний хід швидкості та її середнього квадратичного відхилення та добовий хід швидкості у січні, квітні, липні та жовтні.

ВИСНОВКИ

1. Здійснено формування цифрової бази даних строкових вимірів та спостережень за 12-ти метеорологічними показниками (в тому числі і швидкості та напрямку вітру) на 207 станціях України за період 1981–2010 рр. та проведено подальшу її обробку. Розроблено та використано методику контролю їх якості та заповнення пропущених значень.

2. На основі статистичного аналізу строкових вимірів вітру на метеорологічних станціях України за період 1981–2010 рр. встановлено основні просторово-часові закономірності його розподілу в умовах сучасного клімату на території нашої країни.
3. Для періоду дослідження (1981–2010 рр.) створено цифровий архів вертикальних профілів характеристик вітру, температури повітря і точки роси на основі даних реаналізу ERA-Interim з просторово-часовою роздільною здатністю $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ та часовою дискретністю 4 рази на добу.
4. Проведено оцінювання точності відтворення поля приземного вітру та його вертикальних профілів на основі використання діагностичної метеорологічної моделі CALMET. Результати верифікації свідчать, що CALMET є ефективною при відтворенні поля вітру у рівнинних районах. Проте в умовах складного рельєфу та місцевої циркуляції, на точність моделювання різко впливає просторова щільність мережі метеорологічних станцій. На основі тестових верифікаційних моделювань отримано значення контролюючих параметрів моделі, які дають найменшу помилку розрахунків.
5. Здійснено оцінювання параметру шорсткості для всіх станцій моніторингової мережі України, необхідного для коректного розрахунку просторового розподілу вітру. Запропоновано апроксимаційну формулу, яка може бути використана для визначення параметру шорсткості за даними про закритість горизонту на станціях, які є вільно доступними у кліматологічних довідниках. Усі строкові дані швидкості вітру приведено до умов відкритої місцевості та сформовано, на основі отриманих результатів, окрему базу даних.
6. Проведено розрахунок характеристик вітру на території України з використанням діагностичної метеорологічної моделі CALMET за період 1981–2010 рр. із 1-годинною часовою дискретністю та просторовим кроком 2.5 км на 6-ти вертикальних рівнях – 10, 40, 80, 120, 160 і 200 м. На основі масиву отриманих даних розраховано осереднені за часом поля швидкості вітру, вітроенергетичного потенціалу та повторюваності енергоактивної швидкості.
7. Проаналізовано запаси вітрової енергії на основних висотах у нижній частині атмосфери. Встановлено, що енергії на висоті 10 м достатньо для ефективного використання малопотужних ВЕУ на більшості території України. Передгір'я та долини Карпат, Південний берег Криму та більшість зони мішаних лісів доцільно розглядати для встановлення автономних установок у господарських потребах. Відповідно до значень середнього вітроенергетичного потенціалу на висотах до 200 м включно, перспективні ділянки для встановлення промислових агрегатів великої потужності є на Керченському і Тарханкутському півостровах, прибережних районах Азовського моря у Запорізькій та Донецькій областях, підвищеннях рельєфу на території Донецького кряжу, Приазовської, Подільської та Волинської височин, гірських хребтах Карпат та Кримських яйлах.
8. Результати проведених розрахунків та аналізу кліматологічної інформації на метеостанціях за даними строкових вимірів швидкості й напрямку вітру за сучасний період (1981–2010 рр.) узагальнено в Атласі вітроенергетичних ресурсів України, який має важливе практичне значення для виробників вітрової енергії.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

1. **Ошурок Д.О.** Кліматологічна оцінка вітроенергетичних ресурсів обмежених територій. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2017. Т. 1 (44). С. 120–130.
2. **Ошурок Д.О.**, Скриник О.Я. Приведення даних вимірювань швидкості вітру до умов відкритої місцевості. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. № 4 (55). С. 131–139. (особистий внесок автора – оцифрування даних щодо закритості горизонту на метеорологічних станціях, проведення розрахунків, аналіз отриманих результатів)
3. Осадчий В.І., Скриник О.Я., **Ошурок Д.О.**, Скриник О.А. Вітрові ресурси Тернопільської області. *Геоінформатика*. 2017. № 4 (64). С. 50–61. (Index Copernicus) (особистий внесок автора – підготовка вхідної метеорологічної інформації та її опис, проведення моделювання, побудова карт та інших графічних матеріалів)
4. Giaiotti D., **Oshurok D.**, Skrynyk O., The Chernobyl nuclear accident Cs-137 cumulative depositions simulated by means of the CALMET/CALPUFF modelling system. *Atmospheric Pollution Research*. 2018. 9(3). P. 502–512. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.11.007>. (Scopus, Web of Science) (особистий внесок автора – підготовка бази даних вертикальних зондувань показників температури повітря та вітру, проведення моделювань, аналіз отриманих результатів)

