

Вплив знеліснення на випаровування вологи з ґрунту та рослинного покриву на території України за даними чисельного експерименту LUMIP

Л.А. Писаренко¹, С.В. Краковська^{1,2}, 2021

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

²Державна установа Національний антарктичний науковий центр МОН України, Київ, Україна

Надійшла 25 серпня 2021 р.

Проаналізовано вплив глобального часткового знеліснення на просторово-часовий розподіл витратної частини балансу вологи, а саме випаровування з ґрунту та рослинного покриву для території України за мінімального антропогенного впливу. Для дослідження використано дані шести глобальних кліматичних моделей теоретичного експерименту Land Use Model Intercomparison Project (LUMIP). Мета — виявити вплив глобального зменшення лісового покриву з подальшою його заміною на трав'яний на розподіл кліматичних характеристик у період з 1850 до 1929 р., коли лісовий покрив зменшувався з трендом 400 тис. км²/рік у доіндустріальний період 1850—1899 рр., або період мінімального і порівняно сталого антропогенного навантаження, та у наступні 30 років він залишався без змін. Для встановлення впливу знеліснення проводили нормування за середніми показниками за перше 20-річчя (1850—1869) та знаходили аномалії відносно вказаних показників як різницю до значень у цей базовий період. Зменшення лісистості з подальшою його заміною на трав'яний покрив зумовлює зростання значень середнього місячного випаровування з поверхні ґрунту з трендом до 1,6 мм/10 років у теплий сезон з більшими змінами у квітні—липні, оскільки знеліснення спричиняє більше відкриття ґрунту. Це підтверджується кореляційними зв'язками $-0,8 \dots -0,4$ з максимальними значеннями у квітні, коли ще мало розвинений трав'яний покрив може перешкоджати інтенсивному випаровуванню. На противагу йому, у моделях випаровування з рослинного покриву зменшується разом зі знелісненням, оскільки зменшується доступна поверхня для випаровування. Такий ефект виявлено переважно у вузлах сітки моделей, де штучно зменшували лісистість, в усі сезони року, проте він є найбільшим у весняні та літні місяці із середніми місячними значеннями до $-0,8$ мм/10 років і коефіцієнтами кореляції $0,4 \dots 0,9$ залежно від моделі та сезону року. Отже, в моделюванні ефекту глобального часткового знеліснення отримано зростання випаровування з поверхні ґрунту одночасно зі зменшенням випаровування з рослинного покриву на території України. Такі зміни можуть привести до перерозподілу вологи між складовими водного балансу території, що має вплинути на її гідрологічні, агрометеорологічні та інші характеристики. Зокрема, збільшення випаровування з поверхні ґрунту через знеліснення може спричинити інтенсивніше висушування та деградацію ґрунтів. Вплив знеліснення на загальний вологовміст ґрунту і режим випадання опадів буде розглянуто у наступній публікації.

Ключові слова: LUMIP, знеліснення, лісистість, випаровування з поверхні ґрунту, випаровування з рослинного покриву.

Вступ. Постановка проблеми. Сучасні дослідження в кліматології засвідчують, що клімат змінюється в усіх регіонах планети і виявляється не тільки через зростання приземної температури повітря, а навіть великою мірою внаслідок збільшення кількості

та інтенсивності екстремальних і небезпечних явищ погоди, наприклад тих, що пов'язані з колообігом води. Саме посухи, паводки, тропічні циклони, інтенсивні зливи наносять значні матеріальні збитки і призводять до людських жертв. Тому сучасні кліматичні зміни визнають як глобальну кризу для людства [IPCC ..., 2019; Climate ..., 2021; WMO ..., 2021]. Зміну клімату можна розглядати через зміну параметрів, кожен з яких відіграє важливу роль у функціонуванні кліматичної системи та формує численні взаємозв'язки. Прояви зміни клімату можуть різнитися над різними територіями, що потребує проведення досліджень на регіональному та локальному рівнях для розроблення ефективних заходів адаптації у різних секторах економіки тощо. В Україні кліматичні дослідження розпочались із середини ХІХ ст. та з кінця ХХ ст. Кліматологами доведено, що зміни кліматичних параметрів перевищили природну мінливість й істотно впливають на екосистеми, сектори економіки та здоров'я людини [Бойченко, Забарна, 2019; Волощук та ін., 2002; Кліматичні ..., 2018; Клімат ..., 2003; Краковська та ін., 2016, 2017; Krakovska et al., 2021; Хохлов, Єрмоленко, 2015; Швиденко та ін., 2018; Boychenko et al., 2016, 2018; Malyska, Balabukh, 2018; Shevchenko et al., 2020a, б; Snizhko et al., 2020 та ін.].

Серед кліматичних показників важливу роль на регіональному масштабі відіграють зміни балансу вологи, який складається з кількості вологи, що надходить у вигляді атмосферних опадів і випаровується з поверхні. В Україні баланс вологи переважно досліджено в контексті надходження вологи за рахунок опадів [Адаменко, 2014; Балабух та ін., 2018; Клімат ..., 2003; Краковська та ін., 2017; Мартазінова, Щеглов, 2018; Паламарчук та ін., 2014; Хохлов та ін., 2020; Шевченко, 2014; Balabukh et al., 2018]. Однак для визначення зволоження території також важливу роль відіграє випаровування з підстильної поверхні, що залежить від її типу та кліматичних показників території [Рахманов, 1984; Morton, 1984; Smith, Smith, 2001; Novak, 2012]. Слід зауважити, що станцій спостережень за випаровуванням з підстильної поверхні недостатньо для формування мережі, оскільки

існують певні інструментальні обмеження у безпосередніх вимірах кількості вологи, що випаровується з підстильної поверхні. Зазвичай її визначають для відкритих водойм і потім вводять перехідні коефіцієнти для різних типів поверхонь та метеорологічних параметрів: температури і відносної вологості повітря, швидкості вітру [Guide ..., 2008, 2018].

В Україні випаровування досліджено з позиції узагальнюючих кліматичних норм [Клімат ..., 2003], гідрології [Горбачова, 2014; Гребінь, 2010; Липченко та ін., 2006; Лобода, Божок, 2016; Осипов та ін., 2021], агрометеорології, лісівництва, ботаніки тощо [Адаменко, 2014; Букша та ін., 2017; Олійник, Рак, 2018; Орлова, 2009; Польовий, 2012, 2015; Швиденко та ін., 2018; Adamenko et al., 2016; Shvidenko et al., 2017]. Розроблені також кліматичні проєкції на майбутнє для кількості опадів в Україні [Краковська та ін., 2017], які було застосовано, зокрема, й для лісівництва [Букша та ін., 2017; Балабух, Зібцев, 2016; Швиденко та ін., 2018; Buksha et al., 2014; Shvidenko et al., 2017]. Проте у зазначених публікаціях увагу зацентровано на тому, як розподіл кліматичних характеристик (температури повітря та ґрунту, опадів, випаровуваності, випаровування тощо) може вплинути на лісові масиви та біорізноманіття. Втім зворотний вплив зміни підстильної поверхні на регіональні кліматичні показники в Україні не розглядали.

Разом зі змінами клімату в Україні актуальною є проблема знеліснення, що спонукає до створення механізмів відновлення лісових насаджень [Стратегія ..., 2019; Повідомлення ..., 2020]. Як відомо, ліси відіграють важливу роль в екосистемах, зокрема, поглинаючи CO₂ та виділяючи кисень [Дронова, Кузнєцова, 2016; Букша, Пастернак, 2005; Kulmala et al., 2020]. Процеси випаровування у лісах знижують температуру повітря, хоча може бути й зворотний ефект через низьке альbedo [Bonan, 2008]. Багато досліджень присвячені взаємодії зміни клімату та лісів, але більше уваги приділяють тому, як перерозподіл кліматичних характеристик за умов антропогенної діяльності впливає на сьогодні та вплине у майбутньому на

ліси, зокрема на придатність кліматичних умов території до поширення лісів, їх біорізноманіття, продуктивність тощо [Букша та ін., 2017; Швиденко та ін., 2018]. Чимало досліджень присвячено тропічним й бореальним лісам і їх впливу на глобальний та регіональний клімат [Bonan et al., 1992; Bonan, 2008; Boysen et al., 2018, 2020; Brovkin et al., 2020; Gao Y., 2016; Gauthier et al., 2015; Lindner et al., 2010; Snyder et al., 2004, Spracklen et al., 2008; Wang et al., 2014]. Ліси помірної зони займають проміжне місце між тропічними та бореальними лісами, проте їм присвячено менше публікацій [Fischer, 2019; Groisman et al., 2009; Hofmeister et al., 2019], тому багато питань залишаються малодослідженими.

Актуальною є також проблема оцінювання впливу знеліснення на клімат, оскільки велика площа лісів упродовж минулого століття зникла через масові вируби, які продовжуються і нині [IPCC, 2019]. Вирішенню цієї проблеми присвячений глобальний чисельний експеримент Land Use Model Intercomparison Project (LUMIP) [Lawrence et al., 2016], який є частиною проєкту Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) [CMIP ..., 2021]. У цьому проєкті важливе місце відведено ретроспективному моделюванню за допомогою глобальних кліматичних моделей (ГКМ) з метою виявлення змін у кліматичній системі, зокрема, за мінімального антропогенного впливу. Одним із таких експериментів є LUMIP, мета якого — оцінювання саме впливу зменшення лісистості у глобальному масштабі на зміну радіаційного, температурного, вологісного та вітрового режимів, біогеохімічні цикли тощо за умов незначного антропогенного навантаження. Незважаючи на те, що експеримент виконано декілька років тому, лише нещодавно почали з'являтися публікації на основі аналізу даних LUMIP. Проте проаналізовано лише річні характеристики температури та опадів у глобальному масштабі з більшою увагою на бореальні та тропічні ліси без переходу на регіональні масштаби і сезони [Boysen et al., 2018, 2020; Brovkin et al., 2020].

У попередній статті оцінено характерис-

тики радіаційного та термічного режимів під час зменшення площі лісів для території України за умов мінімального антропогенного впливу [Писаренко, Краковська, 2021]. Очевидно, що суттєвих наслідків зазнає і баланс вологи території внаслідок впливу зміни температурного режиму передусім на його витратну частину, а саме випаровування вологи як з поверхні ґрунту, так і з самих рослин, яке у поєднанні з випаровуванням унаслідок їх дихання називають евапотранспірацією.

Мета статті — аналіз регіональних особливостей впливу глобального знеліснення на витратну частину балансу вологи для території України за мінімального антропогенного навантаження.

Матеріали і методи. У статті використано дані шести глобальних кліматичних моделей експерименту LUMIP (із сайту The Earth System Grid Federation [ESGF ..., 2021]), що охоплює історичний період 1850—1929 рр. та входить до проєкту CMIP6 [CMIP6]. На відміну від попередньої статті [Писаренко, Краковська, 2021] у цьому дослідженні застосовано не п'ять, а шість моделей, список і розташування вузлів яких наведено в таблиці та на рис. 1. У подальшому моделі названо за порядковим номером у таблиці.

Метою LUMIP є виявлення впливу часткового глобального знеліснення на глобальні та регіональні кліматичні характеристики за мінімального антропогенного навантаження у період 1850—1929 рр. За сценарієм експерименту протягом перших 50 років (1850—1899), які розглянуто як доіндустріальний період, поступово зменшували лісистість з подальшою заміною її на траву з трендом близько 1 % на рік, або 400 тис. км²/рік. У наступні 30 років (1900—1929) лісовий покрив стабілізувався і залишався без змін. Авторами попередньо описано та використано дані експерименту у статті [Писаренко, Краковська, 2021] для аналізу та дослідження змін радіаційного і термічного режиму території України. Методика опрацювання даних LUMIP у цілому є подібною.

На рис. 1 показано координатну сітку моделей, у вузлах якої проаналізовано дані щодо території України. Схему зменшення лі-

систості (%) з часом на прикладі півночі України (50° — $52,5^{\circ}$ пн. ш.) для ГKM1 наведено в публікації [Писаренко, Краковська, 2021]. Для аналізу показників виділено широтні зони (рис. 1):

1) $52,5^{\circ}$ — $50,0^{\circ}$ пн. ш. — північ країни, переважно Полісся (північна широтна зона);

2) $50,0^{\circ}$ — $47,5^{\circ}$ пн. ш. — центральна частина України (центральна широтна зона), переважно лісостеп;

3) $47,5^{\circ}$ — 44° пн. ш. — південь країни (південна широтна зона), переважно степ.

На рис. 2 показано початкові дані лісистості (а), зміну за 50 років (б) та кінцеві дані лісистості (в), як у статті [Писаренко, Краковська, 2021], але з додаванням ще однієї моделі (ГKM5 — BCC-CSM2-MR). З рис. 2 очевидно, що ГKM мають різні сітку та лісистість, тому кожену модель аналізували окремо. Оскільки початкові дані лісистості є різними, змінювали її для кожної моделі з різним кроком, проте пропорційно початковому стану.

У більшості моделей лісистість поступово замінювали на трав'яний покрив у вузлах сітки, де лісистість перевищує 30 %. У деяких моделях зміни були там, де лісис-

тість мала найвищі значення, як у ГKM2, де на територію України припадає лише 3 вузли сітки зі зміненим лісовим покривом (рис. 2). Слід зазначити, що за ГKM5 лісистість змінювали з більшим кроком — приблизно 1,2—1,3 %/рік, тоді як за більшістю моделей цей крок становив 0,4—1,0 %/рік. Для цієї моделі характерне максимальне значення лісистості у вузлі сітки серед усіх моделей — 80,4 % (схід центральної широтної зони). ГKM4 у цілому характеризується високими значеннями лісистості в усіх трьох широтних зонах, і, відповідно, знеліснення проводили на всій території України, тоді як за більшістю моделей ці зміни відбувалися не в усіх вузлах сітки. За ГKM3 лісистість змінювали протягом всього чисельного експерименту 1850—1929 рр.

У наведеному дослідженні проаналізовано дві характеристики випаровування: з рослинного покриву та з поверхні ґрунту, які є складовими евапотранспірації, що в контексті балансу вологи розглянуто як процес, протилежний надходженню вологи у вигляді опадів. Інакше кажучи, евапотранспірація та опади є складовими колообігу води в кліматичній системі та основою балансу вологи території, що визначає, зокрема, і її тип клімату.

