

ГЕОГРАФІЧНІ АСПЕКТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ГЛОБАЛЬНОГО ГІДРОЛОГІЧНОГО ЦИКЛУ

DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.7>

УДК 044.7:551.58:57.04:913(4)

Дідух Я.П., Винокуров Д.С.

Інститут ботаніки ім. М.Г. Холодного НАН України, м. Київ

ПРОСТОРОВО-ЧАСОВІ ЗМІНИ БІОКЛІМАТИЧНИХ ФАКТОРІВ У ЄВРОПІ

На основі даних Worldclim 2.0 та Climatic Research Unit проведени розрахунки біокліматичних гідротермічних показників, що визначають розвиток та поширення біоти і використовуються для методики синфітоіндикації: терморезиму (ФАР, період вегетації), кріорезиму (середні температури січня), континентальності (індекс Горчинського), омброрезиму (індекс Де Мартона). Створено відповідні карти, що відображають 30-річні часові проміжки (1901-1929, 1930-1959, 1960-1989 та 1990-2019 рр.) та регіональні зміни у межах Європи. Водночас фіксується досить суттєва їх зміна на рубежі XX-XXI ст. (1990-2019 рр.), що пов'язано із потеплінням клімату. Встановлено векторну різноспрямованість (характер, градієнт та величину) часових та регіональних змін, кореляційні зв'язки між ними та біокліматичними параметрами, що слугує підставою для віднесення України до чотирьох типів біоклімату (субгумідного субокеанічного – лісова та лісостепова зони; субаридного субконтинентального – степова зона; гірського – Карпати, та гірсько-субсередземноморського – Гірський Крим), кожен із яких характеризується якісними відмінами, тому при розробці відповідних прогнозів розвитку та змін біоти і екосистем необхідно враховувати ці особливості.

Ключові слова: біоклімат, карти, терморезим, континентальність, омброрезим, кріорезим.

Вступ. У процесі історичного розвитку та інтеграції кліматології з еколого-біотичними дисциплінами сформувалася біокліматологія, яка вивчає вплив клімату на живі організми [12, 13, 24, 28, 29, 31]. Разом з тим, існує і зворотний вплив, коли рослинний покрив є потужним фактором, що змінює клімат. При цьому давно відомо, що біота є чутливим мірилом кліматичних змін, що зумовлює її високу індикаційну роль. Це проявляється у формуванні низки наукових напрямків та окремих дисциплін (фенологія, дендроіндикація, ареалогія, агрокліматологія тощо). Однією із характерних ознак реакції біоти на кліматичні умови є території поширення видів, що відображається на будові їх ареалів. Спочатку це знайшло відбиток у словесній класифікації останніх (арктичні, альпійські, бореальні, неморальні, аридні і т.д.), пізніше – у класифікації за допомогою формул [18, 19, 22, 6], а потім було запроваджено числові (бальні) показники [21, 11, 34, 5, 1, 2, 10]. На відміну від словесно-знакових моделей, що являють собою шкали найменувань, останні є шкалами порядків та відношень, з якими можна виконувати низку математичних операцій порівняльного та прогнозного характеру. Власне, на цьому ґрунтується розроблена нами методика синфітоіндикації, яку ми використовуємо для оцінки кліматичних змін та їх впливу на рослинність [1].

Не вдаючись у суть цієї методики, що виходить за межі цієї публікації, її точність та результативність вимагає удосконалення, переведу кліматичних показників, які використовують кліматологи, у показники, які використовуються у біокліматології. Зокрема, для фітоіндикаційної оцінки клімату ми використовуємо чотири характеристики: терморезим (Tm) (ФАР, що визначає власне вегетаційні процеси та тривалість онтогенетичних стадій); кріорезим (Cr) - зимові температури, що визначають період спокою у позатропічних зонах та тривалість вегетації; континентальність клімату (Kn) та омброрезим (Om), що, як і попередні показники, визначають поширення видів та закономірності їх розподілу [1, 2].

На основі методики синфітоіндикації нами встановлені важливі закономірності щодо залежності між зміною клімату та рослинними угрупованнями та розробляються прогнози можливих змін біорізноманіття. Такі дослідження щодо оцінки зміни кліматичних показників у часовому аспекті для Європи і є предметом даної статті, що слугуватиме основою прогнозування можливих змін екосистем.

I ISSN:2306-5680 **Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology. 2021. № 1 (59)**

Мета роботи полягала в оцінці часових та регіональних змін кліматичних параметрів, які визначають розвиток та поширення організмів та угруповань і є вихідними позиціями для розробки прогнозів та сценаріїв можливих змін біоти.

Методика. На основі баз глобальних кліматичних даних високої роздільної здатності Worldclim 2.0 [14] та Climatic Research Unit [16] було сформовано гіс-шари для основних кліматичних показників території Європи. За допомогою мови програмування R [27] та використання бібліотек raster [17], tidyverse [33], rgdal [7], ncdf4 [25] було проведено відповідні розрахунки показників

- терморежиму (ФАР),
- кріорежиму (середньосічкових температур),
- континентальності (індекс Горчинського: $K = (1.7 * A / \sin(\text{lat } \varphi)) - 20.4$, де A – різниця середніх температур липня та січня, $\text{lat } \varphi$ – значення широти),
- омброрежиму (індекс Де Мартонне: $I = P/(T+10)$, де P – річна сума опадів, T – середньорічна температура, $^{\circ}\text{C}$).

На їх основі із застосуванням програмного забезпечення QGIS 3.14.16 [26] створено растрові карти із відповідним масштабом ізоліній для території Європи, що відображають 30-річні часові проміжки (1901-1929 рр., 1930-1959 рр., 1960-1989 рр., 1990-2019 рр.). Для побудови графіків використано бібліотеку ggplot2 [32].

Враховуючи складний характер розподілу ізохор, для визначення змін кліматичних показників протягом останніх 120 років, нами обрано два напрямки північної широти (52° та 47°), які пересікають Україну у північній (лісовій) та південній (степовій) зоні з різним кліматом, а також два напрямки східної довготи (33° та 65°), що характеризують субаридний та аридний клімати.

Результати досліджень. Термічність клімату (T_m) ґрунтується на показниках середньорічних температур та ФАР, між якими нами була встановлена тісна прямолінійна кореляційна залежність.

$Y = 135,6x + 729,65$, де Y – середньорічна температура, $^{\circ}\text{C}$, x – ФАР, МДж/м^2 .

Ці показники корелюють з тривалістю вегетаційного періоду.

$Y = 10,04x + 79,58$ ($R^2 = 0,98$), де x – середньорічна температура, Y – кількість днів вегетації при $T > 10^{\circ}\text{C}$;

$Y = 0,0495x + 17,14$ ($R^2 = 0,65$), де x – ФАР, МДж/м^2 , Y – кількість днів вегетації при $T > 0^{\circ}\text{C}$.

Побудовані нами карти ізотерм середньорічних температур (рис. 1), що корелюють з тривалістю вегетації, близькі до широтної зональності, хоча орографічні особливості гір суттєво впливають на цей розподіл. Зміна показників за 30-літні періоди (1901-1929; 1930-1959; 1960-1989; 1990-2019) свідчить про певні часові відхилення показників. Для такої кількісної оцінки цих відхилень нами проаналізовані показники по 52° пн.ш., що визначає північні кордони України і характеризується вологим континентальним (холодним) з теплим літом кліматом – Dfb, та по 47° пн.ш., яка пересікає південну частину степової зони України і характеризується вологим континентальним (холодним) зі спекотним літом кліматом – Dfa [20, 8]. Поняття «вологий» та «континентальний» досить відносне і у першому випадку, на наш погляд, мова йде про субгумідний, вологий, обумовлений впливом західного циклона, а у другому – субаридний сухий, обумовлений впливом східного сибірського антициклону, клімати, що розмежовуються по «осі Воєйкова» [8].

Аналіз зміни показників середньорічних температур у межах Європи на широті 47° по відношенню до 1900-1929 р. свідчить, що за 1930-1959 р. вона майже не змінювалася (1%), з 1960 по 1989 р. зросла на 4,6%, а з 1990 по 2019 рр. це зростання було досить суттєвим (17%), що становить $0,9^{\circ}\text{C}$ (рис. 2). Відповідно середньорічні показники ФАР зростають від 1821 ± 417 , 1836 ± 412 , 1869 ± 414 до 2009 ± 411 МДж/м^2 , тобто на 187,6, або 12%, а кількість днів вегетації при $T > 10^{\circ}\text{C}$ – від $160,4 \pm 31$ до $174,3 \pm 30$, тобто збільшилася на 14 днів.

На широті 52° хоча і спостерігається аналогічне підвищення середньорічної температури, однак воно дещо вище $1,3^{\circ}\text{C}$ і становить 26,8% (рис. 2). Це відповідає річному

підвищенню ФАР від 1635 ± 303 до 1814 ± 273 , тобто на $178,4 \text{ МДж/м}^2$ (11,7%), а збільшення тривалості активної вегетації з $146,7 \pm 22$ до 160 ± 20 , тобто на 13 діб.

У субконтинентальному кліматі по східній довготі 33° до 1989 р. таке підвищення становило 1%, а з 1990 по 2019 рр. різко зросло (рис. 2). Згідно з рис. 1 можна зробити висновок, чим вищі широти і більш континентальний клімат, тим різкіші зміни середньорічних температур, а відповідно ФАР і періоду активної вегетації.

