

Тимофєєв В.Є.*Український гідрометеорологічний інститут проспект ДСНС України та НАН України,
м. Київ*

СУЧАСНИЙ СТАН ЦИРКУЛЯЦІЇ АТМОСФЕРИ АТЛАНТИКО-ЄВРОПЕЙСЬКОГО СЕКТОРУ ТА ЇЇ ВПЛИВ НА ПОГОДНІ УМОВИ УКРАЇНИ

У роботі вивчається сучасний стан атмосферної циркуляції — головного внутрішнього кліматотворчого фактора, що визначає кліматичні та погодні умови України, зокрема небезпечні явища. Надано огляд сучасного стану регіонального клімату, з оцінкою стану атмосферної циркуляції в Атлантико-Європейському секторі, існуючих телеконекцій та прогностичного потенціалу. Загальна тенденція до потепління нижніх шарів тропосфери в Україні та східній Європі зберігається протягом останніх десятиліть і супроводжується дефіцитом опадів та посиленням посушливості.

Підтверджено, що значні кліматичні зсуви поєднуються зі змінами в атмосферній циркуляції, в тому числі з переходом до сучасного потепління в Україні та східній Європі. Головною рисою є розширення впливу центрів дії атмосфери з посиленням антициклогенезу, що відбиває особливий стан атмосферної циркуляції з підвищеною стійкістю синоптичних процесів. Знайдено типові комбінації аномалій регіональних кліматичних індексів, які можуть використовуватися для діагнозу та прогнозу небезпечних явищ.

Протягом періоду сучасного потепління, найбільші зміни відзначені для геопотенціалу середнього рівня тропосфери АТ - 500 гПа, відбиваючи посилення антициклогенезу. Значуща кореляція приземної температури з АТ-500 гПа в усі місяці року також дозволяє використовувати дані середнього рівня тропосфери для довгострокового прогнозу погодних умов, враховуючи зв'язок інтенсифікації антициклонів з посиленням вертикальної комірки Хедлі в північній півкулі.

Ключові слова: циркуляція атмосфери, середній рівень, посушливі явища, кліматичні індекси, антициклони.

Актуальність теми дослідження. Загальновідоме сучасне потепління та низка супутніх явищ, як почастищення небезпечних метеорологічних явищ (НМЯ), зростання ступеню посушливості, гідрологічного циклу, зміни екосистем, відбуваються на фоні зміни регіональної атмосферної циркуляції, внутрішнього кліматотворчого чинника [1, 2, 5, 13, 18, 22, 26, 36, 37]. Атмосферна циркуляція є важливою рушійною силою як для формування клімату, так і для встановлення погодного режиму у конкретному регіоні. Їхні природні режими були вивчені в багатьох аспектах, зокрема щодо мінливості в різних часових масштабах [6, 7, 19, 25, 29, 34]. Вивчення режиму атмосфери, ідентифікація типів циркуляції, особливо тих, що зумовлюють НМЯ, набувають практичного значення з метою діагнозу та прогнозу [6, 14].

З кліматичних характеристик, традиційно, особливо багато уваги приділено температурі повітря. Найбільш яскравою особливістю зміни клімату минулого століття є підвищення приземної температури повітря (ПТП) планети. Середня річна глобальна температура приземного шару протягом останніх 100 років збільшилася на $0,75 \pm 0,2^{\circ}\text{C}$ [22]. Аналіз її часових змін виявив неоднорідний характер потепління: перший період відбувався у 1910-1946 рр., у 1947-1975 рр. - слабке похолодання, починаючи з середини 1970х, відзначається фаза найбільш інтенсивного потепління, яке продовжується і до теперішнього часу (рис. 1, А). Підвищення температури повітря охопило всю територію України, за даними ОГМС Київ, перевищення середньої річної ПТП кліматологічної норми сягає $2,0^{\circ}\text{C}$ (рис. 1, Б).

Порівняння багаторічних змін приземної температури повітря рівних 35 річних періодів 1951-1985 та 1986-2021 рр., за даними ОГМС Київ, показує позитивний тренд у всі місяці року з 1986р., при цьому більш значне потепління відзначилося протягом літнього сезону, зі зміною негативного тренду на позитивний (рис.1 В). Також відзначається значний тренд потепління у листопаді-грудні та березні.

