

Статистичний аналіз аридності клімату в Україні

Василь І. Затула^a , Неллі І. Затула^b 

^a Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

^b Національний авіаційний університет, Київ, Україна

Statistical analysis of aridity in Ukraine

Vasyl I. Zatula^a, Nelli I. Zatula^b

^a Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64/13, Volodymyrska str., Kyiv, 01601, Ukraine

^b National Aviation University, 1, Kosmonavta Komarova Ave., Kyiv, 03058, Ukraine

ABSTRACT

The article presents a detailed pattern of the spatio-temporal distribution of the De Martonne aridity index in Ukraine. The distribution of climate types by this indicator at the weather stations of Ukraine is also presented. The De Martonne aridity index has been statistically analyzed at 187 weather stations in Ukraine. The dependences of De Martonne aridity index on the elevation of the station above the sea level, its geographic latitude and longitude were estimated. The overall contributions of each of these characteristics to total variance of this indicator were also evaluated. Scatterplots of the index of aridity depending on location's coordinates are presented. The long-term trend of this indicator for the period from 1931 to 2010 has been studied on the example of weather stations that represent the plain part of Ukraine: Lviv (west), Kyiv (north), Poltava (east), Uman (center) and Kherson (south). It has been shown that the humidification regime of Ukraine for the period under consideration has insubstantially changed, but the tendency towards aridization is still prevailing. This statement is fully consistent with the results of previous studies. The map of De Martonne aridity index for the standard climatological period 1961-1990 and modelling results of its geographical distribution using linear regression equations are presented. It was noted that the three-factor model of multiple regression this indicator for the plain stations of Ukraine may have the greatest theoretical value. The average absolute error (2 units) and average relative error (6.2%) of the estimation of the De Martonne aridity index were determined. It was established that the dynamics of the De Martonne aridity index over the past 50 years has been consistent with the dynamics of the change in the hydrothermal coefficient of Selyaninov. It was concluded that climate of Ukraine has a weak tendency to increasing of aridity, which has certain risks to development of agricultural sector.

KEYWORDS

Aridity of climate, De Martonne aridity index, regressive analysis, statistical model

1. Вступ

Однією з найважливіших властивостей клімату є його сухість або вологість. Їх дескрипторами можуть бути такі метеорологічні величини, як вміст водяної пари, хмарність та атмосферні опади. В описовій характеристиці режиму зволоження важливе місце належить випаровуванню, яке насамперед залежить від температури, а також від вітру та турбулентності в приземному шарі повітря, дефіциту насичення, атмосферного тиску, інших факторів. На випаровування з поверхні ґрунту, окрім метеорологічних чинників, впливає також стан ґрунту (Blüthgen, J., 1973; Mucha et al., 2014).

Ступінь посушливості клімату зазвичай характеризують через відношення річної кількості атмосферних опадів до випаровування. Однак спостереження за випаровуванням усе ще неточні і дуже нечисленні. Тож оцінки випаровування отримують з допомогою різних методів апроксимації (Brutsaert, 1982; Konstantinov, 1968). Найпростіші з них ґрунтуються на даних про температуру повітря. Саме вони розглядаються в даній роботі.

Найпростішим показником посушливості клімату є фактор дощу P . Ланга (Lang, 1915):

$$I_L = P/t, \quad (1)$$

де P та t – річні кількість опадів (мм) і температура повітря (°C), відповідно.

Спочатку передбачалося, що цей показник буде використовуватися тільки для оцінки умов накопичення гумусу в ґрунті. Однак незабаром його недоліки проявилися в задачах класифікації кліматів. У 1925 р. французький кліматолог Емманюель де Мартонн практично усунув цю проблему, запровадивши невелику поправку до величини знаменника:

$$I_{DM} = P/(t+10), \quad (2)$$

де I_{DM} – індекс аридності де Мартонна.

На основі модифікованого показника аридності де Мартонн розробив класифікацію кліматів, що охоплює сім типів клімату, від сухого до дуже вологого, причому меншим значенням індексу відповідає більш посушливий клімат. Зокрема, $I_{DM} = 10$ у нього відповідає межі пустелі, а $I_{DM} = 20$ – межі степу.