На північному сході України ізотерма середньорічної температури за 120 років змістилася від 6°C до $7,5^\circ\text{C}$, що означає подовження періоду активної вегетації від 140 до 155 днів, а на півдні (степовий Крим) від 11 до 12°C , а період вегетації подовжився від 190 до 200 днів. При цьому зафіксовано підвищення середньорічних температур на високогір'ї Карпат від $+4$ до $+5^\circ\text{C}$, а від півночі Молдови до Поділля спостерігається зона з підвищеною середньорічною температурою (так зване «тепле Поділля»), де середньорічна температура піднімається від $8-9$ до $9-10^\circ\text{C}$, що сприяє збільшенню періоду активної вегетації рослин на два тижні.

Кріорежим (Cr) – один із найбільш значущих лімітувальних факторів, які визначають поширення видів, онтогенетичний цикл їх розвитку, особливості фенології, а відтак – територіальний розподіл та часові зміни природних екосистем. Показники кріорежиму корелюють з такими терморежиму, тому у методичному відношенні їх оцінка є одним із способів перевірки достовірності отриманих результатів.

$Y = 1,059 x - 11,132$ ($R^2 = 0,97$), де x – значення терморежиму (середньорічна, $^\circ\text{C}$), Y – значення кріорежиму (середні температури найхолоднішого місяця, $^\circ\text{C}$).

На основі даних Climatic Research Unit [16] нами було побудовано карти кріорежиму, які відображають зміни показників за 30-річні проміжки 120-річного періоду та проведена оцінка їх часових змін. Хоча показники кріорежиму корелюють з такими терморежиму, однак характер розташування ізохор є дещо іншим і у більшості випадків на рівнині має меридіональний характер, але залежить і від довготи (рис. 3).

$Y = -0,53 x_1 + 23,415$ ($R^2 = 0,83$); $Y = -0,205 x_2 + 2,06$ ($R^2 = 0,80$), де x_1 – координати пн.ш., x_2 – координати сх.д. Y – значення кріорежиму.

На відміну від показників терморежиму, де спостерігалось поступове збільшення температур, показники кріорежиму мали коливальний характер: з 1901 по 1929 рр. відбувалося їх зниження, з 1930– підвищення, а з 1990 р. це підвищення було досить суттєве. При цьому від гумідної зони Атлантики до аридної Уралу ці показники наростають (рис. 4).

На основі відповідних розрахунків була встановлена загальна залежність між Cr (x) та показниками ФАР (Y_{Far}), а також кількістю днів інтенсивної вегетації (Y_{veg})

$Y_{Far} = 123,75 x + 2135,2$ ($R^2 = 0,97$); $Y_{veg} = 9,166x + 183,7$ ($R^2 = 0,97$).

Показники ФАР у середньому підвищилися на $187,6 \pm 27 \text{ МДж/м}^2$, тобто цей показник дещо вищий за розрахунки терморежиму ($178,4 \pm 30 \text{ МДж/м}^2$), але ця різниця становить лише 5%, що є межах похибки. Відповідно період активної вегетації збільшується від 167 до 181, тобто на 14 днів.

Розрахунки показують, що на території України при підвищенні середньорічної температури на 1°C показники кріорежиму (середніх температур січня) на широті 47° у степовій аридній зоні підвищилися на $1,5^\circ\text{C}$, а на широті 52° у лісовій гумідній зоні на $1,8^\circ\text{C}$. Відповідно ФАР показників кріорежиму при підвищенні температур на $+1^\circ\text{C}$ зростає на $54-66 \text{ МДж/м}^2$ а кількість днів активної вегетації – на 4 -6 днів. При підвищенні середньорічних температур на $+1,5$, $+2$, $+2,5$ та $+3^\circ\text{C}$ ці показники відповідно зростають (рис. 5). При цьому величина зростання в північних широтах лісової зони вища, ніж у південних степової зони.

Показники термо- та кріорежиму лімітують поширення та розвиток видів. Перше сприяє розширюю в Україні на північ ареалу багатьох середземноморських видів, а друге – у зміні їх онтогенезу та фенологічних циклів, що прискорюють розвиток. Саме завдяки цьому в листяних лісах України клени мають більшу перевагу в розвитку, ніж граб, липа чи дуб, тому сьогодні спостерігається експансія кленів.

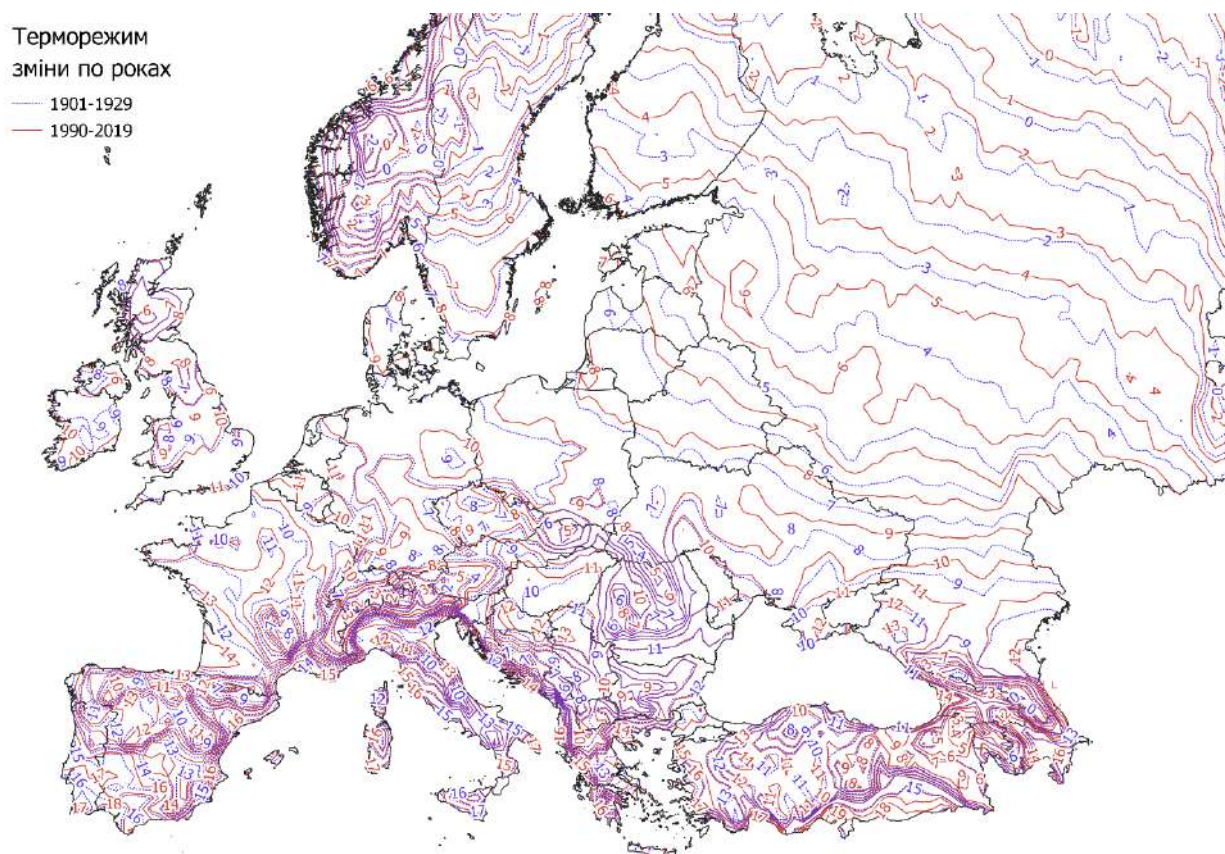


Рис. 1. Карта терморежиму Європи за 1900-1929 та 1990-2019 рр.

