

Вплив зменшення лісистості на зміну вітрового режиму для території України за даними глобального чисельного експерименту LUMIP

Л.А. Писаренко^{1,2}, С.В. Краковська^{1,2}, 2023

¹Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, Київ, Україна

²Державна установа «Національний антарктичний науковий центр МОН України», Київ, Україна
Надійшла 3 липня 2023 р.

У статті проаналізовано та оцінено вплив часткового знеліснення на режим вітру на підставі основі глобального чисельного експерименту the Land Use Model Intercomparison Project (LUMIP), що є одною зі складових частин глобального проекту Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6). Мета експерименту LUMIP — аналіз зміни кліматичних характеристик і біогеохімічних циклів унаслідок часткового глобального знеліснення з поступовою заміною на трав'яний покрив. Згаданий період ретроспективного моделювання охоплює такі підперіоди: 1) з умовно мінімальним антропогенним впливом (1850—1899), для якого безпосередньо моделювали часткове зменшення лісистості з трендом близько 1 % на рік у тих вузлах сітки, де лісистість перевищувала 30 %; 2) наступні 30 років (1900—1929) стабілізації лісового покриву, тобто без його подальших змін. У попередніх дослідженнях проаналізовано вплив зменшення лісистості на радіаційний, термічний та вологісний режими для території України. Ця стаття є продовженням указанного цього циклу досліджень і присвячена впливу часткового знеліснення на зміну середньомісячної приземної швидкості вітру на підставі даних шести глобальних кліматичних моделей (ГКМ). Встановлено, що, очікувано, знеліснення спричинює збільшення цього показника в усі місяці року за всіма ГКМ, використаними у дослідженні, але проте з різною чутливістю. Найбільші зміни з-поміж усіх ГКМ визначено за моделлю, де з найбільшим кроком зменшували лісистість — до 1,6 % у вузлі сітки. Ще більші зміни відбувались у тих вузлах сітки, де лісовий покрив замінювали трав'яним. Встановлено середні—високі обернені зв'язки для всіх сезонів року. Втім в Україні найбільші швидкості вітру характерні для зими, тому й максимальні зміни — до 0,3 м/с на 10 років, отримано для січня. Натомість у перехідні сезони року та влітку подібні зміни досягають 0,1—0,2 м/с на 10 років. Різниця між періодами сталого лісового покриву та часткового знеліснення становили складали до 1,2 м/с у вузлі сітки для території України.

Ключові слова: LUMIP, глобальна кліматична модель, лісовий покрив, швидкість вітру, знеліснення.

Вступ. Вітровий режим у межах граничного шару атмосфери насамперед залежить від характеристик підстильної поверхні та її зміни, зокрема через висоту,

шорсткість тощо. Природні та антропогенні форми рельєфу, міська забудова тощо можуть бути свого роду перешкодою, що впливає на зміну напрямку та швидкості ві-

Citation: Pysarenko, L.A., & Krakovska, S.V. (2023). The impact of forest cover decrease on the wind regime changes for the territory of Ukraine based on data of the global numerical experiment LUMIP. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 45(5), 44—61. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i5.289106>.

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

тру через посилення та послаблення повітряних потоків [Клімат..., 2003; Barry, Hall-McKim, 2014]. Вітер є важливою складовою для оцінювання кліматичних ресурсів території, особливо протягом останнього двадцятиріччя, коли активно розвивається вітрова енергетика з метою переходу на відновлювальні джерела енергії та зменшення викидів парникових газів й екологічного навантаження на довкілля. У звітах Міжурядової групи експертів зі зміни клімату (МГЕЗК) оцінено зміни швидкості вітру у різних регіонах нашої планети [IPCC ..., 2011, 2014, 2021, 2022a, 2022b]. У цих роботах проаналізовано та оцінено вітровий режим загалом для території України у різні проміжки часу [Клімат..., 2003; Кліматичні..., 2018; Ошурок, Скриник, 2019; Ошурок, 2020], їх екстремальні значення [Стихійні..., 2006], для міст [Клімат..., 2003; Кліматичні..., 2018; Шевченко, Сніжко, 2018], мікроклімату [Клімат..., 2003; Міщенко, Ляшенко, 2007; Шевченко, Сніжко, 2018; Попова та ін., 2018], біокліматології з метою визначення комфортності погодних умов та клімату [Малицька, 2017; Karamushka et al., 2022; Shevchenko et al., 2019], вітроенергетичного потенціалу для території України [Ошурок, Скриник, 2019; Ошурок, 2020], а також кліматичні проєкції на майбутнє [Кліматичні..., 2018; IPCC..., 2022b] з визначенням трендів чинника кліматичного впливу, що змінюється.

Слід зазначити, що для аналізу кліматичних показників з різною метою необхідно також оцінювати та аналізувати їх флуктуації та зміни з охопленням історичних проміжків часу, зокрема й в періоди без антропогенного впливу або з мінімальним його впливом. Зазначений проблематиці приділено окрему увагу в глобальному проєкті the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) [CMIP Phase 6, 2023; Eyring et al., 2016], який входить до Всесвітньої програми дослідження клімату the World Climate Research Programme (WRCP) [The World..., 2023]. Метою CMIP6 є вивчення клімату у минулому й нинішньому часі, а також оцінювання його змін та варіативності у майбутньому з урахуванням

просторово-часових розподілів парникових газів за допомогою даних спостережень та чисельних кліматичних моделей. Складовою є охоплення ретроспективного моделювання, контрольного або базового, для глибокого вивчення саме природної мінливості складових кліматичної системи як без зміни типу підстильної поверхні, так і з її зміною [CMIP Phase 6, 2023; Eyring et al., 2016]. У минулому відбувалася значна зміна у землекористуванні включно з освоєнням нових земель, нині спостерігається та в подальшому за частиною сценаріїв очікується посилення господарської діяльності людини відповідно зі зміною типів землекористування, які можуть вплинути на просторово-часовий розподіл кліматичних характеристик. Одній з таких проблематик присвячений експеримент the Land Use Model Intercomparison Project (LUMIP) [Lawrence et al., 2016], який проведено із застосуванням глобальних кліматичних моделей (ГКМ) [Boucher et al., 2018; Danabasoglu, 2019; Seferian, 2018; Sospedra-Alfonso et al., 2019; Tang et al., 2019; Wu et al., 2018]. Його завданням є знаходження зв'язків та вивчення наслідків поступового глобального знеліснення, а також подальшої стабілізації лісового покриву на різні кліматичні характеристики атмосфери та підстильної поверхні, а також на біогеохімічні цикли за умови мінімізації антропогенного впливу з метою виділення більш природного фону. Тому в указаному експерименті використано історичний період тривалістю 80 років (1850—1929), який поділено на два основні підперіоди [Lawrence et al., 2016]. Протягом першого, що дорівнює 50 років (1850—1899) і деякими глосаріями МГЕЗК визначається як умовно доіндустріальний [IPCC..., FAQ, 2018], лісовий покрив поступово замінювали на трав'яний із загальним трендом близько 1 % на рік у вузлі сітки у глобальному масштабі, де значення лісистості становило 30 % і вище. У наступні 30 років (1900—1929) лісовий покрив уже не змінювали, тобто він залишався стабільним у відсотках лісистості. На рис. 1 показано графік зміни усередненої лісистості для кожного року

всього 80-річного періоду на прикладі півночі України за однією з ГKM. Подібний рисунок репрезентували у попередніх наших публікаціях [Писаренко, Краковська, 2021а,б]. Така змодельована тенденція призвела до зменшення площі лісу на 20 млн км² у глобальному масштабі за період мінімального антропогенного впливу.

Лише за останні два роки почали з'являтися публікації, які ґрунтуються на результатах обробки та узагальненого аналізу поки що лише основних багаторічних кліматичних характеристик згаданого експерименту LUMIP, таких як температура повітря чи підстильної поверхні, кількість опадів для всієї земної кулі без детального переходу на регіональні масштаби та сезонні зміни кліматичних характеристик [Boysen et al., 2018, 2020; Brovkin, 2020]. Окремі зі згаданих характеристик добре вивчені для лісів кореальної й тропічної зон [Bonan et al., 1992; Bonan, 2008; Sanderson et al., 2012; Thom et al., 2017], але ефекти

лісів помірної зони займають проміжне положення [Sanderson et al., 2012; Brovkin et al., 2020; Boysen et al., 2018, 2020; Huang, 2020] і містять ще багато відкритих питань [Bonan, 2008; Sanderson et al., 2012]. Хоча з точки зору впливу лісу у мікрокліматичному масштабі та урбометеорології досліджували закономірності за даними публікації щодо питань зміни напряму та швидкості вітру, а також вітроенергетичний потенціал для території України і будували кліматичні проєкції на майбутнє, тим не менш питання впливу зміни підстильної поверхні через зменшення лісового покриву у регіональному масштабі на приземну швидкість вітру ще недостатньо добре вивчено. Слід зауважити, що у наведено представлений результати впливу часткового знеліснення на показники радіаційного, термічного та вологісного режимів за мінімального антропогенного навантаження чисельного ретроспективного експерименту LUMIP з акцентом на території України [Писарен-