Список ГKM, що використано у дослідженні [Писаренко, Краковська, 2021]

Но-мер	Модель	Організація-розробник, країна	Сітка (довгота × широта)
1	CanESM5	The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCma), Канада	$2,8125^{\circ} \times 2,76727^{\circ}$
2	IPSL-CM6A-LR	The Institute Pierre-Simon Laplace (IPSL), Франція	$2,5^{\circ} \times 1,26761^{\circ}$
3	UKESM1-0-LL	The Met Office Hadley Centre (MOHC), Великобританія	$1,875^{\circ} \times 1,25^{\circ}$
4	CNRM-ESM2-1	National Centre for Meteorological Research and Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CNRM-CERFACS), Франція	$1,40625^{\circ} \times 1,38903^{\circ}$
5	BCC-CSM2-MR	The Beijing Climate Center (BCC), Китай	$1,125^{\circ} \times 1,11209^{\circ}$
6	CESM2	The National Center for Atmospheric Research, США	$1,25^{\circ} \times 0,9424^{\circ}$

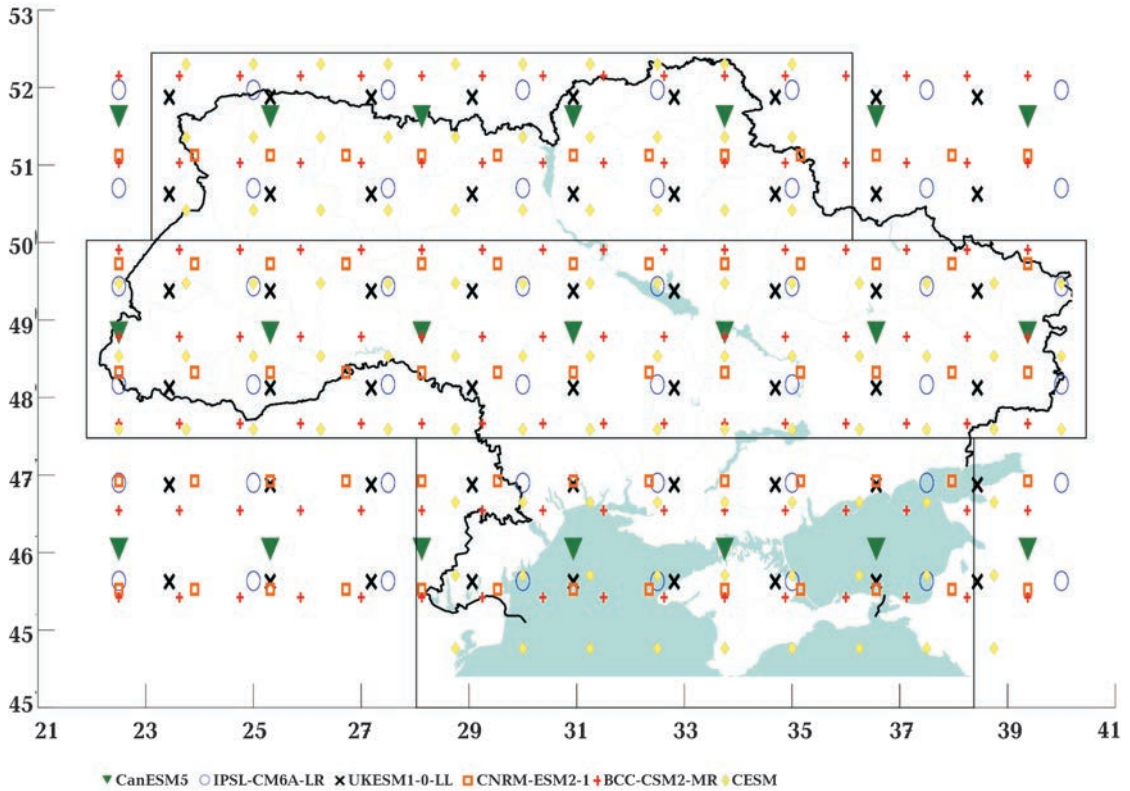


Рис. 1. Розташування широтних зон і вузлів координатної сітки глобальних кліматичних моделей (див. таблицю) експерименту LUMIP [Писаренко, Краковська, 2021].

Fig. 1. The location of latitudinal zones and grid points of the GCMs from the LUMIP experiment (see Table) [Pysarenko, Krakovska, 2021].

Розрахунки та дослідження виконано за схемами, які показано на рис. 3. Для вказаних показників визначали середні значення за кожен місяць у базовий період — перше двадцятиріччя — 1850—1869 рр. Надалі знаходили різницю між усередненим значенням за кожен місяць та усередненим 20-річним значенням за відповідний місяць. Таким чином, отримували аномалії кожного показника, які згладжували 5-річним ковзним середнім та проводили кореляції між 5-річним ковзним середнім зменшення лісистості та відповідним показником. Статистичну значущість трендів зміни розраховували за коефіцієнтом Фішера ($F > 3,13—3,18$). Для визначення змін було розраховано також різницю між усередненими значеннями за 30-річний період сталого лісового покриву 1900—1929 рр. та попередній 50-річний період змін 1850—1899 рр. Алго-

ритм розрахунків випаровування з поверхні ґрунту та з поверхні рослинного покриву (в мм) представлено на рис. 3, а, б.

Основні результати. Випаровування з поверхні ґрунту. Знеліснення вочевидь впливає на випаровування вологи з поверхні ґрунту, оскільки при заміні лісового покриву на трав'яний відбувається більше відкриття ґрунту.

У цьому дослідженні проаналізовано щомісячні дані, за якими встановлено, що у зимовий сезон відсутні чіткі зв'язки між аномаліями випаровування з ґрунту та зменшенням лісового покриву, оскільки можуть впливати такі чинники, як низька температура, наявність снігового покриву та ін. На рис. 4 показано результати для січня, які підтверджують цей висновок.

Для весняних місяців, зокрема у березні, як і для зимового сезону, вплив знеліснен-

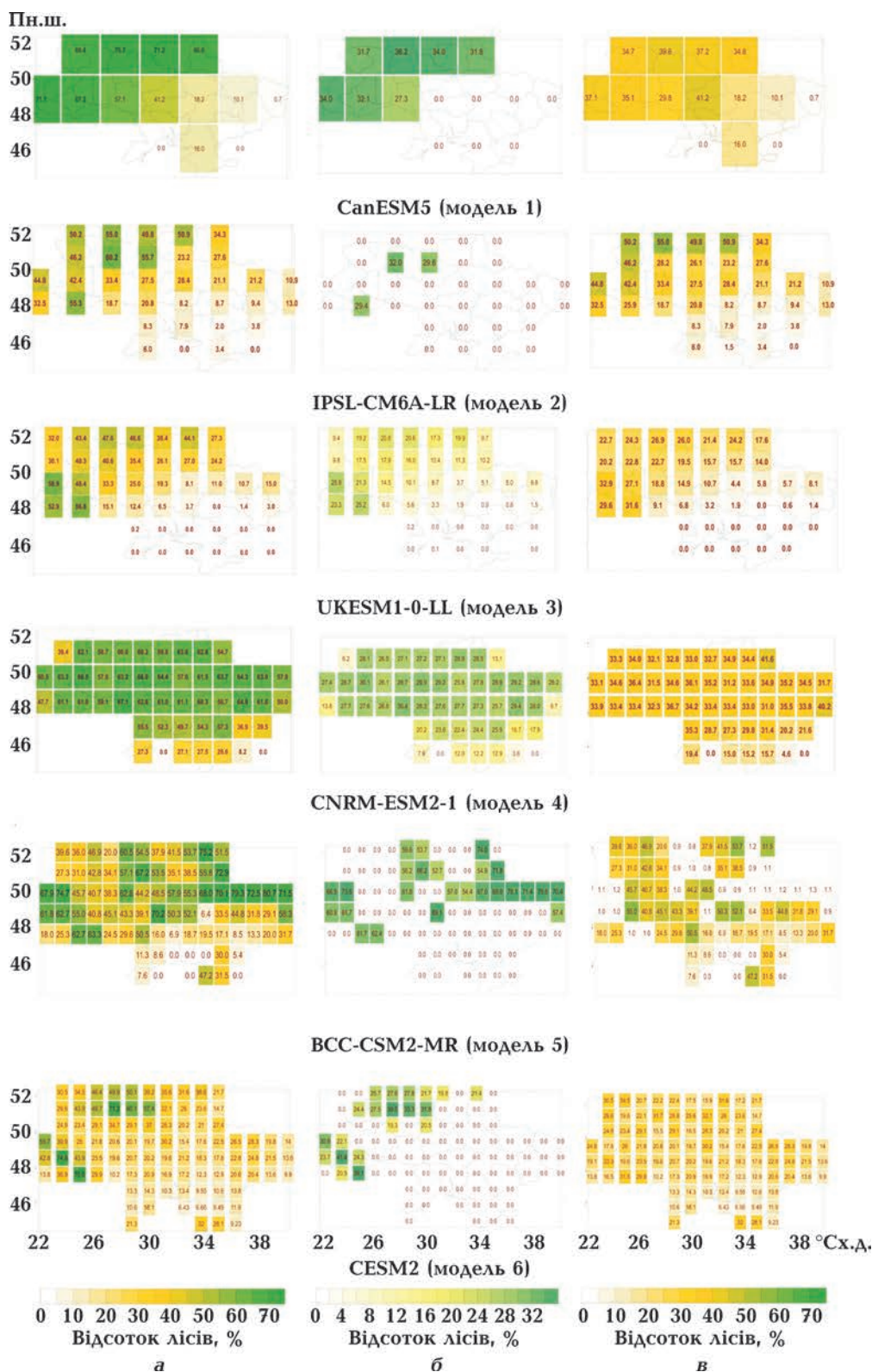


Рис. 2. Початкові умови у 1850 р. (а), зміна за період 1850—1899 рр. (б) і кінцеві умови у 1900 р. (в) просторового розподілу стану лісистості (%) на території України (у вузлах сіток ГКМ) з таблиці [Писаренко, Краковська, 2021].

Fig. 2. The initial spatial distribution of forest cover (%) in grid points of GCMs in 1850 (а), a partial deforestation during 1850—1899 (б), and the final distribution in 1900 (в) from table [Pysarenko, Krakovska, 2021].



Рис. 3 Алгоритм обробки даних для аналізу аномалій багаторічних середніх місячних випаровувань (мм) з поверхні (а) ґрунту та (б) рослинного покриву, де t — місяць року, сер — середнє, ЛС — лісистість.

Fig. 3 The algorithm of data processing for the anomaly analysis of the multi-year monthly mean evaporations (mm) from (a) soil and (b) canopy, t — month of the year, сер — mean, ЛС — forest cover.

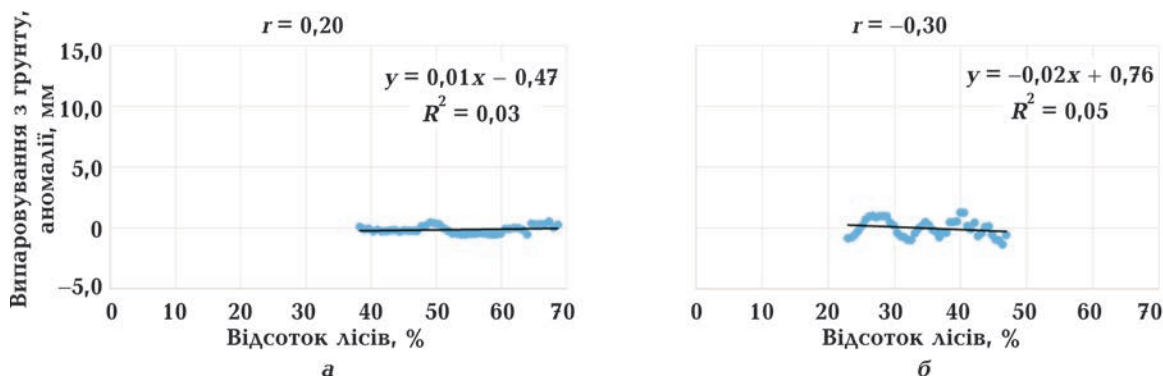


Рис. 4 Зв'язок між зменшенням лісистості (%) та аномаліями середньомісячних значень випаровування з ґрунту (у мм) на прикладі ГКМ 1 (а) та ГКМ 6 (б) для січня у північній широтній зоні.

Fig. 4 The correlation between forest cover reduction (%) and mean monthly anomalies of evaporation from soil (mm) on examples of GCMs 1 (a) and 6 (b) for January in the northern latitudinal zone.

ня на випаровування з ґрунту ще відсутній, проте у квітні для північної широтної зони за більшістю моделей реєстрували негативний зв'язок у межах $r = -0,8 \dots -0,3$ (рис. 5).

