


Комплексна оцінка посушливості клімату України

Василь Затула

к. геогр. н., доцент, кафедра метеорології та кліматології,
Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна,
e-mail vaszatula@knu.ua,  <https://orcid.org/0000-0001-5598-0200>

Дану роботу присвячено проблемам оцінки посушливості клімату України. Для проведення такої оцінки застосовано комбінований індекс Пінна (PCI) та його модифікацію (PCI_m). Базові обчислення цих індексів виконувалися більш як для 150 метеостанцій країни за два останні 30-річні періоди. Запропонована автором модифікація індексу краще відображає особливості аридності клімату в країнах помірної пояси, необхідні для прийняття рішень щодо іригації сільськогосподарських угідь. Розглянуто особливості географічного розподілу різних типів клімату України за цими індексами в 1961-1990 та в 1991-2020 рр. Показано, що в обидва періоди тут переважали гумідні різновиди клімату. Найбільший ступінь гумідності властивий зоні мішаних лісів та Українським Карпатам, а найбільш аридними є рівнинні простори півдня країни. Представлено карти розподілу посушливості клімату для цих двох періодів, а також карту зміни індексів аридності між ними. Для модифікованого варіанту індексу проведено поглиблений статистичний аналіз. Посушливість клімату України з просуванням із півночі на південь зростає принаймні у півтора рази швидше, ніж з віддаленням від Атлантичного океану у східному напрямку. Особливо чітко (коефіцієнт детермінації $R^2 > 0,7$) виявилася тенденція до посилення гумідності клімату з висотою. Коефіцієнти лінійного тренду цього показника в обох частинах досліджуваного періоду наближаються до 6 од. у перерахунку на 100 м висоти. Побудовані моделі множинної регресії дозволили встановити вид залежності індексу від усього комплексу елементів географічного положення в різні частини розглядуваного періоду, а також те, що провідну роль у формуванні загальної дисперсії індексу відіграє абсолютна висота (з часткою понад 60-65 %) та географічна довгота (з часткою понад 20 %). У різних регіонах України спостерігалися різні за знаком зміни індексу PCI_m. Як правило, за абсолютними значеннями вони не перевищували 5 од., однак вихід цього показника за межі одного середньоквадратичного відхилення (~2,5 од.) уже вказує на значне порушення попередніх кліматичних умов. Обчислені зміни індексу PCI_m приблизно на половині території країни перебувають фактично на межі цього критерію необоротних кліматичних змін. Аридизація клімату стає важливою ознакою розбалансування регіональної кліматичної системи України, а тому вимагає невідкладного реагування на рівні розробки і впровадження науково обґрунтованих заходів державної кліматичної політики у відповідності з цілями сталого розвитку ООН.

Ключові слова: гумідність і аридність клімату, комбінований індекс Пінна, модифікований комбінований індекс Пінна, моделі регресії, зміни клімату, адаптація сільського господарства до змін клімату, Україна; цілі сталого розвитку ООН.

Як цитувати: Затула Василь. Комплексна оцінка посушливості клімату України / Василь Затула // Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія», 2024. – Вип. 61. – С. 180-192. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-15>

In cites: Zatul Vasyl (2024). Complex assessing of aridity in Ukraine. Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology", (61), 180-192. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-15> [in Ukrainian]

Постановка проблеми. Аридність або посушливість є фундаментальною властивістю клімату, яка потребує точності і зваженості підходів до її опису та оцінки. Попри формальну простоту формулювання аридності як властивості клімату певної території, в кліматології усе ще є місце для пошуку найкращих показників та методів її дослідження. Виконання такого роду досліджень сприятиме розробці і впровадженню науково обґрунтованих заходів державної кліматичної політики відповідно до цілей сталого розвитку ООН.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аридність клімату тісно переплітається з поняттями бездошової погоди і посухи, часто оперує до таких елементів метеорологічного режиму, як вологість повітря, хмарність та атмосферні опади. У зволоженні деяких екосистем Землі винятково важливу роль відіграють роса та тумани.

В описі характеру зволоження важливе місце відводиться випаровуванню, швидкість якого,

згідно із формулою Джона Дальтона, залежить від різниці тиску насичення при температурі випарювальної поверхні і парціального тиску водяної пари, атмосферного тиску, а також від швидкості вітру та пов'язаної з нею інтенсивності турбулентного перенесення водяної пари [2]. На випаровування з поверхні ґрунту, окрім метеорологічних чинників, впливає також стан ґрунтово-рослинного покриву, а в умовах розчленованого рельєфу ще й абсолютна висота та експозиція схилу, інші фактори [4; 7; 18]. Це пояснює велику розмаїтість підходів щодо виділення сухих і вологих кліматів [18; 22].

Серед проявів сухого клімату особливо небезпечними є посухи, які за своєю природою є регіональним явищем [11]. Географічне положення України сприяє регулярному виникненню і розвитку на її території посух різної інтенсивності та просторового охоплення. Їх частота в сучасних умовах клімату зростає [1]. Встановленню посушливої погоди в Україні сприяє три-

вала трансформація повітря в антициклонах, причому одним з основних процесів при цьому є блокування зонального потоку в атмосфері [8].

У середніх кліматичних умовах як посуха, так і посушливість проявляються через дефіцит вологи [12]. Однак між цими поняттями є й принципові відмінності. Зокрема, на відміну від посухи, яка є обмеженим у часі природним явищем, посушливість є постійною особливістю клімату [6; 24; 27].

Посушливість відображає складний комплекс умов навколишнього середовища, що описується температурою повітря, атмосферними опадами, випаровуванням і за якої формується низький рослинний покрив [22], характерний для степових і пустельних ландшафтів.

Зазвичай посушливість зумовлена встановленням на великих просторах Землі стійкої циркуляції атмосфери й океану, вплив якої посилюються регіональними орографічними особливостями. На формування посушливих явищ в окремих регіонах найбільший вплив мають області високого тиску, холодні океанічні течії і сухі вітри, які дмуть над материками, а також ефект дощової тіні, спричинений орографічними перешкодами [12; 24; 28]. Однак метеорологічні чинники формування посушливості важко відокремити від нестачі води, пов'язаної з особливостями геологічної будови території та гідрогеологічними умовами залягання і динаміки підземних вод [13].

Причини посушливості важливі з погляду сучасної зміни глобального клімату, а відтак великого значення набуває і оцінка самих умов посушливості.

Однією з найважливіших проблем сучасності є нестача водних ресурсів та поширення посушливості й прогресуюче опустелювання в багатьох регіонах Земної кулі. Одеські дослідники [8] переконані, що збільшення повторюваності посух в Україні спричинене зміною регіонального клімату, зокрема підвищенням температури повітря, впливом Атлантики при зміщенні на схід центрів дії атмосфери та відхиленням траєкторій переміщення баричних утворень від типових. В Україні з аридизацією клімату пов'язане також зростання дефіциту насичення повітря [10].

Атмосферна посуха завдає великої шкоди сільськогосподарським культурам. Її прогнозування вимагає врахування сезонності явища та оцінки зміни властивостей підстильної поверхні. Значна увага приділяється попередженню та розробці стратегічних методів послаблення впливу посух. Вирішення цих завдань може досягатися різними шляхами, зокрема і завдяки проведенню ефективної економічної політики з перерозподілу та збереження водних ресурсів в

аридних регіонах [9].

Серед численних показників посушливості в сучасній кліматологічній практиці широко використовуються індекси аридності де Мартонна, запропоновані ним ще на початку ХХ ст. Відомо декілька типів таких індексів, які обчислюються за річний або коротший період часу.

Перший із них ґрунтується на використанні річних показників температури повітря і кількості опадів:

$$I_{DM} = P/(t + 10), \quad (1)$$

де I_{DM} – індекс аридності де Мартонна; P – річна кількість опадів, мм; t – середня річна температура, °С.