Впродовж XX сторіччя встановлено факторну зумовленість відзначених фаз потепління явищем Ель-Ніньйо – Південне коливання (ЕНПК), що має найсильніший сигнал у системі океан–атмосфера [7, 28]. Сучасний період потепління розвивався на тлі збільшення частоти та інтенсивності теплої фази ЕНПК, особливо після кліматичного зсуву у 1980 рр. а в період похолодання 1947-1975 рр. у ЕНПК переважала тенденція до

збільшення інтенсивності холодної фази (Ла-Нінья). Аномалії останніх років пов'язані з супер-Ель-Ніньо 2016 р. [17, 23]. При цьому, домінуючі варіації ПТП та атмосферних опадів 3-7 років пов'язані з мінливістю фаз ЕНПК, хоча існують значні регіональні зміни [35].

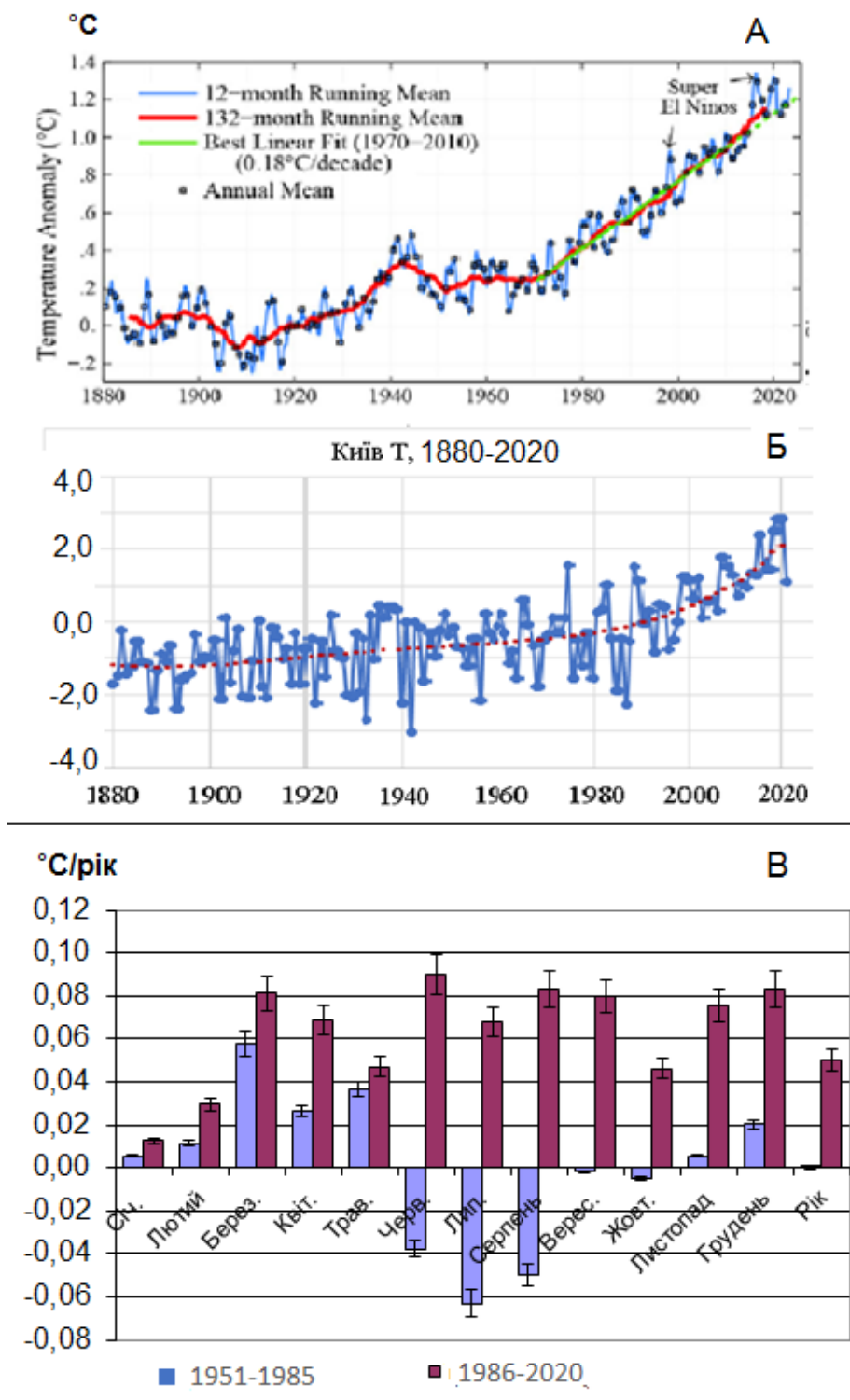


Рис. 1. Аномалія глобальної температури повітря (°C) від кліматологічної норми 1880-1950 рр. (А) за даними Інституту космічних досліджень Годдарда. Аномалія середньої річної температури повітря ОГМС Київ (від норми 1991-2020 рр. (Б)). Коефіцієнти лінійних трендів середньої температури повітря (°C/рік), ОГМС Київ (В), за місяцями року, 1951-1985 і 1986-2020 рр.

