

Сучасні тенденції зміни річного ходу атмосферних опадів в Україні

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>

В кліматичних описах територій важлива роль відводиться режиму атмосферних опадів, їх кількості та розподілу протягом року. Винятково велике значення ці відомості набувають при плануванні та управлінні водними ресурсами. Основна мета даного дослідження полягала у представленні розширеної характеристики річного ходу атмосферних опадів на території України та встановленні найважливіших особливостей його зміни за період 1961-2020 рр. Інформаційну базу дослідження становлять дані спостережень за місячною і річною кількістю атмосферних опадів на 153 метеорологічних станціях континентальної частини України за періоди 1961-1990 і 1991-2020 рр. Найважливіші характеристики режиму зволоження обчислювалися із застосуванням як стандартних методів статичного аналізу, так і методу гармонічного аналізу. Основний акцент роботи зроблено на параметрах гармонічного аналізу вихідних рядів спостереження в 1961-1990 та 1991-2020 роках та утворених на їх основі різницевих рядів зі змінами кількості опадів, насамперед амплітуді C_1 і фазі t_1 річної гармоніки, а також її внеску f_1 в загальну дисперсію місячних рядів опадів. Було виявлено великі просторові неоднорідності в розподілі річних і місячних сум опадів. Гармонічний аналіз дозволив встановити й важливі закономірності всередині річного ходу сум опадів. Основну роль в сезонних коливаннях місячних сум опадів відіграє річна, рідше – піврічна гармоніка. При переході від першого періоду спостереження (1961-1990 рр.) до другого (1991-2020 рр.) відчутно послабилася тіснота оберненого зв'язку між частинами дисперсії, зумовленими цими гармоніками (коефіцієнт детермінації R^2 між параметрами f_1 та f_2 річної і піврічної гармонік зменшився з 0,876 до 0,661). Водночас відчутно зменшився нахил прямих залежності між цими параметрами (коефіцієнт рівняння лінійної регресії змінився від -0,771 до -0,47). Встановлено, що амплітуда і фазова структура річної гармоніки, а також відносна роль річної і піврічної гармонік місячної кількості опадів в умовах сучасного клімату зазнали значних змін. Імовірно, це зумовлено змінами в характері циркуляції атмосфери над усім Атлантико-Європейським сектором, хоча вплив місцевих чинників кліматоутворення виключати повністю також не можна. Виявлені зміни фазової структури та інших характеристик річної гармоніки місячних рядів сум опадів сприяють кращому розумінню сучасних тенденцій еволюції стану регіональної кліматичної системи в Україні та будуть корисними при довгостроковому прогнозуванні змін клімату.

Ключові слова: річний хід, гармоніки, амплітуда, фаза, регресійний аналіз, повторюваність, суми опадів, зміни клімату, Україна.

Як цитувати: Затула Василь (2025). Сучасні тенденції зміни річного ходу атмосферних опадів в Україні. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (63), 211-220. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-16>

In cites: Zatulа Vasył (2025). Present tendencies of annual cycle rainfall change in Ukraine. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series Geology. Geography. Ecology*, (63), 211-220. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2025-63-16> [in Ukrainian]

1. Вступ

Постановка проблеми. Атмосферні опади є однією з найважливіших характеристик клімату. З точки зору планування та управління відновними природними ресурсами, насамперед водними, важливою є не тільки річна кількість атмосферних опадів, але і розподіл їх протягом року. Особливості річного ходу атмосферних опадів розглядалися багатьма дослідниками в усьому світі. Однак при цьому характеристики режиму опадів часто складалися тільки на основі традиційних методів аналізу даних стандартних таблиць або карт місячної і річної кількості опадів, тоді як практика вимагає глибшого опрацювання цих матеріалів з використанням спеціальних методів і кліматичних показників.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний інтерес становлять відомості про час настання максимумів та мінімумів річного ходу атмосферних опадів. Найзагальнішу інформацію такого роду можна почерпнути з класичних ро-

біт класифікації клімату Землі, неодноразово цитованих не менш авторитетними вченими, наприклад в монографії [8]. Деякі з цих класифікацій виявилися настільки успішними, що час від часу використовуються для оцінки тенденцій глобальних змін клімату або навіть проєкцій клімату на майбутнє. В країнах колишнього СРСР в середній і вищій школі найбільш поширеною є класифікація Б.П. Алісова (1891-1972) [1, 23], однак у світі найбільшу популярність здобула класифікація кліматів В.П. Кеппена (1846-1940) та її модифікації [7, 11, 13, 18, 20, 24]. Цікаве узагальнення сучасних зрушень в географії кліматичних зон за Кеппеном-Гейгером в Південно-Східній Європі представлено в [19]. Однак подібні публікації зазвичай не вирізняються деталізацією характеристик режиму опадів.

На регіональному рівні більш ґрунтовно дану проблему розглянуто в роботі [9], де представлено карту розподілу періоду настання макси-

мальних кількостей опадів в Південній Європі протягом 1961-1990 рр. Аналіз цієї карти говорить про розмитість часу настання максимуму атмосферних опадів на території району дослідження. У всіх частинах району дослідження він не обмежується якимось одним місяцем, а охоплює інтервал двох-трьох місяців, а в чотирьох із них явно виділено навіть окремий тип режиму з нечітким максимумом опадів.

Як видно з представленої у цій роботі карти, у Середній та Східній Європі максимальна кількість опадів припадає на літні місяці, з червня по серпень. В багатьох дослідженнях підкреслюються відносна однорідність режиму опадів в Європі. Зокрема, мала мінливість опадів традиційно пояснюється приналежністю цієї території до зони позатропічних циклонічних опадів [8].

В роботі [3] докладно проаналізовано кліматологічні зміни в настанні найсухішого місяця року в Україні за останні 60 років, а також показано їх значення для формування національної кліматологічної політики та зіставності оцінок аридності клімату в країнах помірного та субтропічного поясів.

Грунтовний аналіз найважливіших зрушень в настанні екстремальних опадів в останні десятиріччя представлено в роботі [14].

Коливання кількості атмосферних опадів протягом року з одним максимумом і одним мінімумом можна представити у вигляді простої гармонічної хвилі. За допомогою методу гармонічного аналізу можна оцінити параметри цієї гармоніки та її внесок у сумарну дисперсію річного ходу метеорологічної величини.