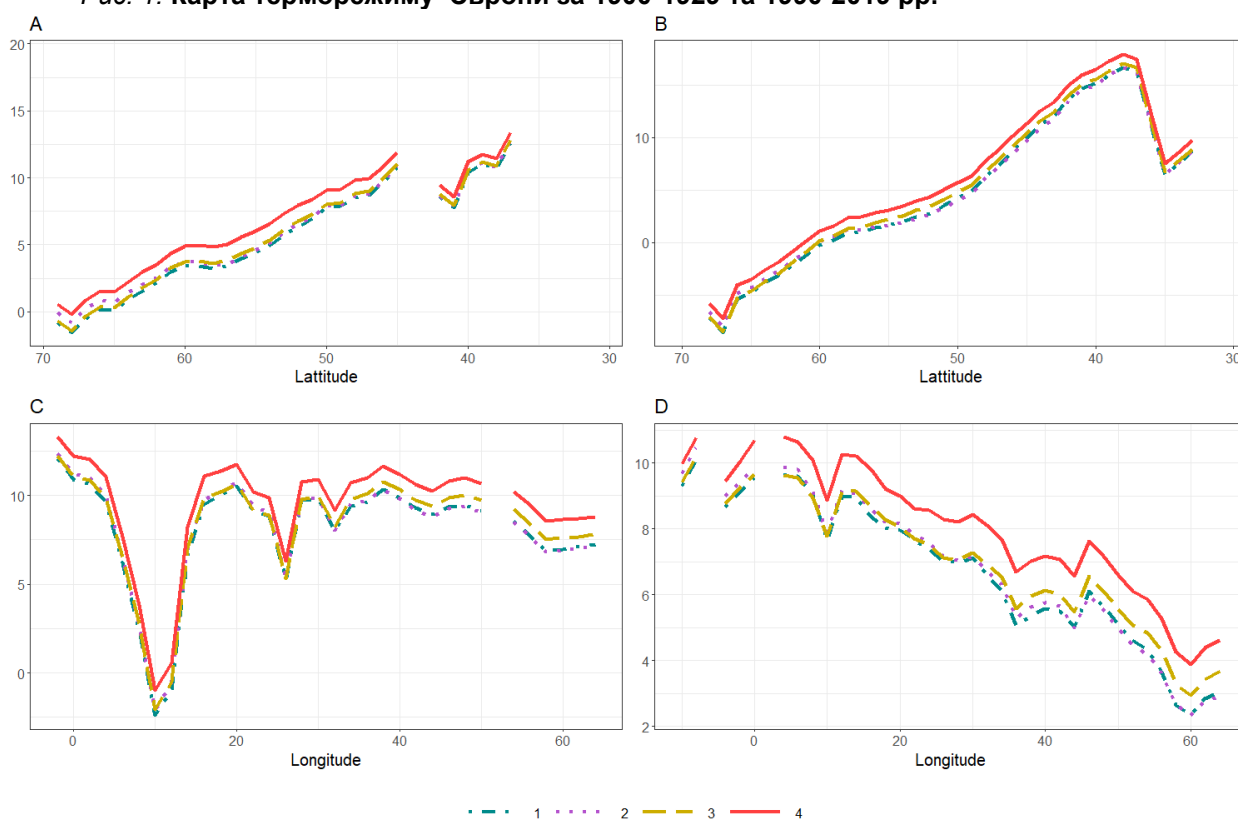


Рис. 2. Зміни показників терморежиму (по осі ординат) за 120-річний період по сх.д. 33° (А), сх.д. 65° (В), пн.ш. 47° (С), пн.ш. 52°(D). Позначення: 1-4 – часові проміжки: 1 – 1901-1929, 2 – 1930-1959, 3 – 1960-1989, 4 – 1990-2019 рр.

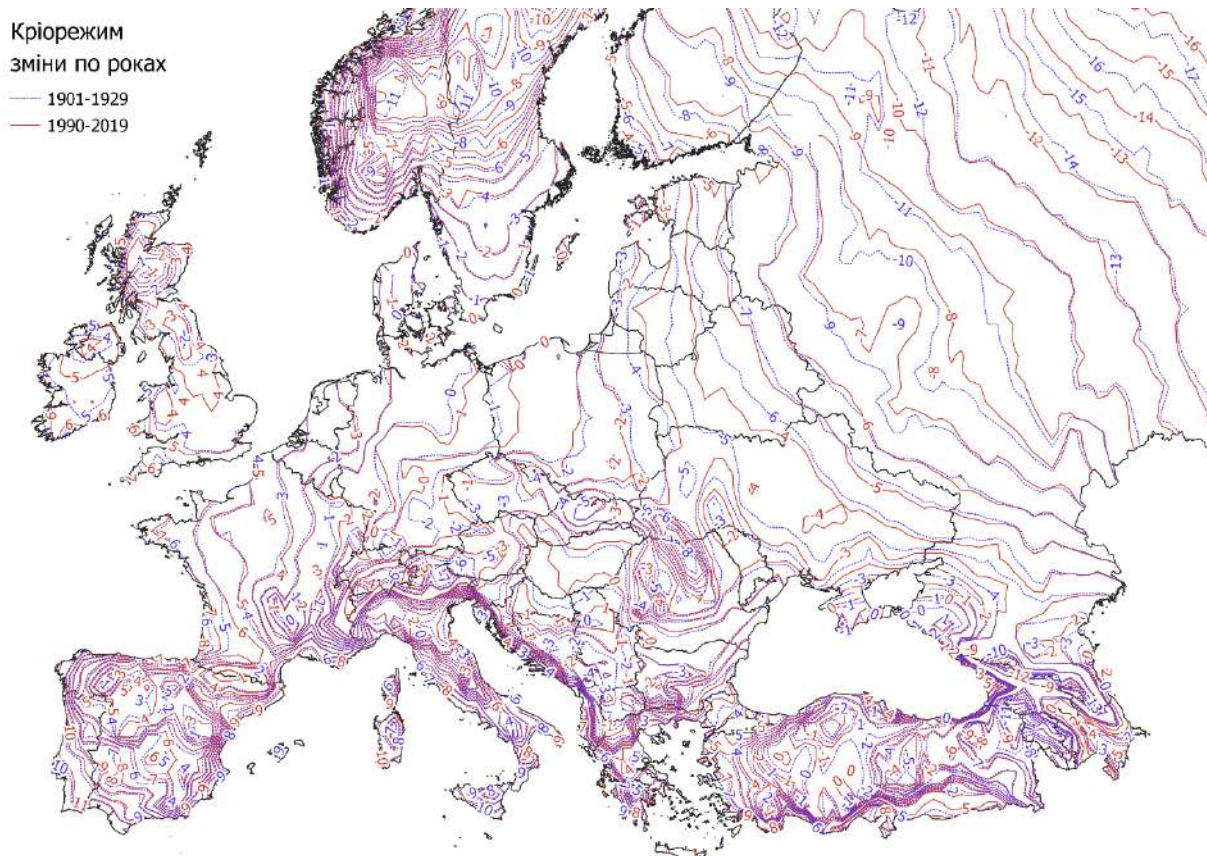


Рис. 3. Карта кріорежиму Європи за 1900-1929 та 1990-2019 рр.

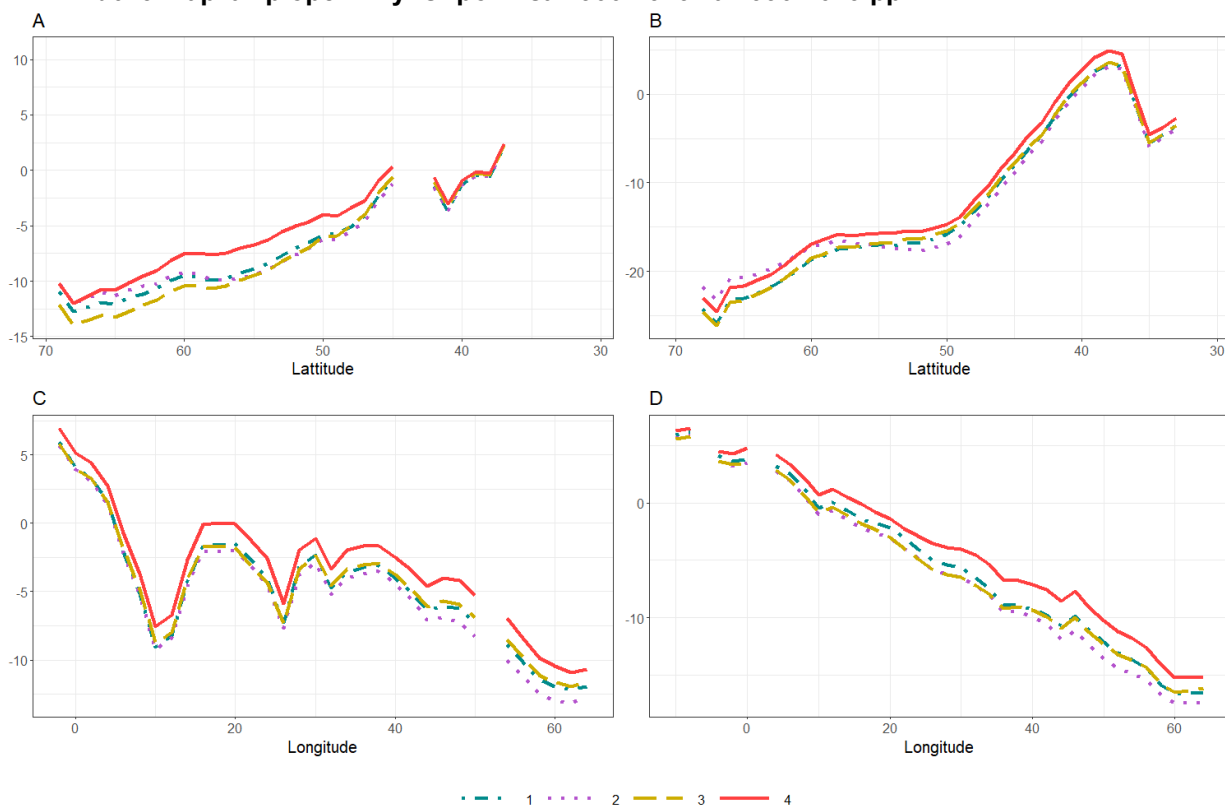


Рис. 4. Зміни показників кріорежиму (по осі ординат) за 120-річний період по сх.д. 33° (А), сх.д. 65° (В), пн.ш. 47° (С), пн.ш. 52°(D). Позначення: 1-4 – часові проміжки: 1 – 1901-1929, 2 – 1930-1959, 3 – 1960-1989, 4 – 1990-2019 рр.

