УДК 556.133: 551.58
DOI https://doi.org/10.32782/2226-0099.2026.151.13

АГРОЕКОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ЗВ'ЯЗКУ МІЖ ЕВАПОТРАНСПІРАЦІЄЮ ТА СТУПЕНЕМ ПОСУШЛИВОСТІ КЛІМАТУ

Лиховид П.В. *– д.с.-г.н., старший дослідник,*
головний науковий співробітник відділу використання меліорованих земель,
Інститут водних проблем і меліорації Національної академії аграрних наук України
orcid.org/0000-0002-0314-7644
Аверчев О.В. *– д.с.-г.н., професор,*
завідувач кафедри землеробства,
Херсонський державний аграрно-економічний університет
orcid.org/0000-0002-8333-2419
Чабан В.О. *– д.с.-г.н.,*
професор кафедри безпеки життєдіяльності
та професійно-прикладної фізичної підготовки,
Херсонська державна морська академія
orcid.org/0000-0003-0900-2128

Глобальне потепління є серйозним викликом для підтримки продуктивності агроекосистем, оскільки його багатогранні прояви включають низку негативних метеорологічних явищ. Одним із найбільш шкодочинних із них є наростання посушливості та опустелювання, особливо у регіонах із початково високим дефіцитом природного зволоження. Метою дослідження є встановлення взаємозв'язку між величиною евапотранспірації (ET_0) за Пенман-Монтейтом та індексом аридності як маркером ступеня посушливості клімату на глобальному рівні та на рівні контрастних європейських кліматів. Методичним базисом дослідження стала відкрита глобальна база даних Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Database v3.1. Математико-статистичну обробку даних та побудову регресійних моделей залежності величини індексу аридності від потенційної евапотранспірації виконували методом регресійного аналізу за алгоритмом найменших квадратів (OLS) у програмному середовищі Python 3. У якості представників європейських контрастних кліматів було обрано Україну (Dfb), Норвегію (Dfc), Іспанію (BSh) та Великобританію (Cfc). У результаті розрахункової роботи було встановлено, що у глобальному розрізі дольова участь евапотранспірації у формуванні посушливості клімату не перевищує 40%, а тому даний фактор не може вважатися вирішальним. Оцінка взаємозв'язку між індексом аридності та потенційною евапотранспірацією у контрастних кліматах Європи дозволила встановити істотний сильний вплив випаровуваності на формування посушливості. Максимально стабільним впродовж усього року він є у спекотному степовому кліматі Іспанії. Найбільшу силу впливу (82,8%) зафіксовано в умовах теплого континентального клімату України в період липня місяця, а найменшу – 8% – у період січня місяця в помірному холодному кліматі Великобританії. Спільною рисою є посилення впливу рівня випаровуваності на індекс аридності в теплий період року і суттєве зниження у холодний.

Ключові слова: *екологія, зміна клімату, зрошення, математичне моделювання, Пенман-Монтейт, регресійний аналіз, Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Database.*

© Лиховид П.В., Аверчев О.В., Чабан В.О., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

Lykhovyd P.V., Averchev O.V., Chaban V.O. Agroecological analysis of the relationship between evapotranspiration and severity of climate aridity

Global warming is a serious challenge for agricultural ecosystems sustainability, as its manifestation includes numerous adverse meteorological phenomena. Aridity aggravation and desertification are among the most harmful events, especially in the initially vulnerable regions with natural moisture deficit. The purpose of this study is to establish relationship between values of Penman-Monteith evapotranspiration (ET_0) and aridity index as a marker of climate aridity level. The study was conducted on global scale and for the contrasting European climates. The methodical basis was represented by the open Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Database v3.1. Mathematical and statistical data processing and regression modeling for the dependence of aridity index magnitude on potential evapotranspiration were performed by the ordinary least squares (OLS) regression analysis algorithm in Python 3 programming environment. For European contrasting climates Ukraine (Dfb), Norway (Dfc), Spain (BSh) and Great Britain (Cfc) were chosen. As a result of the calculations, it is established that on the global scale share of evapotranspiration in climate aridity formation does not exceed 40%, therefore, this factor cannot be decisive. Evaluation of the relationship between aridity index and potential evapotranspiration in contrasting climates of Europe revealed significantly strong influence of evapotranspiration on aridity formation. The highest stability of the influence throughout the whole year was established for Spain. The strongest (82.8%) effect was observed in the conditions of warm continental climate of Ukraine, and the least – 8% – during January in moderate cold climate of Great Britain. The common trait is an increase in evapotranspiration effects on aridity index during the warm period of year, and significant decrease in cold period.