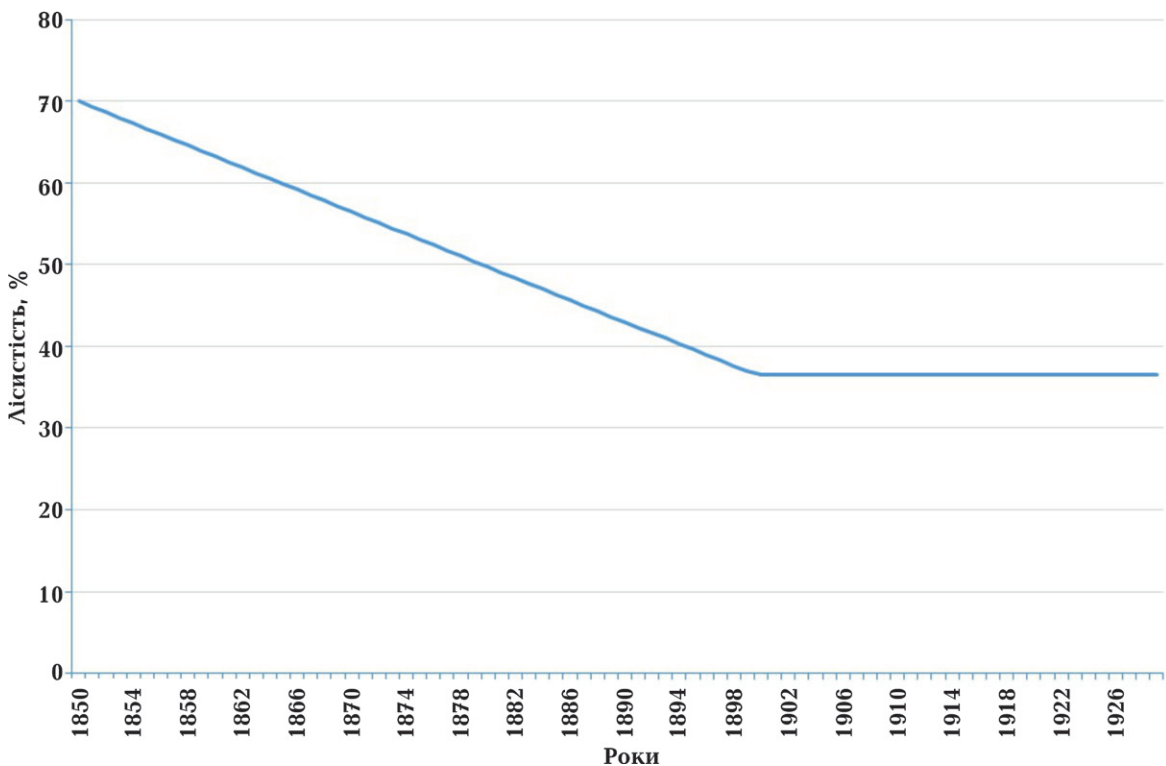


Рис. 1. Часовий хід усередненої лісистості (%) на прикладі півночі України (50°—52,5° пн. ш.) за однією з глобальних кліматичних моделей [Писаренко, Краковська, 2021а]

Fig. 1. The time course of mean deforestation (%) on the example of North Ukraine (50—52,5° N) in one of the GCMs [Pysarenko, Krakovska, 2021a].

ко, Краковська, 2021а,б, 2022]. Дана стаття є продовженням наших досліджень, її мета — є аналіз кількісних змін середньомісячної швидкості вітру внаслідок часткового знеліснення та подальшої стабілізації лісового покриву на території України з використанням даних чисельного експерименту LUMIP у впродовж 1850—1929 років.

Матеріали та методи. Результати дослідження ґрунтується на вихідних даних шести ГKM чисельного експерименту LUMIP (див. сайт The Earth System Grid Federation [ESGF ..., 2023]. Список ГKM [Boucher et al., 2018; Danabasoglu, 2019; Seferian, 2018; Sospedra-Alfonso et al., 2019; Tang et al., 2019; Wu et al., 2018], що використані для аналізу, наведено у таблиці у порядку зростання роздільної здатності вони також згадуються також у попередніх публікаціях [Писаренко, Краковська, 2021а,б, 2022]. У тексті моделі позначено за їх порядковим номером від 1 до 6.

На територію України за ГKM з найкрупнішою сіткою припадає всього 15 вузлів сітки, а за найдрібнішою — до 100

вузлів (рис. 2). Крок сітки моделей доволі крупним для такої площі, тому зміни цього показника проаналізовано поширено. Інакше кажучи, умовно територію України районувано на три прямокутні широтні зони: північну, що відповідає більшою мірою поліссю; центральну — переважно лісостепу, південну — переважно степовій природній зоні. Детальний опис такого районування наведено і в попередніх публікаціях [Писаренко, Краковська, 2021а,б, 2022].

У таблиці наведено максимальний крок зміни лісистості. Хоча загальна тенденція зміни становила порядку 1 % на рік, як помітно зі значень, вона різниться залежно від моделі. Найбільший крок зміни був характерний для ГKM 5 — дорівнював порядку 1,6 % на рік, що спричинило зменшення лісового покриву до 70—75 % в окремих вузлах сітки. У цілому пропорційно зменшувався відсоток лісистості залежно від початкових умов стану лісового покриву у вузлі сітки ГKM. Лише ГKM 2 мала певні відмінності від загального алгоритму, а

Список ГKM, використаних у дослідженні [Писаренко, Краковська, 2021б], та значення лінійного тренду зменшення лісистості (%/рік) за кожною ГKM для вузлів сітки на території України [Писаренко, Краковська, 2022]

Глобальна кліматична модель	Організація-розробник, країна	Крок сітки (°довготи×°широти)	Максимальна зміна лісистості у вузлі сітки, %/рік
CanESM5	The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma), Канада	2,8125×2,76727	0,74
IPSL-CM6A-LR (2 реалізації)	The Institute Pierre-Simon Laplace (IPSL), Франція	2,5×1,26761	0,64
UKESM1-0-LL	The Met Office Hadley Centre (MOHC), Великобританія	1,875×1,25	0,52
CNRM-ESM2-1	National Centre for Meteorological Research and Centre Européen de Recherche et de Formation AvancéeeenCalculScientifique (CNRM-CERFACS), Франція	1,40625×1,38903	0,62
BCC-CSM2-MR	The Beijing Climate Center (BCC), Китай	1,125×1,11209	1,60
CESM2 (3 реалізації)	The National Center for Atmospheric Research, США	1,25×0,9424	0,83

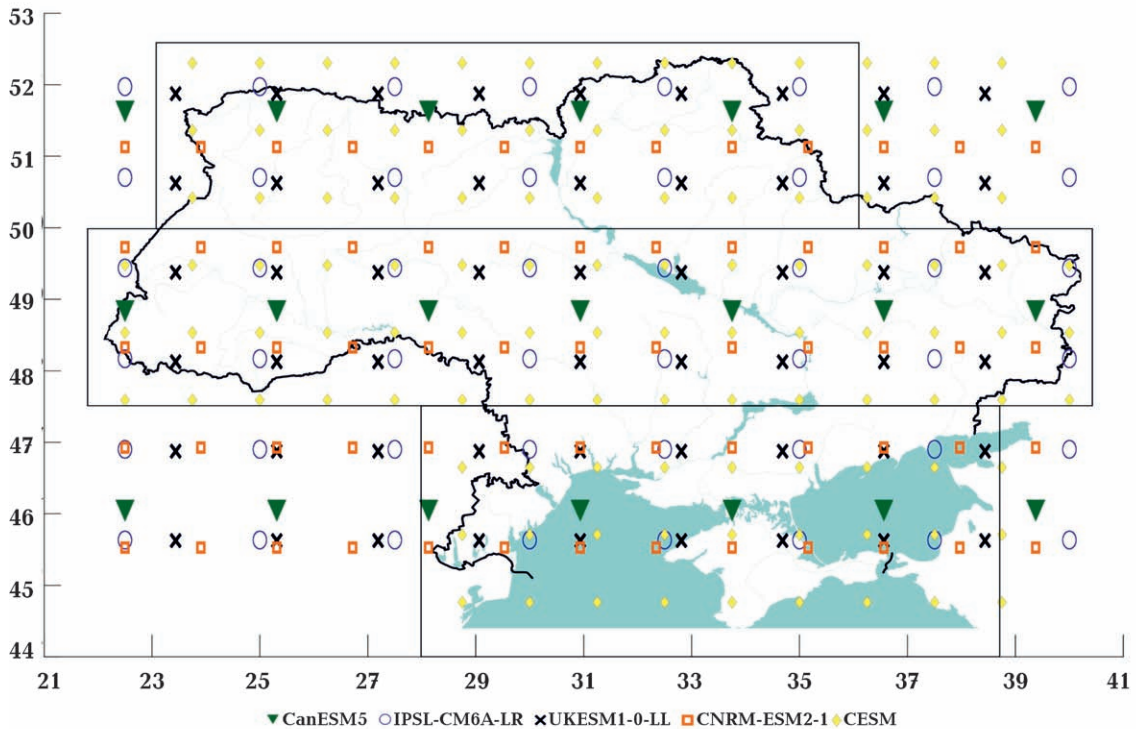


Рис. 2. Розташування широтних зон і вузлів координатної сітки глобальних кліматичних моделей (див. таблицю) експерименту LUMIP [Писаренко, Краковська, 2021б].

Fig. 2. The location of latitudinal zones and grid points of the GCMs from the LUMIP experiment (see Table) [Pysarenko, Krakovska, 2021б].

саме вищі порогові значення для зменшення лісового покриву. Такі початкові значення становили порядку 50 %, і подібних вузлів на територію України припало лише три.