Згідно з аналізом часових значень аномалій характеристики, зменшення лісистості призведе до збільшення випаровування на 0,2—1,6 мм/10 років за більшістю моде-

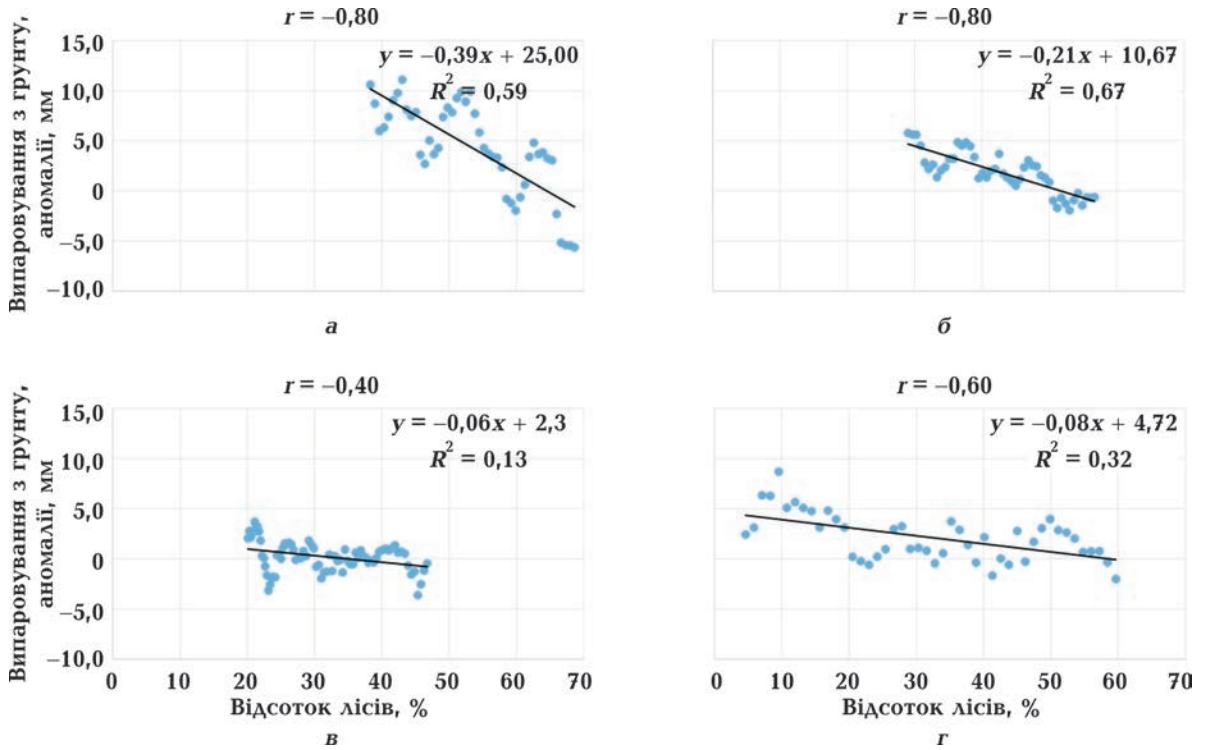
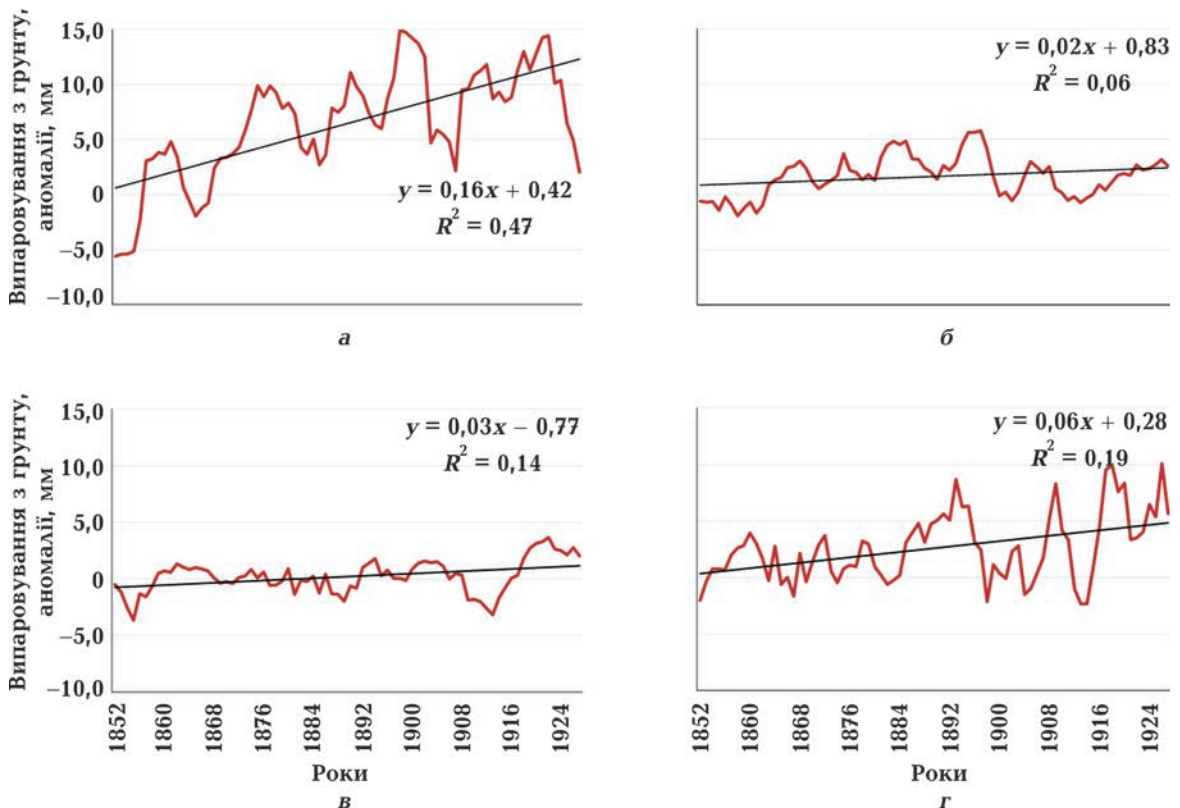


Рис. 5. Зв'язок між зменшенням лісистості (%) та аномаліями середньомісячних значень випаровування з ґрунту (у мм) на прикладі ГКМ 1 (а), ГКМ 2 (б), ГКМ 3 (в, для центральної частини) і ГКМ 5 (г) для квітня у північній широтній зоні.

Fig. 5. The correlation between forest cover reduction (%) and mean monthly anomalies of evaporation from soil (mm) on examples of GCMs 1 (a), 2 (б), 3 (в, for central part) and 5 (г) for April in the northern latitudinal zone.



лей (рис. 6). Найвищі значення отримані для ГKM1 з найбільшим кроком, тоді як найнижчі — для ГKM2. Інакше кажучи, у квітні для північної широтної зони характерне зростання випаровування з ґрунту із зменшенням лісистості для більшості моделей. Між тим для центральної широтної зони такі зв'язки неоднозначні. Моделі 1 та 5 вказують на негативний зв'язок зі значеннями відповідно $r = -0,8$ та $r = -0,6$, за аналогією, як і в північній широтній зоні. А моделі 4 і 6, навпаки, демонструють позитивні кореляції 0,6 і 0,5 відповідно. Тому однозначно висновку, як саме впливає знеліснення у центральній широтній зоні в перехідний сезон, не можна зробити.

У травні для північної широтної зони зберігаються негативні зв'язки між зменшенням лісів та аномаліями випаровування з ґрунту за більшістю моделей з $r = -0,8 \dots -0,4$. Для центральної зони ці зв'язки істотно посилились порівняно із квітнем зі значеннями $r = -0,8 \dots -0,4$ і набули більшої однорідності. Подібні зв'язки призводять до статистично значущих трендів зростання випаровування з ґрунту, що становлять 1,0—1,7 мм/10 років для північної зони, при цьому максимальні значення характерні для

ГKM з крупнішою сіткою. Для центральної широтної зони значення росту є нижчими і коливаються в межах 0,1—1,0 мм/10 років, тобто значення випаровування є вищими, ніж у квітні.

З настанням літнього сезону, у червні, зв'язки між зменшенням лісистості та аномаліями випаровування з ґрунту також негативні за більшістю моделей з $r = -0,8 \dots -0,4$ для обох широтних зон. ГKM2 та ГKM6 не узгоджуються з іншими моделями. Модель 2 продемонструвала позитивну кореляцію. Модель 6 показала відсутність зв'язку у північній широтній зоні і негативний зв'язок на заході центральної широтної зони, у районі Карпат. Слід зауважити, що за ГKM з крупнішою сіткою зв'язок послаблюється порівняно з таким у весняному сезоні для північної широтної зони. Статистично значущі тренди становлять 0,1—1,1 мм/10 років для північної широтної зони, тоді як для центральної вони дещо вищі і дорівнюють 0,6—1,3 мм/10 років.

Як помітно з рис. 7, у липні зменшення відсотка лісистості має негативний зв'язок з $r = -0,6 \dots -0,4$ за більшістю моделей для північної широтної зони, крім моделей 2 та 4, де виявлені незначущі або неузгоджені

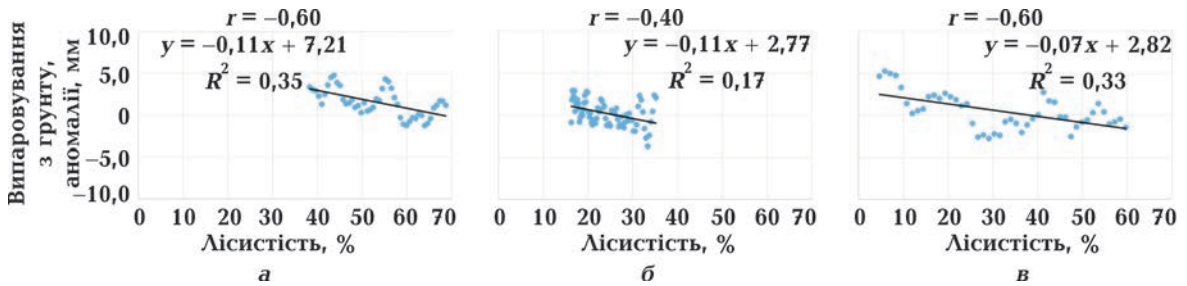


Рис. 7. Зв'язок між зменшенням лісистості (%) та аномаліями середньомісячних значень випаровування з ґрунту (у мм) на прикладі ГKM 1 (а), 3 (б), 5 (в) для липня у північній широтній зоні.

Fig. 7. The correlation between forest cover reduction (%) and mean monthly anomalies of evaporation from soil (mm) on examples of GCMs 1 (a), 3 (b), 5 (v) for July in the northern latitudinal zone.

←

Рис. 6. Аномалії значень випаровування з ґрунту (у мм) за період 1852—1927 рр. з лінійним трендом на прикладі ГKM 1 (а), 2 (б), 3 (в, для її центральної частини), 5 (г) для квітня у північній широтній зоні.

Fig. 6. Anomalies of evaporation from soil (mm) for 1852—1927 with linear trend on the example of GCMs 1 (a), 2 (b), 3 (v, for central part) and 5 (r) for April in the northern latitudinal zone.

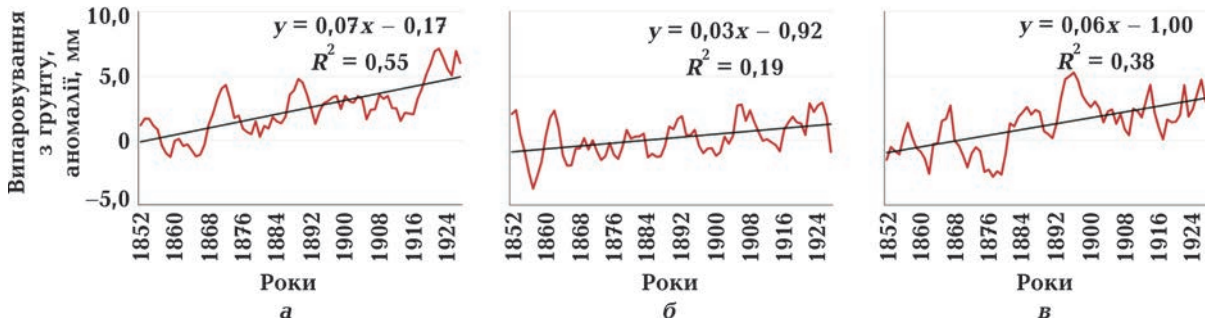


Рис. 8. Аномалії значень випаровування з ґрунту (у мм) за період 1852—1927 рр. з лінійним трендом на прикладі ГКМ 1 (а), 3 (б), 5 (в) для липня у північній широтній зоні.

Fig. 8. Anomalies of evaporation from soil (mm) for 1852—1927 with linear trend on the example of GCMs 1 (a), 3 (b), 5 (v) for July in the northern latitudinal zone.

зміни. Для центральної широтної зони ці зв'язки становлять у середньому $-0,5 \dots -0,4$. Інакше кажучи, часткове знеліснення території призводить до збільшення випаровування з поверхні ґрунту в липні. Ці зміни дорівнюють $0,3 \text{—} 0,7$ мм/10 років для північної і центральної широтних зон, що підтверджується статистично значущими коефіцієнтами Фішера ($F > 3,13$) (рис. 8).

У серпні за більшістю ГКМ зв'язок між зменшенням лісового покриву та аномаліями випаровування з ґрунту становить: $r = -0,6 \dots -0,5$ для північної широтної зони зі статистично значущими трендами $0,3 \dots 0,6$ мм/10 років ($F > 3,13$), тоді як для центральної широтної зони $r = -0,5 \dots -0,4$ з трендами

$0,03 \dots 0,5$ мм/10 років. Причому для моделі 4 у західних вузлах сітки спостерігаються від'ємні значення тренду, тобто протилежні результати порівняно з центральними і східними вузлами.

Для осіннього сезону більшість моделей показали негативні кореляційні зв'язки між зменшенням лісистості й аномаліями випаровування з поверхні ґрунту. Для жовтня виявлено кореляції $r = -0,6 \dots -0,5$ для обох широтних зон за моделями 3, 5, 6 (рис. 9). Відповідно, це призведе до зростання випаровування до $0,6$ мм/10 років за ГКМ (рис. 10).

Загалом у листопаді спостерігаються негативні зв'язки між зменшенням лісистості та аномаліями випаровування з ґрунту ($-0,6$

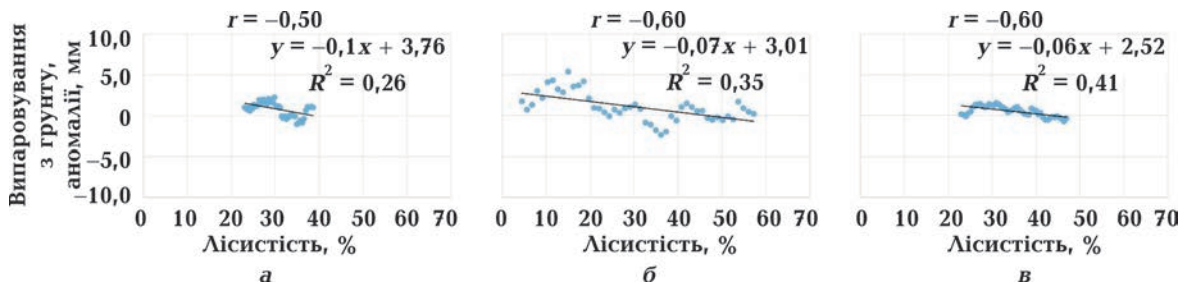


Рис. 9. Зв'язок між зменшенням лісистості (%) та аномаліями середньомісячних значень випаровування з ґрунту (у мм) на прикладі ГКМ 3 (а, для центральної та східної частин), 5 (б, для центральної та східної частин), 6 (в) для жовтня у північній широтній зоні.