На основі місячних даних обчислюється інший тип індексу:

$$I_m = 12P'/(t' + 10), \quad (2)$$

де P' і t' – середні місячні значення кількості опадів та температури повітря, відповідно, для даного місяця. Вважається [16; 17; 30], що при $I_m < 20$ необхідна іригація землі.

Комбінований індекс Пінна (Pinna Combina-tive Index, PCI) враховує обидва підходи й обчислюється за формулою [16; 17; 25; 30]:

$$PCI = \frac{1}{2} \left(\frac{P}{t+10} + \frac{12P'_d}{t'_d+10} \right), \quad (3)$$

де P'_d і t'_d – середні місячні значення кількості опадів і температури повітря для найсухішого місяця року.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Певною проблемою опису посушливості клімату в різних країнах світу за допомогою комбінованого індексу Пінна є певна незлагодженість у встановленні кількісних меж гумідних різновидів клімату різними авторами. Досі не було запропоновано жодного критерію для оцінки критичності змін умов аридності, накопичених в період глобального потепління. На регіональному рівні не можна вважати закритим питанням створення повних кліматологічних описів аридності в багатьох країнах світу, в Україні зокрема.

Основною метою роботи є критичний аналіз застосовності індексу PCI для дослідження посушливості клімату України та власне сама характеристика аридності, насамперед встановлення закономірностей просторового розподілу і зміни у часі індексів посушливості клімату на території країни за період 1961-2020 рр.

Матеріал і методи досліджень. Представлені нижче результати отримано шляхом обчислення та кліматологічного опрацювання індексів аридності на 153 метеорологічних станціях України за останні шість десятиріч. В емпіричну основу цих індексів покладено дані Кліматичних

кадастрів України за періоди 1961-1990 і 1991-2020 рр. Перелік пунктів спостереження в даному дослідженні формувався зі станцій державної метеорологічної мережі України з повними кліматологічними рядами спостережень за температурою повітря і кількістю опадів в обох періодах спостереження. Ці станції достатньо рівномірно розподілені по материковій частині території країни і належним чином репрезентують усі її природно-кліматичні зони.

Опрацювання даних проводилося з використанням стандартних інструментів статистичного аналізу, реалізованих в пакеті програм "Microsoft Excel". Просторові моделі розподілу індексів аридності в Україні будувалися за допомогою методу обернених зважених відстаней в програмі QGIS (версія 3.34 "Prizren").

Загальний характер і ступінь впливу елементів географічного положення на показники аридності клімату оцінювалися за допомогою методів регресійного аналізу. Для оцінки їх залежності від окремих складових географічного положення – географічної довготи (λ , град.), широти (φ , град.) та висоти над рівнем моря (h , м н.р.м.) використовувався метод парної лінійної регресії, для сукупності географічних умов – метод множинної лінійної регресії. Зокрема, модель множинної регресії у нашому випадку можна подати у вигляді:

$$\hat{y} = a_{\lambda}\lambda + a_{\varphi}\varphi + a_h h + a_0, \quad (4)$$

де \hat{y} – оцінка залежної величини (індексів аридності клімату); λ , φ , h – незалежна величина (досліджуваний фактор впливу); a_{λ} , a_{φ} , a_h і a_0 – деякі безрозмірні коефіцієнти.

Якість побудованих моделей оцінювалася за допомогою прийнятих у математичній статистиці методів.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Відомо, що помірно-континентальний клімат України зі своєрідними рисами аридності в різних частинах її території, є сприятливим для сільського господарства. За даними метеорологічних спостережень, середнє багаторічне значення комбінованого індексу Пінна на материковій частині території України становило 39,9 у 1961-1990 рр. та 40,5 у 1991-2020 рр. Сам показник при цьому варіював від 13-15 на крайньому півдні Херсонської обл. до 90 і більше одиниць у високогірних районах Карпатських гір (метеорологічні станції Плай та Пожежевська). Такий широкий діапазон його значень зумовив необхідність виділення додаткової градації екстремально гумідного клімату, яка розробником класифікації не передбачалася (див., наприклад, [25]). Розподіл типів клімату за метеорологічними станціями України з урахуванням додаткової градації представлено в табл. 1.

Таблиця 1 / Table 1

Розподіл типів клімату в Україні за комбінованим індексом Пінна /
Distribution of climate types in Ukraine according to the Pinna combinative index

Тип клімату	Індекс аридності Пінна	1961-1990 рр.		1991-2020 рр.	
		кількість метеостанцій	%	кількість метеостанцій	%
аридний	до 10	0	0,0	0	0,0
напіваридний	від 10 до 20	15	9,8	12	7,8
гумідний	від 20 до 30	49	32,0	24	15,7
дуже гумідний	від 30 до 50	54	35,3	92	60,1
екстремально гумідний	50 і більше	35	22,9	25	16,3
	Разом	153	100,0	153	100,0

Аналіз табл. 1 показує сильне зростання гумідних умов на території країни за індексом аридності Пінна в другій половині розглядуваного періоду. Оскільки ця тенденція вступає у суперечність з висновками інших досліджень сучасної динаміки аридності клімату України та очікуваного її розвитку до кінця ХХІ ст. [3; 4], то потрібно розібратися з причинами такої невідповідності. З цією метою було проаналізовано час настання максимальної сухості (табл. 2).

Виявилось, що найсухішими місяцями року за параметром середньої місячної кількості опа-

дів є місяці холодного півріччя (з жовтня по березень), коли немає потреби в додатковій іригації сільськогосподарських угідь. Крім того, як часовий (див. табл. 2), так і просторовий (рис. 1) розподіл найсухішого періоду року за місяцями у різні частини досліджуваного періоду виявився дуже нестійким. Очевидно, ці обставини демонструють обмеженість підходу, що лежить в основі комбінованого індексу Пінна. Їх не було виявлено в попередніх дослідженнях аридності клімату за показником РСІ тому, що вони стосувалися переважно країн із середземноморським ти-

Найсухіші місяці року на метеостанціях України / Driest months of the year at weather stations in Ukraine

Місяць	Число випадків		Відсотків	
	1961-1990 рр.	1991-2020 рр.	1961-1990 рр.	1991-2020 рр.
I	14	9,2	42	27,5
II	28	18,3	66	43,1
III	49	32,0	11	7,2
IV	2	1,3	21	13,7
V	0	0,0	0	0,0
VI	0	0,0	0	0,0
VII	0	0,0	1	0,7
VIII	0	0,0	9	5,9
IX	1	0,7	1	0,7
X	59	38,6	2	1,3
XI	0	0,0	0	0,0
XII	0	0,0	0	0,0
Рік	153	100,0	153	100,0

пом клімату (Греції [16; 30], Італії [26], країн Іберійського півострова [14; 15; 25] та Туреччини [21]), в яких посушливий сезон збігається з основним (літнім) вегетаційним періодом. Серед європейських країн з континентальним кліматом просторовий розподіл PCI розглядався тільки для Сербії [19; 23], Румунії [20; 29] та Болгарії [29]. Оскільки ж вони повністю або частково

розташовані в центральній і північній частинах Балканського півострова, клімат яких значною мірою створюється під впливом Середземного моря, то автори останніх публікацій також ще не відчували значних незручностей у користуванні відомими градаціями показника PCI. Разом з тим, у деяких районах Сербії [23] значення PCI уже можуть перевищувати 100 одиниць.