Key words: *ecology, climate change, irrigation, mathematical modeling, Penman-Monteith, regression analysis, Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Database.*

Актуальність дослідження. Глобальне потепління та пов'язані з ним зміни клімату є одним із найскладніших і найбільш загрозливих викликів сьогодення. Стрімка зміна кліматичних умов приводить до каскаду трансформацій у природних екосистемах і агрофітоценозах, які є особливо чутливими та вразливими до нових, вкрай нестабільних і часто екстремальних погодних умов, і реагують на них істотним зниженням продуктивності, що у свою чергу ставить під загрозу продовольчу безпеку.

Серед головних наслідків глобальної зміни клімату науковці виділяють такі як зростання температури приземного шару атмосфери (причому темпи зростання істотно варіюють залежно від територіального розташування та за порою року), подальше зміщення співвідношення газів у приземному шарі атмосфери (що є водночас і першопричиною кліматичних змін), просторову і часову нерівномірність надходження опадів (часті періоди тривалої посухи змінюються зливами), зростання частоти несприятливих атмосферних і екологічних явищ (шторми, урагани, сильні грози, град, повені, підтоплення). Усе це веде до каскаду пов'язаних змін у біосфері як то, наприклад, зсуви та зниження біорозмаїття, міграція і вимирання видів, трансформація ґрунтового покриву, поява нових видів хвороб із підвищеною вірулентністю, а також нових мутацій у шкідників і зростання темпів розвитку їх поколінь, тощо [1]. Перелічені фактори становлять загрозу ефективному виробництву продукції рослинництва, яка є основою забезпечення продовольчої безпеки. Хоча окремі дослідники вказують і на певні позитивні наслідки кліматичних змін, наприклад, можливість інтродукції нових культурних видів, можливість прискореного розвитку рослин на полі і впровадження 2- або 3-врожайної культури, у більшості регіонів планети глобальне потепління спричинило негативні наслідки [2]. Втім, чи не на першому місці у багатьох куточках планети постає загроза опустелювання та втрати врожаїв через високий дефіцит природного зволоження на тлі зростаючих температур у вегетаційний період, що веде якщо не до повної загибелі, то до суттєвих втрат урожаю та зниження його якісних

показників. Чи не головною рушійною силою у цьому процесі на думку більшості науковців постає висока температура повітря приземного шару атмосфери, яка веде до істотного зростання потенційної евапотранспірації з денної поверхні поля [3]. Проте остаточно не доведено, що власне цей фактор є основою наростання посушливості клімату та опустелювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Не дивлячись на актуальність вивчення взаємозв'язку між потенційною евапотранспірацією та індексом аридності, на сьогодні існує обмежена кількість опублікованих наукових результатів із даної тематики. Ряд дослідників стверджує, що саме зростання температур приземного шару атмосфери та супутнє підвищення потенційної евапотранспірації є головою рушійною силою посилення посушливості клімату в багатьох куточках планети [4]. Так, наприклад, доведено, що саме випаровуваність із денної поверхні має найбільший вплив на деіфцит природної вологи у північному Китаї: дольова участь фактору евапотранспірації згідно проведеного науковцями математичного аналізу метеорологічних даних складає 63,41% [5]. Схожих висновків дійшли й інші групи дослідників, які встановили певну географічну залежність ступеня впливу евапотранспірації на посушливість кліматичних умов, і відмітили максимальну домінанту цього параметра на території США [6]. Згідно досліджень Pan et al. (2021), опади і потенційна евапотранспірація є головними визначальними факторами ступеня посушливості клімату, причому дослідники наголошують на домінантному впливі саме кількості та просторового розподілу опадів у більшості регіонів планети (крім Європи та Східної Азії), у той час як випаровуваність має менший вирішальний вплив. Втім, науковці наголошують, що з прискоренням темпів глобального потепління роль потенційної евапотранспірації у встановленні режиму посушливості щорічно зростає в середньому на 0,07% [7].

З іншого боку, в науковій періодиці все частіше зустрічаються докази на користь того, що рівень евапотранспірації не є головною рушійною силою зростаючої аридизації. Так, наприклад, встановлено другорядну роль евапотранспірації в зростанні посушливості клімату для низки районів Китаю, розташованих в межах Лесового Плато [8]. Подібного висновку дійшли й інші науковці, які встановили значно сильніший вплив кількості та розподілу опадів на індекс аридності у порівнянні з евапотранспірацією [9]. Є наукові дані, що відносна вологість повітря, просторовий і часовий розподіл опадів – це визначальні фактори впливу на ступінь посушливості клімату [10, 11].