Fig. 9. The correlation between forest cover reduction (%) and mean monthly anomalies of evaporation from soil (mm) on examples of GCMs 3 (a, for central and eastern parts), 5 (б, for central and eastern parts), 6 (в) for October in the northern latitudinal zone.

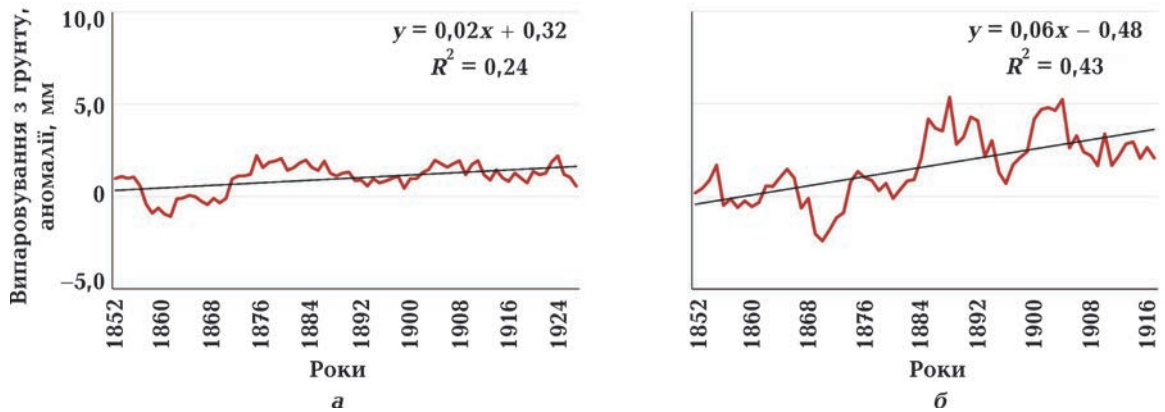


Рис. 10. Аномалії значень випаровування з ґрунту (мм) за період 1852—1927 рр. з лінійним трендом на прикладі ГКМ 3 (а, для центральної та східної частин), 5 (б, для центральної та східної частин) для жовтня у північній широтній зоні.

Fig. 10. Anomalies of evaporation from soil (mm) for 1852—1927 with linear trend on the example of GCMs 3 (a, for central and eastern parts), 5 (б, for central and eastern parts) for October in the northern latitudinal zone.

...–0,4), що призводить до зростання випаровування до 0,1—0,7 мм/10 років ($F > 3,13—3,18$) за більшістю моделей для північної широтної зони. Для центральної широтної зони результати трохи контрверсійні як з позитивними та негативними кореляціями.

Випаровування з поверхні ґрунту проаналізовано також на основі побудованих картосхем зміни усередненої характеристики в період 1900—1929 рр. відносно 1850—1899 рр. для центральних місяців сезонів (рис. 11). Як помітно з картосхем різниць між

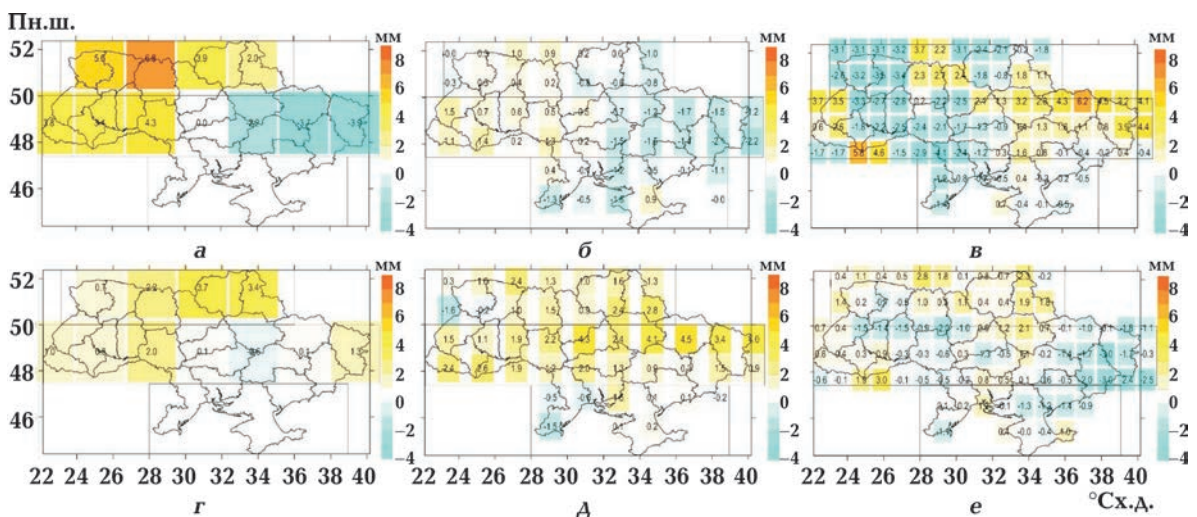


Рис. 11. Просторовий розподіл різниці між середнім місячним випаровуванням з ґрунту (мм) за 30-річний період стаłego лісового покриття 1900—1929 рр. та 50-річного періоду поступового знеліснення 1850—1899 рр. для квітня (а—в) та липня (г—е) за ГКМ 1, ГКМ 3, ГКМ 5.

Fig. 11. The spatial difference between mean monthly evaporation from soil (mm) for 30-year period 1900—1929 after and 50-year period 1850—1899 during a partial deforestation for April (a—в) and July (г—е) on the example of GCMs 1, 3, 5.

періодами сталого лісового покриву та часткового знеліснення з подальшою заміною на траву, саме у теплий період (на прикладі квітня та липня) відбуваються зміни у випаровуванні з ґрунту. Воно збільшилось там, де відбувалось знеліснення (див. рис. 2). Так, у весняний сезон, на прикладі квітня, найяскравіше виражені зміни відбуваються за моделями 1 і 5, тоді як за ГКМЗ вони є в західній та центральній частинах північної та центральної широтних зон (рис. 11, а—в). У цілому зменшення лісового покриву призводить до зростання випаровування з поверхні ґрунту у квітні максимально до 6,8 мм у вузлі сітки.

Влітку, на прикладі липня (рис. 11, г—є), за більшістю ГКМ зміни у випаровуванні менш інтенсивні порівняно з такими у весняному сезоні (квітень). Це збільшення випаровування максимально сягає 4,5 мм у вузлі сітки. Зауважимо, що в липні за ГКМЗ зміни посилюються порівняно із квітнем.

Випаровування з поверхні рослинного покриву. Для аналізу впливу знеліснення на складові балансу вологи використовували також показник «evaporation from canopy», тобто випаровування з рослинного покриву. Цей показник потрібно розглядати помісячно, оскільки він залежить від температури підстильної поверхні та повітря, швидкості вітру, типу рослинного покриву та ін. [Reynolds, Thompson, 1988]. У цілому випаровування з рослинного покриву приз-

водить до зниження температури навколишнього середовища. Тому збільшення зелених зон є одним із засобів адаптації міст до потепління [Шевченко, 2014; Shevchenko et al., 2020].

Згідно з даними LUMIP стосовно випаровування з рослинного покриву, в більшості моделей показник знеліснення очікувано зменшився, що, зокрема, засвідчує відповідність реальним процесам у кліматичній системі фізичних параметризацій в глобальних моделях.

Очевидно, що у зимовий сезон випаровування з рослинного покриву суттєво знижується через низькі температури підстильної поверхні та повітря, і рослини перебувають у стані спокою. У широколистяних дерев воно мінімальне, тому що взимку відсутні листя, проте у хвойних дерев унаслідок наявності голок евапотранспірація продовжується, але менш інтенсивно. За даними моделей протягом зимового сезону, у грудні—лютому, спостерігаються позитивні середні та високі кореляційні зв'язки між зменшенням лісистості та аномалією випаровування з рослинного покриву, що досягають 0,4 ... 0,9 (рис. 12). Ці залежності виявлено для північної та центральної широтних зон. У південній широтній зоні, де лісистість змінювали лише за моделлю 4, статистично значущих зв'язків не встановлено. Найбільший вплив на випаровування з рослинного покриву визначено за моделлю 5, де лісистість зменшували інтенсивніше.

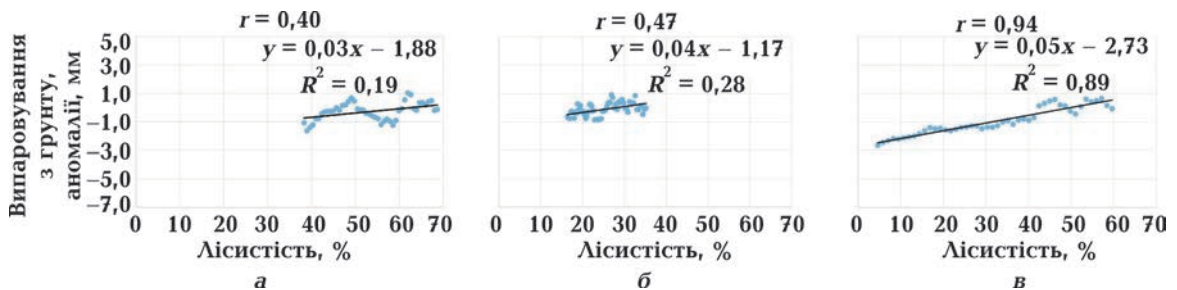


Рис. 12. Зв'язок між зменшенням лісистості (%) та аномаліями середньомісячних значень випаровування з рослинного покриву (мм) на прикладі ГКМ 1 (а), 3 (б), 5 (в) для січня у північній широтній зоні.

Fig. 12. The correlation between forest cover (%) and mean monthly anomalies of evaporation from canopy (mm) on examples of GCMs 1 (a), 3 (b), 5 (c) for January in the northern latitudinal zone.

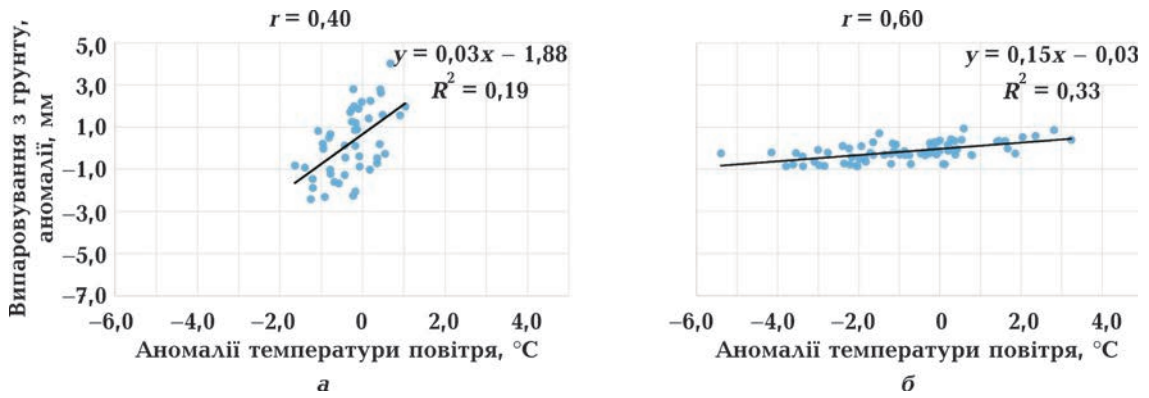


Рис. 13. Зв'язок між аномаліями середньомісячної приземної температури повітря ($^{\circ}\text{C}$) та аномаліями середньомісячного випаровування з рослинного покриву (мм) на прикладі ГКМ 1 (а), 3 (б) для січня у північній широтній зоні.

Fig. 13. The correlation between forest cover (%) and mean monthly anomalies of evaporation from canopy (mm) on examples of GCMs 1 (a), 3 (б) for January in the northern latitudinal zone.

Зафіксовано також позитивні кореляції між аномалією випаровування з рослинного покриву та аномалією приземної температури повітря (рис. 13). У попередніх дослідженнях показано [Писаренко, Краковська, 2021], що знеліснення зумовлює зниження температури підстильної поверхні й температури повітря взимку через однорідніше залягання снігового покриву, що має значно вище альбедо, ніж ліс. Таким чином, зміни випаровування з рослинного покриву не тільки є результатом безпосереднього зменшення лісистості, а й відображають відгук на зміни температурного режиму те-

риторії, що спричинені знелісненням. Зазначимо, що за моделлю 5 не вдалось встановити кореляційні зв'язки між аномаліями приземної температури повітря та аномаліями випаровування з рослинного покриву.

У зимовий сезон, на прикладі січня (рис. 14), це приводить до зменшення випаровування до $-0,5$ мм/10 років у північній та центральній широтних зонах.

У весняний сезон також спостерігаються позитивні кореляційні зв'язки $0,4 \dots 0,9$ між зменшенням лісового покриву і аномаліями випаровування для північної та цент-

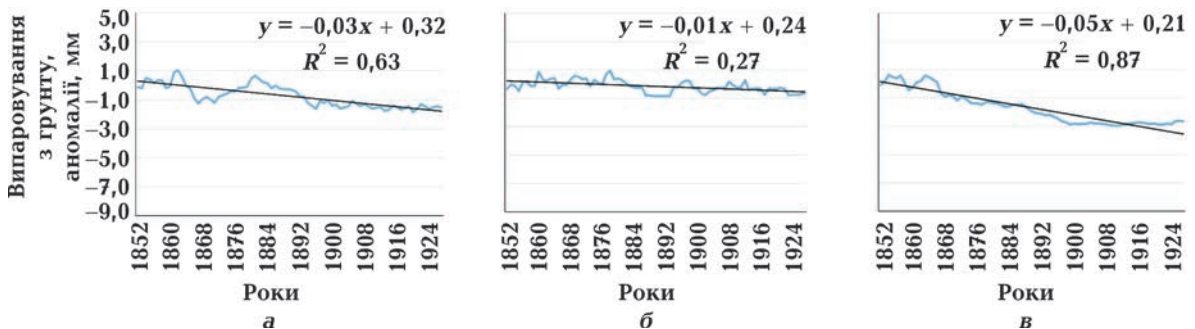


Рис. 14. Аномалії значень випаровування з рослинного покриву (мм) за період 1852—1927 рр. з лінійним трендом на прикладі ГКМ 2 (а), 3 (б), 5 (в) для січня у північній широтній зоні.