Як відомо, в основі методу гармонічного аналізу лежить уявлення про те, що будь-яке значення випадкової величини можна подати у вигляді середнього арифметичного та скінченної суми доданків (гармонік) [25]. У випадку місячних рядів кількості атмосферних опадів, представлених в усіх кліматологічних довідниках, маємо:

$$p_t = \bar{p} + \sum_{i=1}^{n/2} \left[A_i \sin\left(\frac{2\pi}{P} it\right) + B_i \cos\left(\frac{2\pi}{P} it\right) \right], \quad (1)$$

де p_t – кількість атмосферних опадів за t -й місяць ($t = 1, 2, \dots, 12$); \bar{p} – середнє річне значення цієї величини; $P = 12$ міс. – повний період річного коливання величини; i – порядковий номер гармоніки; $n = 12$ – довжина вихідного ряду (у загальному випадку, наприклад, коли в таблицях даються значення величини тільки для центральних місяців календарних сезонів, величини P і n можуть відрізнятися).

Значення невідомих коефіцієнтів A_i і B_i обчислюються за формулами:

$$A_i = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n \left[p_t \sin\left(\frac{2\pi}{P} it\right) \right], \quad (2)$$

$$B_i = \frac{2}{n} \sum_{t=1}^n \left[p_t \cos\left(\frac{2\pi}{P} it\right) \right]. \quad (3)$$

Важливо також, що для останньої ($i = n/2$) гармоніки $A_i = 0$, а коефіцієнт B_i потрібно додатково поділити на два.

В гармонічному аналізі вагоме місце відводиться поняттю амплітуди гармоніки, яка виражається через ці коефіцієнти:

$$C_i = \sqrt{A_i^2 + B_i^2}. \quad (4)$$

Періодичні коливання метеорологічної величини, зумовлені кожною окремою гармонікою, зручно подати у вигляді добутку

$$C_i \cos\left[\frac{2\pi}{P}(t - t_i)\right], \quad (5)$$

де

$$t_i = \frac{P}{2\pi i} \arctg(A_i/B_i) - \quad (6)$$

фаза i -тої гармоніки, тобто час досягнення нею максимального значення (міс.). За необхідності значення фази за межами основного інтервалу визначення t_i можна скоректувати.

Потрібно зазначити також, що дисперсія за рахунок будь-якої одиначної гармоніки дорівнює $C_i^2/2$, за винятком останньої гармоніки, для якої вона удвічі більша. Внесок окремої гармоніки в сумарну дисперсію метеорологічної величини визначається за формулою

$$f_i = \frac{C_i^2}{2\sigma^2} \cdot 100, \quad (7)$$

де σ^2 – загальна дисперсія ряду. Для останньої гармоніки величина f_i домножується на два.

Згідно з оцінками [26], в Українських Карпатах середня величина внеску річної гармоніки в сезонні коливання кількості атмосферних опадів перевищує 67,6%. Піврічна гармоніка відповідала ще за 27,5% сумарної дисперсії річного ходу. Також було показано, що річний максимум (точніше, фаза річної гармоніки) атмосферних опадів на південно-західному макросхилі цієї гірської системи настає на 0,5-1,0 місяця пізніше, ніж на прилеглих районах Східно-Європейської рівнини. Водночас, в інших регіонах України [2, 4-5] такі оцінки можуть значно відрізнятися від представлених вище.

Як було зазначено в монографії [8], сезонні коливання атмосферних опадів не такі чіткі, як сезонні коливання температури, оскільки вони визначаються впливом великої кількості чинників, дія яких до того ж не завжди є постійною.

Кількість атмосферних опадів, як відомо, визначається режимом циркуляції атмосфери й океану. Можливі зміни атмосферної циркуляції в

помірних широтах Північної півкулі докладно розглядаються в роботі [12]. Відмітимо також певний прогрес в регіональних дослідженнях циркуляційного режиму. Так, в роботі [21] розглянуто можливі зміни режиму циркуляції атмосфери над Північною Атлантикою та Європою під впливом зростання вмісту парникових газів з потенційним послабленням Атлантичної меридіональної циркуляції.

За середніми мультимодельними оцінками, представленими в [24], річні суми опадів в Європі до кінця XXI ст. помітно зростуть. Залежно від рівня радіаційного форсингу, зумовленого антропогенними викидами парникових газів, тут очікується їх збільшення від 1,6 % (SSP1-2.6) до 5,4 % (SSP5-8.5).

Важливі зміни кліматичного режиму, пов'язані з виникненням, проходженням та заповненням позатропічних циклонів в Північній Атлантиці протягом 1950-2021 рр., проаналізовано в роботі [16]. Зокрема, автори вказали на тенденцію до зменшення інтенсивності опадів при них.

В роботі [17] показано, що в Західній Україні на межі XX-XXI ст. відбулося помітне збільшення числа днів з антициклональними типами циркуляції атмосфери.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Попри значну кількість наукових публікацій, присвячених режиму атмосферних опадів в Україні і світі, робіт з докладним аналізом особливостей їх річного ходу небагато. Недостатньо дослідженою в нашій країні є проблема зміни режиму атмосферних опадів в контексті сучасних змін клімату.

Основною метою даного дослідження є представлення розгорнутої характеристики річного ходу атмосферних опадів на території України з використанням методу гармонічного аналізу і традиційних підходів кліматологічного аналізу, а також встановлення найважливіших їх змін в проміжку часу від 1961-1990 до 1991-2020 років.

Для досягнення цієї мети було поставлено такі **завдання**:

- 1) оцінити масштаби відмінностей в режимі атмосферних опадів на території України протягом 30-річних періодів 1961-1990 та 1991-2020 років;
- 2) описати структурні особливості сезонного режиму атмосферних опадів в Україні в останні два 30-річні періоди, та встановити риси подібності та відмінності між ними;
- 3) порівняти особливості річного ходу опадів в ці періоди та оцінити масштаби зрушень в часі настання їх максимумів і мінімумів, у т. ч. шляхом аналізу фазової структури річ-

ної гармоніки.

2. Матеріали та методи дослідження

Представлені нижче матеріали є результатом аналізу характеристик річного ходу атмосферних опадів на 153 метеорологічних станціях України за останні шістьдесят років, які рідко використовують в науковій літературі. Емпіричною основою для їх обчислення послужили дані Кліматичних кадастрів України за періоди 1961-1990 і 1991-2020 рр. Точки спостереження відбиралися серед метеорологічних станцій з повними кліматологічними рядами місячної і річної кількості опадів в обох періодах спостереження. Вони достатньо рівномірно покривають материкову частину території України і належним чином репрезентують усі її природно-кліматичні зони.