Отже, питання впливу величини евапотранспірації на ступінь посушливості клімату залишається дискусійним. На нашу думку, допомогти вирішити його може математичне моделювання взаємозв'язків між індексом аридності та випаровуваністю на глобальному рівні та на рівні окремих територій із контрастними типами клімату. Враховуючи недостатній рівень саме модельних досліджень із цього напряму, дана тематика є актуальною як для України, так і для глобальної агроекологічної науки.

Постановка завдання. Метою дослідження було встановити математичні зв'язки між індексом аридності в редакції UNEP, як маркером посушливості клімату, та потенційною евапотранспірацією за рівнянням Пенман-Монтейта в редакції ФАО у глобальному річному та помісячному розрізах за період 1970–2000 рр. на основі відкритої бази даних Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Database v3.1, оновленої у липні 2025 р. [12]. За результатами дослідження буде визначено роль евапотранспірації у зростанні посушливості клімату на глобальному рівні, а також на рівні основних кліматично контрастних країн Європи (Норвегія, Україна, Велика Британія, Іспанія).

Матеріали і методи. У дослідженні використовували відкриту базу даних Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Database v3.1, яка вже була успішно використана для оцінки агрокліматичних умов Херсонської області України [13]. Методологія дослідження взаємозв'язку між референсною евапотранспірацією (ET_0), оціненої за рівнянням Пенман-Монтейта в редакції ФАО, та індексом аридності (AI) в редакції UNEP базується на застосуванні методів математичної статистики та просторового аналізу геоінформаційних даних. В основу математичного підходу покладено побудову парних лінійних регресійних моделей, які дають змогу кількісно оцінити ступінь та характер залежності між зазначеними параметрами як у глобальному масштабі, так і на рівні окремих регіонів. Моделювання здійснювали шляхом апроксимації просторово-розподілених даних методом найменших квадратів (OLS), де залежною змінною виступає індекс аридності, а незалежним предиктором – величина евапотранспірації. Адекватність та надійність отриманих регресійних рівнянь оцінювали за допомогою комплексу статистичних критеріїв, зокрема коефіцієнта детермінації (R^2), що характеризує частку поясненої дисперсії, та F-критерію Фішера для перевірки загальної значущості моделі [14]. Поряд із цим здійснюється діагностика структури залишків моделі з використанням інформаційного критерію Акаіке (AIC) для оцінки відносної якості моделей та критерію Дарбіна-Уотсона (DW) для виявлення автокореляції у просторових часових рядах [15].

Програмна реалізація зазначеного математичного апарату орієнтована на високоефективну обробку надвеликих масивів базових геопросторових кліматичних даних. Для забезпечення високої обчислювальної швидкодії та раціонального використання ресурсів оперативної пам'яті розроблено спеціалізований алгоритм мовою Python 3 із залученням бібліотек rasterio, pandas, numpy, statsmodels та pyarrow. Початковий етап обробки передбачає декодування растрових файлів формату GeoTIFF, екстракцію векторів географічних координат (lon, lat) та формування бінарної маски суші за значеннями індексу аридності. Для оптимізації подальших обчислень просторово-узгоджені дані сум евапотранспірації та показників аридності конвертуються у бінарний формат Apache Parquet із застосуванням компресії Snappy, що забезпечує миттєвий доступ до мільйонів точок спостереження.

Регіоналізація розрахунків для окремих територій, таких як європейські країни з контрастним кліматом, а саме Україна, Норвегія, Іспанія та Велика Британія, реалізується шляхом просторової фільтрації координат у заданих обмежувальних прямокутниках (bounding boxes). Для запобігання переповненню пам'яті при обробці багатомільйонних вибірок розрахунок регресійних параметрів та статистичних метрик виконується за допомогою оптимізованих векторних операцій numpy з примусовим звільненням тимчасових масивів та циклічним викликом garbage collector. Сформований програмний комплекс забезпечує повний цикл автоматизованого аналізу: від первинного декодування растрових сіток до генерації підсумкових аналітичних таблиць і статистичних звітів у форматі CSV для щомісячних та річних часових інтервалів.