Fig. 14. Anomalies of evaporation from canopy (mm) for 1852—1927 with linear trend on the example of GCMs 2 (a), 3 (б), 5 (в) for January in the northern latitudinal zone.

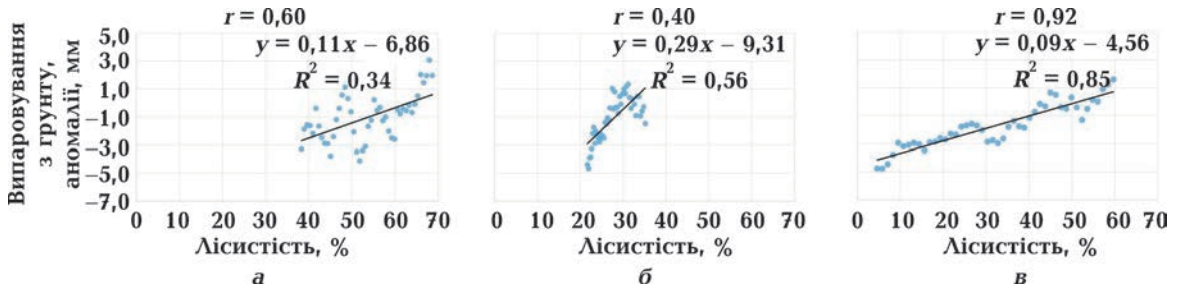


Рис. 15. Зв'язок між зменшенням лісистості (%) та аномаліями середньомісячних значень випаровування з рослинного покриву (мм) на прикладі ГКМ 1 (а), 3 (б), 5 (в) для квітня у північній широтній зоні.

Fig. 15. The correlation between forest cover reduction (%) and mean monthly anomalies of evaporation from canopy (mm) on examples of GCMs 1 (a), 3 (b), and 5 (v) for April in the northern latitudinal zone.

ральної широтних зон (рис. 15). З аномаліями температури повітря, що також зменшуються, зв'язків не встановлено, тобто у весняний сезон саме зменшення лісу спричиняє зменшення випаровування в атмосферу. У весняний сезон, на прикладі квітня, часткове знеліснення призводить, у свою чергу, до зменшення випаровування з рослинного покриву до $-0,8$ мм/10 років (модель 5) у північній та центральній широтних зонах (рис. 16).

У літній сезон, на прикладі липня, кореляційні зв'язки між зменшенням лісистості та аномаліями випаровування з рослинного покриву слабшають порівняно із зимовим та весняним сезонами і становлять за частиною моделей $0,4 \dots 0,5$ (для липня—серп-

ня) (рис. 17), оскільки температури в цей час високі та сприяють зростанню випаровування в цілому.

Проте, незважаючи на вищі середні приземні температури повітря, усе одно випаровування зменшується до $-0,6$ мм/10 років через часткове знеліснення і заміну його на трав'яний покрив (рис. 18). Максимальні зміни знову спостерігаються за моделлю 5, за якою швидше відбувалось знеліснення.

В осінній сезон, на прикладі жовтня, посилюється зв'язок між знелісненням та випаровуванням, що становить $0,4 \dots 0,8$ для обох широтних зон (рис. 19). Таке часткове знеліснення призводить до зменшення випаровування з рослинного покриву — до $-0,5$ мм/10 років (рис. 20).

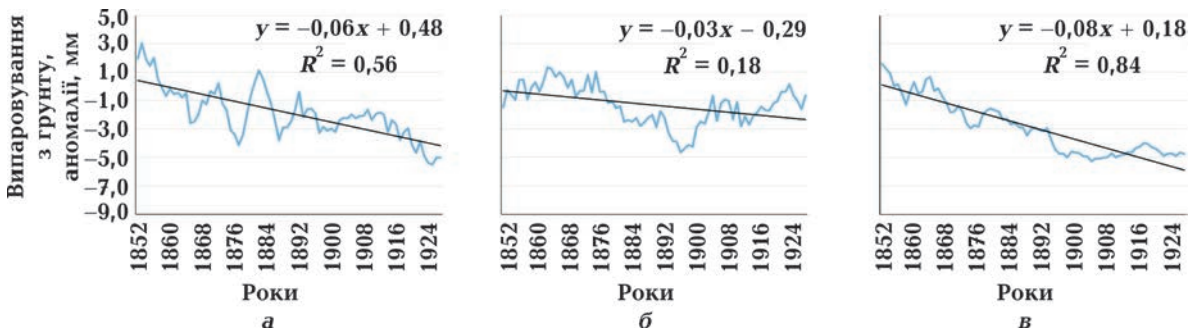


Рис. 16. Аномалії значень випаровування з рослинного покриву (мм) за період 1852—1927 рр. з лінійним трендом на прикладі ГКМ 2 (а), 3 (б), 5 (в) для квітня у північній широтній зоні.

Fig. 16. Anomalies of evaporation from canopy (mm) for 1852—1927 with linear trend on the example of GCMs 2 (a), 3 (b), 5 (v) for April in the northern latitudinal zone.

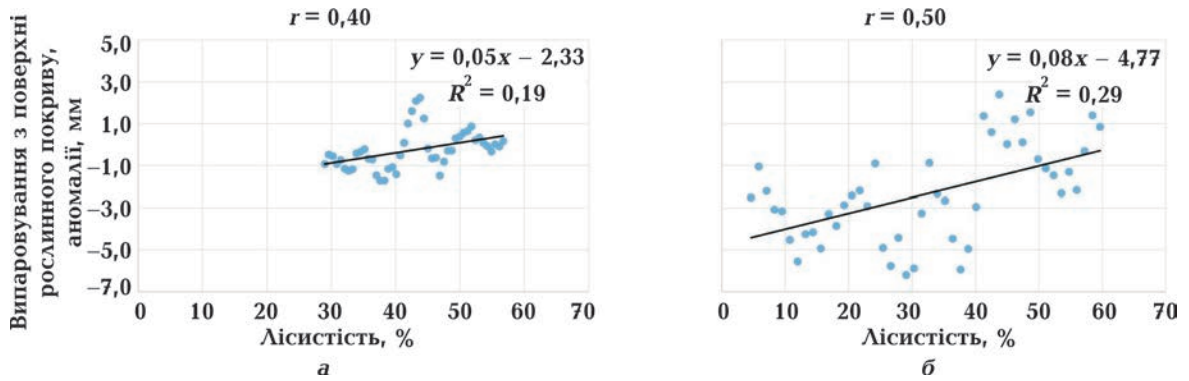


Рис. 17. Зв'язок між зменшенням лісистості (%) та аномаліями середньомісячних значень випаровування з рослинного покриву (мм) на прикладі ГКМ 2 (а), 5 (б) для липня для північної широтної зони.

Fig. 17. The correlation between forest cover reduction (%) and mean monthly anomalies of evaporation from canopy (mm) on examples of GCMs 2 (a), 5 (b) for July in the northern latitudinal zone.

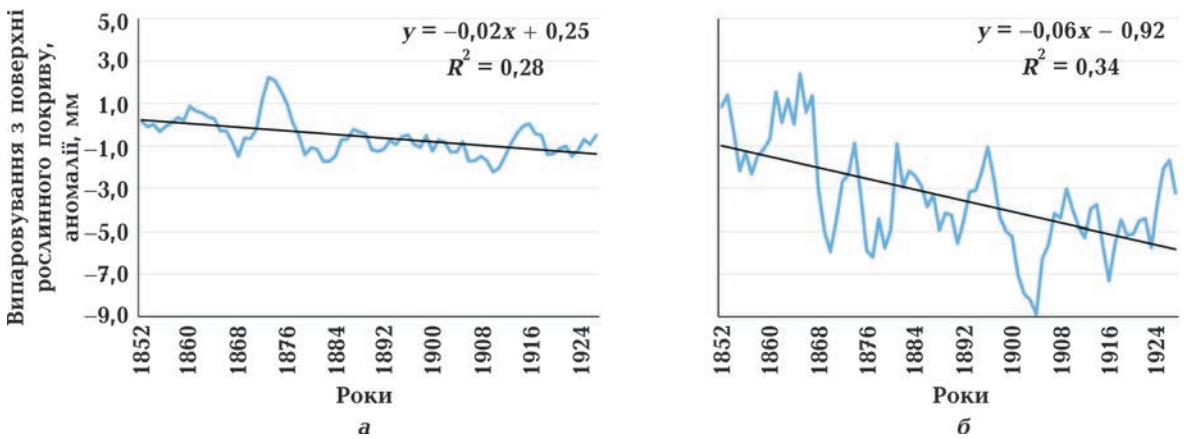


Рис. 18. Аномалії значень випаровування з рослинного покриву (мм) за період 1852—1927 рр. з лінійним трендом на прикладі ГКМ 2 (а), 5 (б) для липня у північній широтній зоні.

Fig. 18. Anomalies of evaporation from canopy (mm) for 1852—1927 with linear trend on the example of GCMs 2 (a), 5 (b) for July in the northern latitudinal zone.

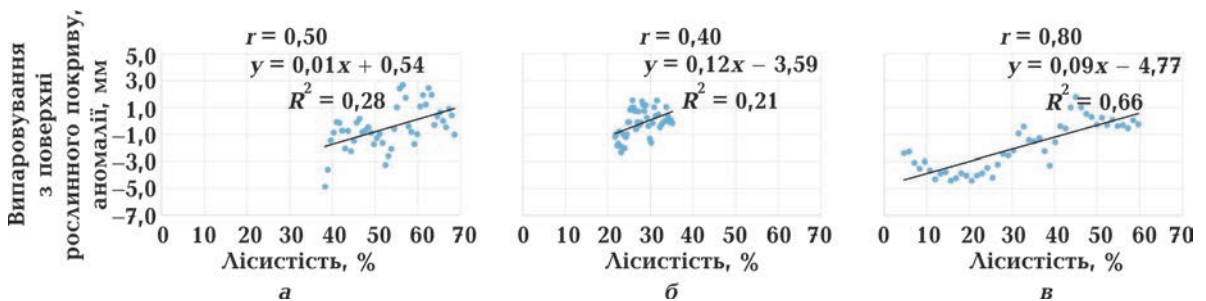


Рис. 19. Зв'язок між зменшенням лісистості (%) та аномаліями середньомісячних значень випаровування з рослинного покриву (у мм) на прикладі ГКМ 1 (а), 3 (б), 5 (в) для жовтня у північній широтній зоні.

Fig. 19. The correlation between forest cover reduction (%) and mean monthly anomalies of evaporation from canopy (mm) on examples of GCMs 1 (a), 3 (b), 5 (v) for October in the northern latitudinal zone.

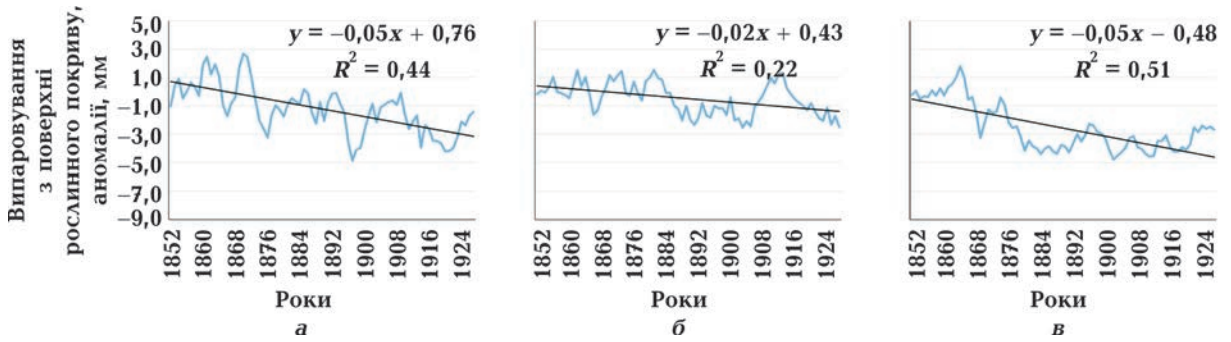


Рис. 20. Аномалії значень випаровування з рослинного покриву (мм) за період 1852—1927 рр. з лінійним трендом на прикладі ГKM 1 (а), 3 (б), 5 (в) для жовтня у північній широтній зоні.

Fig. 20. Anomalies of evaporation from canopy (mm) for 1852—1927 with linear trend on the example of GCMs 1 (a), 3 (b), 5 (v) for October in the northern latitudinal zone.

На картосхемі різниць між періодами знеліснення та сталого лісового покриву (рис. 21) за ГKM5, за якою з найбільшим кроком зменшували лісистість, показано, як зменшилось випаровування з рослинного покри-

ву у різні сезони року у січні (а), квітні (б), липні (в), жовтні (г). Помітно, що ці зміни є більшими саме в тих вузлах сітки, де зменшували лісистість з подальшою заміною на траву.