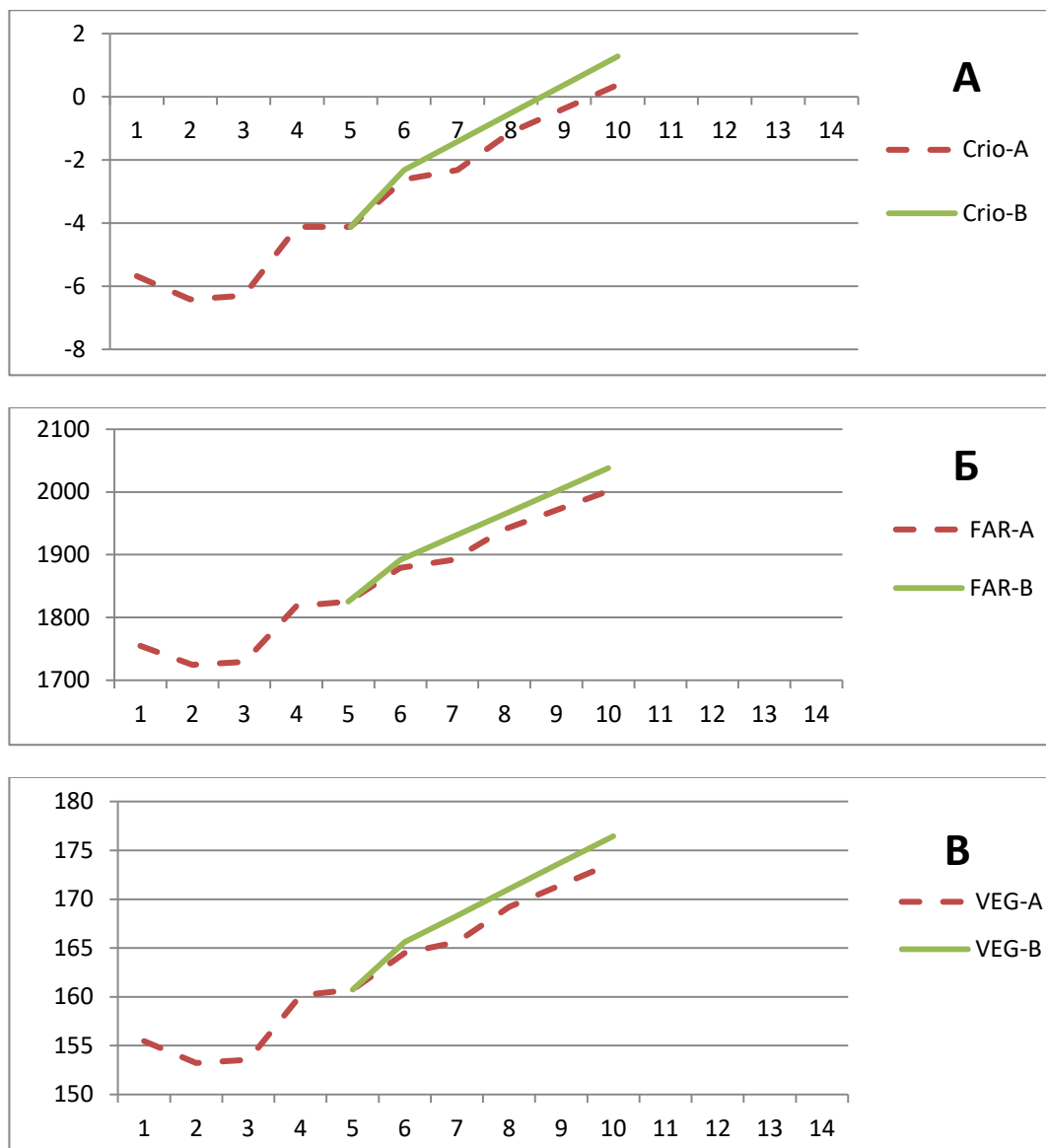


Рис. 5. Зміна біокліматичних показників з 1901 по 2019 р. та сценарії можливих їх змін при підвищенні середньорічних температур від +1 до +3°C. А. Температурні показники кріоклімату (Crio-A – аридний, Crio-B – гумідний клімат); Б- Показники ФАР (МДж/м²) (FAR-A – гумідний, FAR-B – аридний клімат); В - Показники активної вегетації (дні) (VEG-A – аридний, VEG-B –гумідний клімат). Цифрові значення по осі абсцис: 1 – 1901-1929 рр.; 2 – 1930-1959 рр.; 3 – 1960-1989 рр.; 4 – 1990-2019 рр.; 5 – сучасний стан; 6 – підвищення T на +1°C; 7 – +1,5°C; 8 – +2°C; 9 – +2,5°C; 10 – +3°C.

На відміну від згаданих показників, що визначають загальні зональні зміни рослинності, особливості континентальності та омброрежиму впливають на розподіл угруповань на ландшафтному рівні. При цьому їх зміна для одних типів біотопів сприяє розширенню позицій, а для інших – скороченню, в результаті чого відбувається зональне заміщення одних іншими (ліси-степи-пустелі). Натомість для азональних типів біотопів (водна рослинність, евтрофні болота, луки) ці фактори не є лімітуючими.

Якщо терморежим та кріорежим мають прямі одиниці виміру, то для оцінки континентальності та омброрежиму використовують десятки різних методів та коефіцієнтів. Ми не ставили завдання у цій статті оцінити їх ефективність чи робити порівняння, а відобразити територіальні та часові зміни на основі найчастіше вживаних для континентальності – індексу коефіцієнта Горчинського [15].

$K = 1,6A / \sin \varphi$, де A - різниця середньомісячних температур липня (T_6) та січня (T_1), φ - пн. ш., градуси.

Континентальність (K_n) – це така властивість клімату, яка визначається впливом великих площ суші та океану на атмосферні та кліматоутворювальні процеси. Пояснюється це тим, що при нагріванні води на 1°C потрібно 4190 Дж, які поглинаються від прямого сонячного опромінення, у той час, як суша має у 5-6 разів нижчу теплоємність і значна кількість тепла відбивається [30].

Як видно із побудованих карт, ізохори континентальності хоча і мають меридіональний напрямок, однак по відношенню до кріорежиму він змінюється з північного сходу на південний захід, тобто на 90° (рис. 6). Континентальність клімату (Y) у цілому залежить від довготи (x), але в різні часові періоди ця залежність дещо відрізнялася. Для показників 1900-1930 р. $Y = 0,915x + 6,8$ ($R^2 = 0,99$), для 1990-2019 р. $Y = 0,848x + 7,59$ ($R^2 = 0,99$). При цьому на широті 52° переломною зміною показників є меридіан 46° сх.д., а на 47° пн.ш. меридіан – 48° сх.д. (рис. 7). Поблизу морських басейнів Атлантики, Північного океану, Середземного і навіть Чорного та Каспійського морів обриси ізохор змінюють напрямок, що свідчить про значний вплив на континентальність морських басейнів.

Як видно з графіку (рис. 7-С) по широті 47° показники континентальності коливаються, з 1900 по 1930 рр. зростають, а пізніше знижуються. При цьому суттєве зниження спостерігаються на схід від 45° сх. д., а на широті 52° на схід від 30° сх. д. В умовах континентального клімату по довготі 65° у межах південніших широт 40 - 55° показники континентальності з 1930 по 1959 рр. зростали, а в північніших (55 - 70°) знижувалися. З 1960 по 1989 р. фіксувалися зворотні зміни, а з 1989 р. дотепер континентальність знижується по всіх широтах, хоча рівня 1930-1959 рр. на широті 60 - 70° вона не досягає (рис. 7).

Омброрежим є ключовою характеристикою клімату, які відображають гідротермічні умови, що залежить від температури, кількості опадів, вологості повітря, їх випаровуваності, накопичення у ґрунті [3] і визначають диференціацію рослинних угруповань та біотопів [1, 2]. Побудовані на основі розрахунку коефіцієнтів Де Мартонне [9] $I_{dm} = O/T + 10$, де O – середньорічна кількість опадів, мм; T – середньорічна температура, $^\circ\text{C}$. Ізохори омброрежиму мають складні обриси, і найвищий градієнт змін спостерігається в гірських регіонах, проте і тут спостерігаються певні закономірності (рис. 8). Виходячи з того, що річна кількість опадів за 120-літній період характеризується циклічністю і суттєвих трендів змін не має, то в цілому показники омброрежиму мають коливальний характер, хоча спостерігається його незначне зниження. З 1900 по 1960 р. ці показники підвищувалися лише на I_{dm} 2-3, до 90-х знижувалися на таку ж величину, а пізніше знову спостерігається незначне підвищення (рис.9). При цьому розраховано залежність цих змін від сх. довготи та пн. широти:

На широті 47° за 1900 р. $Y = -0,5157x + 39,76$ ($R^2 = 0,85$), за 2000 р. $Y = -0,48x + 38,18$ ($R^2 = 0,86$), на широті 52° відповідно $Y = -0,439x + 47,66$ та $Y = -0,472x + 473$ ($R^2 = 0,93$), де x - східна довгота, Y – коефіцієнт омброрежиму (I_{dm}).