Зазначену математико-статистичну обробку даних виконували у річному та помісячному розрізах на глобальному (планетарному) рівні, а також для окремих країн Європи із контрастним кліматом для виявлення відмінностей у взаємовідношенні досліджуваних показників у різних кліматичних реаліях. Під час вибору країн з контрастним кліматом керувалися сучасною кліматичною мапою Європи [16], згідно якої Україна має клімат типу Dfb (холодний континентальний без сухого сезону з теплим літом); Норвегія – Dfc (холодний континентальний без сухого сезону з холодним літом); Іспанія – BSh (сухий степовий спекотний); Великобританія – Cfc (помірний без сухого сезону з холодним літом). Таким чином, було охоплено та порівняно чотири типові кліматичні ареали Європи.

Виклад основного матеріалу дослідження. В першу чергу зупинимо увагу на результатах моделювання, виконаних у глобальному річному розрізі (Табл. 1). Величина коефіцієнту детермінації свідчить про помірний взаємозв'язок між величиною евапотранспірації та індексом аридності. Втім, менше ніж 50% варіювання показника посушливості клімату може бути пояснено за рахунок евапотранспірації, що свідчить на користь гіпотези про другорядну роль випаровуваності у формуванні клімату.

Таблиця 1

Результати регресійного аналізу зв'язку між евапотранспірацією та індексом аридності за алгоритмом OLS (річний розріз) на глобальному рівні

Параметр моделі	Значення
Залежна змінна	Індекс аридності
Кількість спостережень	777600000
Коефіцієнт детермінації	0,401
F-статистика	$5{,}207\times10^{8}$
Константа	$0{,}9227\pm3{,}43\times10^{-5}$
Регресійний коефіцієнт	$-1{,}411\times10^{-5}\pm6{,}18\times10^{-10}$
Критерій Акаіке	$1{,}133\times10^{9}$
Критерій Дарбіна-Уотсона	0,010

У випадку аналізу даних у місячному розрізі (табл. 2) встановлено ще менш переконливий вплив евапотранспірації на індекс посушливості кілмату. Так, величина коефіцієнту детермінації в окремі періоди року (зокрема, весняно-літній період) не перевищує 0,21. Це свідчить про надзвичайно низький, хоча і статистично істотний, вплив евапотранспірації на глобальне кліматотворення. Максимальна тіснота зв'язку між індексом аридності та величиною евапотранспірації спостерігається у холодний період року (листопад – грудень).

Таблиця 2

Результати регресійного аналізу зв'язку між евапотранспірацією та індексом аридності за алгоритмом OLS (місячний розріз)* на глобальному рівні

Параметр моделі	Значення по місяцях					
Перша половина року	I	II	III	IV	V	VI
R^2	0,294	0,226	0,102	0,103	0,155	0,163
F-stat	$5{,}88\times10^{7}$	$4{,}12\times10^{7}$	$1{,}61\times10^{7}$	$1{,}61\times10^{7}$	$2{,}58\times10^{7}$	$2{,}75\times10^{7}$
C	116,049	101,580	108,203	108,203	139,067	145,277
b	-19,381	-18,798	-18,652	-18,652	-22,446	-22,262
AIC	$1{,}18\times10^{9}$	$1{,}14\times10^{9}$	$1{,}15\times10^{9}$	$1{,}15\times10^{9}$	$1{,}08\times10^{9}$	$1{,}10\times10^{9}$
DW	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,001
Друга половина року	VII	VIII	IX	X	XI	XII
R^2	0,163	0,207	0,271	0,288	0,320	0,316
F-stat	$2{,}75\times10^{7}$	$3{,}68\times10^{7}$	$5{,}25\times10^{7}$	$5{,}69\times10^{7}$	$6{,}63\times10^{7}$	$6{,}52\times10^{7}$
C	150,918	145,304	132,461	126,736	113,612	116,529
b	-22,370	-23,944	-27,375	-27,868	-19,412	-19,294
AIC	$1{,}11\times10^{9}$	$1{,}07\times10^{9}$	$1{,}05\times10^{9}$	$1{,}11\times10^{9}$	$1{,}14\times10^{9}$	$1{,}18\times10^{9}$
DW	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001

Примітка: кількість помісячних спостережень – 140992691; залежна змінна – індекс аридності; R^2 – коефіцієнт детермінації; F-stat – критерій Фішера; C – константа; b – коефіцієнт регресії; AIC – критерій Акаіке; DW – критерій Дарбіна-Уотсона.