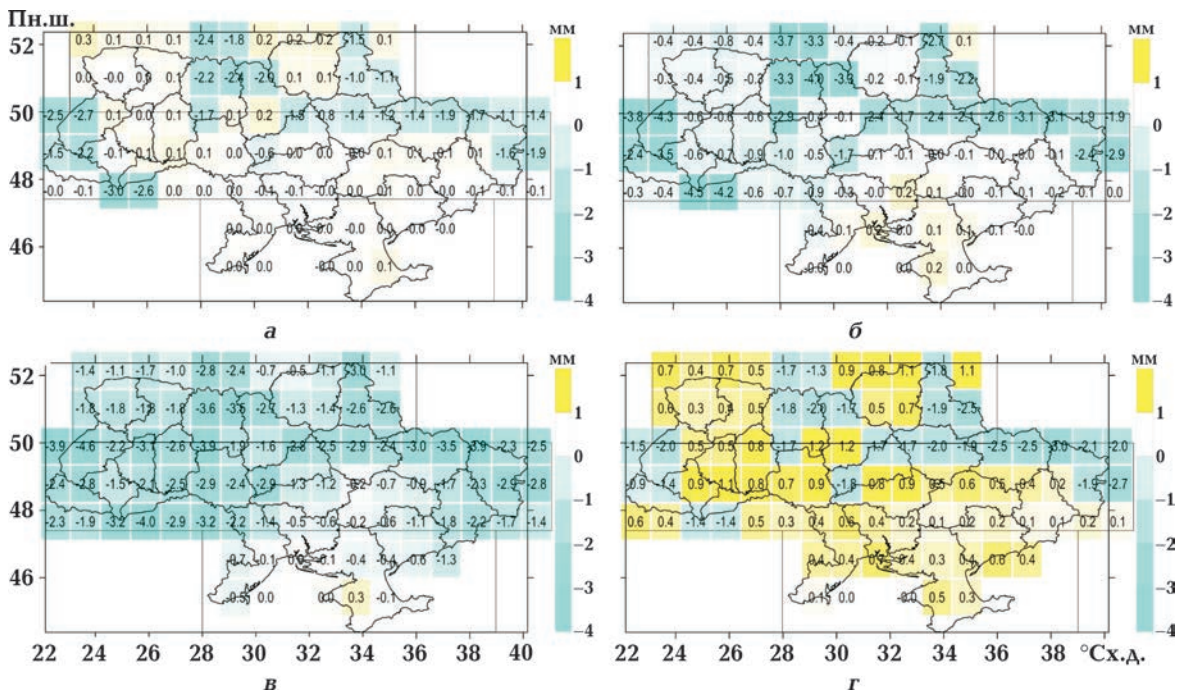


Рис. 21. Просторовий розподіл різниці між середнім місячним випаровуванням з рослинного покриву (мм) за 30-річний період сталого лісового покриву 1900—1929 рр. та 50-річного періоду поступового знеліснення 1850—1899 рр. за ГKM 5 (а — січень, б — квітень, в — липень, г — жовтень).

Fig. 21. The spatial difference between mean monthly evaporation from canopy (mm) for 30-year period 1900—1929 after and 50-year period 1850—1899 during a partial deforestation for GCM 5 (a — January, б — April, в — July, г — October).

Ці зміни у холодний сезон є меншими внаслідок відносно низьких температур повітря, а також через період спокою у дерев. Максимальні зміни у січні характерні для центру північної широтної зони та району Карпат і в цілому дорівнюють $-3,0 \dots -1,0$ мм на території. Навесні, у квітні, транспірація зменшується на $-4,5 \dots -1,7$ мм з максимальними змінами, як і у січні, для центра північної широтної зони та Карпат. Влітку зміни охоплюють майже всю територію України і менш виражені саме для тих регіонів, де змінювали лісистість. Проте в цілому більші зміни залишаються характерними для вузлів, де проводили знеліснення. Максимальні зміни сягають $-4,0$ мм. На відміну від літнього сезону восени, у жовтні, дуже чітко прослідковується зниження випаровування саме в тих регіонах, де зменшували лісовий покрив. Оскільки температури в жовтні нижчі за температури літнього сезону, зміни випаровування з рослинного покриву менші та дорівнюють максимально $-3,0$ мм на сході центральної широтної зони.

Висновки. За даними ГKM експерименту LUMIP зменшення лісового покриву на території України потенційно може призводити до зростання випаровування з поверхні ґрунту, особливо у весняно-літній сезон, коли спостерігаються вищі температури. Ці сезони характеризуються коефіцієнтами кореляції між зміною лісистості та аномаліями випаровування з ґрунту в межах $-0,8 \dots -0,4$ із збільшенням середніх місячних значень випаровування до $1,6$ мм/10 років з максимальними змінами у квітні. Лісовий покрив може дещо затримувати випаровування з поверхні ґрунту, тому можна припустити, що наявність крон дерев та лісових підстилок є перешкоджувальним фактором або бар'єром до вільного потрапляння вологи з ґрунту в атмосферу, а у квітні рослинний покрив ще недостатньо розвинений для утримання вологи в ґрунті.

Зменшення лісистості приводить до зменшення випаровування з поверхні рослинно-

го покриву, оскільки ліси є джерелом надходження вологи в атмосферу. У зимовий сезон встановлено кореляційні зв'язки як між лісистістю і аномаліями випаровування з рослинного покриву ($r = 0,4 \dots 0,9$), так і між аномаліями приземної температури повітря і випаровуванням ($r = 0,4 \dots 0,6$). Як зазначено у попередніх дослідженнях, через зменшення лісового покриву взимку збільшується альbedo внаслідок відкриття снігового покриву, тому це спричиняє зниження приземної температури повітря. Очікувано в зимовий сезон загалом через низькі температури випаровування з лісового покриву є незначним та вищим у хвойних дерев порівняно з широколистяними, проте це все зумовлює зменшення середніх місячних значень випаровування до $-0,5$ мм/10 років. Для весняного, літнього і осіннього сезонів кореляційні зв'язки між температурою та випаровуванням з рослинного покриву слабкіші, проте зі зменшенням лісового покриву зв'язки посилюються, і кореляція становить $0,4 \dots 0,9$. Це приводить також до зменшення випаровування з поверхні рослинного покриву, особливо у весняно-літній сезоні — до $-0,8$ мм/10 років (квітень) і до $-0,6$ мм/10 років (липень). Восени зміни менші. В теплий сезон рівень зменшення випаровування з рослинного покриву збільшується, оскільки його значення вищі. Максимальні зміни виявлено за ГKM5, які сягають $-4,5$ мм у весняні місяці та $-4,0$ мм у літні в окремих вузлах сітки.

Таким чином, знеліснення спричинює зменшення випаровування з рослинного покриву та зростання випаровування з поверхні ґрунту, що може призвести до висушування й деградації ґрунтів в умовах зменшення кількості опадів. Тому для оцінювання балансу вологи території крім випаровування необхідно проаналізувати також вплив знеліснення на загальний вологовміст ґрунту і кількість опадів, зокрема частку, що затримується кронами дерев. Це буде проаналізовано у наступній публікації.

Список літератури

- Адаменко Т.І. Агрокліматичне зонування території України з врахуванням зміни клімату. Київ: ВЕГО «МАМА-86», 2014. 16 с.
- Балабух В.О., Зібцев С.В. Вплив зміни клімату на кількість та площу лісових пожеж у північно-чорноморському регіоні України. *Укр. гідрометеоролог. журн.* 2016. № 18. С. 60—71. <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.07>.
- Балабух В., Малицька Л., Лавриненко О. Динаміка середньорічних показників температури повітря і кількості опадів в окремих ґрунтово-кліматичних зонах України. В кн.: Адаптація агротехнологій до змін клімату: ґрунтово-агрохімічні аспекти. Харків: Стильна типографія, 2018. С. 14—44
- Бойченко С.Г., Забарна О.Г. Оцінювання комфортності погодних умов і тенденції їх змін на Київщині в умовах змін клімату. *Геофіз. журн.* 2019. Т. 41. № 6. С. 128—143. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190071>.
- Букша І.Ф., Пастернак В.П. Інвентаризація та моніторинг парникових газів у лісовому господарстві. Харків: Вид. ХНАУ, 2005. 125 с.
- Букша І.Ф., Швиденко А.З., Бондарук М.А., Целіщев О.Г., Пивовар Т.С., Букша М.І., Пастернак В.П. Краковська С.В. Методологія моделювання та оцінювання впливу зміни клімату на лісові фітоценози України. *Наук. вісник НУБПУ. Серія «Лісівництво та декоративне садівництво»*. 2017. № 266. С. 26—38.
- Волощук В.М., Бойченко С.Г., Степаненко С.Н., Бортник С.Ю., Шищенко П.Г. Глобальне потепління і клімат України: регіональні екологічні та соціально-економічні аспекти. Київ: ВПЦ «Київський університет», 2002. 117 с.
- Горбачова Л.О. Просторовий розподіл зв'язків між елементами водного балансу річкових водозборів України. *Укр. географ. журн.* 2014. № 2. С. 17—22. <https://doi.org/10.15407/ugz2014.02.017>.
- Гребінь В.В. Сучасний водний режим річок України (ландшафтно-гідрологічний аналіз). Київ: Ніка-Центр, 2010. 316 с.
- Дронова О.О., Кузнєцова Ю.О. Вплив лісового господарства півдня України на регулювання вуглекислого газу в атмосферному повітрі. *Укр. гідрометеоролог. журн.* 2016. № 17. 79—85.
- 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.
- Краковська С.В., Гнатюк Н.В., Шпиталь Т.М., Паламарчук Л.В. Проекції змін приземної температури повітря за даними ансамблю регіональних кліматичних моделей у регіонах України в ХХІ столітті. *Наук. праці Укр-НДГМІ*. 2016. Вип. 268. С. 33—44.
- Краковська С.В., Паламарчук Л.В., Гнатюк Н.В., Шпиталь Т.М., Шедеменко І.П. Зміни поля опадів в Україні у ХХІ ст. за даними ансамблю регіональних кліматичних моделей. *Геоінформатика*. 2017. № 4(64). С. 62—74.
- Липченко А.Е., Ильин Ю.П., Репетин Л.Н., Липченко М.М. Уменьшение испарения с поверхности Черного моря во второй половине ХХ столетия как следствие глобальных изменений климата. *Екологічна безпека прибережних та шельфових зон та комплексне використання ресурсів шельфу*. 2006. Вип. 14. С. 449—461.
- Лобода Н.С., Божок Ю.В. Оцінка змін водних ресурсів річки Дунай у ХХІ сторіччі за сценарієм А1В з використанням моделі «Клімат-стік». *Укр. гідрометеоролог. журн.* 2016. № 18. С. 112—120. <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.13>.
- Мартазинова В.Ф., Щеглов А.А. Характер екстремальних осадков начала ХХІ столетия на территории Украины. *Укр. гідрометеоролог. журн.* 2018. Вип. 22. С. 36—45 <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.04>
- Олійник В.С., Рак Ю.А. Водорегулювальна роль лісистості водозборів Горган. *Наук. праці Лісівничої академії наук України*. 2018.

- № 16. С. 17—23. <https://doi.org/10.15421/411802>.
- Орлова Л.Д. Інтенсивність транспірації лучних рослин Лівобережного лісостепу України. *Вісник Дніпропетровського університету. Біологія. Екологія*. 2009. Т. 1. Вип. 17. С. 166—171. <https://doi.org/10.15421/010925>.
- Осипов В.В., Осадча Н.М., Осадчий В.І. Кліматичні зміни та водні ресурси басейну Десни до середини ХХІ століття. *Доп. НАН України*. 2021. № 2. С. 71—81. <https://doi.org/10.15407/dopovid2021.02.071>.
- Паламарчук Л.В., Шпиг В.М., Гуда К.В. Умови формування сильних опадів холодного періоду року на рівнинній території України. *Фізична географія та геоморфологія*. 2014. Вип. 2. С. 110—120.
- Писаренко Л.А., Краковська С.В. Вплив знеліснення на радіаційний та термічний режими території України за даними глобальних кліматичних моделей. *Геофиз. журн*. 2021. Т. 43. № 3. С. 135—160. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i3.236385>.
- Повідомлення про оприлюднення проекту Державної стратегії управління лісами України до 2035 року. (2020). Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/news/36108.html>.
- Польовий А.М. Сільськогосподарська метеорологія: підручник. Одеса: ТЕС, 2012. 632 с.
- Польовий А.М., Божко Л.Ю. Вплив кліматичних змін на режим зволоження вегетаційного періоду в Україні. *Укр. гідрометеоролог. журн*. 2015. № 16. С. 128—140. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.17>.
- Рахманов В.В. Гидроклиматическая роль лесов. Москва: Лесная промышленность, 1984. 240 с.
- Стратегія адаптації до зміни клімату сільськогосподарського, лісового та рибного господарств України до 2030 року. Режим доступу: https://www.uahhg.org.ua/wp-content/uploads/2019/08/Стратегія-адаптації-до-зміни-клімату-сільськогосподарського-лісового-та-рибного-господарств-України-до-2030-року_29.05.19.pdf.
- Хохлов, В.М., Боровська, Г.О., Замфірова, М.С. Кліматичні зміни та їх вплив на режим температури повітря і опадів в Україні у перехідні сезони. *Укр. гідрометеоролог. журн*. 2020. № 26. С. 60—67. <https://doi.org/10.31481/uhmj.26.2020.05>.
- Хохлов В.М., Єрмоленко Н.С. Майбутні зміни клімату та їх вплив на режим опадів та температури в Україні. *Укр. гідрометеоролог. журн*. 2015. № 16. С. 76—82. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.10>.
- Швиденко А.З., Букша І.Ф., Краковська С.В. Уразливість лісів України до зміни клімату. Київ: Ніка-Центр, 2018. 184 с.
- Шевченко О.Г. Вразливість урбанізованого середовища до зміни клімату. *Фізична географія та геоморфологія*. 2014. Вип. 4. С. 112—120.
- Шевченко О., Власюк О., Ставчук І., Ваколюк М., Ілляш О., Рожкова А. Оцінка вразливості до зміни клімату: Україна. Київ: Myflaer, 2014. 74 с.
- Adamenko, T.I., Demydenko, A.O., Romashchenko, M.I., Tsvietkova, A.M., Shevchenko, A.M., & Yatsyuk, M.V. (2016). *Rethinking of Water Security for Ukraine based on results of National Policy Dialogue*. Global Water Partnership. Kyiv, 20 p. Retrieved from: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cee_files/regional/rethinking-water-securityukraine-2016.pdf.
- Balabukh, V., Lavrynenko, O., Bilaniuk, V., Mykhnovych, A., & Pylypovych, O. (2018). Extreme weather events in Ukraine: occurrence and changes. In P.J. Sallis (Ed.), *Extreme Weather* (pp. 85—106). London: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77306>.
- 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>.
- Boychenko, S., Voloshchuk, V., Movchan, Ya., Serdjuchenko, N., Tkachenko, V., Tyshchenko, O., & Savchenko, S. (2016). Features of climate change on Ukraine: scenarios, consequences