На довготі 33° за 1900-1929 рр. залежність між омброрежимом та пн.ш. описуються рівнянням $Y = 1,288x - 30,76$ ($R^2 = 0,79$), а за 2000 р. - $Y = 1,3x - 32,75$ ($R^2 = 0,88$), де x – показники пн.ш., Y – коефіцієнт омброрежиму (I_{dm}). При цьому з 1900 по 1930 р. у межах пн.ш. 35 - 47° спостерігається підвищення омброрежиму на I_{dm} 2, у межах пн.ш. 47 - 54° – зниження на I_{dm} 6, а у межах пн.ш. 54 - 62° – підвищення I_{dm} на 2-6, 62 - 65° – зниження, 65 - 69° - підвищення по відношенню відповідних середніх значень цих широт. У 1990-2019 рр. у межах широт 35 - 40° зафіксовано його незначне підвищення (I_{dm} 1), 40 - 51° пн.ш. – зниження до I_{dm} 3, широті 51 - 56° – підвищення на I_{dm} 1, а з 56 до 69° пн.ш. зниження до I_{dm} 3 (рис. 10). В умовах континентального клімату на довготі 65° показники омброрежиму фактично не змінювалися, лише на півночі на узбережжі Льодовитого океану зафіксовано значне їх коливання.

В Україні цей коефіцієнт змінюється від I_{dm} 20 на півдні степу до 35-37 у північно-східній частині, а в Карпатах досягає I_{dm} 60-70. При цьому слід відмітити ту ж специфіку «теплого Поділля», де спостерігається різке зниження I_{dm} до 25, що відповідає показникам степової зони.

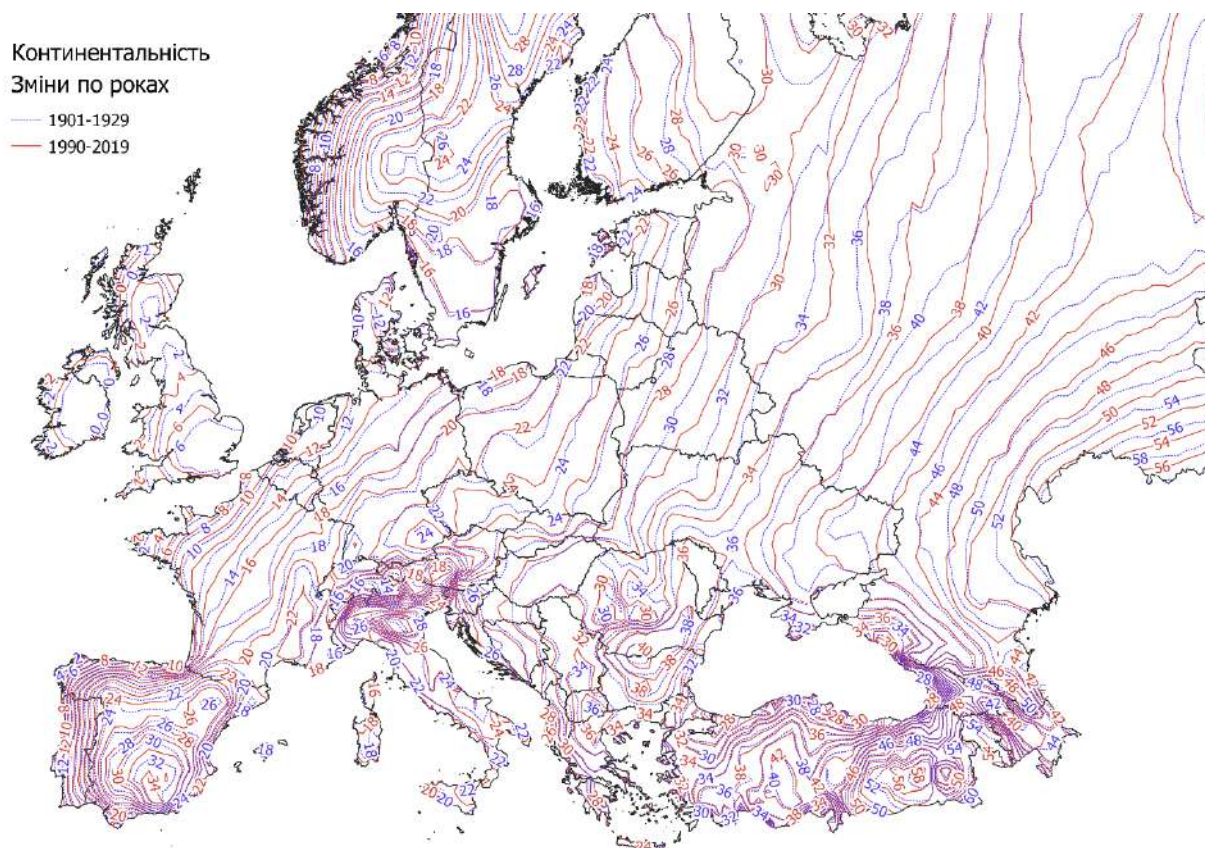


Рис. 6. Карта континентальності Європи за 1900-1929 та 1990-2019 рр.

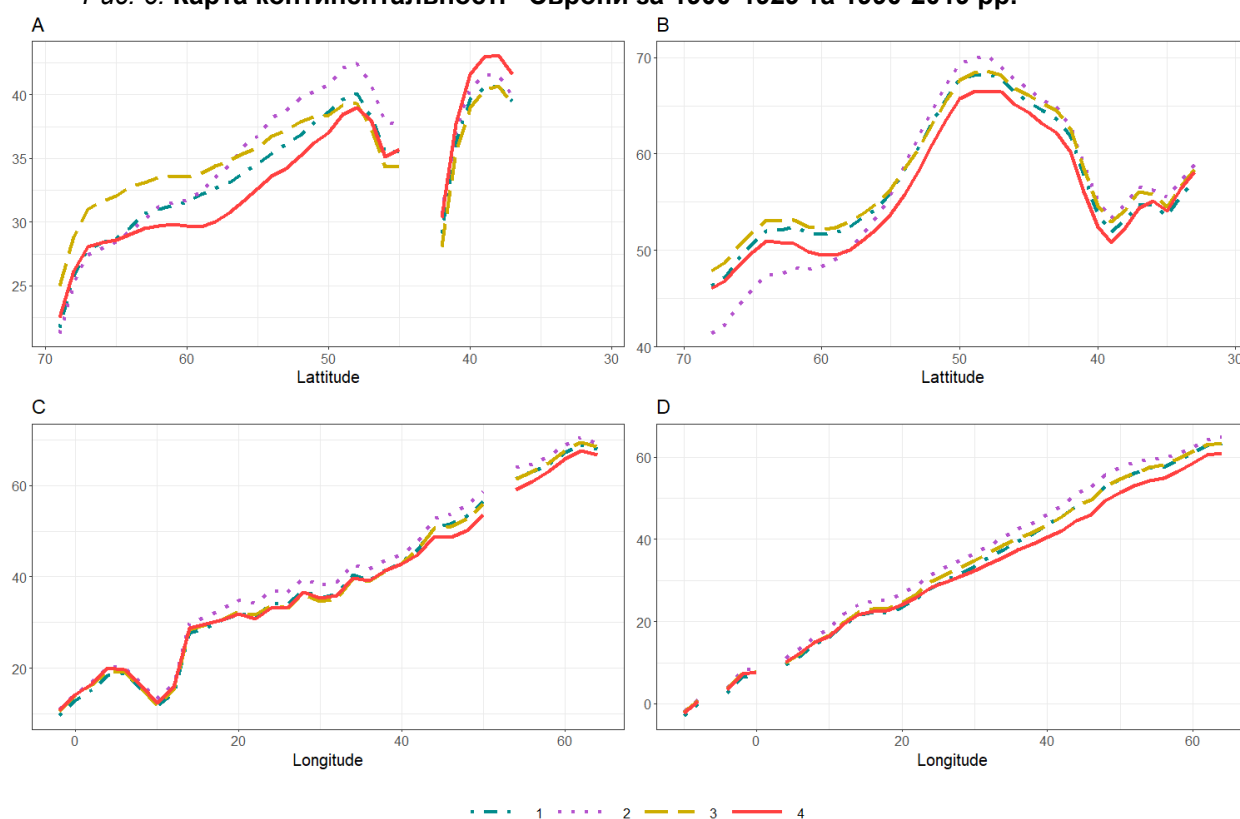


Рис. 7. Зміни показників континентальності клімату (по осі ординат) за 120-річний період по сх.д. 33° (А), сх.д. 65° (В), пн.ш. 47° (С), пн.ш. 52°(D). Позначення: 1-4 – часові проміжки: 1 – 1901-1929, 2 – 1930-1959, 3 – 1960-1989, 4 – 1990-2019 рр.