Аналіз даних у розрізі країн Європи із контрастним кліматом за річні періоди засвідчив, що у різних кліматичних умовах сила впливу потенційної випаровуваності на посушливість клімату є неоднаковою (табл. 3). В усіх досліджуваних країнах встановлено істотність взаємозв'язку між досліджуваними метеорологічними параметрами, але тіснота була мінімальна в умовах холодного континентального клімату Норвегії, та максимальною – в умовах спекотного степового клімату Іспанії.

Таблиця 3

Результати регресійного аналізу зв'язку між евапотранспірацією та індексом аридності за алгоритмом OLS (річний розріз) за країнами Європи з контрастним кліматом

Параметр моделі	Значення за країнами			
	Україна	Норвегія	Великобританія	Іспанія
Залежна змінна	Індекс аридності			
Кількість спостережень	1903675	1518353	558237	988698
Коефіцієнт детермінації	0,456	0,420	0,528	0,641
F-статистика	$1{,}60\times10^{6}$	$1{,}10\times10^{6}$	$9{,}96\times10^{5}$	$1{,}11\times10^{6}$
Константа	3,333	6,569	9,531	3,996
Регресійний коефіцієнт	-0,002	-0,007	-0,011	-0,002
Критерій Акаіке	$3{,}69\times10^{5}$	$2{,}18\times10^{6}$	$9{,}15\times10^{6}$	$1{,}19\times10^{6}$
Критерій Дарбіна-Уотсона	0,006	0,015	0,026	0,006

Вивчення внутрішньорічних особливостей дозволило встановити, що в умовах теплого континентального клімату України максимальна сила впливу випаровуваності на формування посушливості спостерігається у найбільш теплу пору року, починаючи з травня місяця і закінчуючи вереснем (коефіцієнт детермінації в межах 0,67–0,83, тобто зміни в евапотранспірації пояснюють понад 50% у зміни інтенсивності посух в Україні у зазначений період). У той самий час, в холодний період року вплив евапотранспірації є незначним (табл. 4).

Таблиця 4

Результати регресійного аналізу зв'язку між евапотранспірацією та індексом аридності за алгоритмом OLS (місячний розріз) для України*

Параметр моделі	Значення по місяцях					
Перша половина року	I	II	III	IV	V	VI
R^2	0,287	0,380	0,252	0,492	0,675	0,785
F-stat	$7{,}67\times10^{5}$	$1{,}16\times10^{6}$	$6{,}40\times10^{5}$	$1{,}84\times10^{6}$	$3{,}95\times10^{6}$	$6{,}95\times10^{6}$
C	18,750	27,168	49,728	92,596	142,531	161,487
b	-2,029	-4,890	-13,533	-28,765	-50,670	-53,196
AIC	$3{,}98\times10^{6}$	$4{,}68\times10^{6}$	$6{,}79\times10^{6}$	$6{,}98\times10^{6}$	$7{,}63\times10^{6}$	$7{,}17\times10^{6}$
DW	0,021	0,014	0,008	0,010	0,010	0,011
Друга половина року	VII	VIII	IX	X	XI	XII
R^2	0,828	0,770	0,714	0,582	0,451	0,334
F-stat	$9{,}14\times10^{6}$	$6{,}39\times10^{6}$	$4{,}75\times10^{6}$	$2{,}65\times10^{6}$	$1{,}56\times10^{6}$	$9{,}56\times10^{5}$
C	177,557	159,427	107,609	60,776	27,355	18,834
b	-71,562	-78,307	-48,630	-18,676	-3,584	-1,791
AIC	$7{,}61\times10^{6}$	$8{,}37\times10^{6}$	$7{,}61\times10^{6}$	$6{,}66\times10^{6}$	$4{,}93\times10^{6}$	$4{,}11\times10^{6}$
DW	0,011	0,008	0,009	0,009	0,014	0,020

Примітка: кількість помісячних спостережень – 1903675; залежна змінна – індекс аридності; R^2 – коефіцієнт детермінації; F-stat – критерій Фішера; C – константа; b – коефіцієнт регресії; AIC – критерій Акаіке; DW – критерій Дарбіна-Уотсона.

Щодо Норвегії, то в умовах холодного континентального клімату евапотранспірація демонструє мінімальний вплив на посушливість (табл. 5). У осінній, зимовий та ранньовесняний періоди року вплив евапотранспірації фактично є дуже обмеженим, і пояснює від 1 до 33% варіації в індексі аридності. У теплий літній період року ступінь впливу випаровуваності істотно зростає, але не перевищує максимуму в 71,9% на період липня місяця.