- for nature and agroecosystems. *Proceedings of the National Aviation University*, (4), 96—113. <https://doi.org/10.18372/2306-1472.69.11061>.
- Boychenko, S., Voloshchuk, V., Kuchma, T., & Serdyuchenko, N. (2018). Long-time changes of the thermal continentality index, the amplitudes and the phase of the seasonal temperature variation in Ukraine. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 40(3), 81—96. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i3.2018.137175>.
- 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., Nieradzick, 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 2020*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-10295>.
- Buksha, I.F., Pyvovar, T.S., & Buksha, M.I. (2014). Vulnerability assessment of eastern Ukrainian forests to climate change: Case study on the base of GIS technology usage. *Scientific Proceedings of Forestry Academy of Sciences of Ukraine* (is. 12, pp. 30—37).
- Climate Change. United Nations. (2021). Retrieved from <https://www.un.org/en/global-issues/climate-change>.
- CMIP Phase 6 (CMIP6). (2021). Retrieved from <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>.
- Fischer, A.P. (2019) Adapting and coping with climate change in temperate forests. *Global Environmental Change*, 54, 160—171. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.10.011>.
- Gao, Y. (2016). *Interactions between land surface, forests and climate: regional modelling studies in the boreal zone*: PhD thesis. University of Helsinki. Department of Physics. Retrieved from <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/166502>.
- Gauthier, S., Bernier, P., Kuuluvainen, T., Shvidenko, A., & Schepaschenko, D. (2015) Boreal forest health and global change. *Science*, 349 (6250), 819—822. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9092>.
- Guide to Hydrological Practice. Vol. I. Hydrology. From Measurement to Hydrological Information. WMO. (2008). Retrieved from https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10473.
- Guide to Instruments and Methods of Observation. Vol. I. Measurement of Meteorological Variables. WMO. (2018). Retrieved from https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10616.
- ESGF: WCRP Coupled Model Intercomparison Project. (2021). Retrieved from <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>.
- Groisman, P.Ya., & Ivanov, S.V. (2009). *Regional aspects of climate-terrestrial-hydrologic interactions in non-boreal Eastern Europe*. Springer, 376 p.
- Hofmeister, J., Hošek, J., Brabec, M., Střalková, R., Mýlová, P., Bouda, M., Pettit, J. L., Rydval, M., & Svoboda, M. (2019). Microclimate edge effect in small fragments of temperate forests in the context of climate change. *Forest Ecology and Management*, 448, 48—56. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.069>.
- IPCC: Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems. (2019). Retrieved from <https://www.ipcc.ch/srccl/>.
- IPCC: Frequently Asked Questions. (2015). Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/12/SR15_FAQ_Low_Res.pdf.
- Krakovska, S., Balabukh, V., Chyhareva, A., Pysarenko, L., Trofimova, I., & Shpytal, T. (2021). Projections of regional climate change in Ukraine

- based on multi-model ensembles of Euro-CORDEX, EGU General Assembly 2021, online, 19—30 Apr 2021, EGU21-13821. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13821>.
- Kulmala, M., Ezhova, E., Kalliokoski, T., Noe, S., Vesala, T., Lohila, A., Liski, J., Makkonen, R., Bäck, J., Petäjä, T. & Kerminen, V.-M. (2020). CarbonSink+: Accounting for multiple climate feedbacks from forests. *Boreal Environment Research*, 25, 145—159.
- Lawrence, D.M., Hurtt, G.C., Arneth, A., Brovkin, V., Calvin, K.V., Jones, A.D., Jones, C.D., Lawrence, P.J., de Noblet-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>.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S. Kremer, A., Barbatie, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M.J., & Marchetti, M. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259, 698—709. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>.
- Malytska, L., & Balabukh, V. (2018). Atmospheric self-cleaning coefficients as indicators of the atmospheric ability to dissipate pollutants in Ukraine. *Meteorology Hydrology and Water Management*, 6(1), 59—65. <https://doi.org/10.26491/mhwm/79450>.
- Morton, F.I. (1984). What are the limits on forest evaporation? *Journal of Hydrology*, 74(3-4), 373—398. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90025-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90025-8).
- Novak, V. (2012). *Evapotranspiration in the Soil-Plant-Atmosphere System*. Springer, 272 p.
- Reynolds, E.R.C., & Thompson F.B. (Eds.). (1988). *Forests, Climate, and Hydrology: Regional Impacts*. 217 p.
- Shevchenko, O.H., Snizhko, S.I., & Matviienko, M.O. (2020a). Simulation of the thermal comfort conditions of urban areas: a case study in Kyiv. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series «Geology. Geography. Ecology»*, 51, 186—198. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-13>.
- Shevchenko, O., Snizhko, S., & Matzarakis, A. (2020b). Recent trends on human thermal bioclimate conditions in Kyiv, Ukraine. *Geographia Polonica*, 93(1), 89—106. <https://doi.org/10.7163/GPol.0164>.
- Shvidenko, A., Buksha, I., Krakovska, S., & Lakyda, P. (2017). Vulnerability of Ukrainian Forests to Climate Change. *Sustainability*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/su9071152>.
- Smith, R.L., & Smith, T.M. (2001). *Ecology & field biology*. San Francisco, Benjamin Cummings. 720 p.
- Snizhko S., Shevchenko, O., Didovets, Iu., Krivkivska, A., & Kostyrko, I. (2020) Assessment of changes in the main climatic parameters over the territory of Ukraine during the XXI century according to scenarios based on representative concentration pathways (RCP). *Conference Proceedings, XIV International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment»*, Nov 2020 (Vol. 2020, pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056032>.
- Snyder, P.K., Delire, C., & Foley, J.A. (2004). Evaluating the influence of different vegetation biomes on the global climate. *Climate Dynamics*, 23, 279—302. <https://doi.org/10.1007/s00382-004-0430-0>.
- Spracklen, D., Bonn, B., & Carslaw, K.S. (2008). Boreal forests, aerosols and the impacts on clouds and climate. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 366(1885), 4613—4626. <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0201>.
- Wang, F., Notaro, M., Liu, Zh., & Chen, G. (2014). Observed Local and Remote Influences of Vegetation on the Atmosphere across North America Using a Model-Validated Statistical Technique That First Excludes Oceanic Forcings. *Journal of Climate*, 27, 362—382. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00080.1>.
- WMO. Water-related hazards dominate disasters in the past 50 years. (2021). Retrieved from <https://public.wmo.int/en/media/press-release/water-related-hazards-dominate-disasters-past-50-years>.

Impact of deforestation on moisture evaporation from soil and canopy for the territory of Ukraine based on data of numerical experiment LUMIP

L.A. Pysarenko¹, S.V. Krakovska^{1,2}, 2021

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 MES of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The study presents results of analysis of the impact of partial deforestation on spatio-temporal distribution of the outflow part of water balance, namely evaporation from soil and canopy. The data of 6 Global climate models of theoretical experiment Land Use Model Intercomparison Project (LUMIP) was used in the research. The aim of this experiment is to reveal the influence of global deforestation with further replacement by grass cover on distribution of climate characteristics. It was done for the period 1850—1929, where the first part 1850—1899 refers to the pre-industrial period or period with minimal mostly constant anthropogenic influence; the second part is the next 30 years — 1900—1929. During the pre-industrial period 1850—1899 land cover was reduced globally with a trend of 400 thousand km² per year and during 1900—1929 it was stable. Defining the impact of deforestation, the normalization over the first 20 years (1850—1869) was performed and there were found anomalies of climatic characteristics as difference to this basic period. Deforestation with further replacement of the forest cover by grass causes an increase in soil evaporation with the trend up to 1.6 mm/10 years in the warm season with more significant changes in April—July, as deforestation reveals more of the soil. Thus, the correlation was $-0.8 \dots -0.4$ between forest cover and soil evaporation with maximal changes in April. It can be connected with grass being sparse in this period but later on covering more soil and preventing intensive evaporation. On the contrary, evaporation from canopy in global climate models is reduced with deforestation as the evaporation area is shrunk. This effect was revealed during all seasons in most grid points, where deforestation occurs. But the biggest change is found in spring and summer months with values up to -0.8 mm/10 years and correlation $r = 0.4 \dots 0.9$ depending on the model and the season. Thus, we found an effect of increasing evaporation from soil while decreasing evaporation from canopy in climate modeling as the effect of partial deforestation on the territory of Ukraine. These changes can cause redistribution in water balance components of the territory and have consequences for hydrological regime, agrometeorology etc. In particular, the increase in soil evaporation due to deforestation can provoke more intensive soil aridization and degradation. The influence of deforestation on total soil moisture and regime of precipitation will be presented in the next publication.

Key words: LUMIP, deforestation, forest cover, evaporation from soil, evaporation from canopy.

References

- Adamenko, T.I. (2014). *Agroclimatic zoning of the territory of Ukraine taking into account climate change*. Kyiv: VEGO «MAMA-86», 16 p. (in Ukrainian).
- Balabukh, V.O. & Zibtsev, S.V. (2016). Impact of climate change on the quantity and area of forest fires in the North part of the Black sea region of Ukraine. *Ukrayins'kyi hidrometeorologichnyy Zhurnal*, (18), 60—71. <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.07> (in Ukrainian)
- Balabukh, V., Malytska, L., & Lavrynenko, O. (2018). Dynamics of average annual air temperature and precipitation in some soil and climatic zones of Ukraine. In *Adaptation of agrotechnologies to climate change: soil and agrochemical aspects* (pp. 14—44). Kharkiv: Stylna typohrafiia (in Ukrainian).

- Boychenko, S.G., & Zabarna, O.G. (2019). Estimation of comfort of weather conditions and trends of their changes for the Kyiv region in the conditions of climate change. *Geofizicheskii Zhurnal*, 41(6), 128—143. https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v41i6.2019.190_071 (in Ukrainian).
- Buksha, I.F., & Pasternak, V.P. (2005). *Inventory and monitoring of greenhouse gases in forestry*. Kharkiv: Published by KhNAU, 125 p. (in Ukrainian).
- Buksha, I.F., Shvidenko, A.Z., Bondaruk, M.F., Tselyshev, O.H., Pyvovar, T.S., Buksha, M.I., Pasternak, V.P., & Krakovska, S.V. (2017). The methodology of modeling of the impact of climate change on forest phytocenoses in Ukraine. *Naukovyy visnyk NUBIPU. Seriya «Lisivnytstvo ta dekoratyvne sadivnytstvo»*, (is. 266, pp. 26—38) (in Ukrainian).
- Voloshchuk, V.M., Boychenko, S.G., Stepanenko, S.M., Bortnik, S.Yu., & Shishchenko, P.G. (2002). *Global warming and climate in Ukraine: Regional environmental and socio-economic aspects*. Kyiv: PPC Kiev University, 116 p. (in Ukrainian).
- Gorbachova, L.O. (2014). Spatial links distribution between water balance elements of the Ukraine river catchments. *Ukrayins'kyy heohrafichnyy Zhurnal*, (2), 17—21. <https://doi.org/10.15407/ugz2014.02.017> (in Ukrainian).
- Grebin, V.V. (2010). *Modern streamflow regime of rivers in Ukraine (landscape-hydrology analysis)*. Kyiv: Nika-Centre, 316 p. (in Ukrainian).
- Dronova, O.O., & Kuznetsova, J.O. (2016). Effect of forestry of the southern Ukraine on the regulation of carbon dioxide in the atmosphere. *Ukrayins'kyy hidrometeorologichnyy Zhurnal*, (17), 79—85 (in Ukrainian).
- Stepanenko, S.M. & Polevoy, A.M. (Eds.). (2018). *Climatic risks of functioning of branches of the economy of Ukraine in the conditions of climate change: monograph*. Odesa: TES, 548 p. (in Ukrainian).
- Lipinsky, V., Dyachuk, V., & Babichenko, V. (Eds.). (2003). *Climate of Ukraine*. Kyiv: Rayevskyy Publishing, 343 p. (in Ukrainian).
- Krakovska, S.V., Gnatiuk, N.V., Shpytal, T.M., & Palamarchuk, L.V. (2016). Projections of surface air temperature changes based on data of regional climate models' ensemble in the regions of Ukraine in the 21st century. *Naukovi pratsi UkrNDHMI*, (268), 33—44 (in Ukrainian).
- Krakovska, S.V., Palamarchuk, L.V., Gnatiuk, N.V., Shpytal, T.M., & Shedemenko, I.P. (2017) Changes in precipitation distribution in Ukraine for the 21st century based on data of regional climate model ensemble. *Geoinformatika*, (4), 62—74 (in Ukrainian).
- Lipchenko, A.E., Illyin, Yu.P., Repetin, L.N., & Lipchenko, M.M. (2006). Decrease in evaporation from the Black Sea surface in the second half of the 20th century as a consequence of global climate changes. *Ekologichna bezpeka pryberezhnykh ta shel'fovyykh zon ta kompleksne vykorystannya resursiv shel'fu*, (14), 449—461 (in Russian).
- Loboda, N.S., & Bozhok, Y.V. (2016). Assessment of water resources change of the Danube River in the XXI century under the scenario A1B using the model «climate-runoff». *Ukrayins'kyy hidrometeorologichnyy Zhurnal*, (18), 112—120. <https://doi.org/10.31481/uhmj.18.2016.13> (in Ukrainian).
- Martazinova, V.F., & Shcheglov, A.A. (2018). Nature of extreme precipitation over Ukraine in the 21st century. *Ukrayins'kyy hidrometeorologichnyy Zhurnal*, (22), 36—45. <https://doi.org/10.31481/uhmj.22.2018.04> (in Russian)
- Oliinyk, V.S., & Rak, Yu.A. (2018). Water regulating role of the forest cover of the Gorgany watersheds. *Naukovi pratsi Lisivnychoyi akademiyi nauk Ukrayiny*, (16), 17—23. <https://doi.org/10.15421/411802> (in Ukrainian).
- Orlova, L.D. (2009). The transpiration rate of poic plants of the left-bank Ukraine's forest-steppe. *Visnyk Dnipropetrovs'koho universytetu. Biologiya. Ekologiya*, 1(17), 166—171. <https://doi.org/10.15421/010925> (in Ukrainian).
- Osypov, V.V., Osadcha, N.M., & Osadchyi, V.I. (2021). Climate change and water resources of the Desna river basin till the middle of the XXI century. *Dopovidi NAN Ukrayiny*, (2), 71—81. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2021.02.071> (in Ukrainian).