У попередніх публікаціях наведено картосхеми початкового стану лісистості, кількісних змін відсотку лісистості протягом 50 років та кінцеві значення станом на 1900 рік. Слід зазначити, що в моделях закладено не тільки різну початкову лісистість, а й різний її просторовий розподіл. Тому за таких розбіжностей кожен модель аналізували індивідуально та виділяли спільні тенденції зміни характеристик вітрового режиму, а також ступінь зміни кількісних показників.

Дані лісистості (у відсотках) та середньої місячної швидкості вітру шести глобальних кліматичних моделей (ті, що були наявні у відкритому доступі) експерименту LUMIP з розширенням .nc (NetCDF) завантажено із сайту [ESGF..., 2023]. Початкові

модельні дані опрацьовано для території України за допомогою скриптів спеціалізованого програмного пакета Climate data operators (CDO) для обробки кліматичної інформації. Була застосована мова програмування Visual Basic for Applications (VBA) для подальшої обробки та побудови графіків в електронній таблиці Microsoft Excel. Побудову картосхем зроблено за допомогою програм QGIS і Surfer. Отримано бази даних і результати щодо з лісистості та середньої місячної швидкості вітру у форматах .nc, .dat, .xlsx.

Початкові дані ГKM 2 і 6 містили декілька реалізацій, тому їх попередньо було усереднено перед включенням до ансамблю шести ГKM.

На рис. 3 показано алгоритм обробки даних для знаходження залежності між частковим знелісненням і вітровим режимом. Для цього використано метод аномалій або відхилень кліматичних характеристик. Як базовий період взято перші

двадцять років (1850—1869), які характеризуються відносно невеликими змінами лісового покриву, що дає змогу оцінити кількісно саме зміну вітрового режиму. 20-річні періоди широко використовуються МГЕЗК, також Всесвітня метеорологічна організація дозволяє використовувати періоди нестандартної довжини. Отже, для аналізу модельних даних використовували базовий період 1850—1869 та знаходили багаторічне значення швидкості вітру за кожен місяць року. Наступним кроком був розрахунок аномалій між кожним місяцем року шляхом обчислення відхилень. Для уникнення флуктуацій брали 5-річне ковзне усереднення для аномалій серед-



Рис. 3. Покрокова обробка даних ГKM для аналізу аномалій багаторічних середніх місячних швидкостей вітру (м/с): t — місяць року; сер. — середнє, ЛС — лісистість (%).

Fig. 3. A step-by-step data processing for the anomaly analysis (a) of the multi-year monthly mean wind speed (m/s), where t — a month of the year, ser. — mean, ЛС — forest cover (%).

ньої місячної приземної швидкості вітру. Ці тренди перевіряли на статистичну значущість з використанням F-тесту (95 %), числове значення якого для даної вибірки становило 3,13—3,18. За допомогою регресійного аналізу (Пірсона) знаходили залежності між зменшенням лісистості, для якого теж проводили ковзне усереднення, та характеристикою вітру.

Основні результати досліджень. Як зауважено, рослинність, зокрема лісовий покрив, зумовлює зміну вітрового режиму через параметр шорсткості, висоту стовбурів, щільність насаджень тощо з особливо відчутним впливом у приземному шарі атмосфери. Відповідно, заміна лісового покриву трав'яним вплине на розподіл характеристик вітру і може зумовити як кількісні зміни швидкості вітрових потоків, так і у деяких випадках зміну напрямку та формування локальних завихрень.

На рис. 4 за однією з ГKM показано просторовий розподіл середньої місячної швидкості вітру у вузлах сітки для базового 20-річного періоду (1850—1869) у центральні місяці сезонів з виділенням широтних зон. Для північної широтної зони швидкість вітру у січні (рис. 4, a) дорівнює в середньому 3,5—4,5, для центральної — 3,5—4,6 м/с, для південної широтної зони характеризується деяким підвищенням — 4,2—7,9 м/с, через наявність плоских прибережних територій та морських поверхонь.

Навесні, на прикладі центрального місяця квітня, за ГKM 5 спостерігається практично подібний просторовий розподіл кількісних вітрових характеристик, як і для січня у більшості вузлів сітки.

Для літнього сезону, на прикладі липня, значення середніх місячних швидкостей вітру знижується порівняно із січнем і липнем. У північній широтній зоні вони коливаються в межах 3,4—3,9 м/с, у центральній — 3,3—4,4, у південній 4,0—6,2 м/с.

Восени, на прикладі жовтня, середня місячна швидкість вітру збільшується і становить 3,4—4,1 м/с для північної широтної зони, 3,4—4,5 та 4,1—7,1 м/с — для центральної та південної широтних зон

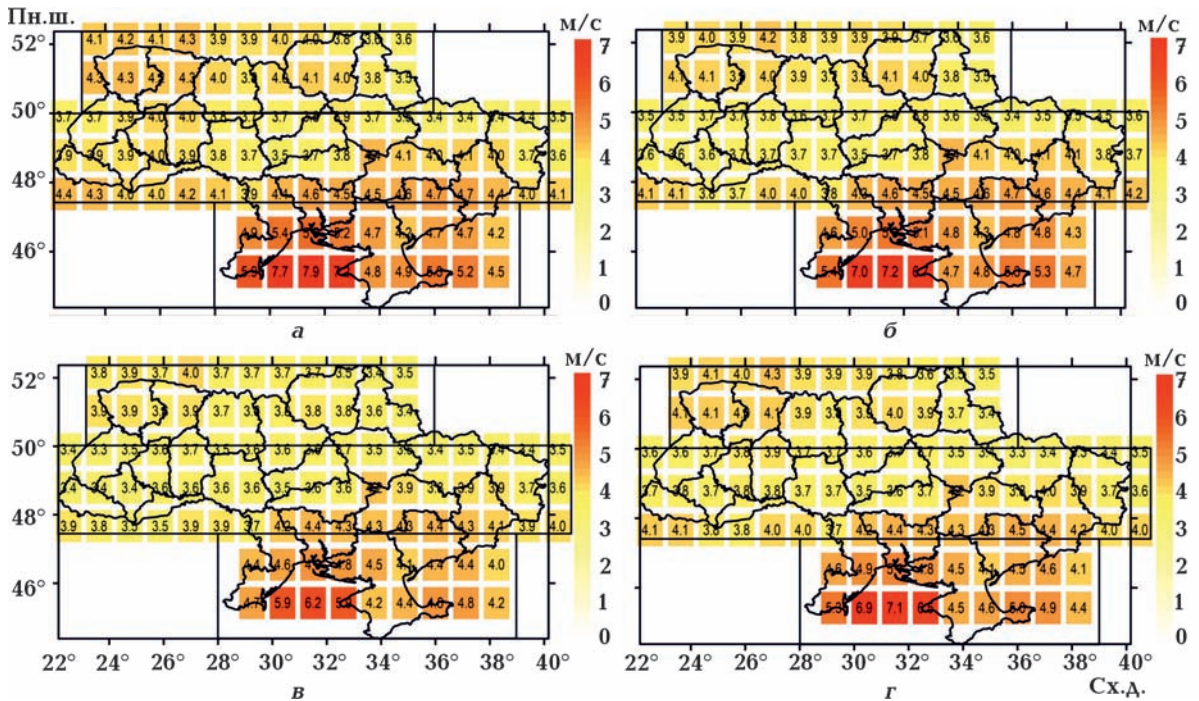


Рис. 4. Просторовий розподіл середньої місячної швидкості вітру (м/с) на прикладі центральних місяців сезонів: для січня (а), квітня (б), липня (в), жовтня (г) за ГКМ 5 для 20-річного базового періоду.

Fig. 4. The spatial distribution of mean monthly wind speed (m/s) on the example of the mid-month of seasons: for January (a), for April (b), for July (v), for October (r) on the example of GCM 5 for basic 20-year period.

відповідно. Для інших моделей розподіл є подібним.

Отриманий за ГКМ просторовий розподіл подібний до того, що спостерігається в Україні (див., наприклад [Клімат..., 2003]), з вищими значеннями з наближенням до акваторій морів. Тому залежно від типу підстильної поверхні та шорсткості формуються та змінюються швидкість і напрям вітру. Отже, нижчі швидкості вітру властиві регіонам з найвищим лісовим покривом, а найвищі — поблизу й над морськими поверхнями та характерні для всіх сезонів року.

За всіма 6 ГКМ експерименту LUMIP через часткове знеліснення виявлено підвищення середньої швидкості вітру в усі місяці року для території України. Ці зміни характерні переважно для тих вузлів сітки, де саме зменшувалась лісистість.

Узимку виявлено середні та високі обернені зв'язки (r) між частковим знелісненням та підвищення середньої місячної швидкості вітру для всіх ГКМ. На рис. 5,

для січня, наведено приклад для двох моделей з порядковими номерами 5 і 6 (а, б). Згадані зв'язки (r) дорівнюють $-0,95 \dots -0,40$ та $-0,91 \dots -0,59$ у північній та центральній широтних зонах відповідно. У південній широтній зоні зміни лісового покриву відбувалися лише за ГКМ 4, проте виявлено також закономірності з $r = -0,40$, $r = -0,49$, $r = -0,78$ у грудні—лютому. Для ГКМ 3 характерне часткове знеліснення для всіх 80 років, тому, відповідно, зв'язки виявлено для всього періоду досліджень.

Виявлені найвищі обернені зв'язки за ГКМ 2 та ГКМ 5 у північній та центральній широтних зонах у всі зимові місяці. Проте за моделлю 2 на територію України припало лише 3 вузли сітки, де змінювалась лісистість, і саме в тих вузлах визначено значущі зв'язки. За ГКМ 5 знеліснення відбувалося з самим максимальним трендом з-поміж усіх моделей — до 1,6 % на рік, тому і залежності між зміною лісового покриву та середньої місячної швидкості вітру є найбільш вираженими.