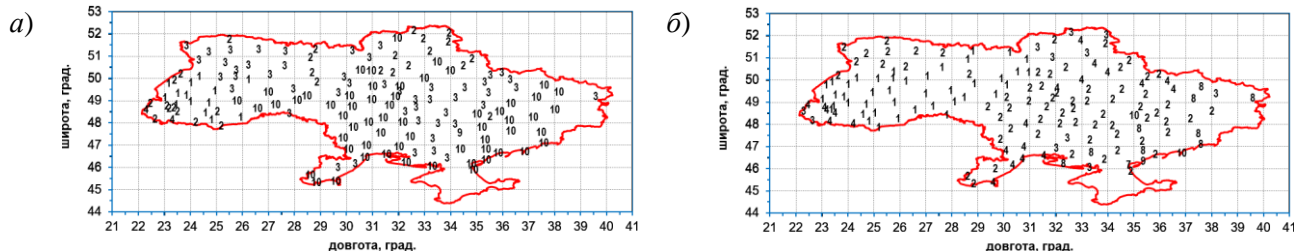


Рис. 1. Найсухіший місяць року (номер) в Україні: а) 1961-1990 рр.; б) 1991-2020 рр. /
Fig. 1. Driest month of the year (number) in Ukraine: a. 1961-1990; b. 1991-2020

Тому було запропоновано модифікацію комбінованого індексу Пінна (PCI_m), яка акцентує увагу на умовах посушливості саме теплої половини року:

$$PCI_m = \frac{1}{2} \left(\frac{P}{t+10} + \frac{12P'_d}{t'_d+10} \right), d \in W, \quad (5)$$

де P'_d і t'_d – середні місячні значення кількості опадів і температури повітря для найсухішого місяця множини W місяців теплої півріччя (в Україні це період з квітня по вересень).

Можна припустити, що завдяки відомим особливостям річного ходу атмосферних опадів в країнах середземноморського клімату, розрахункові показники PCI та PCI_m там практично не будуть відрізнятися. Натомість первинну шкалу умов аридності, яку запропонував Пінна для індексу PCI, можна буде поширити і на показник

PCI_m для значно ширшого діапазону географічних умов.

Географічний розподіл комбінованого індексу Пінна на території України представлено на рис. 2.

Як видно з рис. 2, клімат країни за ступенем посушливості в різних її регіонах дуже відрізняється. Найбільшим ступенем гумідності вирізняються Українські Карпати. У створенні більш гумідних умов відчутною, хоч і не завжди, є роль Кримських гір (на рис. 2, а це не показано з метою дотримання однорідності картографічного представлення території), а також височин на півночі країни: Волино-Подільської, Придніпровської та Середньоросійської. В межах рівнинної частини території України найбільш посушливі умови склалися в межах Причорноморської низовини та степового Криму. Можна стверджувати,

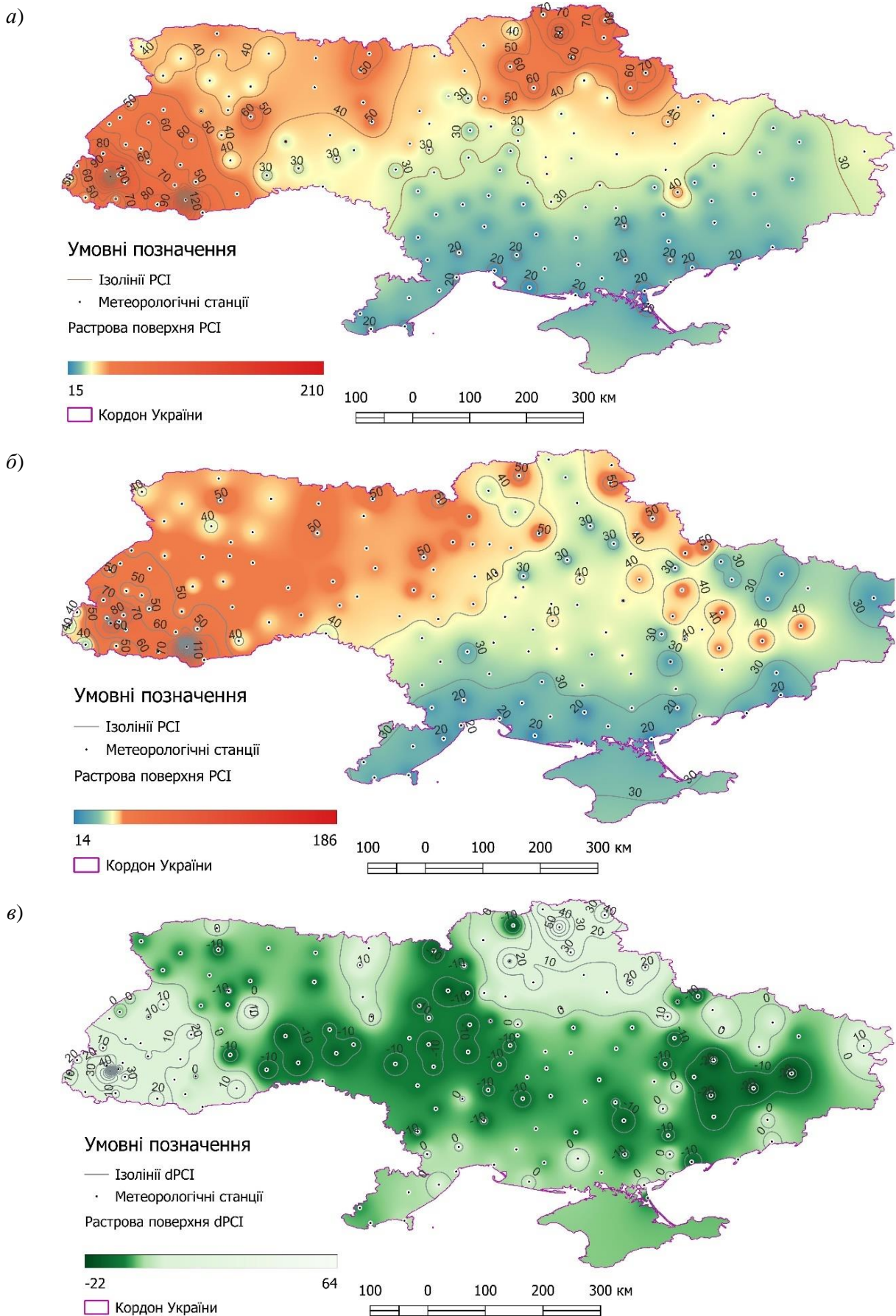


Рис. 2. Комбінований індекс аридності Пінна:

a) 1961-1990 рр.; б) 1991-2020 рр.; в) зміни в 1991-2020 рр. відносно 1961-1990 рр. /
 Fig. 2. Pinna combinative index: a. 1961-1990; b. 1991-2020; c. changes 1991-2020 relative to 1961-1990

що південніше 49-ї паралелі клімат України більш аридний, а на північ від неї він є дуже гумідним, або навіть екстремально гумідним.

Утім, на рис. 2 можна помітити й певну невідповідність, коли гумідні умови північного сходу країни виявляються ближчими до умов Українських Карпат, ніж гумідні умови на північному заході країни. Таку невідповідність не можна пояснити якимись об'єктивними причинами, а тому доводиться вчергове говорити про приховані недоліки в конструюванні самого індексу Пінна.

Перед тим, як приступити до аналізу показника PCI_m зазначимо, що розподіл найсухіших місяців теплого півріччя в обох частинах розгля-

дуваного періоду відрізняється набагато менше, ніж для індексу PCI . Зауважимо також, що у 1991-2020 рр. кількість випадків, коли цим місяцем був квітень зросла порівняно із 1961-1990 рр. зі 103 (67,3 %) до 132 (86,3 % усіх станцій) (рис. 3). Це тривожна тенденція, оскільки початок вегетаційного сезону відіграє дуже важливу роль у формуванні урожаю усіх вітчизняних культур. Водночас, значно змінилася ситуація і з вереснем. Якщо у 1961-1990 рр. він був найсухішим місяцем теплого півріччя на 42 метеостанціях (27,5 %), то в 1991-2020 рр. ці показники знизилися до 3 метеостанцій (2,0 %). Це може мати значення для формування врожайності озимих культур.