3. Результати та обговорення

Спочатку декілька слів щодо стійкості річної кількості атмосферних опадів. Коефіцієнт кореляції між рядами її значень для різних метеорологічних станцій в 1961-1990 і 1991-2020 рр. становив 0,979, що мало б говорити про тісний зв'язок між відповідними рядами величини та синхронний характер зміни рівня зволоженості опадами усєї території України. В середньому по усій вибірці станцій відбулося несуттєве зменшення річної кількості опадів (-2,2 мм), однак у даному випадку значно інформативнішим є велике значення середнього квадратичного відхилення (36,2 мм). Особливо вражає діапазон зміни річної кількості опадів, причому навіть на близько розташованих станціях. Так, річна кількість опадів від першого до другого періоду спостереження зменшилася на 199 мм на станції Плай (Закарпатська обл.) та збільшилася на 126 мм на станції Пожежевська (Івано-Франківська обл.). Загальне враження про неймовірність поєднання настільки різних змін статистичних характеристик досліджуваної метеорологічної величини в останньому випадку нівелюється добре відомим фактом підвищеної мінливості опадів в межах будь-якої гірської країни, Українських Карпат зокрема.

Найбільші абсолютні зміни річної кількості опадів за межами гірських територій також відбулися у найбільш зволоженій частині країни – в Західній Україні: -101 мм у Бережанах Тернопільської області та +76 мм у Рава-Руській Львівської області. Як бачимо, діапазон зміни річної кількості опадів в межах Східно-Європейської рівнини не набагато поступається змінам цієї величини в сусідній гірській країні. При цьому достатньо помітні зміни характеру найближчого оточення відбулися тільки на станції Пожежевська, де середній ступінь закритості горизонту у цей час зріс із 4,4° до 8,6°. Тому залишається припустити, що спостережувані

порушення режиму зволоження є виявами високої природної мінливості атмосферних опадів на території України, або ж вони відбулися під впливом зміни якихось інших чинників.

Розглянемо тепер результати застосування гармонічного аналізу до рядів кількості атмосферних опадів на метеорологічних станціях України в різні періоди спостереження та порівняємо їх з результатами традиційного аналізу часових рядів.

Насамперед було встановлено, що амплітуда річної гармоніки кількості атмосферних опадів (величина C_1) на території України зазвичай не перевищує 15 мм (табл. 1). Такою вона була на 82 метеорологічних станціях в 1961-1990 рр. та на 88 метеостанціях в 1991-2020 рр., що становить 53,6 % і 57,5 % від загальної кількості проаналізованих станцій (153). Як виявилось, у

градаціях 0-5, 5-10 і 10-15 мм відбулися і наймасштабніші структурні зміни повторюваності величини C_1 . Кількість метеорологічних станцій з найменшою амплітудою річної гармоніки опадів (до 5 мм) зменшилася на 5, а кількість метеорологічних станцій з амплітудами від 5 до 10 мм та від 10 до 15 мм збільшилася на 6 і 5, відповідно. Разом з тим, відносна повторюваність (частота) таких градацій змінилася несуттєво – тільки на 3-4 %. У повній відповідності до наших очікувань, в старших градаціях величини C_1 ці зміни були ще меншими, причому переважала тенденція до зменшення їх повторюваності. Іншими словами, амплітуда річної гармоніки кількості атмосферних опадів в Україні виявилася дуже консервативною характеристикою. На це вказує також великий коефіцієнт кореляції (0,960) між значеннями даної величини в різні

Таблиця 1 / Table 1

Повторюваність різних градацій амплітуди річної гармоніки кількості атмосферних опадів на метеорологічних станціях України. 1961-2020 рр. /

Repeatability of gradations of the amplitude of annual harmonic of atmospheric precipitation at weather stations in Ukraine, 1961-2020

Градації C_1 , мм / Gradations of C_1 , mm	1961-1990 рр. / 1961-1990		1991-2020 рр. / 1991-2020		Різницевий ряд / Residual series	
	число випадків / cases	відсотків / %	число випадків / cases	відсотків / %	число випадків / cases	відсотків / %
0-5	23	15,03	18	11,76	-5	-3,27
5-10	27	17,65	33	21,57	6	3,922
10-15	32	20,92	37	24,18	5	3,268
15-20	21	13,73	23	15,03	2	1,307
20-25	24	15,69	20	13,07	-4	-2,61
25-30	14	9,15	12	7,84	-2	-1,31
30-35	3	1,96	4	2,61	1	0,654
35-40	3	1,96	3	1,96	0	0
40-45	3	1,96	0	0,00	-3	-1,96
45-50	1	0,65	1	0,65	0	0
50-55	1	0,65	1	0,65	0	0
55-60	1	0,65	0	0,00	-1	-0,65
60-65	0	0,00	1	0,65	1	0,654
Разом / Total	153	100,0	153	100,0		

періоди спостереження.

Відомо, що амплітуда будь-якої окремої гармоніки охоплює тільки частину розмаху коливання випадкової величини, що нею апроксимується. Для вихідних рядів кількості атмосферних опадів річна амплітуда A (у традиційному розумінні цієї величини, як різниці кількості опадів у найвологіший і найсухіший місяці року) була приблизно утричі більша за середню амплітуду річної гармоніки C_1 , а середнє квадратичне відхилення – приблизно удвічі більше (табл. 2). Відмітимо, що середні значення величини C_1 для

різних періодів спостереження відрізнялися значно менше, ніж відповідні їм значення A , а зміни амплітуди річної гармоніки від одного періоду до другого (-0,52) виявилися навіть на цілий порядок меншими за середні зміни річної амплітуди (-5,65), що є дуже зручним для просторових узагальнень кліматичних змін, оскільки дозволяє усунути з розгляду значну частину випадкових подій. Потрібно зважати й на те, що при апроксимації річного ходу річною гармонікою помітно збільшується коефіцієнт варіації ряду.

Річна гармоніка робить найбільший внесок

у формування загальної дисперсії кількості атмосферних опадів. У 1961-1990 рр. середній внесок f_1 цієї гармоніки становив 52,3 %, а в 1991-2020 рр. він перевищив навіть 68,6 %. При цьому процеси зміни кількості атмосферних опадів на більшості метеорологічних станцій розвивалися досить узгоджено між собою: коефіцієнт кореляції між значеннями f_1 по вибірці

станцій у різні періоди спостереження становив 0,881.