Незважаючи на певні недоліки цього індексу, він продовжує залишатися одним із популярних засобів кліматичних класифікацій та оцінки аридності території. Зокрема, він використовувався при складанні оцінки посушливості клімату Греції (Baltas, 2007), Сербії (Radaković et al., 2018), Румунії (Croitoru et al., 2013), України (Gnatiuk, 2017),

інших країн. Водночас, робіт з глибоким аналізом аридності території України за цим індексом мало, що й визначило наукову спрямованість даної статті.

Об'єкт дослідження – аридність клімату України.

Основною метою роботи є характеристика закономірностей просторово-часового розподілу індексу аридності клімату де Мартонна на території України.

2. Матеріали та методи

Представлені у роботі результати отримано шляхом статистичного опрацювання індексів аридності клімату де Мартонна на 187 метеорологічних станціях України, які достатньо рівномірно розподілені по території країни і охоплюють усі її природно-кліматичні зони. Найважливіші результати отримано для періоду спостережень 1961-1990 рр. Крім того, для частини станцій умови аридності оцінено за попередній 30-річний період і в умовах сучасного клімату (1991-2010 рр.). Матеріали цих станцій узагальнювалися та аналізувалися переважно за допомогою статистичних методів регресійного аналізу, реалізованих в пакеті програм “Microsoft Excel”.

3. Результати та обговорення

Як відомо, в Україні переважає помірно-континентальним клімат, причому різним частинам її території притаманні свої риси гумідності та аридності. За даними багаторічних спостережень (1961-1990 рр.), індекс аридності I_{DM} в Україні коливається в межах від 17,2 (Херсонський маяк в Криму) до 131,0 (сніголавинна станція Плай, що в Закарпатті) і в середньому дорівнює 33,9. Розподіл типів клімату за метеорологічними станціями України подано в табл. 1.

На двох третинах метеорологічних станцій клімат гумідний, дуже гумідний або навіть екстремально гумідний (показник перевищує 28 одиниць). Ще майже на 13% станцій зустрічається напівгумідний клімат. Значно ширшими за очікувані виявилися повторюваність та географія

середземноморського клімату. Окрім кількох станцій Південного берега Криму (Феодосія, Алушта) він значно частіше зустрічається в степовій частині півострова і сусідніх районах Причорномор'я та Приазов'я. Напіваридний тип клімату визначається тільки на 11 метеостанціях країни. Аридний тип клімату в Україні не зустрічається взагалі.

Як видно з рис. 1, на рівнинній частині території України аридність клімату з просуванням на південь помітно посилюється. Якщо на півночі країни індекс де Мартонна зазвичай перевищує 35 одиниць (дуже гумідний клімат), то на півдні Причорноморської низовини і в степовому Криму він знижується до 20-24 одиниць і менше (середземноморський та напіваридний типи клімату). Гумідні типи кліматів з $I_{DM} \geq 28$ спостерігаються також в Українських Карпатах, в Кримських горах та на височинах півдня і сходу України.

Залежність індексу аридності де Мартонна від широти φ по всій сукупності метеорологічних станцій України можна виразити за допомогою рівняння регресії $I_{DM} = 2,185\varphi - 72,04$. Утім, ступінь тісноти цієї залежності вельми невеликий (рис. 2). Коефіцієнт детермінації представленого вище рівняння $R^2 = 0,097$.

Аридність клімату в Україні посилюється також з просуванням із заходу на схід (рис. 3). Залежність показника I_{DM} від географічної довготи виражається рівнянням: $I_{DM} = -1,636\lambda + 85,03$ за коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,284$.

Зауважимо, що завдяки гірським станціям лінії регресії на рис. 2 і 3 розміщені вище порівняно з тими, що могли бути побудовані за даними виключно рівнинних станцій. Крім того, кут нахилу ліній регресії в обох випадках помітно зростає за рахунок карпатських метеостанцій з підвищеною гумідністю клімату. У протилежному напрямку на їх нахил впливають станції Гірського Криму. Завдяки високій гумідності їхнього клімату (однак, меншій, ніж на високогір'ї Українських Карпат) лінії регресії на цих рисунках є пологішими.

Індекс аридності де Мартонна суттєво залежить від висоти над рівнем моря (рис. 4).