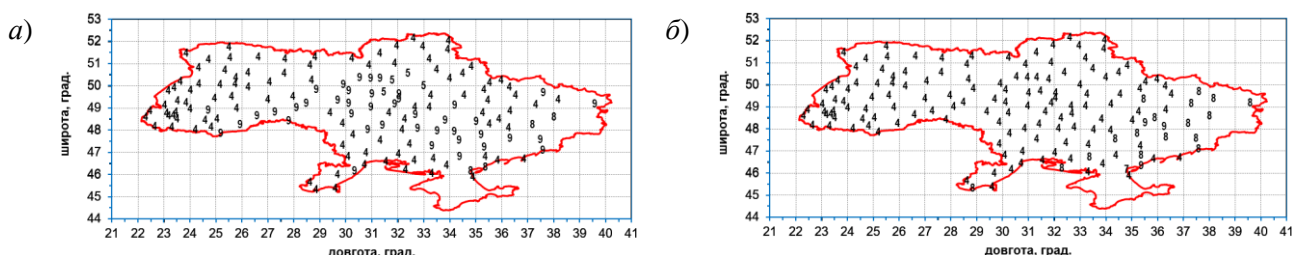


Рис. 3. Найсухіший місяць (номер) теплого півріччя в Україні: а) 1961-1990 рр.; б) 1991-2020 рр. /
Fig. 3. Driest month of the warm half-year (number) in Ukraine: a. 1961-1990; b. 1991-2020

Залежність показника PCI_m від елементів географічного положення показано на рис. 4. На ньому можна легко виявити два викиди з найбільшими значеннями PCI_m , які отримано для високогірних станцій Українських Карпат (Пожежевська і Плай). Оскільки застосування багатьох статистичних методів для вибірок з викидами є проблематичним, то ці станції довелось вилучити із вибірки, скоротивши тим самим кількість точок до 151.

Отримані для цих метеостанцій рівняння лінійної регресії та їх параметри представлено в табл. 3. У ній показано також параметри рівнянь лінійної регресії для показника $dPCI_m$, який відображає зміни індексу PCI_m в 1991-2020 рр. відносно його значення в 1961-1990 рр.:

$$dPCI_m = PCI_m(1991 - 2020) - PCI_m(1961 - 1990). \quad (6)$$

Усі побудовані рівняння лінійної регресії для показника PCI_m відображають не випадковий характер виявлених залежностей за F -критерієм та є значущими при рівні значущості $\alpha = 0,01$. Коефіцієнт детермінації R^2 вказує на велику тісноту залежності між абсолютною висотою і показником PCI_m та помірну тісноту залежності для інших чинників впливу на аридність клімату. Попарний аналіз знаку та абсолютної величини коефіцієнтів в отриманих рівняннях лінійної регресії для обох половин розглядуваного періоду вказує на те, що загальний характер просторо-

рових закономірностей розподілу PCI_m залежно від довготи, широти або висоти над рівнем моря за цей час не змінився, що не можна сказати про інтенсивність самого зв'язку. Імовірною причиною таких змін можна назвати довгострокові коливання атмосферної циркуляції, під впливом яких модулюються прояви впливу елементів географічного положення.

Залежності, що описуються показником $dPCI_m$, апріорі не можуть бути такими тісними як у випадку PCI_m . Тому рівень значущості для них у табл. 3 не зазначено. Однак представлені тут рівняння відображають тонкі і слабо виражені зміни (R^2 тільки в одному випадку перевищує 0,05) у характері залежностей між відповідними величинами, а тому можуть становити певний інтерес також.

Як видно із табл. 3, посушливість клімату в Україні зростає із просуванням із півночі на південь, про що говорять додатні значення коефіцієнтів a_ϕ , та у напрямку із заходу на схід, на що вказують від'ємні значення коефіцієнтів a_λ . Зауважимо, що незважаючи на значно меншу тісноту залежності, абсолютні зміни індексу PCI_m на 1 градус широти у 1,5-1,7 разів перевищують їх зміни у перпендикулярному напрямку. Такі особливості просторового розподілу індексу добре помітно і на рис. 5, а), б).

Ще чіткішим ($R^2 > 0,7$) є зростання індексу PCI_m з висотою. Вертикальний градієнт цього показника в обох частинах досліджуваного пері-

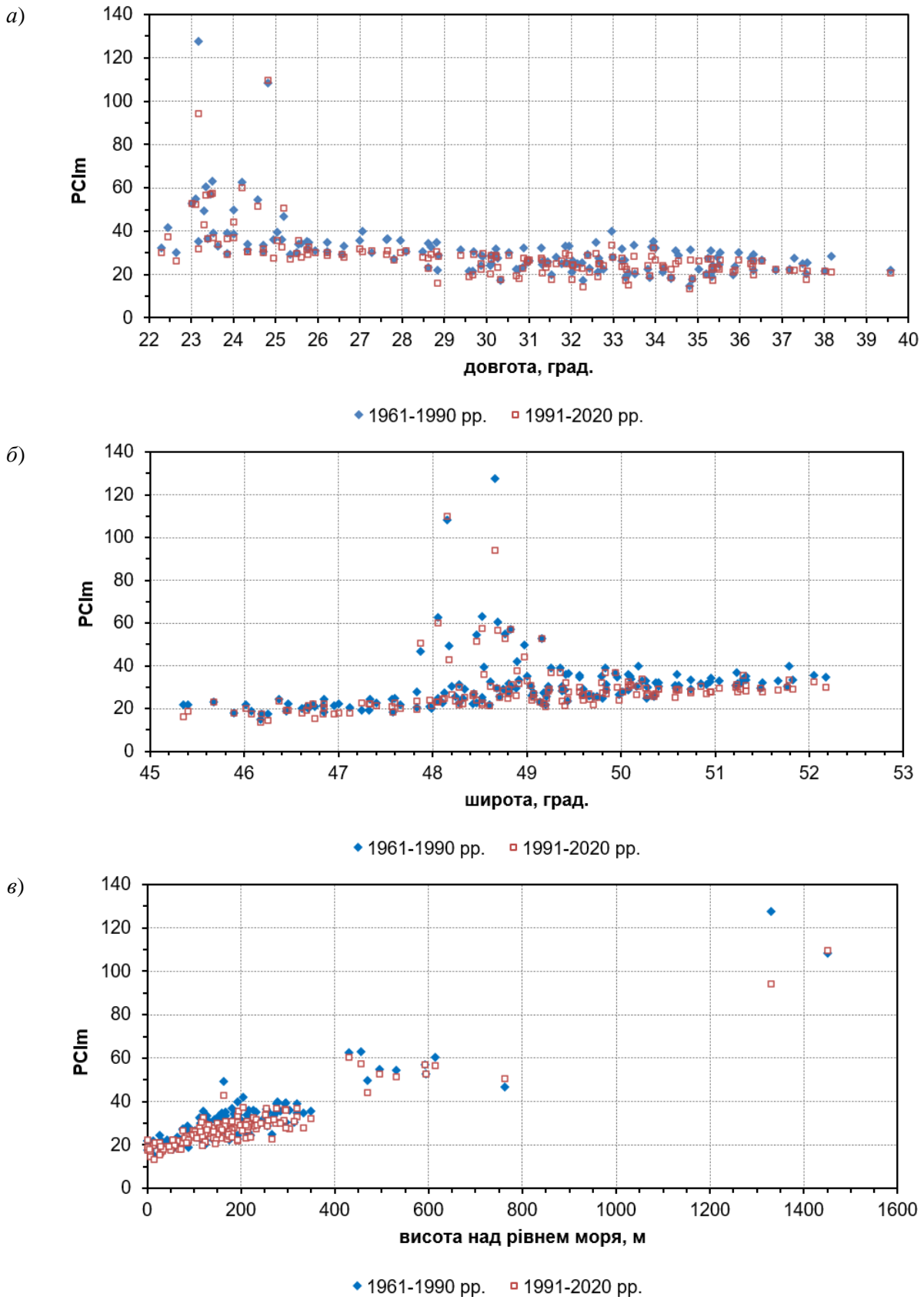


Рис. 4. Залежність PCI_m від окремих складових географічного положення:
а) від довготи; б) від широти; в) від висоти над рівнем моря /
Fig. 4. Dependence of PCI_m on individual components of geographical position:
a. on longitude; b. on latitude; c. on absolute elevation