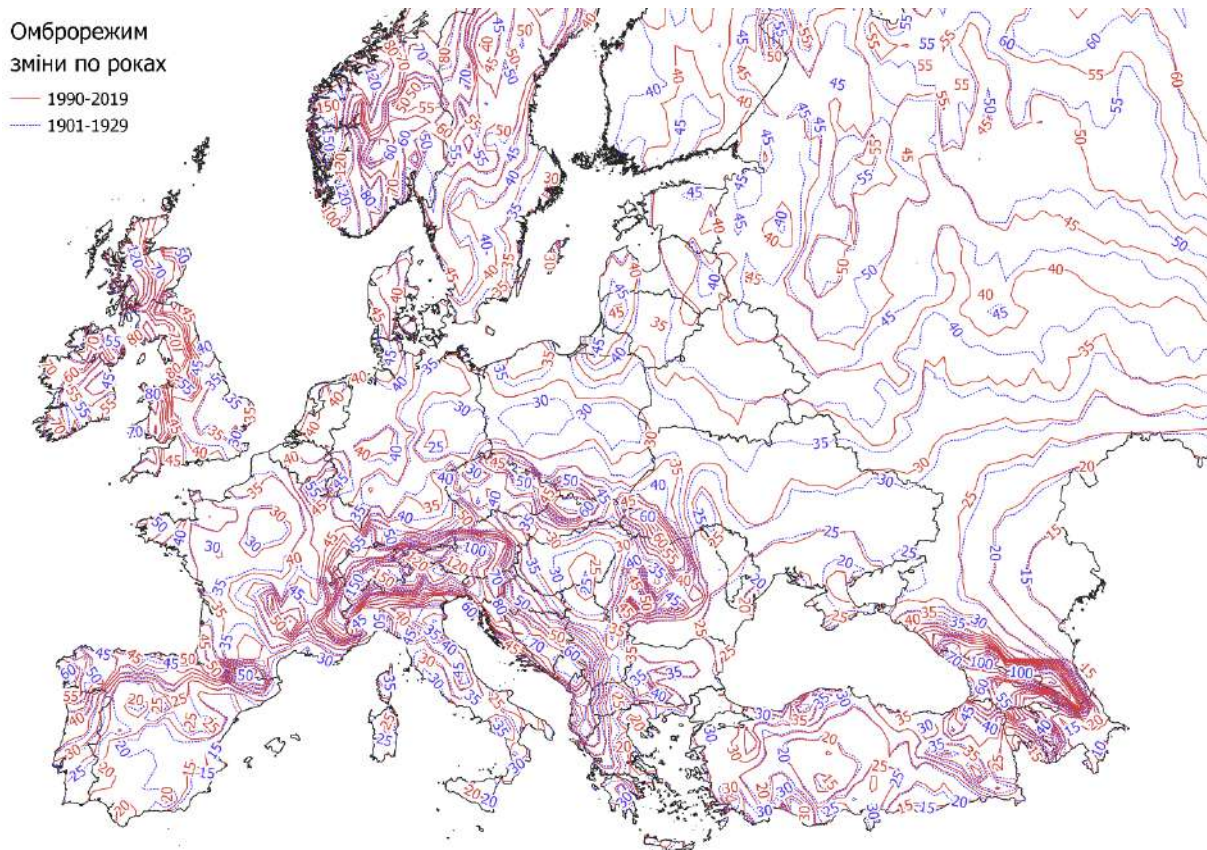


Рис. 8. Карта омброрежиму Європи за 1900-1929 та 1990-2019 рр.

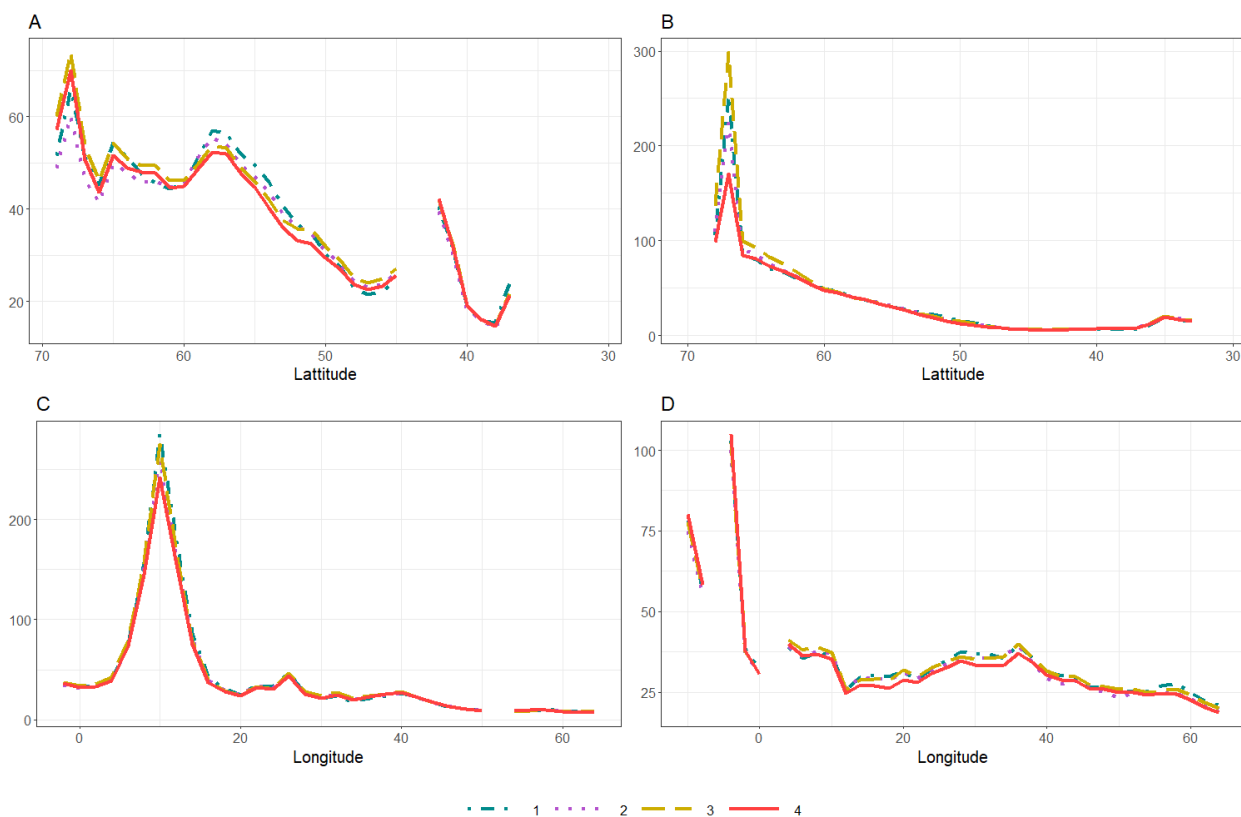


Рис. 9. Зміни показників омброрежиму (по осі ординат) за 120-річний період по сх.д. 33° (А), сх.д. 65° (В), пн.ш. 47° (С), пн.ш. 52°(D). Позначення: 1-4 – часові проміжки: 1 – 1901-1929, 2 – 1930-1959, 3 – 1960-1989, 4 – 1990-2019 рр.

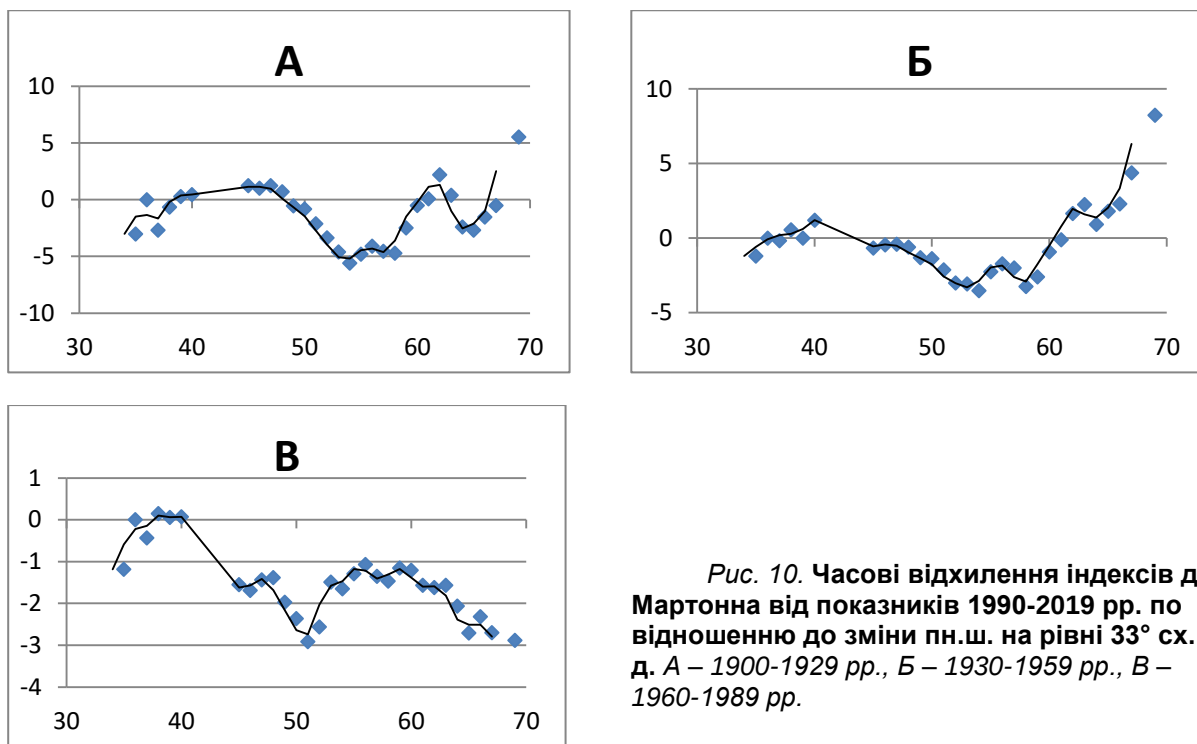


Рис. 10. Часові відхилення індексів де Мартонна від показників 1990-2019 рр. по відношенню до зміни пн.ш. на рівні 33° сх. д. А – 1900-1929 рр., Б – 1930-1959 рр., В – 1960-1989 рр.