Навесні, на прикладі квітня, негативні кореляції між частковим знелісненням і швидкістю вітру становлять $-0,95...-0,51$

у північній (рис. 5, *в, г*), $-0,97...-0,40$ — у центральній та $-0,56$ — у південній широтних зонах, тобто також демонструють се-

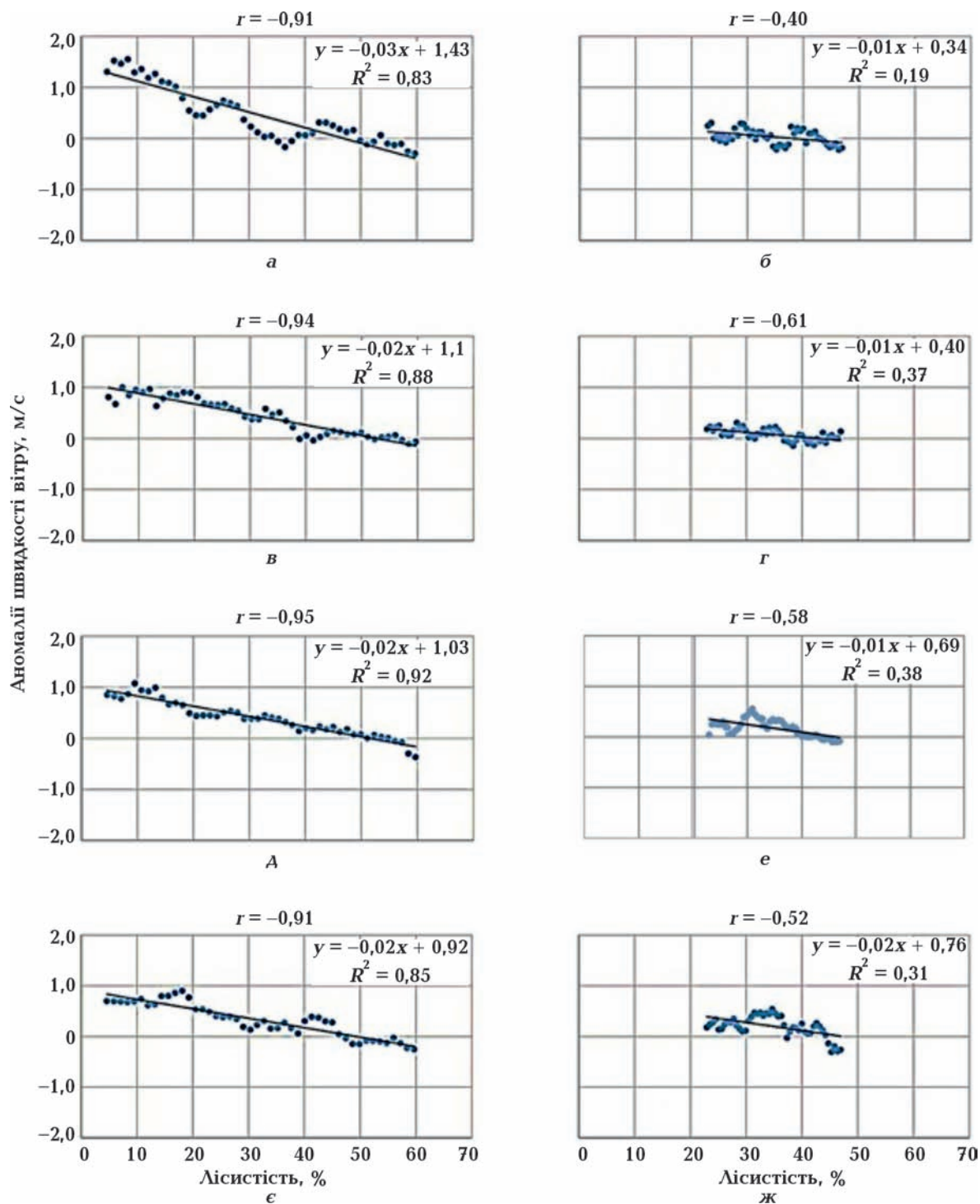


Рис. 5. Залежність зміни середньої місячної швидкості вітру (у м/с) від відсотка лісистості для північної широтної зони за ГКМ 5 (а) та ГКМ 6 (б) на прикладі січня, квітня (в) та (г), липня (А) та (е), жовтня (є) та (ж).
 Fig. 5. The dependence of the change in the mean monthly wind speed in m/s on the percentage of forest cover for the northern latitudinal zone on the examples of GCMs 5 (a), 6 (б) for January, for April (в) and (г), for July (А) and (е), for October (є) and (ж).

редню та сильну статистичну залежність. Слід зауважити, що максимальні зв'язки для весняного сезону простежуються для тих самих ГКМ, що і для зимового. Виявлені негативні кореляції є вищими для півночі, ніж для центральної широтної зони. На рис. 5 показано статистичні зв'язки у весняний сезон на прикладі центрального місяця — квітня.

Влітку, на прикладі липня, аналогічно, як і для попередніх сезонів, часткове знеліснення спричинює підвищення середньої місячної швидкості вітру. Отримано також негативні кореляції зі значеннями $r = -0,95 \dots -0,48$ у північній (рис. 5, д, е) і $r = -0,96 \dots -0,59$ центральній широтних зонах. Для півдня, лише за ГКМ 4, $r = -0,67$ в цілому. Загалом високі обернені зв'язки отримано за моделями 1, 2, 5.

Восени, для вересня—листопада, обернений зв'язок між частковим знелісненням та аномаліями середніх місячних швидкостей вітру становить $r = -0,97 \dots -0,52$ у північній широтній зоні (рис. 5, є, ж), $r = -0,91 \dots -0,35$ — у центральній, $r = -0,69$ — у південній (ГКМ 4). Максимальні значення, як і для попередніх сезонів, характерні для моделей 2 і 5 (у північній широтній зоні).

Подібне зменшення лісистості спричинить підвищення швидкості вітру протягом зимового сезону (на прикладі січня) за всіма моделями на $0,1—0,2$ м/с за 10 років для північної широтної зони (рис. 6, а, б). Статистична значущість отриманих трендів підтверджується високими значеннями критерію Фішера. У північній широтній зоні він дорівнює 47,77 і вище для січня. Максимальні значення для досліджуваного регіону — 223,10 і 231,19, характерні для ГКМ 2 і ГКМ 5. У центральній широтній зоні ці значення варіюють у межах 9,36—42,28. Виявлено, що для зимового сезону найбільш чіткі зміни виражені саме за ГКМ 5, оскільки для неї знеліснення відбувалося з найвищим трендом. Встановлено, що загалом зміни швидкості вітру можуть сягати 0,3 м/с за 10 років для центральної широтної зони.

Зазначене часткове зменшення лісис-

тості спричинює зростання характеристики середньої місячної швидкості вітру на $0,04—0,2$ м/с на 10 років (рис. 6, в, г). Слід зауважити, що менші кількісні значення встановлені за ГКМ 3 і 6, тоді як для моделі 5 простежуються максимальні тренди, які сягають 0,2 м/с на 10 років. Величина F-тесту для північної широтної зони перевищує 12,89 (у квітні), для центральної варіює в межах від 4,23 до 670,13, для південної дорівнює 89,42 (ГКМ 4). Максимальні зміни спостерігаються у вузлах, де часткове зменшували лісистість для ГКМ 2 і 5, вони становлять 300—400 (для всіх весняних місяців). Отримані усереднені тенденції середньої місячної швидкості вітру становлять $0,1—0,2$ м/с на 10 років для центральної і південної широтних зон.

Отже, очевидно, що зменшення лісового покриву спричинює зростання кількісних значень середньої швидкості вітру у широтних зонах, за всіма ГКМ вона досягає $0,04—0,2$ м/с за 10 років упродовж усіх літніх місяців (рис. 6, д, е) з найвищими тенденціями за ГКМ 2 і 5. Це підтверджується високими значеннями F-тесту — 25,40—576,85 для всіх моделей. При цьому слід зазначити, що для моделі 6 характерні найнижчі тенденції до зростання середньої місячної швидкості вітру для липня у північній широтній зоні

В осінні місяці часткове зменшення лісового покриву також спричиняє ріст середньої місячної швидкості вітру зі значеннями тренду $0,04—0,3$ м/с на 10 років (рис. 6, є, ж), з найбільшими змінами за ГКМ 5 у північній та центральній широтних зонах. Мінімальні темпи зростання середньої місячної швидкості вітру для жовтня виявлено за ГКМ 6 зі значеннями $0,04$ м/с на 10 років, що підтверджується величиною критерію Фішера 19,38.