Рівняння лінійної регресії для індексів аридності та основні їх параметри
(коефіцієнт детермінації R^2 та рівень значущості α) /
Linear regression equations for aridity indices and their main parameters
(determination coefficient R^2 and significance level α)

Період	Рівняння регресії	Параметри
1961-1990 рр. 1991-2020 рр. зміни у 1991-2020 рр. відносно 1991-2020 рр.	довгота	
	$\widehat{PCI}_m = -1,3445\lambda + 70,76$	$R^2 = 0,4379; \alpha = 0,01$
	$\widehat{PCI}_m = -1,2747\lambda + 66,518$	$R^2 = 0,4464; \alpha = 0,01$
	$d\widehat{PCI}_m = 0,0698\lambda - 4,2424$	$R^2 = 0,0146$
1961-1990 рр. 1991-2020 рр. зміни у 1991-2020 рр. відносно 1991-2020 рр.	широта	
	$\widehat{PCI}_m = 2,2897\varphi - 82,448$	$R^2 = 0,161; \alpha = 0,01$
	$\widehat{PCI}_m = 1,8989\varphi - 65,411$	$R^2 = 0,1256; \alpha = 0,01$
	$d\widehat{PCI}_m = -0,3908\varphi + 17,038$	$R^2 = 0,058$
1961-1990 рр. 1991-2020 рр. зміни у 1991-2020 рр. відносно 1991-2020 рр.	висота над рівнем моря	
	$\widehat{PCI}_m = 0,0594h + 19,346$	$R^2 = 0,7063; \alpha = 0,01$
	$\widehat{PCI}_m = 0,0579h + 17,489$	$R^2 = 0,7623; \alpha = 0,01$
	$d\widehat{PCI}_m = -0,0015h - 1,8568$	$R^2 = 0,0053$

оду наближається до 6 од. на 100 м висоти і виявляє значно вищу стійкість у часі, ніж горизонтальні градієнти PCI_m . Це вказує на те, що у високогір'ї Українських Карпат і на височинах країни завжди створюються більш гумідні умови, ніж на найближчих до них низовинах.

Залежність модифікованого комбінованого індексу Пінна від усіх елементів географічного положення можна описати за допомогою таких моделей:

$$\widehat{PCI}_m(1961 - 1990) = -0,469\lambda + 1,063\varphi + 0,046h - 16,11, \quad (7)$$

$$\widehat{PCI}_m(1991 - 2020) = -0,410\lambda + 0,686\varphi + 0,047h - 1,73. \quad (8)$$

Коефіцієнти детермінації 0,777 та 0,810 отриманих рівнянь переконливо вказують на тісну залежність PCI_m від розглядуваної сукупності чинників впливу. На не випадковий характер виявлених взаємозв'язків між залежною і незалежними величинами вказує і велике значення F -статистики (170,7 та 208,6). Обчислені для рівня значущості $\alpha = 0,01$ значення t -статистики значно перевищують критичне значення 2,610 і вказують на статистичну значущість отриманих коефіцієнтів при незалежних величинах, що після побудови нормованих (стандартизованих) моделей регресії уможливило оцінку внеску окремих елементів географічного положення в загальну дисперсію показника PCI_m . За обома моделями регресії більша частина дисперсії PCI_m зумовлена абсолютною висотою (61,0 та 67,5 % відповідно). На частку географічної довготи припадає не менше 20 % дис-

персії (21,6 та 20,4 %). Решта 17,4 та 12,1 % дисперсії індексу аридності – за географічною широтою.

Загалом, для більшості метеорологічних станцій країни досягається задовільна відповідність оціночних значень PCI_m за моделями (7) і (8) їхнім фактичним значенням. Середня абсолютна похибка оцінки цього індексу за рівнянням (7) дорівнює 3,0, а за рівнянням (8) – 2,5 од.; середня відносна похибка – 9,8 та 8,8 % відповідно. Для 90 % усіх станцій відносна похибка оцінки PCI_m не перевищує 20 %.

Перейдемо тепер до аналізу змін індексу PCI_m від однієї половини розглядуваного періоду до іншої. Насамперед потрібно зазначити, що величина його зміни лежить у дуже широкому діапазоні від -33,4 (Плай) до 4,2 од. (Нижні Сірогози). Після вилучення викидів найменшим числом у цій вибірці стало -9,5 (Шепетівка). Оскільки, як і очікувалося, модель множинної регресії навіть на рівні значущості 0,05 побудувати не вдалося, обмежимося тут просторовим аналізом ГІС-моделі розподілу величини $dPCI_m$ (див. рис. 5 в)).

Для 87,4 % станцій зміни індексу PCI_m не перевищували 5 од. (табл. 4). Індекс зменшився, а рівень аридності посилювався у 80,1 % випадків. З огляду на малу мінливість $dPCI_m$ по остаточній вибірці станцій в Україні (середньоквадратичне відхилення $\sigma = 2,533$) та відому ширину градацій різних типів клімату у вихідній класифікації кліматів Пінна (10 од.), умовно можна вважати, що зміна індексу PCI_m на 2,5 од. уже є кліматологічно значною зміною умов аридності клімату.