Висновки. Побудовані карти ізохор та проведений аналіз показників чотирьох біокліматичних характеристик свідчить про їх векторну різноспрямованість (характер, градієнт та величину) часових та регіональних змін. Водночас фіксується досить суттєва їх зміна на рубежі XX-XXI ст. (1990-2019 рр.), що пов'язано із потеплінням клімату.

При цьому, за показниками та обрисами ізохор для України виділяється чотири типи біоклімату: на півночі у межах Лісової та Лісостепової зон – субгумідний субокеанічний, обумовлений впливом Атлантичного циклону; на півдні – у межах Степової зони – субаридний субконтинентальний, клімат якої зумовлений впливом Сибірського циклону, межі між якими визначаються «віссю Воейкова»; гірського (Карпати) та гірсько-субсередземноморського (Гірський Крим), показники яких визначаються висотними змінами. Така специфіка суттєво впливає на характер поширення видів рослин, їх розвиток, ґрунтоутвірні процеси, гідрорежим, що потребує розробки відповідних прогнозів розвитку та можливих змін екосистем з урахуванням цих регіональних особливостей.

Список літератури

1. Дідух Я.П. Основи біоіндикації: монографія. Київ: Наук. думка, 2012. 344 с.
2. Дідух Я.П., Плюта П.Г. Фітоіндикація екологічних факторів: монографія. Київ: Ін-т ботаніки НАН України, 1994. 280 с.
3. Константинов А.Р. Испарение в природе: монография. Ленинград: Гидрометеиздат, 1968. 532 с.
4. Раменский Л.Г. Введение в комплексное почвенно-геоботаническое исследование земель. Москва: Сельхозгиз, 1938. 620 с.
5. Цыганов Д.Н. Фитоиндикация экологических факторов в подзоне хвойно-широколиственных лесов. Москва: Наука, 1983. 198 с.
6. Юрцев Б.А. Флора Сунтар-Хаята. Проблемы истории высокогорных ландшафтов Северо-Востока Сибири. Ленинград: Изд-во «Наука», Ленпнгр. отд. 1968. С. 1-235.
7. Bivand R., Keitt T., Rowlingson B. rgdal: Bindings for the 'Geospatial' Data Abstraction Library. 2020 R package version 1.5-16. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=rgdal>
8. Coffin J. H., Coffin S. J., Voeikov A. I. The winds of the globe: or, The laws of atmospheric circulation over the surface of the earth. Smithsonian Institution, 1875.V.20.756 p.
9. de Martonne E. L'indice d'aridité. *Bull Ass Geogr Fr.* 1926, 9, P. 3-5.
10. Didukh Y. P. The ecological scales or the Species of Ukrainian Flora and Their Use in Synphytoindication. Kyiv: Phytosociocentre, 2011. 176 p.

11. *Ellenberg H., Weber H. E., Düll R., Wirth V., Werner W.* Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Ed.3. Scripta Geobot. 2001, 18, P. 1–262.
12. *Emberger L.* Project d'une classification biogéographique des climats. *An Biol.* 1954, 31, (5–6). P. 249–255.
13. *Emberger L.* Considérations complémentaires au sujet des recherches bioclimatologiques et phytogéographiques-écologiques. In: Travaux de botanique et d'écologie. 1971, Masson, Paris. P. 291–301.
14. *Fick S.E., Hijmans R.J.* World Clim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2017, 37, P. 4302–4315.
15. *Gorczynski W.* Sur le calcul du degré de continentalisme et son application dans la climatologie. *Geografiska Annaler*, 1920, 2, P. 324–331.
16. *Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D.* Version 4 of the CRU TS Monthly High-Resolution Gridded Multivariate Climate Dataset. *Scientific Data*, 2020, 7, 109.
17. *Hijmans R.J.* raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version, 2020. 3.3–13.
18. *Jäger E.* Die pflanzengeographische Ozeanitätsgliederung der Holarktis und die Ozeanitätsbindung der Pflanzenareale. *Feddes Repert.* 1968, 79, P. 157–335.
19. *Jäger E. J.* Comments on the history and ecology of continental European plants. In: Valentine DH (ed): Taxonomy, phytogeography and evolution, London. 1972. 349–362.
20. *Köppen W.* Das Geographische System der Klimate. *Geogr. Zeitschrift*. 1936, 6, P. 593–611
21. *Landolt E.* Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora. Veröff. Geobot. Inst. der Eidgen. Techn. Hochschule in Zürich, 1977. P. 208.
22. *Meusel H., Jäger E., Weinert E.* Vergleichende Chorologie der zentraleuropäischen Flora. Bd.1 (Text und Karten). Jena: Fischer-Verlag, 1965. 583 + 250 S.
23. *Peel M. C., Finlayson B. L., McMahon T. A.* Hydrology and Earth System Sciences Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2007, 11, P.1633–1644
24. *Pesaresi S., Galdenzi D., Biondi E., Casavecchia S.* Bioclimate of Italy: application of the worldwide bioclimatic classification system. *Journal of Maps*, 2014, 10, 4, P. 538–553.
25. *Pierce D.* ncdf4: Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data Files. 2019, R package version 1.17.
26. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. URL: <http://www.qgis.org>
27. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. URL <https://www.R-project.org/>
28. *Rivas-Martinez S.* Worldwide Bioclimatic Classification System. Phytosociological Research Center. 2004. URL: www.globalbioclimatics.org
29. *Rivas Martínez S., Rivas Sáenz S., Penas Merino A.* Worldwide bioclimatic classification system. *Global geobotany*, 2011, 1, P. 1–634.
30. *Snow R.* Continental climate and continentality Encyclopedia of World Climatology: (eds.) Oliver J.E. Springer Netherlands, 2005, 303–305.
31. *Strat D.* The bioclimate and trend of growing season in the eastern danube delta area over 1951–2000 period. *Analele Universității din Oradea, seria Geografie*. 2014, 2, P. 108–116
32. *Wickham H.* ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York, 2016.
33. *Wickham H. et al.* Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 2019, 4, 43, P.1686.
34. *Zarzycki K.* Ekologiczne liczby wskaźnikowe roślin naczyniowych. Kraków: PAN, 1984. P. 46.

References

1. *Didukh Ya.P.* Osnovy bioindykatsii: monografiia [Fundamentals of bioindication: monograph]. Kyiv: Nauk. dumka, 2012. 344 s.
2. *Didukh Ya.P., Pliuta P.H.* Fitoindykatsiia ekolohichnykh faktoriv: monografiia [Phytoindication of ecological factors: monograph]. Kyiv: In-t botaniky NAN Ukrainy, 1994. 280 s.
3. *Konstantinov A.R.* Isparenie v prirode: monografiya [Evaporation in nature: monograph]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1968. 532 s.
4. *Ramenski L. G.* Vvedenie v kompleksnoe pochvenno-geobotanicheskoe issledovanie zemel [Introduction to the integrated soil-geobotanical study of lands]. Moskva, Selkhozgiz, 1938. 620 s.
5. *Tsyganov D.N.* Fitoindikatsiya e'kologicheskikh faktorov v podzone khvojno-shirokolistvenny'kh lesov. Moskva: Nauka, 1983. 198 s.
6. *Yurtsev B. A.* Flora Suntar-Khaiata. Problemy istorii vysokogornyykh landshaftov Severo-Vostoka Sibiri [Flora Suntar-Hayata. Problems of the history of alpine landscapes in the North-East of Siberia]. Izd.-vo "Nauka", Leningr. Otd. 1968. S. 1—235.
7. *Bivand R., Keitt T., Rowlingson B.* rgdal: Bindings for the 'Geospatial' Data Abstraction Library. 2020 R package version 1.5-16. URL: <https://CRAN.R-project.org/package=rgdal>.