Рівняння регресії індексу аридності де Мартонна від абсолютної висоти h має вигляд:

Таблиця 1. Розподіл типів клімату в Україні за індексом аридності де Мартонна. 1961-1990 рр.

Table 1. Distribution of climate types in Ukraine by De Martonne aridity index. 1961-1990.

Тип клімату	Індекс аридності де Мартонна	Кількість метеостанцій	Відсотків
аридний	до 10	0	0,0
напіваридний	від 10 до 20	11	5,9
середземноморський	від 20 до 24	26	13,9
напівгумідний	від 24 до 28	24	12,8
гумідний	від 28 до 35	52	27,8
дуже гумідний	від 35 до 55	62	33,2
екстремально гумідний	понад 55	12	6,4
	Разом	187	100,0

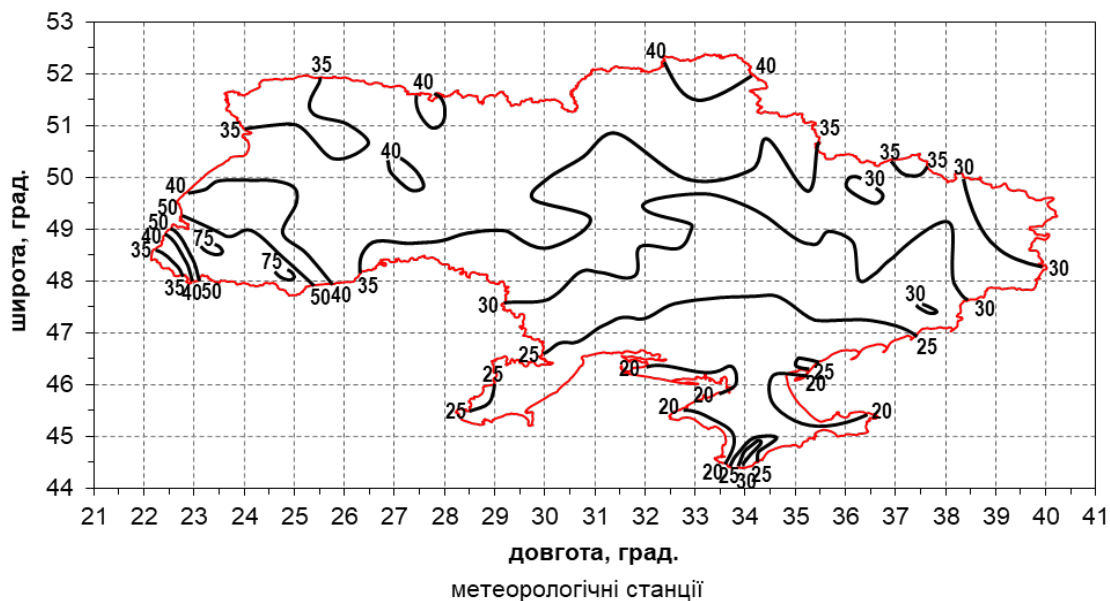


Рис. 1. Індекс аридності клімату де Мартонна. 1961-1990 рр. Fig. 1. De Martonne aridity index. 1961-1990.