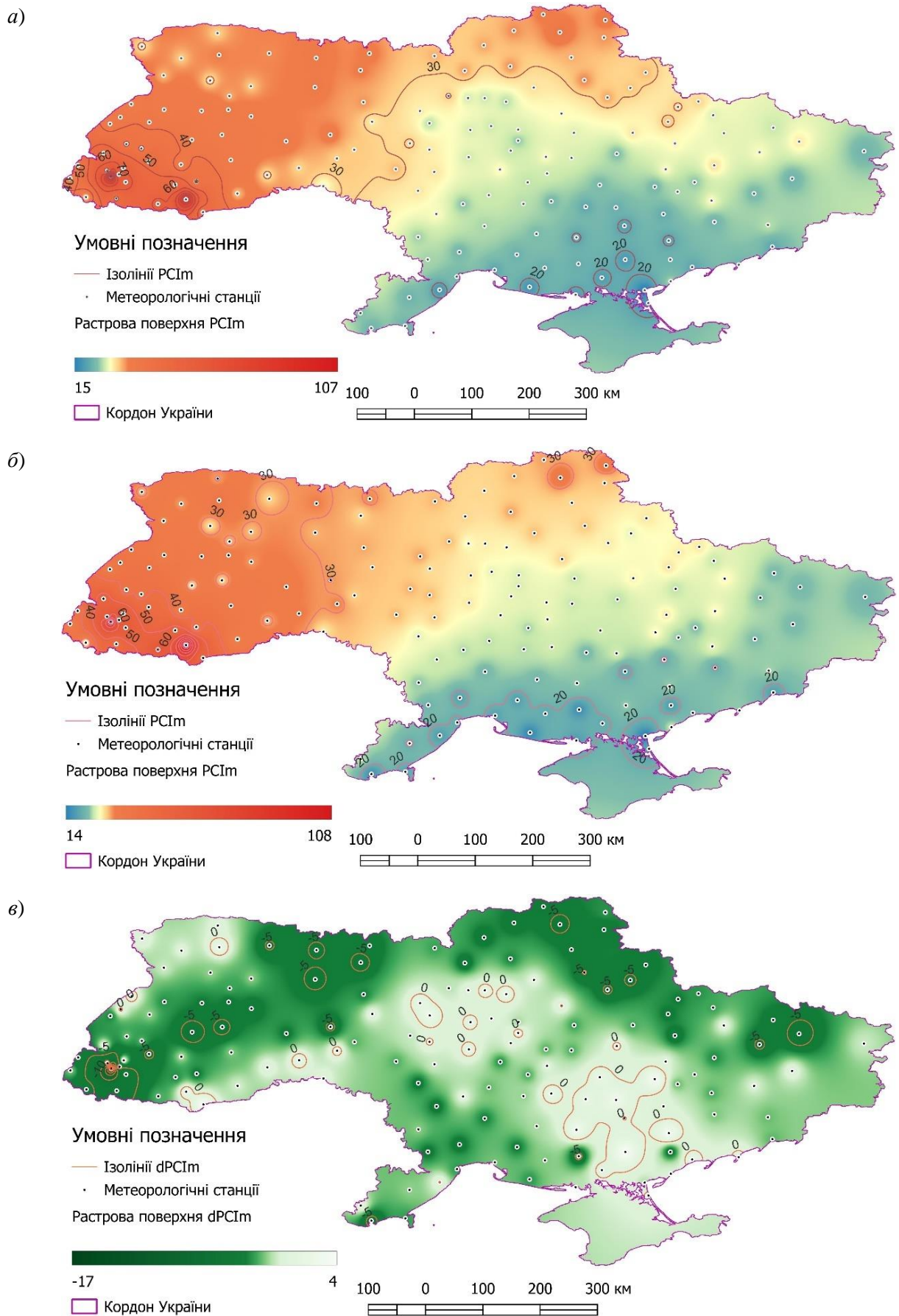


Рис. 5. Модифікований комбінований індекс аридності Пінна:

a) 1961-1990 рр.; б) 1991-2020 рр.; в) зміни 1991-2020 рр. відносно 1961-1990 рр. /

Fig. 5. Pinna modified combinative index: a. 1961-1990; b. 1991-2020; c. changes 1991-2020 relative to 1961-1990

Якщо виходити з цих міркувань, то приблизно на половині (52,3 %) метеостанцій спостережувані зміни індексу PCI_m ще не набули статусу змін в кліматологічному сенсі слова, а залишилися на рівні коливань клімату. Так чи інакше, це вимагає продовження моніторингу клімату та використання даних прогнозування змін клімату.

На більшій частині території країни індекс PCI_m зменшився, особливо сильно на заході, півночі і північному сході країни, тобто в регіонах з найкращим забезпеченням атмосферними опадами. Несприятливі процеси аридизації клімату охопили також Подільську височину, північне Причорномор'я та схід України. Протилежна

тенденція найбільш характерною була для нижнього і середнього Придніпров'я.

Відомо, що в регіонах прогресуючої аридизації клімату створюються передумови для більшого поширення C_4 -видів дикорослих і культурних рослин, які завдяки кращому пристосуванню до нових екологічних умов та вищій продуктивності фотосинтезу отримують об'єктивні переваги над представниками інших видів. В умовах України це може сприяти зміні структури посівів на користь таких культур як кукурудза, пшоно, сорго й амарант [5], що вимагатиме розробки і впровадження відповідних заходів адаптації сільського господарства.

Таблиця 4 / Table 4

Повторюваність зміни індексу PCI_m різних градацій / Repeatability of PCI_m index change by gradations

Зміни PCI_m		Число випадків	Відсотків
від	до		
-10,0	-7,5	2	1,32
-7,5	-5,0	17	11,26
-5,0	-2,5	47	31,13
-2,5	0,0	55	36,42
0,0	2,5	24	15,89
2,5	5,0	6	3,97
Разом:		151	100,00

Висновки. Комбінований індекс Пінна є важливим кліматологічним індексом, який широко використовується сучасними дослідниками для встановлення ступеня гумідності або посушливості клімату. Згідно з класифікацією Пінна, клімат України є переважно гумідним. Найбільшим рівнем гумідності вирізняється клімат зони мішаних лісів та Українських Карпат. На півдні країни, за винятком Гірського Криму, домінують напіваридні умови.

В роботі було показано приховані недоліки в конструюванні цього індексу, які можуть виявлятися при дослідженні умов аридності клімату країн помірного поясу, а також було запропоновано й обґрунтовано простий спосіб їх усунення. Основна частина даного дослідження аридності клімату України проводилася уже за модифікованим комбінованим індексом Пінна (PCI_m).

В цілому аридність клімату України зростає у напрямку із північного заходу на південний схід

за великого впливу висоти над рівнем моря. На підвищених формах рельєфу створюються більш гумідні умови. В роботі отримано регресійні моделі, згідно з якими швидкість зміни показника PCI_m з широтою в 1,5 і більше рази перевищує швидкість її зміни у довготному напрямку. Провідну роль у просторовому розподілі індексу відіграють абсолютна висота та географічна довгота, на частку яких припадає понад 60 та понад 20 % загальної дисперсії відповідно.

В останні десятиріччя в різних регіонах України відбуваються різнонаправлені зміни показника PCI_m . На більшій частині території країни ці зміни не перевищують ± 5 од. Однак процеси аридизації не тільки домінують над іншими, але й демонструють загрозливу тенденцію до набуття статусу необоротних змін, що вимагає розробки і впровадження відповідних заходів адаптації сільського господарства країни у відповідності з цілями сталого розвитку ООН.

Список використаної літератури

1. Адаменко Т.І. Агрокліматичне зонування території України з врахуванням зміни клімату [Текст]. – Біла Церква: ТОВ «РІА» БЛІЦ, 2014. – 16 с. ISBN 978-617-7219-01-8.
2. Водчиць О.Г., Затула В.І. Основи метеорології і кліматології [Текст]: навч. посібник. – Київ : НАУ, 2017. – 360 с.
3. Гнатюк Н.В. Проекції температури повітря та кількості опадів в Україні в XXI столітті [Текст]: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. геогр. наук : 11.00.09 "метеорологія, кліматологія, агрометеоро-