8. Coffin J. H., Coffin S. J., Voeikov A. I. The winds of the globe: or, The laws of atmospheric circulation over the surface of the earth. Smithsonian Institution, 1875. V.20. 756 p.
9. de Martonne E. L'indice d'aridité. *Bull Ass Geogr Fr.* 1926, 9, P. 3–5.
10. Didukh Y. P. The ecological scales or the Species of Ukrainian Flora and Their Use in Synphytoindication. Kyiv: Phytosociocentre, 2011. 176 p.
11. Ellenberg H., Weber H. E., Düll R., Wirth V., Werner W. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Ed.3. *Scripta Geobot.* 2001, 18, P. 1–262.
12. Emberger L. Project d'une classification biogéographique des climats. *An Biol.* 1954, 31, (5–6). P. 249–255.
13. Emberger L. Considérations complémentaires au sujet des recherches bioclimatologiques et phytogéographiques-écologiques. In: *Travaux de botanique et d'écologie.* 1971, Masson, Paris. P. 291–301.
14. Fick S.E., Hijmans R.J. World Clim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2017, 37, P. 4302–4315.
15. Gorczynski W. Sur le calcul du degré de continentalisme et son application dans la climatologie. *Geografiska Annaler*, 1920, 2, P. 324–331.
16. Harris I., Osborn T.J., Jones P., Lister D. Version 4 of the CRU TS Monthly High-Resolution Gridded Multivariate Climate Dataset. *Scientific Data*, 2020, 7, 109.
17. Hijmans R.J. raster: Geographic Data Analysis and Modeling. R package version, 2020. 3.3-13.
18. Jäger E. Die pflanzengeographische Ozeanitätsgliederung der Holarktis und die Ozeanitätsbindung der Pflanzenareale. *Feddes Repert.* 1968, 79, P. 157–335.
19. Jäger E. J. Comments on the history and ecology of continental European plants. In: Valentine DH (ed): *Taxonomy, phytogeography and evolution*, London. 1972. 349–362.
20. Köppen W. Das Geographische System der Klimate. *Geogr. Zeitschrift.* 1936, 6, P. 593–611.
21. Landolt E. Ökologische Zeigerwerte zur Schweizer Flora. Veröff. Geobot. Inst. der Eidgen. Techn. Hochschule in Zürich, 1977. P. 208.
22. Meusel H., Jäger E., Weinert E. Vergleichende Chorologie der zentraleuropäischen Flora. Bd.1 (Text und Karten). Jena: Fischer-Verlag, 1965. 583 + 250 S.
23. Peel M. C., Finlayson B. L., McMahon T. A. Hydrology and Earth System Sciences Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 2007, 11, P.1633–1644.
24. Pesaresi S., Galdenzi D., Biondi E., Casavecchia S. Bioclimate of Italy: application of the worldwide bioclimatic classification system. *Journal of Maps*, 2014, 10, 4, P. 538–553.
25. Pierce D. ncdf4: Interface to Unidata netCDF (Version 4 or Earlier) Format Data Files. 2019, R package version 1.17.
26. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. URL: <http://www.qgis.org>
27. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2020. URL <https://www.R-project.org/>
28. Rivas-Martínez S. Worldwide Bioclimatic Classification System. Phytosociological Research Center. 2004. URL: www.globalbioclimatics.org
29. Rivas Martínez S., Rivas Sáenz S., Penas Merino A. Worldwide bioclimatic classification system. *Global geobotany*, 2011, 1, P. 1–634.
30. Snow R. Continental climate and continentality *Encyclopedia of World Climatology*: (eds.) Oliver J.E. Springer Netherlands, 2005, 303–305.
31. Strat D. The bioclimate and trend of growing season in the eastern danube delta area over 1951-2000 period. *Analele Universității din Oradea, seria Geografie.* 2014, 2, P. 108–116.
32. Wickham H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. Springer-Verlag New York, 2016.
33. Wickham H. et al. Welcome to the tidyverse. *Journal of Open Source Software*, 2019, 4, 43, P.1686.
34. Zarzycki K. Ekologiczne liczby wskaźnikowe roślin naczyniowych. Kraków: PAN, 1984. P. 46.

Пространственно-временные изменения биоклиматических факторов в Европе

Дидух Я.П., Винокуров Д.С.

На основе данных *Worldclim 2.0* и *Climatic Research Unit* проведены расчеты биоклиматических гидротермических показателей, определяющих развитие и распространение биоты, которые используются для методики синфитоиндикации: терморежима (ФАР, период вегетации), криорежима (средние температуры января), континентальности (индекс Горчинского), омброрежима (индекс де Мартона). Созданы соответствующие карты, отражающие 30-летние временные промежутки (1901-1929, 1930-1959, 1960-1989 и 1990-2019 гг) и региональные изменения в пределах Европы. Фиксируется довольно существенное их изменение на рубеже XX-XXI вв. (1990-2019 гг.), что связано с потеплением климата. Установлено векторную разнонаправленность (характер, градиент и величина) временных и региональных изменений, корреляционные связи между ними и биоклиматических параметров, что служит основанием для отнесения Украины к четырем типам биоклимата (субгумидного субокеанического – лесная и лесостепная зоны; субаридного субконтинентального – степная зона, горного – Карпаты и горно-субсредиземноморского – Горный Крым). Каждый из них характеризуется качественными различиями,

ISSN:2306-5680 Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія. 2021. № 1 (59)

поэтому при разработке соответствующих прогнозов развития и изменений биоты и экосистем необходимо учитывать эти особенности.

Ключевые слова: биоклимат, карты, терморегим, континентальность, омброрегим, криорегим.

Spatial-temporal changes of bioclimate factors in Europe

Didukh Ya.P., Vynokurov D.S.

Based on the data from Worldclim 2.0 and the Climatic Research Unit, calculations of bioclimatic hydrothermal indicators were carried out. It is pointed out that the following factors determine the development and distribution of biota, and are used for the synphytoindication method: thermoregime, cryoregime, continentality, ombroregime. Thermoregime is based on mean annual temperatures and FAR, which are highly correlated. They also are connected with the vegetative period. It was found that the higher the latitudes and the more continental climate, the sharper the changes in average annual temperatures, as well as accordingly the vegetation period is longer. Cryoregime is one of the most significant limiting factors that determine the distribution of species, their ontogenetic cycle, the peculiarities of their phenology etc. We used average January temperatures to calculate it. It has been suggested that the change in cryoclimate led to the expansion of maple. It has an advantage over hornbeam, linden and oak because its phenological features have changed. Continentality and ombroregime affect the distribution of communities at the landscape level. We used the Gorchinsky index to calculate the continentality and the de Martonne index to calculate the ombroregime. Their change for some types of habitats contributes to the expansion of their distribution, and for others – to their reduction. As a result, there is a zonal replacement of some types of habitats by others (forests-steppes-deserts). Instead, for azonal types of habitats (aquatic vegetation, eutrophic swamps, meadows), these factors are not limiting.

Corresponding maps have been created that reflect 30-year time intervals (1901-1929, 1930-1959, 1960-1989 and 1990-2019) and regional changes within Europe. A rather significant change is recorded at the turn of the XX-XXI centuries (1990-2019), which is associated with climate warming. Temporal and regional changes are multidirectional (in nature, gradient and magnitude). Correlations between them and bioclimatic parameters have been established. This serves as a basis for assigning Ukraine to four types of bioclimate (sub-humid suboceanic - forest and forest-steppe zones; subarid subcontinental - steppe zone, mountainous - Carpathians and mountain-sub-Mediterranean - Mountain Crimea). Each of them is characterized by qualitative differences. When developing appropriate forecasts for the development and changes of biota and ecosystems, it is necessary to take into account these features.

Keywords: bioclimate, maps, thermoregime, continentality, ombroregime, cryoregime.

Надійшла до редколегії 26.11.2020

DOI: <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2021.1.8>

УДК 551.583

Заболоцька Т.М.¹, Шпиг В.М.¹, Ціла А.Ю.^{1,2}

¹Український гідрометеорологічний інститут ДСНС України та НАН України, м. Київ

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ЦИРКУЛЯЦІЙНІ ПРОЦЕСИ ТА ХМАРНИЙ ПОКРИВ УПРОДОВЖ ПЕРІОДУ ГЛОБАЛЬНОГО ПОТЕПЛІННЯ

Виконано дослідження взаємозв'язку між різними індексами циркуляції та кількісними змінами хмарного покриву упродовж періоду глобального потепління. Визначено осереднений за 73 роки (1946-2018) просторовий розподіл річних значень загальної та нижньої хмарності. Показано, що кількість хмар зменшується із заходу на схід та з півночі на південь. Для кліматичної оцінки змін хмарного покриву проаналізовано відхилення річних значень загальної та нижньої хмарності від історичної (1961-1990 рр.) та сучасної (1981-2010 рр.) норм. Показано, що більші зміни характерні нижній хмарності. Лінійні тренди вказують на зменшення річної кількості хмар нижнього ярусу майже на 90 % території, з них значуще на 70 %. Тренди щомісячних змін свідчать про зменшення нижньої хмарності упродовж всього року тільки на півночі, на решті території в окремі місяці фіксували збільшення, частіше у січні та вересні. Зміни кількості загальної хмарності були не виражені, майже порівну спостерігали незначуще як зменшення, так і збільшення. Показано, що на клімат Північної півкулі (і на Україну) впливають індекси циркуляції: NAO – Північно-Атлантичне коливання, AO – Арктична осциляція, EA – Східно-Атлантичне коливання, EA/WR – коливання Східна Атлантика-Західна Росія, SCAND – Скандинавське коливання, GBI – Гренландське коливання, EI-Niño – південне коливання. Надано характеристику кожному з них та взаємозв'язку між ними. Кількісну оцінку змін хмарного покриву упродовж 1961-2018 рр. визначено за змінами повторюваності різного стану неба (ясний, напів'ясний, похмурий) у послідовних десятиріччях та оцінено відносні зміни між ними. Паралельно проаналізовано вплив вище зазначених індексів циркуляцій у цей час. Отримано, що синхронність змін повторюваності різного стану неба за загальною та нижньою хмарністю узгоджується з відповідною мінливістю циркуляційних процесів.

Ключові слова: індекси циркуляції, стан неба за загальною та нижньою хмарністю, основні форми хмар, регіон, повторюваність.

I ISSN:2306-5680 Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology. 2021. № 1 (59)