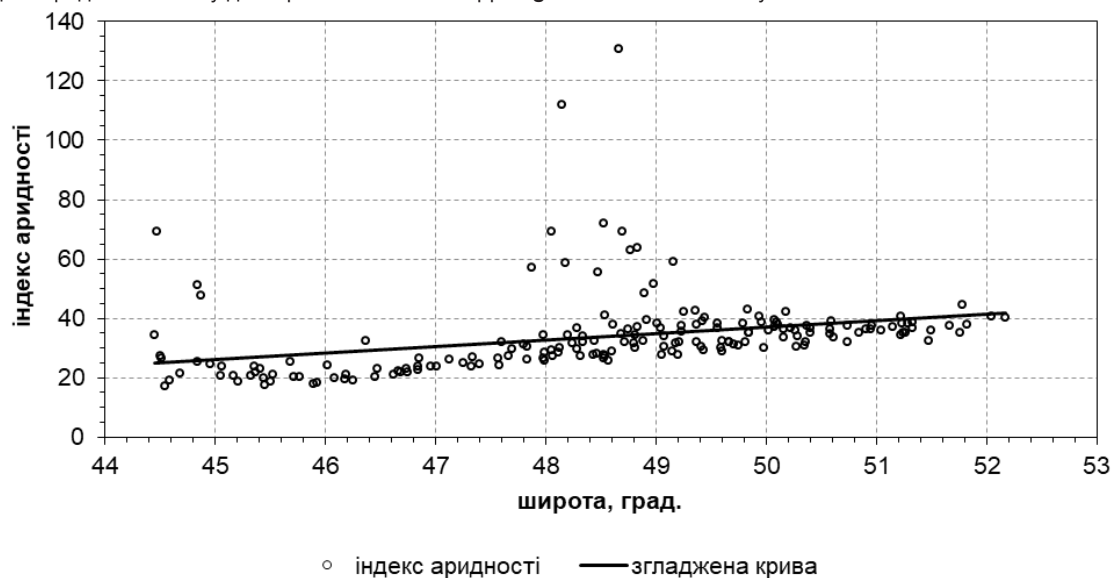


Рис. 2. Залежність індексу аридності де Мартонна від широти. Fig. 2. Dependence of Martonne aridity index on latitude.

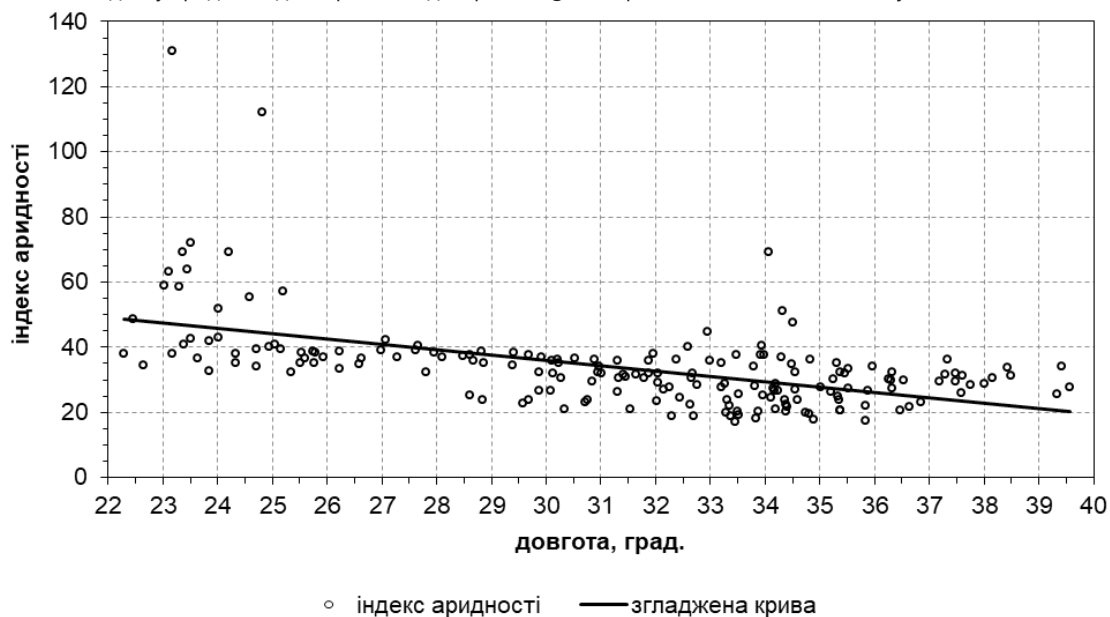


Рис. 3. Залежність індексу аридності де Мартонна від довготи. Fig. 3. Dependence of Martonne aridity index on longitude.