Статті в інших наукових виданнях

1. Осадчий В.І., Скриник О.А., **Ошурок Д.О.**, Скриник О.Я. Оцінка вітроенергетичних ресурсів обмежених територій невеликих просторових масштабів із складним рельєфом. *Доповіді НАН України*. 2017. № 5. С. 51–58. (особистий внесок автора – проведення розрахунків та картографічне представлення отриманих результатів)

Опубліковані наукові праці апробаційного характеру

1. **Ошурок Д.О.** Оцінка вітроенергетичного потенціалу Тернопільської області. *Шевченківська весна – 2016. Географія: Збірник наук. праць XIV міжнародної наукової міждисциплінарної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (Київ, 6-8 квітня 2016 р.)*. К.: Прінт-Сервіс, 2016. С. 84–85.
2. **Ошурок Д.О.** Вітрові ресурси Тернопільської області. *Сучасний стан та якість навколишнього середовища окремих регіонів*: Матеріали міжнародної наукової конференції молодих вчених (Одеса, 1-3 червня 2016 р.). Одеський державний екологічний університет, Одеса: ТЕС, 2016. С. 177–179.
3. **Ошурок Д.О.** Застосування метеорологічного препроцесора CALMET для розрахунку вітроенергетичних ресурсів Тернопільської області. *Метеорологія, гідрологія, моніторинг довкілля в контексті екологічних викликів сьогодення*: Матеріали Всеукраїнської конференції молодих учених (Київ, 16-17 листопада 2016 р.). К: Ніка-Центр, 2016. С.144–146.

4. **Ошурок Д.О.** Верифікація метеорологічного препроцесора CALMET за даними спостережень за вітром. *Молоді науковці – географічній науці*: Збірник наук. праць XIII міжнародної наукової міждисциплінарної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених (Київ, 15-16 листопада 2016 р.). К.: Прінт-Сервіс, 2017. Випуск XIII. С. 53–56.
5. **Oshurok D.O.** Evaluation of the CALMET mesoscale meteorological model against wind measurements in four landscape zones of Ukraine. *The 15th International Conference of Young Scientists on Energy Issues (CYSENI 2018)*. 23-25 May 2018. Kaunas, Lithuania. P. 96–104.
6. **Ошурок Д.О.** Оцінка точності моделювання характеристик вітру у різних ландшафтних зонах України. *Рельєф і клімат*: Матеріали II Міжнародної наукової конференції (Чернівці, 26-28 вересня 2018 р.). Чернівці: Чернівецький нац. ун-т., 2018. С. 24–25.
7. **Ошурок Д.О.** Швидкість вітру в Україні в умовах відкритої місцевості. *Вплив кліматичних змін на просторовий розвиток територій Землі: наслідки та шляхи вирішення*: Збірник наукових праць II Міжнародної науково-практичної конференції (Херсон, 13-14 червня 2019 року). Херсон: ДВНЗ «ХДАУ», 2019. С. 133–136.
8. **Ошурок Д.О.,** Скриник О.Я., Осадчий В.І. Приведення вимірних значень швидкості вітру до умов відкритого горизонту. *Рельєф, клімат та поверхневі води як об'єкти природничо-географічних досліджень (до 70-річчя кафедр землезнавства та геоморфології, метеорології та кліматології, гідрології та гідроекології)*. Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф. (Київ, 2-4 жовтня 2019 р.). Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2019. № 3 (54). С. 139–141. (особистий внесок автора – проведення розрахунків, аналіз та графічне представлення результатів)

АНОТАЦІЯ

Ошурок Д.О. Вітроенергетичні ресурси України в сучасних кліматичних умовах. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата географічних наук за спеціальністю 11.00.09 – метеорологія, кліматологія, агрометеорологія. – Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Міністерство освіти і науки України, Київ, 2021.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню сучасного стану вітроенергетичних ресурсів на території України з використанням спеціалізованого метеорологічного забезпечення та емпіричної метеорологічної інформації, зібраної за кліматологічний період 1981–2010 рр.