Також суттєвим є перерозподіл, що відбувся в останній 30-річчі на користь старших градацій f_1 (рис. 1).

У всіх випадках, коли річна компонента сезонних коливань кількості атмосферних опадів виконує допоміжну роль, провідною стає півріч-

Таблиця 2 / Table 2

Зіставлення статистичних характеристик рядів амплітуди річної гармоніки C_1 та річної амплітуди A кількості атмосферних опадів на метеорологічних станціях України, 1961-2020 рр. / Statistics of the series of annual harmonic amplitude C_1 and annual amplitude A of atmospheric precipitation at weather stations in Ukraine. 1961-2020

Статистичні характеристики / Statistics	Ряди C_1 , мм / Series of C_1 , mm			Ряди A , мм / Series of A , mm		
	1961-1990	1991-2020	різницевий ряд / residual series	1961-1990	1991-2020	різницевий ряд / residual series
Максимум / Maxima	56,45	60,71	4,86	117	140	23
Мінімум / Minima	0,60	1,73	-10,71	15	13	-33
Середнє значення / Mean	16,02	15,50	-0,52	50,26	44,61	-5,65
СКВ / Standard deviation	10,78	9,74	3,08	19,57	20,23	8,55
Коефіцієнт варіації / Coefficient of variation	0,673	0,628	-5,933	0,389	0,454	-1,512

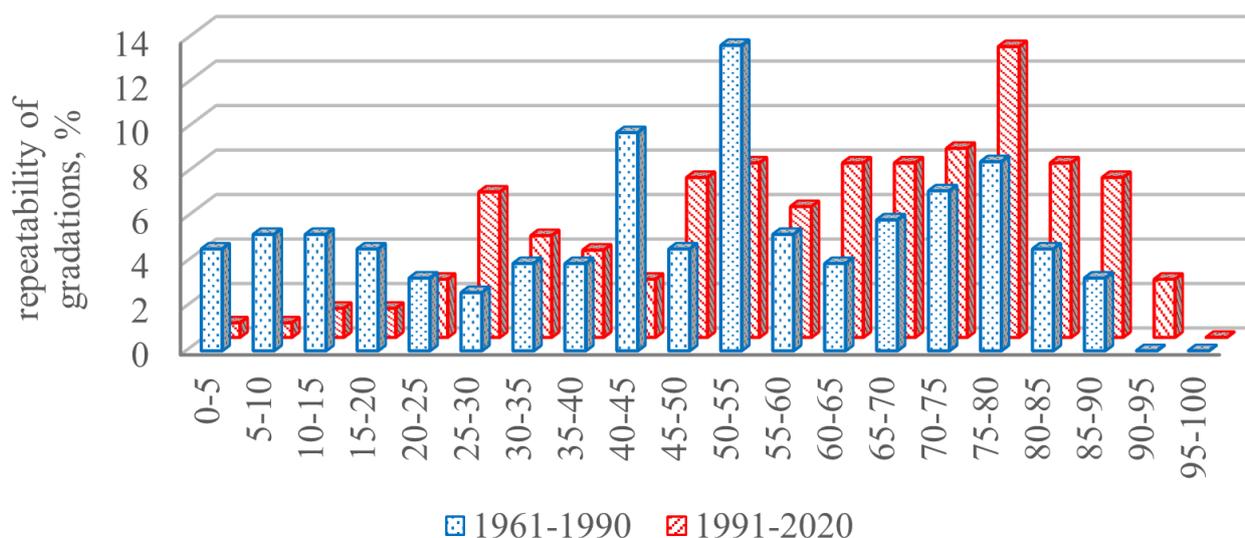


Рис. 1. Розподіл повторюваності градацій річної гармоніки за її внеском в сумарну дисперсію кількості атмосферних опадів в Україні, %. 1961-1990 та 1991-2020 рр. /

Fig. 1. Statistical distribution of the repeatability of annual harmonic gradations according to its contribution to the total variance of rainfall annual cycle in Ukraine, %. 1961-1990 and 1991-2020

на гармоніка (рис. 2). Коефіцієнт кореляції між їх внесками у загальну дисперсію річного ходу кількості атмосферних опадів по усій вибірці станцій становить -0,936 у 1961-1990 рр. і -0,813 у 1991-2020 рр. Цікаво, що коефіцієнт лінійного тренду між параметрами f_1 та f_2 в другий період (-0,47) значно відрізняється від його значення в перший період (-0,771).

Зауважимо також, що в другий період спостереження піврічна гармоніка відіграє набагато більшу роль в менших градаціях величини f_2 (рис. 3).

З табл. 3 випливає, що практично на всій території України максимум річної гармоніки кількості опадів настає із середини червня ($t_1 = 6,0$ міс.) до середини серпня ($t_1 = 8,0$ міс.). Це відповідає усталеній думці [6] про те, що найбільша кількість опадів у нашій країні повсюдно випадає у червні-липні. Нечисленні відхилення від цього правила, які трапляються переважно у вузькій прибережній смузі на півдні України, мали б тільки підтверджувати його істинність (рис. 4).

Звернемо увагу на те, яку важливу роль віді-

грає піврічна гармоніка. Її амплітуда коливається від 4,0 до 27,5 мм у 1961-1990 рр. та від 1,6 до 16,4 мм у 1991-2020 рр., а фаза практично завжди лежить в діапазоні $t_2 = 0,0 \div 1,0$ міс. (99,3 % розглянутих метеостанцій у 1961-1990 рр. та 78,4 % усіх станцій у 1991-2020 рр.), значно рідше $t_2 = 5,0 \div 6,0$ міс. (решта випадків). Завдяки цьому розширюється діапазон фак-

тичного часу настання максимуму кількості опадів (див. рис. 4).