Додатково проаналізовано різницю між середніми місячними швидкостями вітру за період стабілізації лісового покриву (останні 30 років досліджень — 1900—1929 роки) та поступового часткового знеліснення (1850—1899 р.) на прикладі двох ГКМ для всіх сезонів року (рис. 7, 8). За різницями встановлено зростання швид-

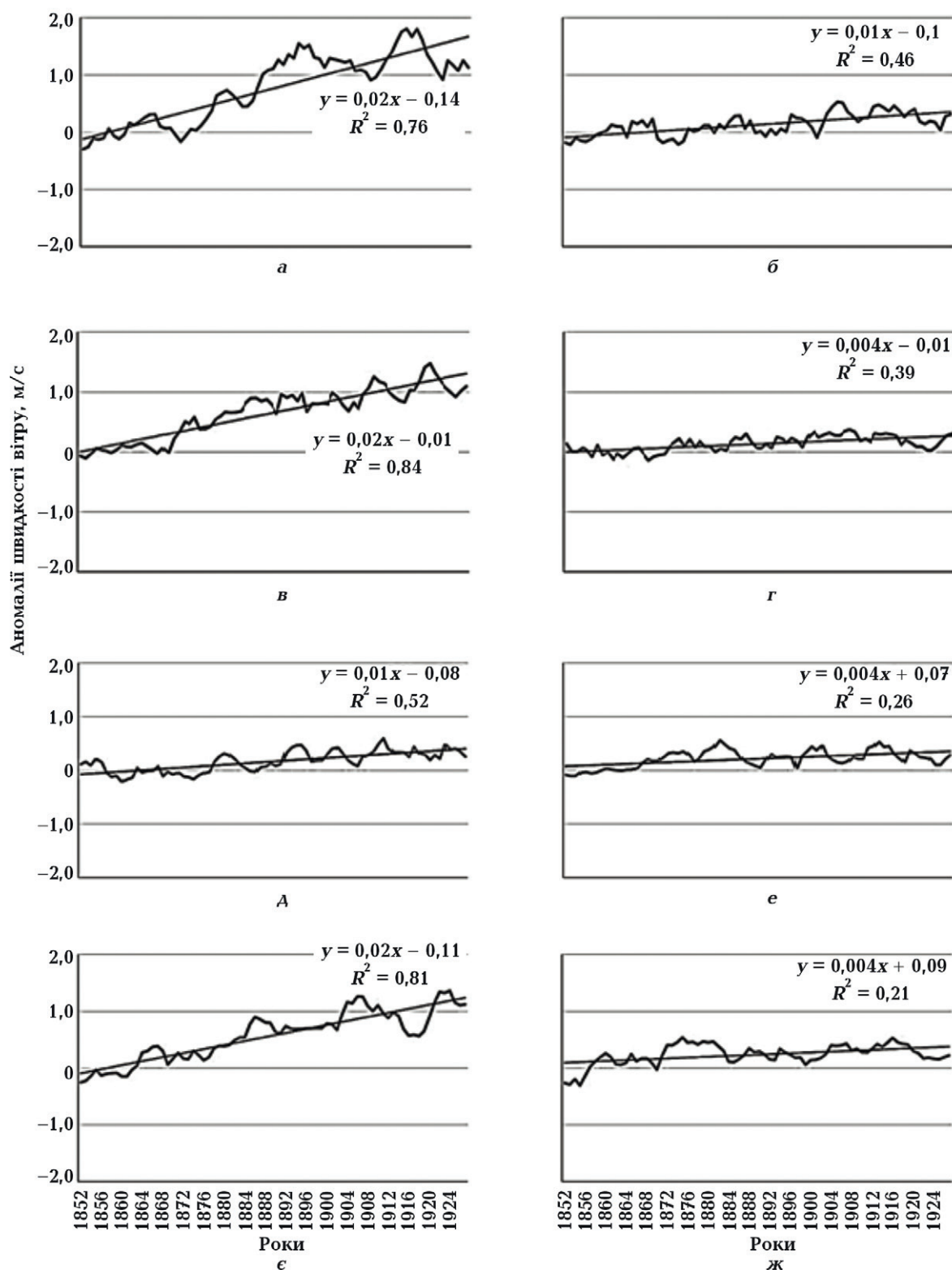


Рис. 6. Аномалії від середнього за базовий період та лінійні тренди середньої місячної швидкості вітру на прикладі січня для північної широтної зони за ГКМ 5 (а) та ГКМ 6 (б) на прикладі січня, квітня (в) та (г), липня (д) та (е), жовтня (є) та (ж).

Fig. 6. Anomalies from mean values of base period and linear trends of mean monthly wind speed anomalies for the northern latitudinal zone based on GCMs 5 (a), 6 (б) on the example of January, April (в) and (г), July (д) and (е), October (є) and (ж).

кості вітру. Як приклад наведено ГKM 4, оскільки за нею знеліснення відбувалося в усіх широтних зонах України. Взимку значення зміни середніх швидкостей вітру є вищими, що частково може бути спричинено відсутністю листяного покриву і, відповідно, меншою шорсткістю.

Аналіз зміни середньої місячної швидкості вітру по сезонах показав, що взимку, на прикладі січня, вона зросла на 0,4—0,6 м/с (рис. 7, а) в усіх трьох широтних зонах України. Навесні, на прикладі квітня (рис. 7, б), помітно, що найвищі зміни середньої швидкості вітру характерні для північної широтної зони і досягають загалом 0,6—0,7 м/с. У літній сезон, на прикладі липня (рис. 7, в), часткове знеліснення спричинило зростання середньої місячної швидкості вітру до 0,4 м/с у вузлі сітки. Для осені, на прикладі жовтня (рис. 7, г) такі зміни коливаються у межах 0,2—0,5 м/с, причому найвище зростання швидкості вітру простежується для центральної широтної зони.

На отриманий просторовий розподіл змін швидкості вітру між періодами стабільного лісового покриву та його часткового зменшення накладається сезонний хід середніх місячних швидкостей вітру. Для літнього сезону в цілому характерні дещо нижчі швидкості вітру, тому і кількісна різниця є нижчою, тоді як для зимового сезону, на противагу, значення цього показника є вищими, тому внаслідок часткового знеліснення більше виявляються кількісні зміни швидкості вітру.

За ГKM 4 зменшували лісовий покрив в усіх широтних зонах, тоді як за ГKM 5 зміни лісистості відбувалися лише частково: на сході та в центрі північної та на сході й заході (район Карпат) центральної широтних зон. Для останньої можна побачити виражені ті вузли сітки, у яких саме відбувалося найінтенсивніша заміна лісового покриву трав'яним (до 1,6 % на рік) і, як наслідок, найвищі зміни у різниці середніх місячних швидкостей вітру. Водночас

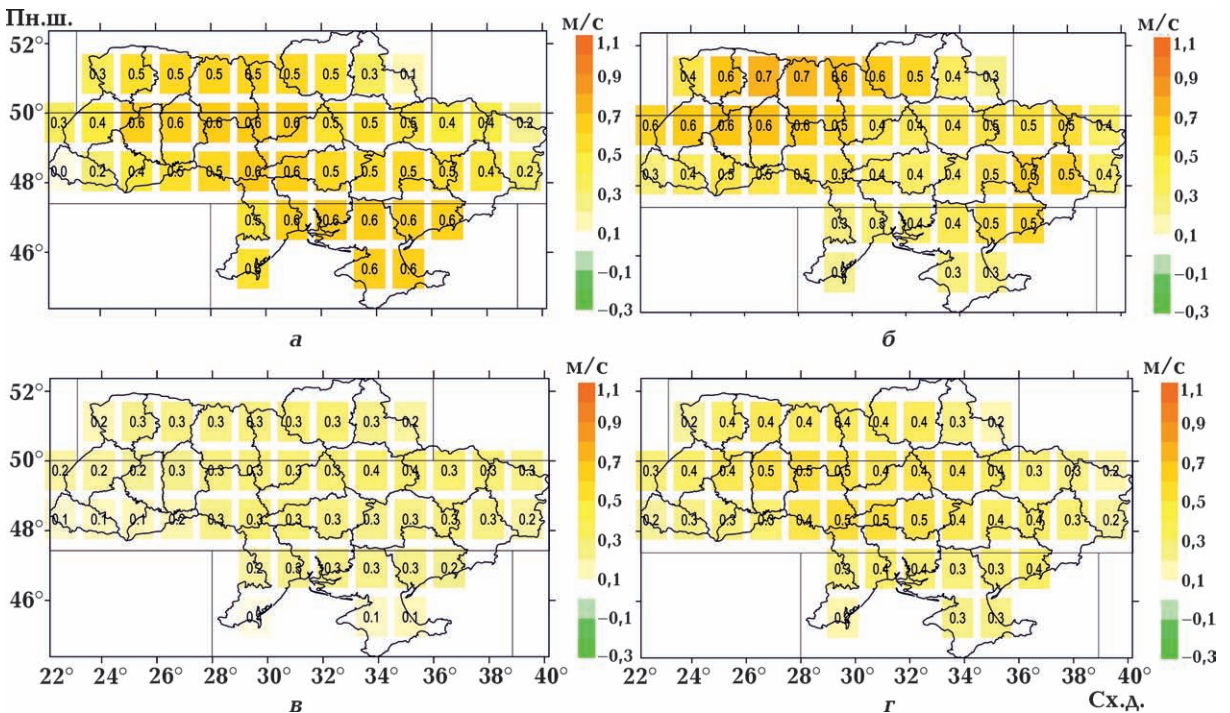


Рис. 7. Розподіл просторової різниці між середньою місячною швидкістю вітру (у м/с) за 30-річний період незмінної лісистості та 50-річного періоду часткового зменшення лісового покриву у вузлах сітки на прикладі ГKM 4 для центральних місяців кожного сезону (а — січень, б — квітень, в — липень, г — жовтень).
Fig. 7. The spatial difference between mean monthly wind speed (m/s) for 30-year period of unchanged forest cover and 50-year period of partial deforestation in grid points on the example of GCM 4 for January (a), April (b), July (v), October (r).