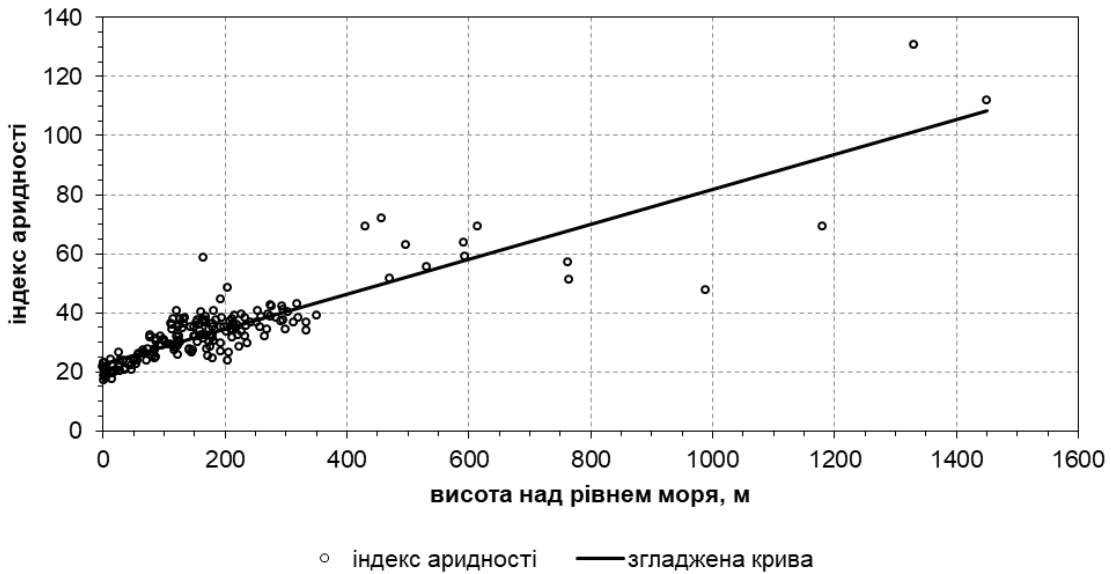


Рис. 4. Залежність індексу аридності де Мартонна від висоти. Fig. 4. Dependence of Martonne aridity index on elevation.

$I_{DM} = 0,059h + 2,73$ за коефіцієнта детермінації $R^2 = 0,778$. Тіснота цієї залежності настільки велика, що дозволяє сформулювати основну причину диференціації умов зволоження клімату в Україні залежно від гіпсометричного положення станції.

Аналіз показує, що для рівнинних станцій (з абсолютною висотою до 400 м н.р.м.) залежність індексу аридності від їх гіпсометричного положення задається подібним рівнянням: $I_{DM} = 0,061h + 22,29$, однак тіснота цієї залежності відчутно послаблюється ($R^2 = 0,582$). Разом з тим, за такої вибірки станцій дещо зростає тіснота лінійних залежностей індексу аридності від довготи ($I_{DM} = -0,937\lambda + 60,69$, $R^2 = 0,311$) та, особливо сильно, від широти ($I_{DM} = 2,741\phi - 102,02$, $R^2 = 0,581$).

Сукупний вплив усіх елементів географічного положення на індекс аридності де Мартонна можна подати за допомогою моделі множинної регресії:

$$I_{DM} = -0,477\lambda + 1,407\phi + 0,054h - 29,65, \quad (3)$$

де I_{DM} – індекс аридності де Мартонна; λ і ϕ – географічні координати (довгота і широта) метеорологічної станції, град.; h – висота над рівнем моря, м.

Коефіцієнт детермінації цього рівняння дорівнює 0,857, що вказує на тісний зв'язок між чинниками впливу і залежною від них величиною. Невипадковий характер виявленого взаємозв'язку між залежною і незалежними величинами підтверджується і високим значенням F -статистики (365,9). Обчислені для рівня значущості значення t -статистики значно перевищують критичне значення 1,973 і вказують на статистичну значущість отриманих коефіцієнтів та корисність усіх змінних для практичного використання запропонованої моделі множинної регресії.

Середня абсолютна похибка оцінки індексу аридності де Мартонна за рівнянням (3) дорівнює 3,18, середня відносна похибка – 8,5 %. У 69,0% усіх випадків відносна похибка оцінки індексу аридності де Мартонна не перевищує 10% і ще в 24,1% випадків вона коливається в межах від 10 до 20%. Тільки у 13 випадках (менш, ніж у 7%) відносна похибка оцінки перевищує 20%.