Ще ширшим діапазоном характеризується час настання найсухішого місяця року. Згідно з матеріалами, представленими в роботі [3], левова частка таких випадків припадає на холодний період року, хоча доволі частими є й винятки з цього правила. Зокрема, в 1961-1990 рр. на 59 із

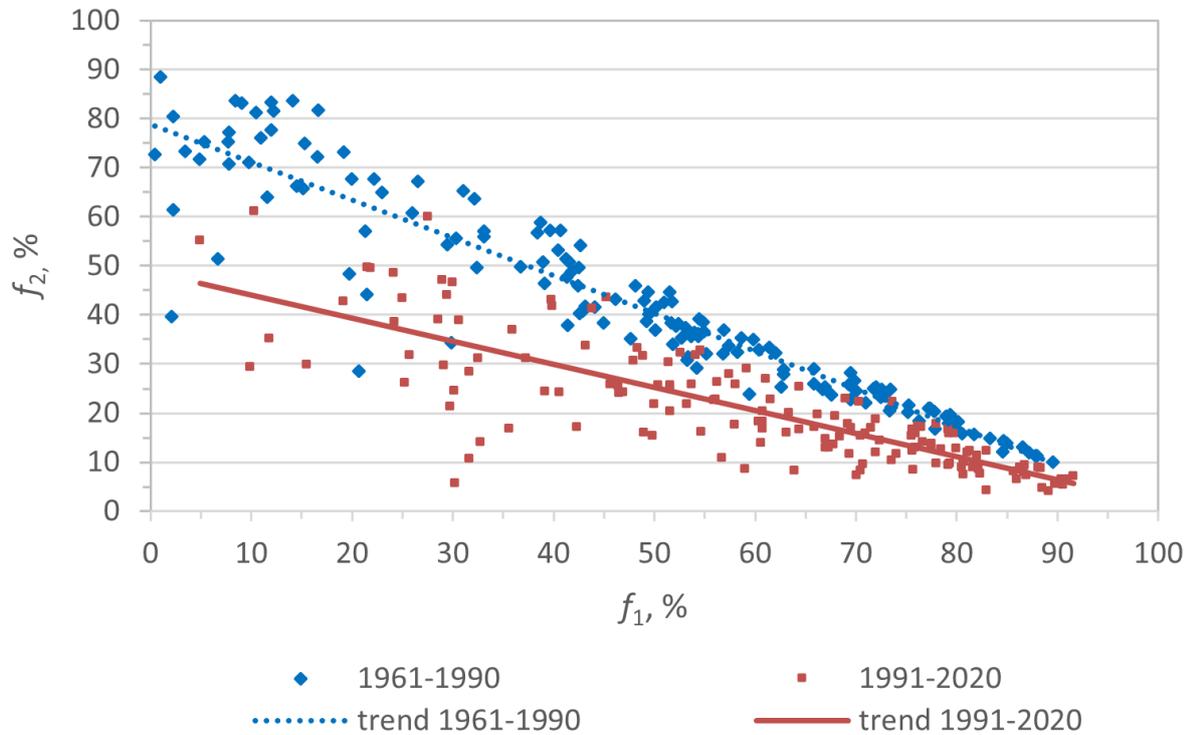


Рис. 2. Внесок річної (f_1) і піврічної (f_2) гармонік в загальну дисперсію річного ходу кількості атмосферних опадів, %. 1961-1990 і 1991-2020 рр. /

Fig. 2. Contribution of annual (f_1) and semi-annual (f_2) harmonics to the total variance of rainfall annual cycle in Ukraine, %. 1961-1990 and 1991-2020

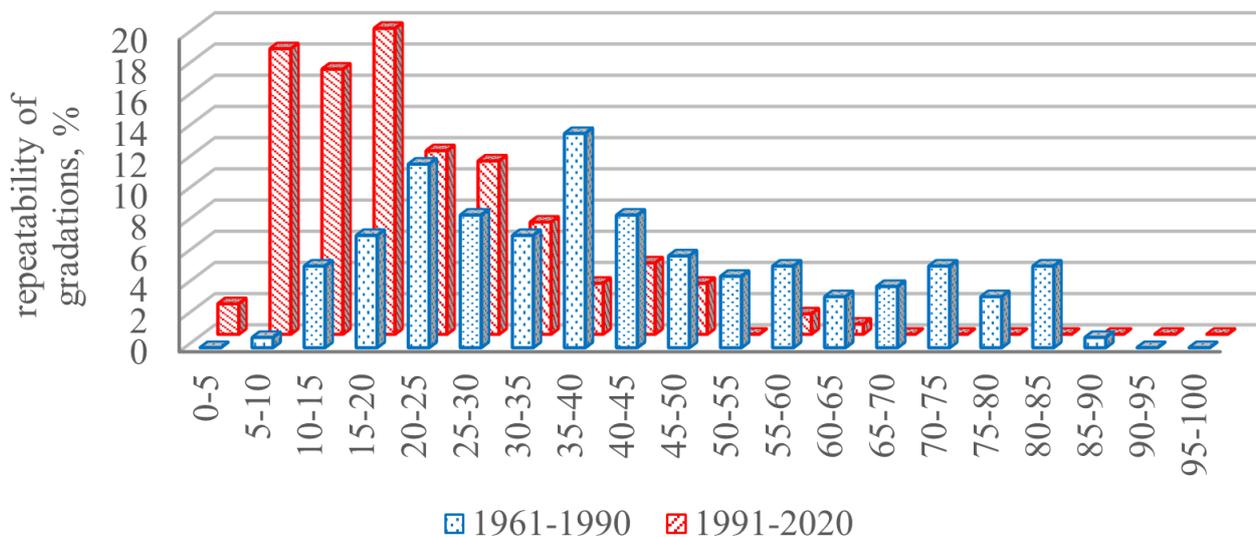


Рис. 3. Розподіл повторюваності градацій піврічної гармоніки за її внеском в сумарну дисперсію кількості атмосферних опадів в Україні, %. 1991-1990 та 1991-2020 рр. /

Fig. 3. Statistical distribution of the repeatability of semi-annual harmonic gradations according to its contribution to the total variance of rainfall annual cycle in Ukraine, %. 1961-1990 and 1991-2020

153 розглядуваних метеостанцій України (38,6 % загальної їх кількості) найсухішим місяцем року був жовтень, який традиційно відноситься до теплого періоду. В наступні 30 років відбулися дуже значні зрушення в часі настання цієї події. З усіх місяців теплого періоду року найсухішим

став квітень (21 станція, або 13,7 % їх кількості), а жовтень залишився таким тільки для двох метеостанцій (1,3 %). Структурні зміни, які відбулися в розподілі часу настання найсухішого місяця року навіть всередині холодного періоду року також були дуже великими.