- логія" / Гнатюк Наталія Володимирівна; Київський національний університет імені Тараса Шевченка. – Київ, 2017. – 20 с.
4. Затула В.І. Статистичний аналіз аридності клімату в Україні [Текст] / В.І. Затула, Н.І. Затула // Фізична географія та геоморфологія. – 2019. – Вип. 93(1). – С. 19-24. DOI: <https://doi.org/10.17721/phgg.2019.1.03>.
 5. Затула В.І. Аридизація клімату України та її вплив на сільське господарство [Текст] / В.І. Затула, Н.І. Затула // Вплив кліматичних змін на просторовий розвиток територій Землі: наслідки та шляхи вирішення: Матеріали III Міжнар. наук.-практич. конф. [Херсон, 11-12 червня 2020 року]. – Херсон : ДВНЗ «ХДАУ», 2020. – С. 121-124.
 6. Лобода Н.С. Оцінка характеристик посушливості Закарпаття в сучасних та майбутніх умовах (за сценарієм глобального потепління) [Текст] / Н.С. Лобода, В.М. Хохлов, Ю.В. Божок // Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. – 2011. – Т. 2(23). – С. 49-56.
 7. Муха Б. Випаровування в Українському Розточчі (за матеріалами Розточького ландшафтно-геофізичного стаціонару) [Текст] / Б. Муха., І. Булавенко, М. Мельничук // Вісник Львівського університету. Серія географічна. – 2014. – Вип. 48. – С. 117-124.
 8. Нажмудінова О.М. Деякі аспекти формування інтенсивних посушливих явищ літку 2010 р. над Східною Європою [Текст] / О.М. Нажмудінова, Н.С. Єрмоленко // Український гідрометеорологічний журнал. – 2011, № 9. – С. 79-84.
 9. Продан А.В. Огляд стану закордонних досліджень з вивчення посух та послаблення їх негативного впливу [Текст] / А.В. Продан, В.І. Затула // Фізична географія та геоморфологія. – 2009. – Вип. 57. – С. 157-161.
 10. Сидоренко А.В. Особливості просторово-часової структури полів дефіциту насичення та їх зв'язок з Північноатлантичним коливанням в умовах сучасного клімату України [Текст] / А.В. Сидоренко, В.І. Затула // Наук. праці УкрНДДГМІ. – 2011. – Вип. 260. – С. 95-109.
 11. Хохлов В.М. Регіональні особливості розподілу посух в Україні [Текст] / В.М. Хохлов, Г.О. Боровська, Г.В. Хоменко, Т.В. Шараєва // Український гідрометеорологічний журнал. – 2011. – № 9. – С. 73-78.
 12. Agnew C. and Anderson W. Water resources in the arid realm [Text]. – Routledge, London, U.K., 1992. – 329 p. (Routledge physical environment series).
 13. Al-Zamili H.S. Assessment of spatial distributions of some climate indices in Iraq [Text] / H.S. Al-Zamili, A.M. Al-Lami // Journal of applied and advanced research. – 2018. – Vol. 3(4). – P. 96-104. DOI: <http://dx.doi.org/10.21839/jaar.2018.v3i4.217>.
 14. Andrade C. Aridity conditions in the Iberian peninsula during the XX century [Text] / C. Andrade, J. Corte-Real // International journal of environmental science. – 2016. – Vol. 1. – P. 52-58.
 15. Andrade C. Climate change projections of aridity conditions in the Iberian peninsula [Text] / C. Andrade, J. Contente, J.A. Santos // Water. – 2021. – Vol. 13, Iss. 15. – P. 2035. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13152035>.
 16. Baltas E. Spatial distribution of climatic indices in northern Greece [Text] / E. Baltas // Meteorological applications. – 2007. – Vol. 14, Iss. 1. – P. 69–78. DOI: <https://doi.org/10.1002/met.7>.
 17. Baltas E.A. Surface representation of climatic variables and indices in Greece using GIS methods [Text] / E.A. Baltas // The international journal of meteorology. – 2010. – Vol. 35, No. 348. – P. 123–136.
 18. Blüthgen J. Allgemeine Klimageographie [Text] / J. Blüthgen. – Berlin, Boston: De Gruyter, 1966. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783111440293>.
 19. Burić D. Contribution to the study of climate change in Serbia using continentality, oceanity, and aridity indices / D. Burić, J. Mihajlović, V. Ducić, M. Milenković and G. Anđelković // IDŌJÁRÁS. – 2023. – Vol. 127, No. 3. – P. 379–399. DOI: <https://doi.org/10.28974/idojaras.2023.3.6>.
 20. Croitoru A.-E. Spatiotemporal distribution of aridity indices based on temperature and precipitation in the extra-Carpathian regions of Romania [Text] / A.-E. Croitoru, A. Piticar, A.M. Imbroane, D.C. Burada // Theoretical and applied climatology. – 2013. – Vol. 112, No 3-4. – P. 597-607. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0755-2>.
 21. Deniz A. Spatial variations of climate indices in Turkey [Text] / A. Deniz, H. Toros, S. Incecik // International journal of climatology. – 2010. – Vol. 31, Iss. 3. – P. 394–403. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.2081>.
 22. Encyclopedia of world climatology [Text] / John E. Oliver (Ed.). – Springer, Dordrecht, Netherlands; New York, 2005. 854 p. – Encyclopedia of Earth sciences series. ISBN 978-1-4020-3264-6.
 23. Hrnjak I. Aridity in Vojvodina, Serbia [Text] / I. Hrnjak, T. Lukić, M.B. Gavrilo, S.B. Marković, M. Unkašević, I. Tošić // Theoretical and applied climatology. – 2014. – Vol. 115. – P. 323–332. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0893-1>.
 24. Maliva R.G. and Missimer T.M. Arid lands water evaluation and management. Environmental Science and Engineering [Text]. – Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. – P. 21–39. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-29104-3_2.
 25. Moral F.J. Spatial distribution and comparison of aridity indices in Extremadura, southwestern Spain [Text] / F.J. Moral, F.J. Rebollo, L.L. Paniagua, A. García-Martín, F. Honorio // Theoretical and applied climatology. – 2016. – Vol. 126, Iss. 3-4. – P. 801–814. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1615-7>.
 26. Nistor M.M. Spatial distribution of climate indices in the Emilia-Romagna region [Text] / M.M. Nistor // Meteorological applications. – 2016. – Vol. 23, Iss. 2. – P. 304–313. DOI: <https://doi.org/10.1002/met.1555>.
 27. Smakhtin V.U. Droughts: The impact of semantics and perceptions [Text] / V.U. Smakhtin, E.L.F. Schipper // Water Policy. – 2008. – Vol. 10, Iss. 2. – P. 131–143. DOI: <https://doi.org/10.2166/wp.2008.036>.

28. Thompson R.D. *The climatology of the arid world [Text]. University of Reading, UK, Department of Geography. Geographical Papers. – 1975. – No. 35. – P. 39.*
29. Vlăduț A.Ș. *Aridity assessment within southern Romania and northern Bulgaria [Text] / A.Ș. Vlăduț, N. Nikolova, M. Licurici // Hrvatski geografski glasnik. – 2017. – Vol. 79, No 2. – P. 5–26. DOI: <https://doi.org/10.21861/HGG.2017.79.02.01>.*
30. Zambakas J. *General Climatology [Text]. Department of Geology, National and Kapodistrian University of Athens: Athens, 1992.*

Complex assessing of aridity in Ukraine

Vasyl Zatula

PhD (Geography), Associate Professor, Department of Meteorology and Climatology,
Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine

Introduction. The aridity is an important part of the climate characterization of a territory. Over the past 100 years, aridity indices have been used to assess it.

The purpose of article is to characterize the patterns of the spatial distribution and changes over time of aridity indices on the territory of Ukraine for the period 1961-2020.

Data and methods. The Pinna combinative index (PCI) and its modification (PCIm) were used to determine the aridity assessment. Basic calculations of these indices were performed for more than 150 weather stations in Ukraine over the last two 30-year periods. The main results of the research were obtained using statistical methods and GIS technologies.

Results. It has been found that the use of the PCI index in temperate countries may be constrained by its high sensitivity to the moisture conditions in the driest month of the year, which often extends beyond the growing season. The modification of the index proposed by the author better reflects the peculiarities of aridity in temperate countries, which are necessary for making decisions on agricultural irrigation. Maps of the distribution of aridity indices for 1961-1990 and 1991-2020 periods and its changes between them are presented. For the modified version of the index, an in-depth statistical analysis was conducted. It is shown that the aridity of Ukraine increases at least one and a half times faster with moving from north to south than with moving away from the Atlantic Ocean in the eastern direction. The tendency to increase the humidity of the climate with elevation turned out to be particularly clear (the coefficient of determination $R^2 > 0.7$). The coefficients of the linear trend of this indicator in both parts of the studied period are close to 6 units in terms of elevation per 100 m. Multiple regression models were shown that the leading role in the formation of the total variance of the index is played by absolute elevation (with a share of more than 60-65%) and geographic longitude (with a share of more than 20%). Changes in the PCIm index were observed in different regions of Ukraine with different signs. As a rule, they did not exceed 5 units, but the fact that this indicator exceeds one standard deviation (~2.5 units) already indicates a significant violation of previous climatic conditions. The calculated changes in the PCIm index in about half of the country's territory are actually on the verge of this criterion of irreversible climate change. Aridization of the climate is becoming an important signal of the imbalance of the regional climate system of Ukraine, and therefore requires an urgent response at the level of development and implementation of appropriate state climate policy measures.