Таблиця 5

Результати регресійного аналізу зв'язку між евапотранспірацією та індексом аридності за алгоритмом OLS (місячний розріз) для Норвегії*

Параметр моделі	**Значення по місяцях**					
Перша половина року	I	II	III	IV	V	VI
R^2	0,328	0,170	0,011	0,153	0,426	0,668
F-stat	$7{,}42\times10^5$	$3{,}10\times10^5$	$1{,}72\times10^4$	$2{,}75\times10^5$	$1{,}13\times10^6$	$3{,}05\times10^6$
C	20,537	13,819	23,753	51,655	103,307	127,518
b	-2,429	-1,105	-0,411	-4,994	-26,434	-32,724
AIC	$3{,}87\times10^6$	$4{,}07\times10^6$	$5{,}00\times10^6$	$5{,}67\times10^6$	$6{,}45\times10^6$	$5{,}76\times10^6$
DW	0,091	0,054	0,030	0,018	0,011	0,021
Друга половина року	VII	VIII	IX	X	XI	XII
R^2	0,719	0,437	0,061	0,013	0,288	0,337
F-stat	$3{,}88\times10^6$	$1{,}18\times10^6$	$9{,}82\times10^4$	$2{,}01\times10^4$	$6{,}13\times10^5$	$7{,}72\times10^5$
C	129,124	89,152	43,605	21,017	31,130	26,722
b	-29,926	-10,991	-1,552	-0,505	-3,791	-3,298
AIC	$5{,}55\times10^6$	$5{,}88\times10^6$	$6{,}02\times10^6$	$5{,}26\times10^6$	$4{,}35\times10^6$	$4{,}02\times10^6$
DW	0,032	0,016	0,026	0,032	0,064	0,098

Примітка: кількість помісячних спостережень – 1518353; залежна змінна – індекс аридності; R^2 – коефіцієнт детермінації; F-stat – критерій Фішера; C – константа; b – коефіцієнт регресії; AIC – критерій Акаіке; DW – критерій Дарбіна-Уотсона.

Стосовно Іспанії, в умовах спекотного степового клімату розподіл сили впливу евапотранспірації на індекс аридності є більш рівномірним і не спостерігається таких разючих контрастів між теплим і холодним періодами року (табл. 6). Цікаво, що максимальну силу впливу зафіксовано для періоду травень – червень, не дивлячись на те, що цей проміжок часу не є найбільш спекотним. У зимові місяці традиційно взаємозв'язок між досліджуваними показниками істотно знижується.

Таблиця 6

Результати регресійного аналізу зв'язку між евапотранспірацією та індексом аридності за алгоритмом OLS (місячний розріз) для Іспанії*

Параметр моделі	**Значення по місяцях**					
Перша половина року	I	II	III	IV	V	VI
R^2	0,198	0,342	0,487	0,676	0,788	0,744
F-stat	$2{,}44\times10^5$	$5{,}13\times10^5$	$9{,}38\times10^5$	$2{,}07\times10^6$	$3{,}68\times10^6$	$2{,}87\times10^6$
C	38,662	51,646	89,337	119,074	159,937	195,004
b	-2,123	-4,134	-16,048	-30,644	-57,032	-121,579
AIC	$3{,}81\times10^6$	$3{,}73\times10^6$	$4{,}24\times10^6$	$4{,}28\times10^6$	$4{,}45\times10^6$	$5{,}19\times10^6$
DW	0,017	0,018	0,012	0,014	0,016	0,013
Друга половина року	VII	VIII	IX	X	XI	XII

Продовження таблиці 6

Параметр моделі	Значення по місяцях					
R^2	0,688	0,652	0,691	0,476	0,270	0,168
F-stat	$2{,}18\times10^6$	$1{,}85\times10^6$	$2{,}21\times10^6$	$8{,}97\times10^5$	$3{,}66\times10^5$	$1{,}99\times10^5$
C	221,946	198,219	144,516	89,383	49,230	36,467
b	-219,220	-139,855	-60,761	-14,488	-3,638	-1,877
AIC	$5{,}83\times10^6$	$5{,}70\times10^6$	$4{,}74\times10^6$	$4{,}48\times10^6$	$4{,}02\times10^6$	$3{,}72\times10^6$
DW	0,012	0,014	0,017	0,010	0,012	0,019

Примітка: кількість помісячних спостережень – 988698; залежна змінна – індекс аридності; R^2 – коефіцієнт детермінації; F-stat – критерій Фішера; C – константа; b – коефіцієнт регресії; AIC – критерій Акаіке; DW – критерій Дарбіна-Уотсона.