Таблиця 3 / Table 3

Повторюваність різних градацій часу настання максимуму річної гармоніки кількості атмосферних опадів на метеорологічних станціях України, міс. 1961-2020 рр. /
Repeatability of gradations of the timing of annual harmonic rainfall maxima
at weather stations in Ukraine, months, 1961-2020

Градації t_1 , міс. / Gradations of t_1 , months	1961-1990 рр. / 1961-1990		1991-2020 рр. / 1991-2020		Різницевий ряд / Residual series	
	число випадків / cases	відсотків / %	число випадків / cases	відсотків / %	число випадків / cases	відсотків / %
0-1	0	0,00	0	0,00	0	0,00
1-2	2	1,31	2	1,31	0	0,00
2-3	0	0,00	1	0,65	1	0,65
3-4	0	0,00	0	0,00	0	0,00
4-5	0	0,00	0	0,00	0	0,00
5-6	0	0,00	0	0,00	0	0,00
6-7	103	67,32	99	64,71	-4	-2,61
7-8	35	22,88	35	22,88	0	0,00
8-9	2	1,31	5	3,27	3	1,96
9-10	2	1,31	2	1,31	0	0,00
10-11	2	1,31	1	0,65	-1	-0,65
11-12	7	4,58	8	5,23	1	0,65
Разом / Total	153	100,0	153	100,0		

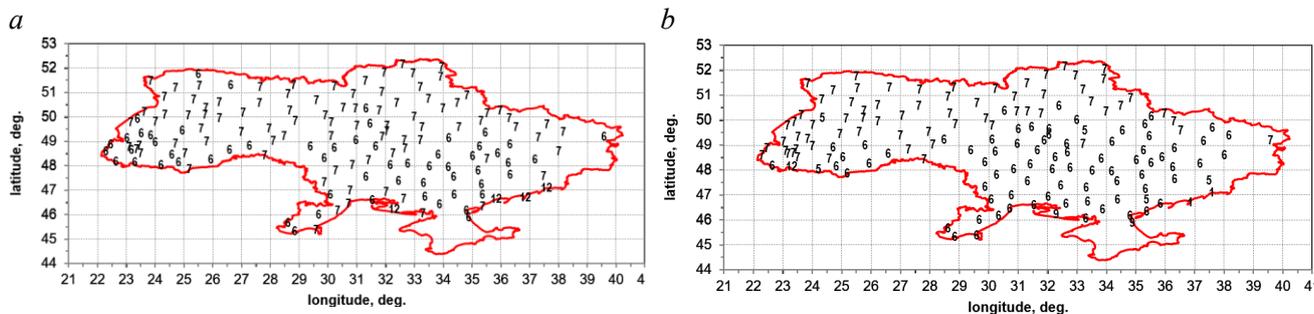


Рис. 4. Найвологіший місяць року (номер) в Україні: а) 1961-1990 рр.; б) 1991-2020 рр. /
Fig. 4. Wettest month of the year (number) in Ukraine: a. 1961-1990; b. 1991-2020

З позицій гармонічного аналізу, якщо обмежитися апроксимацією річного ходу кількості опадів тільки річною гармонікою, то найсухіший місяць року за визначенням має наставати в протифазі до найвологішого місяця, тобто переважно із середини грудня до середини лютого (див. табл. 3). Однак, зважаючи на наявність інших періодичних коливань, насамперед піврічних, це може відбуватися і в інший час. Останнім часом досягнуто кращого розуміння причин і природи піврічних коливань циркуляції атмосфери [10, 15, 22], які потенційно можуть спричинити від-

повідні приховані періодичності в коливаннях річного ходу кількості опадів.

Імовірною причиною показаних вище змін режиму зволоження на території України могли бути великомасштабні коливання циркуляції атмосфери в Атлантико-Європейському секторі, які можуть зберігати періодичність (когерентність) протягом тривалого періоду.

4. Висновки

Таким чином, у даному дослідженні представлено докладну характеристику річного ходу атмосферних опадів на території України. Завдя-

ки застосуванню методів кліматологічного та гармонічного аналізу поставлені завдання вирішено в повному обсязі. Отримано низку нетривіальних результатів, що дозволяє сформулювати такі висновки.

1. Режим атмосферних опадів в Україні в період сучасного глобального потепління (1991-2020 рр.) значно змінився порівняно з 30-річним періодом 1961-1990 рр., який йому передував. На це вказують великі абсолютні та відносні зміни річних та місячних сум опадів в розрізі окремих метеорологічних станцій. Вперше виявлено, що особливістю сучасного режиму зволоження в Україні є значні, нерідко протилежні за знаком, коливання річних сум атмосферних опадів навіть на сусідніх метеостанціях.

2. В роботі вперше ґрунтовно розглянуто значні структурні перетворення сезонного режиму атмосферних опадів в Україні, які відбулися в сучасний період глобального потепління (1991-2020 рр.). Зокрема, це проявилось в послабленні тісноти і частковій зміні характеру оберненого зв'язку між річною та піврічною гармоніками.

3. Як звичайний кліматологічний аналіз, так і гармонічний аналіз вказують, що максимальна кількість опадів в Україні зазвичай досягається влітку, а мінімальна – в холодний період року.

Однак, якщо максимум кількості опадів в розрізі окремих метеостанцій припадає переважно тільки на два місяці року (червень і липень) і описується чітким одномодальним розподілом, то мінімум річного ходу, навпаки, дуже розмитий і на більшості метеостанцій буває в різних, не завжди суміжних місяцях холодного періоду року. Крім того, якщо в часовій структурі найсухіших місяців року першого періоду спостереження було дві добре виражені моди (жовтень і січень-березень), то в другому періоді спостереження жовтнева мода взагалі зникла.

Гармонічний аналіз вперше дозволив встановити, що максимум річної гармоніки кількості опадів зміщений відносно фактичного максимуму річного ходу опадів на пів місяця і настає із середини червня до середини серпня. Гармонічний аналіз також показав, що від одного періоду спостереження до іншого відбулися значні зміни у фазовій структурі річної гармоніки, а також в інтенсивності та ролі річної і піврічної гармонік, що також відмічається вперше. Найімовірнішою причиною зазначених зрушень слід назвати зміни в характері циркуляції атмосфери над усім Атлантико-Європейським сектором Північної півкулі, хоча вплив місцевих чинників кліматоутворення виключати повністю також не можна.