чітко виділяються ті вузли, де не було змін у типі підстильної поверхні, хоча для них характерні певні варіації. Інакше кажучи, простежуються певні загальні закономірності на отриманому контрасті у вузлах сітки, де було часткове знеліснення, а де — не відбувалось. За ГKM 5, на прикладі центрального місяця зимового сезону — січня (рис. 8, а), різниці між середніми місячними швидкостями вітру за період незмінного та часткового зменшення лісового покриву дорівнюють 0,7—1,2 м/с у вузлах сітки, де інтенсивно змінювали тип підстильної поверхні. Максимальні зміни властиві східним точкам центральної широтній зоні та, частково, у північній, зі значенням 0,7—1,0 м/с у вузлі сітки. Для гірського району Карпат підвищення середньої місячної швидкості вітру досягло 0,5—1,0 м/с. Водночас зауваження, що для південної широтної зони лісистість залишалася незмінною протягом усього

періоду досліджень, тому зміни швидкості вітру варіюють зі значеннями $-0,2...+0,2$ м/с, тобто вони є навіть фоновими.

Для весняного сезону, на прикладі центрального місяця квітня (рис. 8, б), як і в січні, максимальні різниці 0,7...1,1 м/с у середній місячній швидкості вітру характерні для тих самих вузлів сітки у північній та центральній широтних зонах, у той час як для інших регіонів України такі зміни коливаються у межах $-0,1$ м/с... $+0,2$ м/с.

У літній сезон, на прикладі липня (рис. 8, в), ці різниці у вузлах сітки, де безпосередньо проводили часткове знеліснення, становлять 0,6...1,0 м/с. Інакше кажучи, ці максимальні значення характерні для східної та західної (гірський регіон Карпат) частин центральної широтної зони, а також частково для півночі України. Для тих вузлів, де тип підстильної поверхні залишався сталим, зміни становлять в межах $0,1...0,3$ м/с.

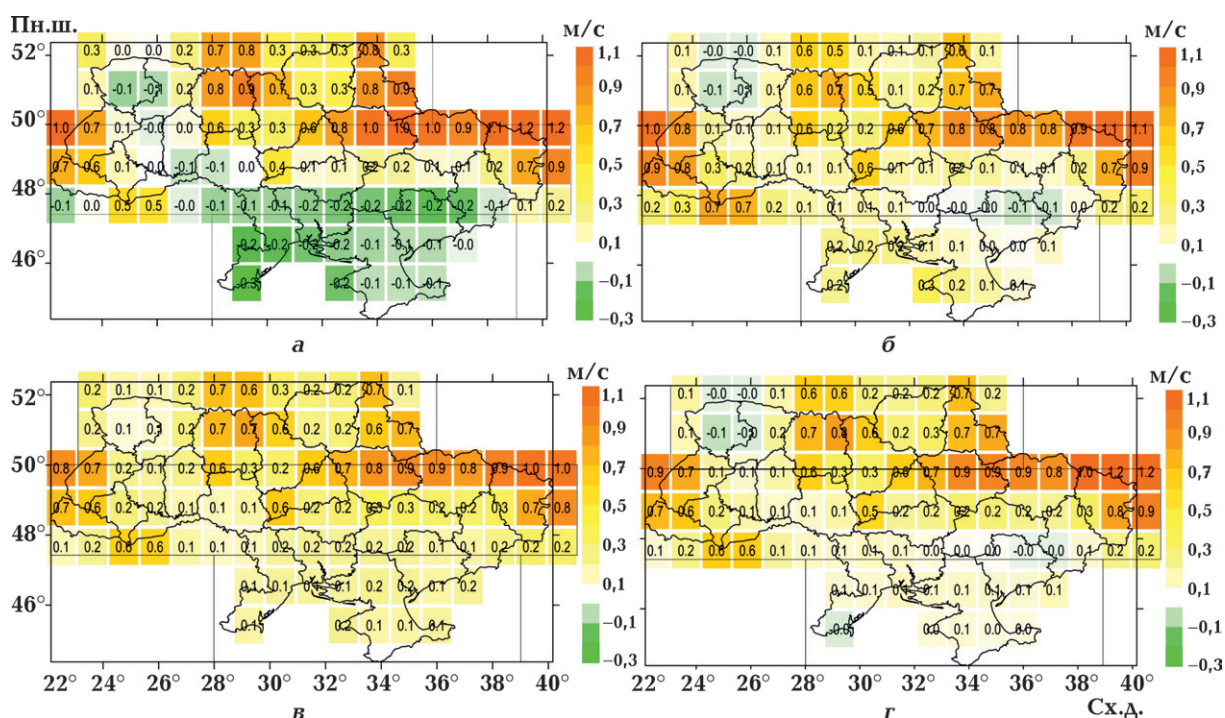


Рис. 8. Розподіл просторової різниці між середньою місячною швидкістю вітру (у м/с) за 30-річний період незмінної лісистості та 50-річного періоду часткового зменшення лісового покриву у вузлах сітки на прикладі ГKM 5 для центральних місяців кожного сезону (а — січень, б — квітень, в — липень, г — жовтень).
 Fig. 8. The spatial difference between mean month lywind speed (m/s) for 30-year period of unchanged forest cover and 50-year period of partial deforestation in grid points on the example of GCM 5 for January (a), April (b), July (v), October (r).

Восени, на прикладі жовтня, порівняно з літнім сезоном такі різниці між середніми швидкостями вітру за два підперіоди стабілізації та поступового зменшення лісистості зростають у даних вузлах сітки: 0,6—1,2 м/с у північній та центральній широтних зонах, для гірського регіону Карпат — у межах 0,6...0,9 м/с (рис. 8, г). Водночас у тих частинах зон, де лісовий покрив протягом всього часу залишався сталим, зміни варіювали зі значеннями $-0,1...0,1$ м/с.

Загалом ГKM 6 у порівнянні з рештою моделей має нижчі темпи зростання середньої швидкості вітру для деяких місяців року, а найвищі — за ГKM 5, тому що для цієї моделі характерні більші темпи знеліснення, що є закономірним наслідком.

Висновки. У статті визначено кількісні характеристики зміни середньомісячної швидкості вітру внаслідок зміни підстильної поверхні в результаті чисельного моделювання часткового знеліснення з подальшою заміною на трав'яний покрив для території України за період умовно мінімального антропогенного впливу з 1850 до 1900 року. Лінійне зменшення відсотку лісистості із трендом приблизно 1 % на рік призводило до статистично значущого зростання швидкості вітру в усі місяці року з лінійним трендом до 0,1—0,3 м/с за 10 років протягом усього періоду досліджень для всіх шести глобальних кліматичних моделей у межах території України з найбільшими значеннями для зимового сезону. Найбільш значущі зміни виявлено

у тих вузлах сітки, де безпосередньо зменшували відсоток лісів. Найбільш чутливою до знеліснення у кількісних змінах характеристик вітрового режиму виявилася ГKM 5, оскільки саме за цією моделлю з більшим кроком зменшувалася лісистість — близько 1,6 % за 10 років. За аналізом різниць середньої місячної швидкості вітру між періодом сталого лісового покриву 1900—1929 рр., якому передував період поступового знеліснення 1850—1899, виявлено зростання величини до 1,2 м/с в окремих вузлах сітки.

Отже, у статті проаналізовано кількісні зміни середньої місячної швидкості вітру внаслідок часткового знеліснення із поступовою заміною на трав'яний покрив для території України, які можна розглядати як приклад для помірного широтного поясу. Наведені результати демонструють, що потенційна кількісна зміна швидкості вітру у поєднанні з іншими чинниками може діяти на повторюваність таких небезпечних явищ, як пилові бурі, і, як наслідок, ерозію ґрунтів, що впливатиме на різні сектори економіки тощо. Результати, що отримані під час дослідження, можуть бути застосовані для вдосконалення уявлень щодо взаємодії атмосфери з підстильною поверхнею кліматичними моделями, зокрема для розробки та уточнення сценаріїв потенційних кліматичних змін на різних просторових масштабах унаслідок можливого перерозподілу типів землекористування, зокрема й через проблему знеліснення території України.

Список літератури

- Кліматичні ризики функціонування галузей економіки України в умовах зміни клімату.* Ред. С.М. Степаненко, А.М. Польовий. Одеса: ТЕС, 2018. 548 с.
- Клімат України.* Ред. В. Ліпінський, В. Дячук, В. Бабіченко. Київ: Вид-во Раєвського, 2003. 343 с.
- Малицька Л.В. Дискомфорт погодних умов зимового періоду в Україні. *Укр. гідромет. журн.* 2017. Вип. 20. С. 26—36. <https://doi.org/10.31481/uhmj.20.2017.03>.
- Мищенко З.А., Ляшенко Г.В. *Мікрокліматологія: навч. посібник.* Одеса, 2007. 336 с.
- Ошурок Д.О. Вітроенергетичні ресурси України в сучасних кліматичних умовах: *дис. канд. географ. наук: 11.00.09.* Київ: Укр. гідромет. ін-т Державної служби України з надзвичайних ситуацій та НАН України, 2020. 203 с.
- Ошурок Д.О., Скриник О.Я. Приведення даних вимірювань швидкості вітру до умов відкритої місцевості. *Гідрологія, гідрохімія і гідро-*