Проведено аналіз та виявлено основні закономірності просторово-часового розподілу швидкості й напрямку вітру на території України за сучасний кліматологічний період (1981–2010 рр.) на основі строкових даних вимірювань мережі метеостанцій.

Основним інструментом для розрахунку полів вітру з високою просторовою і часовою роздільною здатністю слугувала діагностична мезомасштабна модель CALMET, яка є метеорологічним препроцесором дифузійної моделі CALPUFF. У ході підготовки вхідної метеорологічної інформації виконано обробку та сформовано цифрову базу строкових даних 12-ти показників на 207 станціях України та архів

вертикальних профілів характеристик вітру, температури та вологості повітря за період дослідження.

Верифікацію моделі CALMET проведено у 4-х областях моделювання з різними фізико-географічними та ландшафтними особливостями. Оцінку точності розрахованих швидкостей вітру виконано на рівні 10 м та у вертикальному профілі до висоти ~1.5 км на основі 8-ми тестових моделювань із заданням різних значень контролюючих параметрів моделі.

На усіх метеостанціях України, що функціонували у період 1981–2010 рр. строкові виміри швидкості вітру приведені до умов відкритої місцевості. З допомогою вибраної добре апробованої моделі розраховано характеристики вітру для усієї території України за період дослідження з просторовим кроком 2.5 км та 1-годинною часовою дискретністю на висотах 10, 40, 80, 120, 160 і 200 м. На основі масиву отриманих даних розраховано осереднені за часом поля швидкості вітру, вітроенергетичного потенціалу та повторюваності енергоактивної швидкості. Осереднені за 30-річний період результати розрахунків та кліматологічна інформація на метеорологічних станціях представлені у Атласі вітроенергетичних ресурсів України.

Ключові слова: вітровий режим, вітроенергетичні ресурси, метеорологічний препроцесор CALMET, база даних.

АННОТАЦІЯ

Ошурок Д.А. Ветроэнергетические ресурсы Украины в современных климатических условиях. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук по специальности 11.00.09 – метеорология, климатология, агрометеорология. – Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко. Министерство образования и науки Украины, Киев, 2021.

Диссертационная работа посвящена исследованию современного состояния ветроэнергетических ресурсов на территории Украины с использованием специализированного метеорологического обеспечения и эмпирической метеорологической информации, собранной за климатологический период 1981–2010 гг.

Проведен анализ и выявлены основные закономерности пространственно-временного распределения скорости и направления ветра на территории Украины за современный климатологический период (1981–2010 гг.) используя данные сети метеостанций в сроки измерений.

В качестве главного инструмента для расчета полей ветра с высокой пространственной и временной разрешающей способностью использовано диагностическую мезомасштабную модель CALMET, которая является метеорологическим препроцессором диффузионной модели CALPUFF. В процессе подготовки входящей метеорологической информации произведено обработку и сформировано цифровую базу срочных данных 12-ти показателей на 207 станциях Украины и архив вертикальных профилей характеристик ветра, температуры и влажности воздуха за период исследования.

Верификацию модели CALMET проведено в 4-х областях моделирования с разными физико-географическими и ландшафтными особенностями. Оценку точности рассчитанных скоростей ветра произведено на уровне 10 м и по вертикальному профилю до высоты ~1.5 км используя 8 тестовых моделирований с разными значениями заданных контролирующих параметров модели.

На всех метеостанциях Украины, которые функционировали в период 1981–2010 гг., данные скорости ветра в сроки измерений приведены к условиям открытой местности. Используя выбранную хорошо апробированную модель рассчитано характеристики ветра для всей территории Украины за период исследования с пространственным шагом 2.5 км и 1-часовой временной дискретностью на высотах 10, 40, 80, 120, 160 и 200 м. На основе массива полученных данных рассчитаны осредненные во времени поля скорости ветра, ветроэнергетического потенциала и повторяемости энергоактивной скорости. Осредненные за 30-летний период результаты расчетов и климатологическая информация на метеорологических станциях представлены в Атласе ветроэнергетических ресурсов Украины.

Ключевые слова: ветровой режим, ветроэнергетические ресурсы, метеорологический препроцессор CALMET, база данных.

SUMMARY

Oshurok D.O. Wind energy resources in Ukraine under the current climatic conditions. – The qualification scientific work on the rights of a manuscript.