Список використаних джерел

1. Водчиць, О.Г., Затула, В.І. (2017). *Основи метеорології і кліматології*. Київ : НАУ, 360.
2. Затула, В.І. (2017). Виявлення прихованих періодичностей сезонних коливань метеорологічних величин на території Волинського Полісся. *Фізична географія та геоморфологія*, 1(85), 101–105.
3. Затула, В. (2024). Комплексна оцінка посушливості клімату України. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія»*, (61), 180–192. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2024-61-15>.
4. Затула, В.І., Затула, Н.І. (2014). Гармонічний аналіз сезонних коливань деяких метеорологічних величин на території України. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*, 2(33), 98–103.
5. Затула, В.І., Затула, Н.І. (2017). Виявлення прихованих періодичностей сезонних коливань метеорологічних величин на території Житомирського Полісся, 1(44), 114–120.
6. Ліпінський, В.М., Дячук, В.А., Бабіченко, В.М. ред. (2003). *Клімат України*. Київ : Вид-во Раєвського, 343.
7. Холявчук, Д.І. (2019). *Регіональна кліматологія*. Чернівці : Чернівець. нац. ун-т ім. Юрія Федьковича, 168.
8. Blüthgen, J. (1966). *Allgemeine Klimageographie*. Berlin, Boston: De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783111440293>.
9. Boucher, K.R. (1987). *Europe, climate of*. In: *The Encyclopedia of Climatology*. Ed. by John E. Oliver. New York, 355–367.
10. Chen, T.-C., Wu, K.-D. (1992). *Semi-annual oscillation of the global divergent circulation*. *Tellus*, 44A, 357–365.
11. Cui, D., Liang, S., Wang, D. (2021). *Observed and projected changes in global climate zones based on Köppen climate classification*. *WIREs Climate Change*, 12(3), e701. <https://doi.org/10.1002/wcc.701>.
12. Fabiano, F., Meccia, V.L., Davini, P., Ghinassi, P. Corti, S. (2021). *A regime view of future atmospheric circulation changes in northern mid-latitudes*. *Weather and Climate Dynamics*, 2(1), 163–180. <https://doi.org/10.5194/wcd-2-163-2021>.
13. Gardner, A.S., Maclean, I.M.D., Gaston, K.J. (2020). *A new system to classify global climate zones based on plant physiology and using high temporal resolution climate data*. *Journal of Biogeography*, 47, 2091–2101. <https://doi.org/10.1111/jbi.13927>.
14. Gründemann, G.J., Zorretto, E., van de Giesen, N., van der Ent, R.J. (2023). *Historical shifts in seasonality and timing of extreme precipitation*. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL105200. <https://doi.org/10.1029/2023GL105200>.
15. Jaison, A.M., Gray, L.J., Osprey, S., Smith, A.K., Garcia, R.R. (2024). *A momentum budget study of the semi-annual oscillation in the Whole Atmosphere Community Climate Model*. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(763), 3544–3565. <https://doi.org/10.1002/qj.4782>.

16. Karwat, A., Franzke, C.L.E., Blender, R. (2022). Long-term trends of Northern Hemispheric winter cyclones in the extended ERA5 reanalysis. *Journal of geophysical research: Atmospheres*, 127(22), e2022JD036952. <https://doi.org/10.1029/2022JD036952>.
17. Kholiavchuk, D. (2022). Changes in the atmospheric circulation types over western Ukraine in the 20th-21st centuries. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Geography*, 3/4 (84/85), 39–45. <https://doi.org/10.17721/1728-2721.2022.85.2>.
18. Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259–263. <https://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.
19. Mimić, G., Podračanin, Z., Basarin, B. (2024). Change detection of the Köppen climate zones in Southeastern Europe. *Atmospheric Science Letters*, 25(11), e1270. <https://doi.org/10.1002/asl.1270>.
20. Navarro, A., Merino, A., García-Ortega, E., and Tapiador, F.J. (2025). Uncertainty maps for model-based global climate classification systems. *Scientific Data*, 12, 35. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04387-0>.
21. Rousi, E., Selten, F., Rahmstorf, S., Coumou, D. (2021). Changes in North Atlantic Atmospheric Circulation in a Warmer Climate Favor Winter Flooding and Summer Drought over Europe. *Journal of Climate*, 34, 2277–2295. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0311.1>.
22. Shangguan, M., Wang, W. (2022). The semi-annual oscillation (SAO) in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(14), 9499–9511. <https://doi.org/10.5194/acp-22-9499-2022>.
23. Shimabukuro, R., Tomita, T., Fukui, K.-ichi. (2023). Update of global maps of Alisov's climate classification. *Progress in Earth and Planetary Science*, 10:19. <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00547-1>.
24. Song, Y.H., Chung, E.-S., Ayugi, B.O. (2025). CMIP6 GCMs projected future Köppen-Geiger climate zones on a global scale. *Earth's Future*, 13, e2023EF004401. <https://doi.org/10.1029/2023EF004401>.
25. Wilks, D.S. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 2nd edn. Amsterdam, 630.
26. Zatula, V.I. (2018). Decomposition and modelling of the annual cycle of meteorological variables in the Ukrainian Carpathians. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, 49, 95–106. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-08>.

Present tendencies of annual cycle rainfall change in Ukraine

Vasyl Zatula

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

ABSTRACT

Introduction. The precipitation regime, its amount and distribution throughout the year are an important component of the climate characteristics. This information is of exceptional importance in the planning and management of water resources.

The purpose of article is to present an expanded description of the annual cycle of atmospheric precipitation in Ukraine and to identify the most important features of its change over the period 1961-2020.

Data and methods. This paper examines the features of the annual cycle of atmospheric precipitation in the continental part of Ukraine. The research is based on data from climatological reference books at 153 weather stations across the country. Much attention is paid to the parameters of the harmonic analysis of the initial observation series in 1961-1990 and 1991-2020 and the residual series formed on their basis with changes in precipitation, primarily the amplitude C_1 and the phase t_1 of the annual harmonic, as well as its contribution f_1 to the total variance of monthly precipitation series.

Results. Changes in the repeatability of gradations of the amplitude of the annual harmonic of atmospheric precipitation are analyzed. A comparison of the statistics of the series of the annual harmonic amplitude C_1 and annual amplitude A of atmospheric precipitation at weather stations of Ukraine during 1961-1990 and 1991-2020 is carried out. Changes in the statistical distributions of the repeatability of gradations of annual and semi-annual harmonics by their contribution to the total variance of rainfall annual cycle in Ukraine in different observation periods were considered. The repeatability of gradations of the timing of annual harmonic of atmospheric precipitation maxima in these periods is analyzed. Significant spatial heterogeneities in the distribution of annual and monthly precipitation amounts were found. Harmonic analysis also allowed us to identify important patterns within the annual cycle. The main role in seasonal fluctuations in monthly precipitation amounts is played by the annual, and less often - semi-annual harmonics. During the transition from the first observation period (1961-1990) to the second (1991-2020), the inverse relationship between the parts of the variance caused by these harmonics noticeably weakened (the coefficient of determination R^2 between the parameters f_1 and f_2 of the annual and semi-annual harmonics decreased from 0.876 to 0.661). At the same time, the slope of the linear relationships between these parameters significantly decreased (the coefficient of the linear regression equation changed from -0.771 to -0.47).