У Великобританії максимальну тісноту взаємозв'язку між випаровуваністю та індексом аридності зафіксовано для літнього періоду (липень – вересень), причому коефіцієнт детермінації в жоден із місяців не перевищує 0,7 (табл. 7). Навесні вплив евапотранспірації на зміни в посушливості клімату країни є помірним (в межах 50–55%), у той час як у холодний осінньо-зимовий період він є несуктгєвим (8–16%).

Таблиця 7

Результати регресійного аналізу зв'язку між евапотранспірацією та індексом аридності за алгоритмом OLS (місячний розріз) для Великобританії*

Параметр моделі	Значення по місяцях					
Перша половина року	I	II	III	IV	V	VI
R^2	0,080	0,165	0,538	0,534	0,461	0,557
F-stat	$4{,}82\times10^4$	$1{,}10\times10^5$	$6{,}50\times10^5$	$6{,}40\times10^5$	$4{,}77\times10^5$	$7{,}01\times10^5$
C	23,545	25,098	44,862	65,614	93,547	106,416
b	-1,078	-1,078	-2,820	-7,980	-15,032	-22,151
AIC	$1{,}84\times10^6$	$1{,}54\times10^6$	$1{,}47\times10^6$	$1{,}51\times10^6$	$1{,}74\times10^6$	$1{,}90\times10^6$
DW	0,082	0,108	0,085	0,073	0,046	0,036
Друга половина року	VII	VIII	IX	X	XI	XII
R^2	0,687	0,697	0,623	0,314	0,107	0,114
F-stat	$1{,}22\times10^6$	$1{,}29\times10^6$	$9{,}22\times10^5$	$2{,}56\times10^5$	$6{,}69\times10^4$	$7{,}18\times10^4$
C	115,012	101,694	65,019	39,871	24,913	23,125
b	-27,149	-18,939	-5,523	-1,750	-1,125	-1,235
AIC	$2{,}14\times10^6$	$2{,}13\times10^6$	$1{,}76\times10^6$	$1{,}57\times10^6$	$1{,}73\times10^6$	$1{,}65\times10^6$
DW	0,028	0,031	0,058	0,078	0,073	0,100

Примітка: кількість помісячних спостережень – 558237; залежна змінна – індекс аридності; R^2 – коефіцієнт детермінації; F-stat – критерій Фішера; C – константа; b – коефіцієнт регресії; AIC – критерій Акаіке; DW – критерій Дарбіна-Уотсона.

Таким чином, виявлено певні закономірності взаємозв'язку між ступенем посушливості клімату, вираженого через індекс аридності, та рівнем евапотранспірації. У глобальному масштабі, евапотранспірація є впливовим, але вірогідніше за все, другорядним фактором визначення інтенсивності посушливості. Вивчення взаємозв'язку між досліджуваними показниками у регіональному розрізі в різних кліматах дозволило встановити, що тип клімату грає неабияку роль у тому, наскільки впливовим є фактор випаровуваності. Так, наприклад, у річному розрізі найсильнішим він є в Іспанії, а найменш значним – у Норвегії. Більш детальний

аналіз помісячних періодів дозволив встановити, що максимально сильно евапотранспірація впливає на посушливість у період липня місяця в Україні, перевершуючи навіть Іспанію. Мінімальний вплив на аридизацію у помісячному розрізі випаровуваність чинить у Великобританії. Спільною рисою усіх типів клімату є максимальний вплив у теплий (пізньовесняний та літній) період року і мінімальний – у холодний.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Встановлено, що у глобальному розрізі дольова участь евапотранспірації у формуванні посушливості клімату не перевищує 40%, а тому даний фактор не може вважатися вирішальним. Оцінка взаємозв'язку між індексом аридності та потенційною евапотранспірацією у контрастних кліматах Європи дозволила встановити істотний сильний вплив випаровуваності на формування посушливості. Максимально стабільним впродовж усього року він є у спекотному степовому кліматі Іспанії. Найбільшу силу впливу (82,8%) зафіксовано в умовах теплого континентального клімату України в період липня місяця, а найменшу – 8% – у період січня місяця в помірному холодному кліматі Великобританії. Спільною рисою є посилення впливу рівня випаровуваності на індекс аридності в теплий період року і суттєве зниження у холодний.