The scientific novelty. The paper analyses for the first time the limits of applicability of the Pinna combinative index and proposes and justifies its improvement.

Practical significance. The proposed modification of Pinna combinative index can be of great importance for the comparability of climate aridity assessments in countries with temperate and subtropical climates. The assessment of the aridity in Ukraine will be useful in the development and implementation of state climate policy measures in areas of intensive climate aridization according to Sustainable Development Goals of United Nations.

Keywords: humidity and aridity; Pinna combinative index; Pinna modified combinative index; regression models; climate change; agricultural adaptation to climate change; Ukraine; Sustainable Development Goals of United Nations.

References

1. Adamenko, T.I. (2014). *Agro-climatic zoning of Ukraine taking into account climate change. Bila Tserkva, Ukraine, 16. ISBN 978-617-7219-01-8. [in Ukrainian]*
2. Vodchys, O.G., Zatula, V.I. (2017). *Fundamentals of meteorology and climatology. Kyiv, Ukraine, 360. [in Ukrainian]*
3. Gnatiuk, N.V. (2017). *The projections of air temperature and precipitation in Ukraine in the 21st century. Taras Shevchenko National University of Kyiv. Kyiv, Ukraine, 20. [in Ukrainian]*
4. Zatula, V.I., Zatula, N.I. (2019). *Statistical analysis of aridity in Ukraine. Physical geography and geomorphology, 93(1), 19-24. DOI: <https://doi.org/10.17721/phgg.2019.1.03>. [in Ukrainian]*
5. Zatula, V.I., Zatula, N.I. (2020). *Aridization of Ukraine's climate and its impact on agriculture. The impact of climate change on spatial development of Earth's territories: implications and solutions. 3rd International scientific and practical conference. June 11-12, 2020. Kherson, Ukraine, 121-124. [in Ukrainian]*

6. Loboda, N.S., Khokhlov, V.N., Bozhok, Y.V. (2011). Assessment of droughtiness descriptions of Transcarpathia in modern and future terms (global climate change scenarios). *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, 2(23), 49-56. [in Ukrainian]
7. Mucha, B., Bulavenko, I., Melnychuk, M. (2014). Evaporation in Ukrainian Roztochia (for materials belongs to the Rostochye landscape geophysical full-time department). *Visnyk of the Lviv University. Series Geography*, 48, 117-124. [in Ukrainian]
8. Nazhmudinova, E.M., Yermolenko, N.S. (2011). Some aspects of formation of intensive droughts conditions in summer of 2010 over eastern Europe. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 9, 79-84. [in Ukrainian]
9. Prodan, A.V., Zatula, V.I. (2009). Overview of the state of foreign research on the study of droughts and mitigation of their negative impact. *Physical geography and geomorphology*, 57, 157-161. [in Ukrainian]
10. Sydorenko, A.V., Zatula, V.I. (2011). Features of spatial and temporal structure of saturation deficit fields and their relationship with the North-Atlantic oscillation in the conditions of Ukrainian modern climate. *Proceedings of Ukrainian research hydrometeorological institute*, 260, 95-109. [in Ukrainian]
11. Khokhlov, V.N., Borovska, G.A., Khomenko, G.V., Sharaieva, T.V. (2011). Regional features of droughts distribution in Ukraine. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 9, 73-78. [in Ukrainian]
12. Agnew C. and Anderson W. (1992). *Water resources in the arid realm*. Routledge, London, U.K., 329. *Routledge physical environment series*.
13. Al-Zamili H.S., Al-Lami A.M. (2018). Assessment of spatial distributions of some climate indices in Iraq. *Journal of applied and advanced research*, 3(4), 96-104. DOI: <http://dx.doi.org/10.21839/jaar.2018.v3i4.217>.
14. Andrade C., Corte-Real J. (2016). Aridity conditions in the Iberian peninsula during the XX century. *International journal of environmental science*, 1, 52-58.
15. Andrade C., Contente J., Santos J.A. (2021). Climate change projections of aridity conditions in the Iberian peninsula. *Water*, 13(15), 2035. DOI: <https://doi.org/10.3390/w13152035>.
16. Baltas, E. (2007). Spatial distribution of climatic indices in northern Greece. *Meteorological applications*, 14(1), 69–78. DOI: <https://doi.org/10.1002/met.7>.
17. Baltas, E.A. (2010). Surface representation of climatic variables and indices in Greece using GIS methods. *The international journal of meteorology*, 35(348), 123–136.
18. Blüthgen, J. (1966). *Allgemeine Klimageographie [General Climatic Geography]*. Berlin, Boston: De Gruyter. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783111440293>. [in German]
19. Burić D., Mihajlović J., Ducić V., Milenković M. and Anđelković G. (2023). Contribution to the study of climate change in Serbia using continentality, oceanity, and aridity indices. *IDŐJÁRÁS*, 127(3), 379–399. DOI: <https://doi.org/10.28974/idojaras.2023.3.6>.
20. Croitoru, A.-E., Piticar, A., Imbroane, A.M., Burada, D.C. (2013). Spatiotemporal distribution of aridity indices based on temperature and precipitation in the extra-Carpathian regions of Romania. *Theoretical and applied climatology*, 112(3-4), 597-607. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-012-0755-2>.
21. Deniz A., Toros H., Incecik S. (2010) Spatial variations of climate indices in Turkey. *International journal of climatology*, 31(3), 394–403. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.2081>.
22. Oliver J.E. (Ed.) (2005). *Encyclopedia of world climatology*. Springer, Dordrecht, Netherlands; New York, 2005, 854. *Encyclopedia of Earth sciences series*. ISBN 978-1-4020-3264-6.
23. Hrnjak I., Lukić T., Gavrilov M.B., Marković S.B., Unkašević M., Tošić I. (2014). Aridity in Vojvodina, Serbia. *Theoretical and applied climatology*, 115, 323–332. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0893-1>.
24. Maliva R.G. and Missimer T.M. (2012). *Arid lands water evaluation and management*. Environmental Science and Engineering. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012, 21–39. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-29104-3_2.
25. Moral F.J., Rebollo F.J., Paniagua L.L., García-Martín A., Honorio F. (2016). Spatial distribution and comparison of aridity indices in Extremadura, southwestern Spain. *Theoretical and applied climatology*, 126(3-4), 801–814. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1615-7>.
26. Nistor M.M. (2016). Spatial distribution of climate indices in the Emilia-Romagna region. *Meteorological Applications*, 23(2), 304–313. DOI: <https://doi.org/10.1002/met.1555>.
27. Smakhtin V.U. and Schipper E.L.F. (2008). Droughts: The impact of semantics and perceptions. *Water Policy*, 10(2), 131–143. DOI: <https://doi.org/10.2166/wp.2008.036>.
28. Thompson R.D. (1975). *The climatology of the arid world*. University of Reading, UK, Department of Geography. *Geographical Papers*, 35, 39.
29. Vlăduț A.Ș., Nikolova N., Licurici M. (2017). Aridity assessment within southern Romania and northern Bulgaria. *Hrvatski geografski glasnik*, 79/2, 5–26. DOI: <https://doi.org/10.21861/HGG.2017.79.02.01>.
30. Zambakas J. (1992). *General Climatology*. Department of Geology, National and Kapodistrian University of Athens: Athens.