The scientific novelty. It has been established that the amplitude and phase structure of the annual harmonic, as well as the relative role of the annual and semi-annual harmonics of monthly precipitation in the current climate, have undergone significant changes. This is probably due to changes in the nature of atmospheric circulation over the entire Atlantic-European sector, although the influence of local climate-forming factors cannot be completely excluded either.

Practical significance. The identified changes in the phase structure and other characteristics of the annual harmonics of monthly precipitation series contribute to a better understanding of current trends in the evolution of the regional climate system in Ukraine and will be useful for long-term climate change forecasting.

Keywords: annual cycle, harmonics, amplitude, phase, regression analysis, repeatability, total precipitations, climate change, Ukraine.

References

- Vodchyts, O.G., Zatula, V.I. (2017). *Fundamentals of meteorology and climatology*. Kyiv, Ukraine, 360. [in Ukrainian]
- Zatula, V.I. (2017). Identifying of the hidden periodicities of seasonal oscillations of meteorological variables on the territory of Volyn Polissya. *Physical geography and geomorphology*, 1(85), 101–105. [in Ukrainian]
- Zatula, V. (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]
- Zatula, V.I., Zatula, N.I. (2014). Harmonic analysis of seasonal oscillations of some meteorological variables on Ukrainian territory. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, 2(33), 98–103. [in Ukrainian]
- Zatula, V.I., Zatula, N.I. (2017). Identifying of the hidden periodicities of seasonal oscillations of meteorological variables on the territory of Zhytomyr Polissya. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology*, 1(44), 114–120. [in Ukrainian]
- Lipinsky V.M., Dyachuk V.A., Babichenko V.M. eds. (2003). *Climate of Ukraine*. Kyiv, Ukraine, 343.
- Kholiavchuk, D.I. (2019). *Regional climatology*. Chernivtsi, Ukraine, 168. [in Ukrainian]
- Blüthgen, J. (1966). *General Climatic Geography*. Berlin, Boston: De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783111440293>. [in German]
- Boucher, K.R. (1987). Europe, climate of. In: *The Encyclopedia of Climatology*. Ed. by John E. Oliver. New York, 355–367.
- Chen, T.-C., Wu, K.-D. (1992). Semi-annual oscillation of the global divergent circulation. *Tellus*, 44A, 357–365.
- Cui, D., Liang, S., Wang, D. (2021). Observed and projected changes in global climate zones based on Köppen climate classification. *WIREs Climate change*, 12(3), e701. <https://doi.org/10.1002/wcc.701>.
- Fabiano, F., Meccia, V.L., Davini, P., Ghinassi, P., Corti, S. (2021). A regime view of future atmospheric circulation changes in northern mid-latitudes. *Weather and Climate Dynamics*, 2(1), 163–180. <https://doi.org/10.5194/wcd-2-163-2021>.
- Gardner, A.S., Maclean, I.M.D., Gaston, K.J. (2020). A new system to classify global climate zones based on plant physiology and using high temporal resolution climate data. *Journal of Biogeography*, 47, 2091–2101. <https://doi.org/10.1111/jbi.13927>.
- Gründemann, G.J., Zorretto, E., van de Giesen, N., van der Ent, R.J. (2023). Historical shifts in seasonality and timing of extreme precipitation. *Geophysical Research Letters*, 50, e2023GL105200. <https://doi.org/10.1029/2023GL105200>.
- Jaison, A.M., Gray, L.J., Osprey, S., Smith, A.K., Garcia, R.R. (2024). A momentum budget study of the semi-annual oscillation in the Whole Atmosphere Community Climate Model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 150(763), 3544–3565. <https://doi.org/10.1002/qj.4782>.
- Karwat, A., Franzke, C.L.E., Blender, R. (2022). Long-term trends of Northern Hemispheric winter cyclones in the extended ERA5 reanalysis. *Journal of geophysical research: Atmospheres*, 127(22), e2022JD036952. <https://doi.org/10.1029/2022JD036952>.
- Kholiavchuk, D. (2022). Changes in the atmospheric circulation types over western Ukraine in the 20th-21st centuries. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv, Geography*, 3/4 (84/85), 39–45. <https://doi.org/10.17721/1728-2721.2022.85.2>.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, 259–263. <https://dx.doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>.
- Mimić, G., Podračanin, Z., Basarin, B. (2024). Change detection of the Köppen climate zones in Southeastern Europe. *Atmospheric Science Letters*, 25(11), e1270. <https://doi.org/10.1002/asl.1270>.
- Navarro, A., Merino, A., García-Ortega, E., and Tapiador, F.J. (2025). Uncertainty maps for model-based global climate classification systems. *Scientific Data*, 12, 35. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-04387-0>.
- Rousi, E., Selten, F., Rahmstorf, S., Coumou, D. (2021). Changes in North Atlantic Atmospheric Circulation in a Warmer Climate Favor Winter Flooding and Summer Drought over Europe. *Journal of Climate*, 34, 2277–2295. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0311.1>.
- Shangguan, M., Wang, W. (2022). The semi-annual oscillation (SAO) in the upper troposphere and lower stratosphere (UTLS). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(14), 9499–9511. <https://doi.org/10.5194/acp-22-9499-2022>.
- Shimabukuro, R., Tomita, T., Fukui, K.-ichi. (2023). Update of global maps of Alisov's climate classification. *Progress in Earth and Planetary Science*, 10:19. <https://doi.org/10.1186/s40645-023-00547-1>.
- Song, Y.H., Chung, E.-S., Ayugi, B.O. (2025). CMIP6 GCMs projected future Köppen-Geiger climate zones on a global scale. *Earth's Future*, 13, e2023EF004401. <https://doi.org/10.1029/2023EF004401>.
- Wilks, D.S. (2006). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 2nd edn. Amsterdam, 630.
- Zatula, V.I. (2018). Decomposition and modelling of the annual cycle of meteorological variables in the Ukrainian Carpathians. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University, series "Geology. Geography. Ecology"*, 49, 95–106. <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2018-49-08>.