- екологія. 2019. № 4(55). 131—139. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2019.4.11>.
- Писаренко Л.А., Краковська С.В. Вплив знеліснення на радіаційний та термічний режими території України за даними глобальних кліматичних моделей. *Геофиз. журн.* 2021а. Т. 43. № 3. С. 135—160. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i3.236385>.
- Писаренко Л.А., Краковська С.В. Вплив знеліснення на випаровування вологи з ґрунту та рослинного покриву на території України за даними чисельного експерименту LUMIP. *Геофиз. журн.* 2021б. Т. 43. № 6. С. 221—247. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i6.251564>.
- Писаренко, Л.А., Краковська, С.В. Вплив часткового знеліснення на режим зволоження: кількості опадів та загального вмісту вологи в ґрунті за даними чисельного експерименту LUMIP для території України. *Геофиз. журн.* 2022. Т. 44. № 4. С. 124—145. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i4.264844>.
- Попова Л.О., Івус Г.П., Семергей-Чумаченко А.Б. Зміна швидкості та напрямку вітру над Одеською областю. *Матеріали III міжнар. наук. конф. молодих вчених «Сучасна гідрометеорологія: актуальні проблеми та шляхи їх вирішення», 21—23 березня 2018 р., м. Одеса, Україна*, С. 183—184.
- Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє двадцятиріччя (1986—2005 рр.)*. За ред. В.М. Ліпінського, В.І. Осадчого, В.М. Бабіченко. Київ: Ніка-Центр, 2006. 312 с.
- Шевченко О.Г., Сніжко С.І. Вітровий режим великого міста. *Вісник Київ. нац. ун-ту імені Тараса Шевченка. Географія*. 2018. Вип. 3(72). С. 13—20. <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2018.72.3>.
- Barry, R., & Hall-McKim, E.A. (2014). *Essentials of the Earth's Climate System*. Cambridge Univer. Press, 274 p.
- Bonan, G.B. (2008). Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 320, 1444—1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>.
- Bonan, G.B., Pollard, D., & Thompson, S.L. (1992). Effects of boreal forest vegetation on global climate. *Nature*, 359, 716—718. <https://doi.org/10.1038/359716a0>.
- Boysen, L., Brovkin, V., & Pongratz, J. (2018). Climatic effects of idealized deforestation experiments in Earth System Models. *Geophysical Research Abstracts*, 20. Retrieved from <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-12079.pdf>.
- Boysen, L., Brovkin, V., Pongratz, J., Lawrence, D., Lawrence, P., Vuichard, N., Peylin, Ph., Liddicoat, S., Hajima, T., Zhang, Y., Rocher, M., Delire, Ch., Séférian, R., Arora, V.K., Nieradzic, L., Anthoni, P., Thiery, W., Laguë, M., Lawrence, D., & Lo, M.-H. (2020). Global climate response to idealized deforestation in CMIP6 models. *Biogeosciences*, 17, 5615—5638. <https://doi.org/10.5194/bg-17-5615-2020>.
- Brovkin, V., Boysen, L., Pongratz, J., Vuichard, N., Peylin, P., & Lawrence, D. (2020). Model intercomparison of idealized global deforestation experiments. *EGU General Assembly, Online, 4—8 May*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-10295>.
- Boucher, O., Denvil, S., Levavasseur, G., Cozic, A., Caubel, A., Foujols, M.-A., Meurdesoif, Y.n, Cadule, P., Devilliers, M., Ghattas, J., Lebas, N., Lurton, T., Mellul, L., Musat, I., Mignot, J., & Cheruy, Fr. (2018). IPSL IPSL-CM6A-LR model output prepared for CMIP6 CMIP. *Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1534>.
- CMIP Phase 6 (CMIP6). (2023). Retrieved from <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>.
- Danabasoglu, G. (2019). NCAR CESM2 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. *Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.7627>.
- ESGF: WCRP Coupled Model Intercomparison Project. (2023). Retrieved from <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., & Taylor, K.E. (2016). Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937—1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.
- Huang, B., Hu, X., Fuglstad, G.-A., Zhou, X., Zhao, W., & Cherubini, F. (2020). Predominant regional biophysical cooling from recent land

- cover changes in Europe. *Nature Communications*, 11. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14890-0>.
- IPCC. *Climate change*. (2014). Synthesis report. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf.
- IPCC. *Frequently Asked Questions*. (2018). Retrieved from: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/12/SR15_FAQ_Low_Res.pdf.
- IPCC. *Sixth Assessment Report Working Group 1: The Physical Science Basis*. (2021). Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- IPCC. *Sixth Assessment Report Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (2022a). Retrieved from https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf.
- IPCC. *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. (2011). Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/>.
- IPCC Working Group I (WGI): *Sixth Assessment Report. IPCC WGI Interactive Atlas*. (2022b). Retrieved from <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>.
- Lawrence, D.M., Hurtt, G.C., Arneth, A., Brovkin, V., Calvin, K.V., Jones, A.D., Jones, C.D., Lawrence, P.J., deNoblet-Ducoudré, N., Pongratz, J., Seneviratne, S.I., & Shevliakova, E. (2016). The Land Use Model Intercomparison Project (LUMIP) contribution to CMIP6: rationale and experimental design. *Geoscientific Model Development*, 9, 2973—2998. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2973-2016>.
- Karamushka, V., Boychenko, S., Kuchma, T., & Zabarna, O. (2022). Trends in the Environmental Conditions, Climate Change and Human Health in the Southern Region of Ukraine. *Sustainability*, 14(9), 5664. <https://doi.org/10.3390/su14095664>.
- Sanderson, M., Santini, M., Valentini, R., & Pope, E. (2012). Relationships between forests and weather. *EC Directorate General of the Environment 13th January 2012*. Retrieved from http://ec.europa.eu/environment/forests/pdf/EU_Forests_annex1.pdf.
- Seferian, R. (2018). CNRM-CERFACS CNRM-ESM2-1 model output prepared for CMIP6 CMIP. *Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1391>.
- Shevchenko, O., Snizhko, S., & Matviienko, M. (2019). Human-biometeorological assessment of Kharkiv (Ukraine) in the summer season. *Hrvatski Meteorološki Časopis*, 54(54/55), 43—54. <https://doi.org/10.37982/hmc.54.55.1.4>.
- Sospedra-Alfonso, R., Lee, W., Merryfield, W.J., Swart, C.N., Cole, J.N.S., Kharin, V.V., Lazare, M., Scinocca, J.F., Gillett, N.P., Anstey, J., Arora, V., Christian, J.R., Jiao, Y., Lee, W.G., Majaess, F., Saenko, O., Seiler, Ch., Seinen, C., Shao, A., Solheim, L., von Salzen, K., Yang, D., Winter, B., & Sigmund, M. (2019). CCCma CanESM5 model output prepared for CMIP6 DCPP. *Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1306>.
- Tang, Y., Rumbold, S., Ellis, R., Kelley, D., Mulcahy, J., Sellar, A., Walton, J., & Jones, C. (2019). MOHC UKESM1.0-LL model output prepared for CMIP6 CMIP historical. *Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6113>.
- Thom, D., Rammer, W., & Seidl, R. (2017). The impact of future forest dynamics on climate: interactive effects of changing vegetation and disturbance regimes. *Ecological Monographs*, 87(4), 665—684. <https://doi.org/10.1002/ecm.1272>.
- The World Climate Research Programme*. (2023). Retrieved from <https://www.wcrp-climate.org/about-wcrp/wcrp-overview>.
- Wu, T., Chu, M., Dong, M., Fang, Y., Jie, W., Li, J.L., Weiping, L., Qianxia, S., Xueli, X., Yan, J., Zhang, F., Zhang, J., Zhang, L., & Zhang, Y. (2018). BCC BCC-CSM2MR model output prepared for CMIP6 CMIP historical. *Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.2948>.

The impact of forest cover decrease on the wind regime changes for the territory of Ukraine based on data of the global numerical experiment LUMIP

L.A. Pysarenko^{1,2}, S.V. Krakovska^{1,2}, 2023

¹Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²State Institution «National Antarctic Scientific Center of the Ministry of Education and Science of Ukraine», Kyiv, Ukraine

The article analyses and estimates the influence of partial deforestation on wind regime based on the global numerical experiment Land Use Model Intercomparison Project (LUMIP). This experiment is one of the components of the global project Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP 6). LUMIP aims to evaluate changes in climate characteristics and biogeochemical cycles due to partial global deforestation with subsequent grassland establishment. A given period of retrospective modelling is divided into two subperiods. The first covers a time frame of 1850—1899 and a so-called subperiod with a minimum anthropogenic influence. During these modelled 50 years, the partial forest cover shrinkage was conducted with a trend of 1 % per year the nodes where the forest cover exceeded 30 %. In the second subperiod (1900—1929), the forest cover was stable. Our previous papers concerned the influence of partial deforestation on the radiation, temperature, and moisture regimes in Ukraine. The present paper continues the analysis and is dedicated to the impact of partial deforestation on changes in the mean monthly wind surface speed based on data from available Global Climate Models (GCMs). Deforestation caused quantitative changes in wind speed during all months of the year for all GCMs used in the research, however, with a different sensitivity. Maximum changes were obtained from the model with the biggest step in forest cover shrinkage among all GCMs, approximately 1.6 % a node. It should be emphasized that the biggest changes occurred in the nodes where the forest was substituted with grassland. The obtained correlations of the deforestation and mean monthly wind speed were moderately or highly negative for all seasons. The maximum wind speed and the highest changes are during the winter. In January, for example, the maximum changes can reach up to 0.3 m/s per 10 years. During spring and autumn, such tendencies generally vary up to 0.1—0.2 m/s per 10 years. The differences in wind speed between the subperiod of stable forest cover and the partial deforestation are up to 1.2 m/s at a particular grid point on the territory of Ukraine.

Key words: LUMIP, Global Climate Model, forest cover, wind speed, deforestation.