За допомогою нормованої моделі множинної регресії було також оцінено внесок окремих елементів географічного положення в загальну дисперсію показника I_{DM} . Внесок географічної довготи в загальну дисперсію індексу аридності де Мартонна в Україні за трифакторною моделлю регресії (3) становить 13,4%, географічної широти – 17,2%, абсолютної висоти – 69,4%.

Відповідне рівняння множинної регресії було побудовано і для рівнинних станцій України (з абсолютними відмітками висоти до 400 м):

$$I_{DM} = -0,337\lambda + 1,707\phi + 0,035h - 46,18, \quad (4)$$

Це рівняння регресії є значущим навіть на рівні значущості 0,01. Його статистики майже не поступаються статистикам попереднього рівняння: коефіцієнт детермінації 0,806, $F = 234,6$. Решта показників ще кращі: середня абсолютна похибка оцінки індексу аридності за рівнянням (4) дорівнює 1,99, а середня відносна похибка – 6,2%, причому практично у половині усіх випадків (49,7%) вона не перевищує 5% і ще в третині випадків (31,2%) коливається від 5 до 10%. Двадцятивідсотковий поріг відносна похибка перевищує тільки у п'яти випадках (2,9%).

Найбільший внесок в дисперсію індексу аридності де Мартонна за рівнянням (4) вносить географічна широта – 42,7%. Майже таким великим є внесок висоти над рівнем моря – 39,2%. Внесок географічної довготи відчутно менший – 18,1%.

Як відомо, в умовах глобальної зміни

Таблиця 2. Динаміка індексу аридності де Мартонна протягом 1931-2010 рр.**Table 2.** Dynamics of De Martonne index during 1931-2010.

Метеорологічна станція	Індекс аридності де Мартонна		
	1931-1960 рр.	1961-1990 рр.	1991-2010 рр.
Львів	—	43,0	43,1
Київ	35,2	36,7	33,4
Полтава	27,8	32,3	31,6
Умань	32,3	36,4	32,1
Херсон	—	22,3	22,4

клімату будь-які оцінки аридності чи гумідності регіонального клімату вимагають критичного переосмислення. В цьому контексті важливо порівняти, наскільки суттєво змінилася аридність клімату України за тривалий проміжок часу. З цією метою ми оцінили зміни індексу аридності де Мартонна на п'яти метеорологічних станціях країни: в Києві (північ), Херсоні (південь), Львові (захід), Полтаві (схід) та Умані (центр). Для більшої об'єктивності оцінювалася динаміка цього індексу за три багаторічні періоди: перший (1931-1960 рр.), другий (1961-1990 рр.) та третій (1991-2010 рр.). Як видно з табл. 2, умови аридності клімату в різних регіонах України протягом 1931-2010 рр. змінювалися по-різному.

Зростання індексу в Києві, Полтаві та Умані між 1931 і 1990 рр. змінилося його зменшенням в 1991-2010 рр. Незначне посилення аридності клімату (зменшення) в цих містах в сучасний період поєднується зі слабкою тенденцією протилежного знаку в інших двох містах. В цілому можна стверджувати, що вологісний режим клімату України за розглядуваний період змінився несуттєво, однак тенденція до аридизації усе ж переважає. Цей висновок цілком узгоджується з висновками (Adamenko, 2014), які ґрунтуються на аналізі зміни гідротермічного коефіцієнту Г.Т. Селянинова за вегетаційний сезон протягом 1961-2013 рр. За оцінками Н.В. Гнатюк (Gnatiuk, 2017), зроблених на основі проєкції температури повітря та кількості опадів, аридизація клімату на території України триватиме ще принаймні до кінця XXI ст.

4. Висновки

Таким чином, вище представлено карту індексу аридності клімату де Мартонна за стандартний кліматологічний період 1961-1990 рр. та результати моделювання цього показника за допомогою рівнянь лінійної регресії. Найбільше теоретичне значення може мати трифакторна модель множинної регресії для рівнинних станцій України. Динаміка зміни індексу аридності де Мартонна в останні 50 років узгоджується з динамікою зміни гідротермічного коефіцієнта Селянинова. В

Україні має місце слабка тенденція до посилення аридності клімату, яка несе певні ризики для розвитку сільського господарства країни.