Майбутні дослідження будуть зосереджені на розширенні набору даних за більш сучасний період (2000–2025 рр.) та деталізації оцінки взаємозв'язку між евапотранспірацією та індексом аридності на більш широкій вибірці контрастних кліматів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Janni M., Maestri E., Gulli M., Marmiroli M., Marmiroli N. Plant responses to climate change, how global warming may impact on food security: A critical review. *Frontiers in Plant science*. 2024. Vol. 14. P. 1297569. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1297569

2. Прокопенко К. О., Удова Л. О. Сільське господарство України: виклики і шляхи розвитку в умовах зміни клімату. *Economy & Forecasting*. 2017. Вип. 1. С. 92–107. https://doi.org/10.15407/eip2017.01.092

3. Hakami-Kermani A., Babazadeh H. Evapotranspiration and water requirement changes of main crops under climate change conditions in a semi-arid region. *Applied Water Science*. Vol. 16. No. 1. P. 18. https://doi.org/10.1007/s13201-025-02696-8

4. Sardans J., Miralles A., Tariq A., Zeng F., Wang R., Penuelas J. Growing aridity poses threats to global land surface. *Communications Earth & Environment*. 2024. Vol. 5. No. 1. P. 776. https://doi.org/10.1038/s43247-024-01935-1

5. Han X., Chen Y., Fang G., Li Z., Li Y., Di Y. Spatiotemporal variations and driving factors of water availability in the arid and semiarid regions of Northern China. *Remote Sensing*. 2024. Vol. 16. No. 22. P. 4318. https://doi.org/10.3390/rs16224318

6. Um M.-J., Kim Y., Park D., Jung K., Wang Z., Kim M. M., Shin H. Impacts of potential evapotranspiration on drought phenomena in different regions and climate zones. *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 703. P. 135590. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135590

7. Pan N., Wang S., Liu Y., Li Y., Xue F., Wei F., Yu H., Fu B. Rapid increase of potential evapotranspiration weakens the effect of precipitation on aridity in global drylands. *Journal of Arid Environments*. 2021. Vol. 186. P. 104414. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104414

8. Zhao Y., Zou X., Zhang J., Cao L., Xu X., Zhang K., Chen Y. Spatio-temporal variation of reference evapotranspiration and aridity index in the Loess Plateau Region of China, during 1961–2012. *Quaternary International*. 2014. Vol. 349. P. 196–206. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.06.050

9. Yin Y., Ma D., Wu S. Nonlinear changes in aridity due to precipitation and evapotranspiration in China from 1961 to 2015. *Climate Research*. 2018. Vol. 74. P. 263–281. https://doi.org/10.3354/cr01500

10. Zhang K.-X., Pan S.-M., Zhang W., Xu Y.-H., Cao L.-G., Hao Y.-P., Wang Y. Influence of climate change on reference evapotranspiration and aridity index and their temporal-spatial variations in the Yellow River Basin, China, from 1961 to 2012. *Quaternary International*. 2015. Vol. 380. P. 75–82. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2014.12.037

11. Huo Z., Dai X., Feng S., Kang S., Huang G. Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China. Journal of Hydrology. 2013. Vol. 492. P. 24–34. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.011

12. Zomer R. J., Xu J., Trabucco A. Version 3 of the Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration Database. *Scientific Data*. 2022. Vol. 9. P. 409.

13. Вожегова Р. А., Лиховид П. В., Лавренко С. О., Пілярська О. О. Можливості застосування бази даних «Global Aridity Index and Potential Evapotranspiration (ET0) Database v3» в агрокліматичних умовах Херсонської області. *Аграрні інновації*. 2023. № 19. С. 19–23. https://doi.org/10.32848/agrar.innov.2023.19.3

14. Fisher R. A. The goodness of fit of regression formulae, and the distribution of regression coefficients. *Journal of the Royal Statistical Society*. 1922. Vol. 85. No. 4. P. 597–612.

15. Bozdogan H. Model selection and Akaike's information criterion (AIC): The general theory and its analytical extensions. *Psychometrika*. 1987. Vol. 52. No. 3. P. 345–370. https://doi.org/10.1007/BF02294361

16. Cui D., Liang S., Wang D., Liu Z. A 1 km global dataset of historical (1979–2013) and future (2020–2100) Koppen-Geiger climate classification and bioclimatic variables. *Earth System Science Data*. 2021. Vol. 13. No. 11. P. 5087–5114. https://doi.org/10.5194/essd-13-5087-2021

Дата першого надходження статті до видання: 29.08.2026
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 19.10.2026
Дата публікації (оприлюднення) статті: 13.11.2026