References

- Stepanenko, S.M., & Polevoy, A.M. (2018). *Climatic risks of functioning of branches of the economy of Ukraine in the conditions of climate change*. Odesa: TES, 548 p. (in Ukrainian).
- Lipinsky, V., Dyachuk, V., & Babichenko, V. (Eds.). (2003). *Climate of Ukraine*. Kyiv: Rayevskyy Publishing, 343 p. (in Ukrainian).
- Malytska, L.V. (2017). Discomfort of weather conditions during winter period in Ukraine. *Ukrainian Hydrometeorological Journal*, 20, 26—36. <https://doi.org/10.31481/uhmj.20.2017.03> (in Ukrainian).
- Mishchenko, Z.A., & Liashenko, G.V. (2007). *Microclimatology: Tutorial*. Odesa, 336 p. (in Ukrainian).

- Oshurok, D.O. (2020). Windenergy resources in Ukraine under the current climatic conditions. *Candidate's thesis*. Kyiv: Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine and NASU, 203 p. (in Ukrainian).
- Oshurok, D.O., & Skrynyk, O.Y. (2019). Correction of wind speed data according to the open terrain conditions. *Hidrolohiia, hidrokhimiia i hidroekolohiia*, (4), 131—139. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2019.4.11> (in Ukrainian).
- Pysarenko, L.A., & Krakovska, S.V. (2021a). Impact of deforestation on radiative and thermal regimes of the territory of Ukraine on the base of global climate models data. *Geofizicheskii Zhurnal*, 43(3), 135—160. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i3.236385> (in Ukrainian).
- Pysarenko, L.A., & Krakovska, S.V. (2021b). Impact of deforestation on moisture evaporation from soil and canopy for the territory of Ukraine based on data of numerical experiment LUMIP. *Geofizicheskii Zhurnal*, 43(6), 221—247. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i6.251564> (in Ukrainian).
- Pysarenko, L.A., & Krakovska, S.V. (2022). The influence of partial deforestation on moisture regime: sums of precipitation and total soil moisture content for the territory of Ukraine based on data of numerical experiment LUMIP. *Geofizicheskii Zhurnal*, 44(4), 124—145. <https://doi.org/10.24028/gj.v44i4.264844> (in Ukrainian).
- Popova, L.O., Ivus, H.P., & Semerhei-Chumachenko, A.B. (2018). Change in wind speed and direction over Odesa region. *Proc. of the third international conference for young scientist on modern hydro meteorology: topical issues and the solutions*, 21—23 March 2018, Odesa, Ukraine (pp. 183—184).
- Lipinsky, V.M., Osadchyy, V.I., Babichenko, V.M. (Eds.). (2006). *Natural Meteorological Phenomena on the Territory of Ukraine for the Last Twenty Years (1986—2005)*. Kyiv: Nika-Center, 312 p.
- Shevchenko, O.G., & Snizhko, S.I. (2018). Big city wind regime. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Geography*, (3), 13—20. <http://doi.org/10.17721/1728-2721.2018.72.3>.
- Barry, R., & Hall-McKim, E.A. (2014). *Essentials of the Earth's Climate System*. Cambridge Univer. Press, 274 p.
- Bonan, G.B. (2008). Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science*, 320, 1444—1449. <https://doi.org/10.1126/science.1155121>.
- Bonan, G.B., Pollard, D., & Thompson, S.L. (1992). Effects of boreal forest vegetation on global climate. *Nature*, 359, 716—718. <https://doi.org/10.1038/359716a0>.
- Boysen, L., Brovkin, V., & Pongratz, J. (2018). Climatic effects of idealized deforestation experiments in Earth System Models. *Geophysical Research Abstracts*, 20. Retrieved from <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2018/EGU2018-12079.pdf>
- Boysen, L., Brovkin, V., Pongratz, J., Lawrence, D., Lawrence, P., Vuichard, N., Peylin, Ph., Liddicoat, S., Hajima, T., Zhang, Y., Rocher, M., Delire, Ch., Séférian, R., Arora, V.K., Nieradzik, L., Anthoni, P., Thiery, W., Laguë, M., Lawrence, D., & Lo, M.-H. (2020). Global climate response to idealized deforestation in CMIP6 models. *Biogeosciences*, 17, 5615—5638. <https://doi.org/10.5194/bg-17-5615-2020>.
- Brovkin, V., Boysen, L., Pongratz, J., Vuichard, N., Peylin, P., & Lawrence, D. (2020). Model intercomparison of idealized global deforestation experiments. *EGU General Assembly, Online*, 4—8 May. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-10295>.
- Boucher, O., Denvil, S., Levvasseur, G., Cozic, A., Caubel, A., Foujols, M.-A., Meurdesoif, Y.n, Cadule, P., Devilliers, M., Ghattas, J., Lebas, N., Lurton, T., Mellul, L., Musat, I., Mignot, J., & Cheruy, Fr. (2018). IPSL IPSL-CM6A-LR model output prepared for CMIP6 CMIP. *Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1534>.
- CMIP Phase 6 (CMIP6). (2023). Retrieved from <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>.
- Danabasoglu, G. (2019). NCAR CESM2 model output prepared for CMIP6 CMIP historical. *Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.7627>.
- ESGF: WCRP Coupled Model Intercomparison Project. (2023). Retrieved from <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>.
- Eyring, V., Bony, S., Meehl, G.A., Senior, C.A., Stevens, B., Stouffer, R.J., & Taylor, K.E. (2016).

- Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase6 (CMIP6) experimental design and organization. *Geoscientific Model Development*, 9, 1937—1958. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-1937-2016>.
- Huang, B., Hu, X., Fuglstad, G.-A., Zhou, X., Zhao, W., & Cherubini, F. (2020). Predominant regional biophysical cooling from recent land cover changes in Europe. *Nature Communications*, 11. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14890-0>.
- IPCC. *Climate change*. (2014). Synthesis report. Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/SYR_AR5_FINAL_full_wcover.pdf.
- IPCC. *Frequently Asked Questions*. (2022a). Retrieved from: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/12/SR15_FAQ_Low_Res.pdf.
- IPCC. *Sixth Assessment Report Working Group 1: The Physical Science Basis*. (2021). Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- IPCC. *Sixth Assessment Report Impacts, Adaptation and Vulnerability. Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. (2022a). Retrieved from https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/downloads/report/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf.
- IPCC. *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*. (2011). Retrieved from <https://www.ipcc.ch/report/renewable-energy-sources-and-climate-change-mitigation/>.
- IPCC Working Group I (WGI): *Sixth Assessment Report. IPCC WGI Interactive Atlas*. (2022b). Retrieved from <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>.
- Lawrence, D.M., Hurtt, G.C., Arneth, A., Brovkin, V., Calvin, K.V., Jones, A.D., Jones, C.D., Lawrence, P.J., deNoblet-Ducoudré, N., Pongratz, J., Seneviratne, S.I., & Shevliakova, E. (2016). The Land Use Model Intercomparison Project (LUMIP) contribution to CMIP6: rationale and experimental design. *Geoscientific Model Development*, 9, 2973—2998. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-2973-2016>.
- Karamushka, V., Boychenko, S., Kuchma, T., & Zabarna, O. (2022). Trends in the Environmental Conditions, Climate Change and Human Health in the Southern Region of Ukraine. *Sustainability*, 14(9), 5664. <https://doi.org/10.3390/su14095664>.
- Sanderson, M., Santini, M., Valentini, R., & Pope, E. (2012). Relationships between forests and weather. *EC Directorate General of the Environment 13th January 2012*. Retrieved from http://ec.europa.eu/environment/forests/pdf/EU_Forests_annex1.pdf.
- Seferian, R. (2018). CNRM-CERFACS CNRM-ESM2-1 model output prepared for CMIP6 CMIP. *Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1391>.
- Shevchenko, O., Snizhko, S., & Matviienko, M. (2019). Human-biometeorological assessment of Kharkiv (Ukraine) in the summer season. *Hrvatski Meteorološki Časopis*, 54(54/55), 43—54. <https://doi.org/10.37982/hmc.54.55.1.4>.
- Sospedra-Alfonso, R., Lee, W., Merryfield, W.J., Swart, C.N., Cole, J.N.S., Kharin, V.V., Lazare, M., Scinocca, J.F., Gillett, N.P., Anstey, J., Arora, V., Christian, J.R., Jiao, Y., Lee, W.G., Majaess, F., Saenko, O., Seiler, Ch., Seinen, C., Shao, A., Solheim, L., vonSalzen, K., Yang, D., Winter, B., & Sigmund, M. (2019). CCCma CanESM5 model output prepared for CMIP6 DCPP. *Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.1306>.
- Tang, Y., Rumbold, S., Ellis, R., Kelley, D., Mulcahy, J., Sellar, A., Walton, J., & Jones, C. (2019). MOHC UKESM1.0-LL model output prepared for CMIP6 CMIP historical. *Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.6113>.
- Thom, D., Rammer, W., & Seidl, R. (2017). The impact of future forest dynamics on climate: interactive effects of changing vegetation and disturbance regimes. *Ecological Monographs*, 87(4), 665—684. <https://doi.org/10.1002/ecm.1272>.
- The World Climate Research Programme*. (2023). Retrieved from <https://www.wcrp-climate.org/about-wcrp/wcrp-overview>.
- Wu, T., Chu, M., Dong, M., Fang, Y., Jie, W., Li, J.L., Weiping, L., Qianxia, S., Xueli, X., Yan, J., Zhang, F., Zhang, J., Zhang, L., & Zhang, Y. (2018). BCC BCC-CSM2MR model output prepared for CMIP6 CMIP historical. *Earth System Grid Federation*. <https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.2948>.