- Palamarchuk, L.V., Shpyg, V.M., & Guda, K.V. (2014). Conditions of formation of strong cold season precipitation in the plains territory of Ukraine. *Fizychna heohrafiya ta heomorfologiya*, (2), 110—120 (in Ukrainian).
- Pysarenko, L.A., & Krakovska, S.V. (2021). Impact of deforestation on radiative and thermal regimes of the territory of Ukraine on the base of global climate models data. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 43(3), 135—160. <https://doi.org/10.24028/gzh.v43i3.236385> (in Ukrainian).
- Announcement about a draft of the Strategic Plan for State Forest Management of Ukraine until 2035. (2020). Retrieved from <https://mep.gov.ua/news/36108.html> (in Ukrainian).
- Pol'ovyi, A.M. (2012). *Agricultural Meteorology*. Odessa: TES, 623 p. (in Ukrainian).
- Pol'ovyy, A.M., & Bozhko, L. Yu. (2015). Influence of climatic changes on mode of moistening of vegetation period in Ukraine. *Ukrayins'kyi hidrometeorologichnyy Zhurnal*, (16), 128—140. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.17> (in Ukrainian).
- Rakhmanov, V.V. (1984). The hydroclimatic role of forests. Moscow: Lesnaya promyshlennost, 240 p. (in Russian).
- The Strategy for Adaptation to Climate Change in Agriculture, Forestry, Fisheries and Hunting of Ukraine until 2030. (2019). Retrieved from: https://www.uahhg.org.ua/wp-content/uploads/2019/08/Стратегія-адаптації-дозміни-клімату-сільського-лісового-тарифного-господарств-України-до-2030-року_29.05.19.pdf (in Ukrainian).
- Khokhlov, V.M., Borovska, H.O., & Zamfirova, M.S. (2020). Climatic changes and their influence on air temperature and precipitation in Ukraine during transitional seasons. *Ukrayins'kyi hidrometeorologichnyy Zhurnal*, (26), 60—67. <https://doi.org/10.31481/uhmj.26.2020.05> (in Ukrainian).
- Khokhlov, V.M., & Yermolenko, N.S. (2015). Future climate change and its impact on precipitation and temperature in Ukraine. *Ukrayins'kyi hidrometeorologichnyy Zhurnal*, (16), 76—82. <https://doi.org/10.31481/uhmj.16.2015.10> (in Ukrainian).
- Shvidenko, A.Z., Buksha, I.F., & Krakovska, S.V. (2018). *Vulnerability of Ukraine's forests to climate change*. Kyiv: Nika-Centre, 184 p. (in Ukrainian).
- Shevchenko, O.G. (2014). Urban Vulnerability to Climate Change. *Fizychna heohrafiya ta heomorfologiya*, (4), 112—120 (in Ukrainian).
- Shevchenko, O., Vlasyuk, O., Stavchuk, I., Vakolyuk, M., Illyash, O., & Rozhkova, A. (2014). *National Climate Vulnerability Assessment: Ukraine Scientific Monography*. Kyiv: Myf-laer, 74 p. (in Ukrainian).
- Adamenko, T.I., Demydenko, A.O., Romashchenko, M.I., Tsvietkova, A.M., Shevchenko, A.M., & Yatsyuk, M.V. (2016). *Rethinking of Water Security for Ukraine based on results of National Policy Dialogue*. Global Water Partnership. Kyiv, 20 p. Retrieved from: https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-cee_files/regional/rethinking-water-securityukraine-2016.pdf.
- Balabukh, V., Lavrynenko, O., Bilaniuk, V., Mykhnovych, A., & Pylypovych, O. (2018). Extreme weather events in Ukraine: occurrence and changes. In P.J. Sallis (Ed.), *Extreme Weather* (pp. 85—106). London: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.77306>.
- 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>.
- Boychenko, S., Voloshchuk, V., Movchan, Ya., Serdjuchenko, N., Tkachenko, V., Tyshchenko, O., & Savchenko, S. (2016). Features of climate change on Ukraine: scenarios, consequences for nature and agroecosystems. *Proceedings of the National Aviation University*, (4), 96—113. <https://doi.org/10.18372/2306-1472.69.11061>.
- Boychenko, S., Voloshchuk, V., Kuchma, T., & Serdyuchenko, N. (2018). Long-time changes of the thermal continentality index, the amplitudes and the phase of the seasonal temperature variation in Ukraine. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 40(3), 81—96. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i3.2018.137175>.

- 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 inter-comparison of idealized global deforestation experiments. *EGU General Assembly, Online, 4–8 May 2020*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-10295>.
- Buksha, I.F., Pyvovar, T.S., & Buksha, M.I. (2014). Vulnerability assessment of eastern Ukrainian forests to climate change: Case study on the base of GIS technology usage. *Scientific Proceedings of Forestry Academy of Sciences of Ukraine* (is. 12, pp. 30—37).
- Climate Change. United Nations. (2021). Retrieved from <https://www.un.org/en/global-issues/climate-change>.
- CMIP Phase 6 (CMIP6). (2021). Retrieved from <https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip6>.
- Fischer, A.P. (2019) Adapting and coping with climate change in temperate forests. *Global Environmental Change*, 54, 160—171. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.10.011>.
- Gao, Y. (2016). *Interactions between land surface, forests and climate: regional modelling studies in the boreal zone*: PhD thesis. University of Helsinki. Department of Physics. Retrieved from <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/166502>.
- Gauthier, S., Bernier, P., Kuuluvainen, T., Shvidenko, A., & Schepaschenko, D. (2015) Boreal forest health and global change. *Science*, 349 (6250), 819—822. <https://doi.org/10.1126/science.aaa9092>.
- Guide to Hydrological Practice. Vol. I. Hydrology. From Measurement to Hydrological Information. WMO. (2008). Retrieved from https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10473.
- Guide to Instruments and Methods of Observation. Vol. I. Measurement of Meteorological Variables. WMO. (2018). Retrieved from https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10616.
- ESGF: WCRP Coupled Model Intercomparison Project. (2021). Retrieved from <https://esgf-node.llnl.gov/search/cmip6/>.
- Groisman, P.Ya., & Ivanov, S.V. (2009). *Regional aspects of climate-terrestrial-hydrologic interactions in non-boreal Eastern Europe*. Springer, 376 p.
- Hofmeister, J., Hošek, J., Brabec, M., Štřalková, R., Mýlová, P., Bouda, M., Pettit, J. L., Rydval, M., & Svoboda, M. (2019). Microclimate edge effect in small fragments of temperate forests in the context of climate change. *Forest Ecology and Management*, 448, 48—56. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.05.069>.
- IPCC: Special Report on Climate Change, Desertification, Land Degradation, Sustainable Land Management, Food Security, and Greenhouse gas fluxes in Terrestrial Ecosystems. (2019). Retrieved from <https://www.ipcc.ch/srcc/>.
- IPCC: Frequently Asked Questions. (2015). Retrieved from https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/12/SR15_FAQ_Low_Res.pdf.
- Krakovska, S., Balabukh, V., Chyhareva, A., Pysarenko, L., Trofimova, I., & Shpytal, T. (2021). Projections of regional climate change in Ukraine based on multi-model ensembles of EuroCORDEX, EGU General Assembly 2021, online, 19—30 Apr 2021, EGU21-13821. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13821>.
- Kulmala, M., Ezhova, E., Kalliokoski, T., Noe, S., Vesala, T., Lohila, A., Liski, J., Makkonen, R., Bäck, J., Petäjä, T. & Kerminen, V.-M. (2020). CarbonSink+: Accounting for multiple climate feedbacks from forests. *Boreal Environment Research*, 25, 145—159.

- Lawrence, D.M., Hurtt, G.C., Arneth, A., Brovkin, V., Calvin, K.V., Jones, A.D., Jones, C.D., Lawrence, P.J., de Noblet-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>.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S. Kremer, A., Barbatie, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M.J., & Marchetti, M. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 259, 698—709. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>.
- Malytska, L., & Balabukh, V. (2018). Atmospheric self-cleaning coefficients as indicators of the atmospheric ability to dissipate pollutants in Ukraine. *Meteorology Hydrology and Water Management*, 6(1), 59—65. <https://doi.org/10.26491/mhwm/79450>.
- Morton, F.I. (1984). What are the limits on forest evaporation? *Journal of Hydrology*, 74(3-4), 373—398. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(84\)90025-8](https://doi.org/10.1016/0022-1694(84)90025-8).
- Novak, V. (2012). *Evapotranspiration in the Soil-Plant-Atmosphere System*. Springer, 272 p.
- Reynolds, E.R.C., & Thompson F.B. (Eds.). (1988). *Forests, Climate, and Hydrology: Regional Impacts*. 217 p.
- Shevchenko, O.H., Snizhko, S.I., & Matviienko, M.O. (2020). Simulation of the thermal comfort conditions of urban areas: a case study in Kyiv. *Visnyk of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series «Geology. Geography. Ecology»*, 51, 186—198. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-51-13>.
- Shevchenko, O., Snizhko, S., & Matzarakis, A. (2020). Recent trends on human thermal bioclimate conditions in Kyiv, Ukraine. *Geographia Polonica*, 93(1), 89—106. <https://doi.org/10.7163/GPol.0164>.
- Shvidenko, A., Buksha, I., Krakovska, S., & Lakyda, P. (2017). Vulnerability of Ukrainian Forests to Climate Change. *Sustainability*, 9(7). <https://doi.org/10.3390/su9071152>.
- Smith, R.L., & Smith, T.M. (2001). *Ecology & field biology*. San Francisco, Benjamin Cummings. 720 p.
- Snizhko S., Shevchenko, O., Didovets, Iu., Krivkivska, A., & Kostyrko, I. (2020) Assessment of changes in the main climatic parameters over the territory of Ukraine during the XXI century according to scenarios based on representative concentration pathways (RCP). *Conference Proceedings, XIV International Scientific Conference «Monitoring of Geological Processes and Ecological Condition of the Environment»*, Nov 2020 (Vol. 2020, pp. 1—5). <https://doi.org/10.3997/2214-4609.202056032>.
- Snyder, P.K., Delire, C., & Foley, J.A. (2004). Evaluating the influence of different vegetation biomes on the global climate. *Climate Dynamics*, 23, 279—302. <https://doi.org/10.1007/s00382-004-0430-0>.
- Spracklen, D., Bonn, B., & Carslaw, K. S. (2008). Boreal forests, aerosols and the impacts on clouds and climate. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 366(1885), 4613—4626. <https://doi.org/10.1098/rsta.2008.0201>.
- Wang, F., Notaro, M., Liu, Zh., & Chen, G. (2014). Observed Local and Remote Influences of Vegetation on the Atmosphere across North America Using a Model-Validated Statistical Technique That First Excludes Oceanic Forcings. *Journal of Climate*, 27, 362—382. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-13-00080.1>.
- WMO. Water-related hazards dominate disasters in the past 50 years. (2021). Retrieved from <https://public.wmo.int/en/media/press-release/water-related-hazards-dominate-disasters-past-50-years>.

Влияние обезлесения на испарение влаги с почвы и растительного покрова на территории Украины по данным численного эксперимента LUMIP

Л.А. Писаренко¹, С.В. Краковская^{1,2}, 2021

¹Украинский гидрометеорологический институт ДСНС Украины и НАН Украины, Киев, Украина

²Государственное учреждение Национальный антарктический научный центр МОН Украины, Киев, Украина

В статье проанализировано влияние частичного обезлесения на пространственно-временное распределение расходной части баланса влаги, а именно испарение с почвы и растительного покрова на территории Украины при минимальном антропогенном влиянии. Для исследования использовано данные шести глобальных климатических моделей теоретического эксперимента Land Use Model Intercomparison Project (LUMIP). Его цель — определить влияние уменьшения лесного покрова с последующей его заменой на травяной на распределение климатических характеристик в период с 1850 по 1929 г., когда лесной покров уменьшался с трендом 400 тыс. км²/год в доиндустриальный период 1850—1899 гг., или период минимального и относительно стабильного антропогенного влияния, и в следующие 30 лет, когда он оставался без изменений. Для определения влияния обезлесения проводили нормирование по средним показателям за первые 20 лет (1850—1869) и рассчитывали аномалии относительно указанных показателей как разницу к значениям за этот базовый период. Уменьшение лесистости с последующей ее заменой на травяной покров приводит к увеличению значений среднего месячного испарения с поверхности почвы с трендом до 1,6 мм/10 лет в теплый сезон с большими изменениями в апреле—июле, поскольку обезлесение обуславливает большую открытость почвы. Это подтверждается корреляционной связью $-0,8 \dots -0,4$ с максимальными значениями в апреле, когда еще мало развит травяной покров, который может препятствовать интенсивному испарению. На противовес ему, в моделях испарение с растительного покрова уменьшается вместе с обезлесением, поскольку уменьшается доступная поверхность для испарения. Такой эффект обнаружен преимущественно в узлах сетки моделей, где искусственно уменьшали лесистость, во все сезоны года, но он наибольший в весенние и летние месяцы со средними месячными значениями до $-0,8$ мм/10 лет и коэффициентами корреляции $0,4 \dots 0,9$ в зависимости от модели и сезона года. Таким образом, в моделировании эффекта глобального частичного обезлесения получен рост испарения с поверхности почвы одновременно с уменьшением испарения из растительного покрова на территории Украины. Такие изменения могут привести к перераспределению влаги между составляющими водного баланса территории, что может, в свою очередь, влиять на ее гидрологические, агрометеорологические и другие характеристики. В частности, увеличение испарения с поверхности почвы вследствие обезлесения может обусловить более интенсивное иссушение и деградацию почвы. Влияние обезлесения на общее содержание влаги в почве и режим выпадения осадков будет рассмотрено в следующей публикации.

Ключевые слова: LUMIP, обезлесение, лесистость, испарение с поверхности почвы, испарение с растительного покрова.