Список посилань

- Adamenko, T.I. (2014). Ahroklimatychnе zonuвання terytoriyi Ukrayiny z vrakhuvannyam zminy klimatu [Agro-climatic zoning of Ukraine taking into account climate change]. Bila Tserkva: RIA BLITS, (In Ukrainian).
- Baltas, E. (2007). Spatial distribution of climatic indices in northern Greece. *Meteorological Applications*, 14, 69–78. doi:10.1002/met.7.
- Blüthgen, J. (1973). Geografija klimatov [Geography of Climates]. Vol. 2. Moscow: Progress, (In Russian).
- Brutsaert, W. (1982). Evaporation into the Atmosphere: Theory. History and Applications. Springer. doi:10.1007/978-94-017-1497-6.
- 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:10.1007/s00704-012-0755-2.
- Gnatiuk, N.V. (2017). *Proektsiyi temperatury povitrya ta kil'kosti opadiv v Ukrayini v XXI stolitti* [The projections of air temperature and precipitation in Ukraine in the 21st century]. Taras Shevchenko National University of Kyiv. Kyiv, Ukraine (In Ukrainian).
- Konstantinov, A.R. (1968). *Isparenie v prirode* [Evaporation in nature]. Leningrad: Gidrometeoizdat (In Russian).
- Lang, R. (1915). Versuch einer exakten Klassifikation der Böden in klimatischer und geologischer Hinsicht [Attempt to exact classification of soils in climatic and geological terms]. *Internat. Mitt. f. Bodenkde*, 5, 312-346 (In German).
- Mucha, B., Bulavenko, I., Melnychuk, M. (2014). Vyparovuvannya v Ukrayins'komu Roztochchi (za materialamy Roztots'koho landshaftno-heofizychnoho statsionaru) [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).
- Radaković, M.G., Tošić, I., Bačević, N., Mladjan, D., Gavrilov, M.B., Marković, S.B. (2018). The analysis of aridity in Central Serbia from 1949 to 2015. *Theoretical and Applied Climatology*, 133(3-4), 887-898. doi:10.1007/s00704-017-2220-8.

Затула В.І., Затула Н.І. Статистичний аналіз аридності клімату в Україні. *Фізична географія та геоморфологія*, 93(1): 19-24.

Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 64/13, Київ, 01601, Україна
Національний авіаційний університет, просп. Космонавта Комарова, 1, Київ, 03058, Україна

В статті докладно розглядаються закономірності просторово-часового розподілу індексу аридності де Мартонна, а також розподіл типів клімату за цим показником на метеостанціях країни. Індекс аридності де Мартонна статистично проаналізовано на 187 метеорологічних станціях України. Оцінено залежність індексу посушливості де Мартонна від висоти станції над рівнем моря, її географічної широти і довготи, а також внесок кожної з цих характеристик у загальну дисперсію даного показника. Наведено діаграми розсіювання індексу посушливості залежно від елементів географічного положення. Довгостроковий тренд індексу аридності за період з 1931 по 2010 рр. показано на прикладі метеорологічних станцій, які репрезентують рівнинну частину території України: Львів (захід), Київ (північ), Полтава (схід), Умань (центр) і Херсон (південь). Показано, що режим зволоження України за розглянутий період суттєво не змінився, але тенденція до аридизації все ж переважає. Це твердження повністю відповідає висновкам попередніх досліджень. Наведено карту індексу аридності де Мартонна за стандартний кліматологічний період 1961–1990 рр. та результати моделювання його географічного розподілу з використанням рівнянь лінійної регресії. Зазначено, що найбільшу теоретичну цінність може мати три-факторна модель множинної регресії цього показника для рівнинних станцій України. Визначено середню абсолютну (2 одиниці) та середню відносну (6,2 %) похибки оцінки індексу аридності де Мартонна за допомогою цієї моделі. Встановлено, що динаміка індексу аридності де Мартонна за останні 50 років відповідала динаміці зміни гідротермічного коефіцієнта Селянинова. Зроблено висновок, що клімат України має слабку тенденцію до збільшення посушливості, що має певні ризики для розвитку аграрного сектору. Ключові слова: динаміка гідромережі, річковий басейн Сивки, краєзнавчо-дослідницький проект.

Ключові слова: аридність клімату, індекс аридності де Мартонна, регресійний аналіз, статистична модель.