The thesis for a Candidate Degree in Geographical Sciences, specialty 11.00.09 – Meteorology, Climatology, Agrometeorology. – Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kyiv, 2021.

The thesis is devoted to the research of the current state of wind energy resources over the territory of Ukraine with the applying of specialized meteorological software and using information collected during the climatological period of 1981–2010.

The analysis of wind speed and direction spatiotemporal distribution was performed over the territory of Ukraine for the current climatological period (1981–2010) based on the sub-daily measurements on the meteorological stations network. The maps of mean resultant vector of surface wind were compared to the data of average sea level pressure. In order to analyze wind conditions in more detail there were selected 12 stations with the lowest horizon closure in different landscape zones – the forest zone (Sarny, Chernihiv), the forest-steppe (Vinnytsia, Sumy), the steppe (Mykolaiv, Donetsk, Mysove), the Carpathians (Uzhhorod, Plai, Mizhhir'ya) and the Crimean mountains (Ai-Petri, Nikitsky Sad). The main spatiotemporal patterns of wind regime have been proved.

As the main tool for calculation of wind fields with high spatiotemporal resolution, the CALMET diagnostic mesoscale model was used, which is a meteorological preprocessor of the CALPUFF dispersion model. The sub-daily data from stations for the period of 1981–2010 were processed including quality control procedure, correction of false values, filling gaps using developed methodology, temporal interpolation and data conversion into specialized CALMET-compatible format. The ERA-Interim reanalysis dataset with the spatial coverage of $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ and the temporal resolution of 4 times per day at 17 vertical levels from surface to 500 hPa isobaric level was used and processed as an input information in the vertical direction. Based on the results of data processing the sub-daily digital database

of 12 meteorological parameters at 207 Ukrainian stations and the archive of vertical profiles of wind characteristics, dew point and air temperature have been created for the period of research.

Assessment of the CALMET meteorological model has been conducted at four domains with the different relief patterns and types of landscapes – at Kyiv, Dnipropetrovsk and Transcarpathian regions and the Autonomous Republic of Crimea. Eight simulations with the various sets of the model input parameters were ran for the each spatial domain during 1-year period (2007) using 2.5 km spatial grid at the horizontal levels with height from 10 m to ~1.5 km above surface. In order to compare results and observations the following statistics were calculated: bias, mean absolute deviation, root-mean-square error, Pearson correlation coefficient, index of agreement and factors of 2 and 5.

At the near-surface level, the model demonstrates better accuracy in regions with relatively flat terrain when reproducing wind fields. The efficiency of the model depends a lot on the spatial density of the observational grid in areas with complicated terrain and mesoscale circulation. Overall, the accuracy of simulations increases in a vertical direction. It has also been detected that precision of the modelled wind speed vertical profiles depends primarily on discrepancies between input vertical information taken from the ERA-Interim reanalysis and measurements of the upper-air stations.

The wind fields computation over the whole territory of Ukraine for the research period has been performed with 1-hour temporal resolution using 2.5 km spatial grid at six heights – 10, 40, 80, 120, 160 and 200 m. Based on the obtained multiyear array of data there were calculated the averaged fields of wind speed, wind power density and frequency of velocity range of 3–25 m/s. It should be noted that entire sub-daily wind speed dataset was corrected according to the open terrain conditions, because of the problem to represent adequately the roughness length at surface weather stations.

According to the obtained estimates, wind energy capacity at the height of 10 m is enough for sufficient utilization of small wind turbines on most of the territory of Ukraine. Perspective sites for installing of large turbines with a rated capacity >1 MW are available at the Kerch and Tarkhankut Peninsulas, in the coastal areas near the Sea of Azov in Zaporizhia and Donetsk regions, at the local elevations on the territory of Donets Ridge, Azov, Podolian and Volhynian uplands, on the Carpathian ridges and tops of the Crimean mountains. Mean annual wind energy potential at these areas exceeds 200 W/m² at 80 m height and 350 W/m² at 200 m. However, the frequency of velocity range, which is relevant for energy generation by most of turbines, generally, is relatively low in mountain regions compared to Ukrainian flat part.

The averaged maps (over 30-yr period) of wind speed and wind energy potential fields at six vertical levels above surface (information is relevant for the open terrain conditions) are represented in the Ukrainian wind Atlas. The wind atlas also contains climatological information about the wind conditions at surface weather stations.

Key words: wind conditions, wind energy, meteorological preprocessor CALMET, database.