Одним з найважливіших наслідків глобального потепління є почастищення НМЯ, таких як посушливі явища, хвилі тепла та холоду, а також сильні зливи, паводки, що мають велике значення для життєдіяльності та завдають значної економічної шкоди [13, 15, 17, 23]. Згідно з звітами Міжурядової комісії зі зміни клімату (IPCC), у 1991-2010 рр., кількість природних аномалій щодо попередніх десятиліть збільшилась у 2,6 раза, що призвело до зростання економічної шкоди у розвинених країнах у 7,3 рази. У багатьох роботах показано, що різні фази ЕНПК відповідні за формування характерних НМЯ, причому вони відіграють важливу роль в розумінні очікуваних змін клімату, оскільки розрахунки кліматичних моделей прогнозують зміну частоти, тривалості та інтенсивності подій НМЯ [27, 37].

В Європейському регіоні, включаючи Україну, тенденції ПТП та дефіцит опадів сприяють посиленню ступеня посушливості [3, 5, 8-12, 15]. Кліматична вразливість більшості регіонів посилюється з заходу на схід [11]. Однак клімат України залишається в цілому сприятливим для розвитку різних галузей економіки, зокрема сільського господарства, оскільки інтервали змін метеовеличин залишаються в цілому у сприятливих рамках, що дозволяє збирати рекордні врожаї [9, 25].

Атмосферна циркуляція формує погодні умови, фон температури повітря, вологості, атмосферних опадів, через встановлення переважючих потоків у тропосфері. При цьому, відбувається зміна регіональної атмосферної циркуляції, що сприяє тенденції потепління та зростання ступеню посушливості, а саме, підвищення впливу субтропічних максимумів на більшій частині Європи. Для Атлантико-Європейського сектору (АЕС) це відображає посилення антициклогенезу і зміщення зони дії центрів дії атмосфери (ЦДА) на північний схід [18, 19, 31]. Спрощений опис кліматичної системи можливо здійснити через моделі просторової структури телеконекцій регіональної циркуляції атмосфери, що забезпечують статистичні зв'язки з метеорологічними величинами у конкретному регіоні [7, 29].

Актуальність теми наукової роботи зумовлена необхідністю вивчення сучасного стану та можливих майбутніх змін атмосферної циркуляції – головного внутрішнього кліматотворчого фактора, що визначає кліматичні та погодні умови України, включаючи НМЯ.

Аналіз виконаних досліджень за обраною темою. Згідно з висновками багатьох досліджень, сучасне потепління в полярних і позатропічних районах обох півкуль відбувається більш прискорено в Арктиці, центральному Сибіру, центральній і східній Європі, а також у західній Антарктиці. При цьому, найбільше підвищення ПТП відзначено над континентами Північної півкулі в зимове півріччя, причому у багатьох регіонах добовий діапазон температур зменшився головним чином через швидше підвищення мінімальної температури, ніж максимальної [1, 21].

Для України, сучасний клімат характеризується комплексом змін метеовеличин та явищ, крім підвищення ПТП, зростаючим дефіцитом кількості атмосферних опадів та загальним посиленням ступеню аридності, інтенсифікацією сонячної радіації та тривалості сонячного сяйва (ТСС), на фоні зміни геофізичних факторів [1-5, 8-10].

Зміна клімату супроводжується низкою подій, що показують почастищення епізодів НМЯ у вигляді значних аномалій температури. Хвилі тепла (ХТ) відіграють Особливу роль у формуванні посушливих явищ, в Європі спостерігається значне почастищення епізодів ХТ після смертоносної спеки літа 2003 року, якщо спричинила понад 70000 жертв.

Найтриваліший посушливий період із значним ступенем пожежонебезпечності в Східній Європі відзначений влітку 2010 р, на тлі особливо стійкого антициклонічного процесу [2, 15]. Ця тенденція продовжилась низкою послідовних, виключно жарких і сухих, літніх сезонів у більшій частині Європи з лютого до травня 2011 р., хвилями спеки та посухою протягом послідовних років 2009-2012 рр. в Україні. В окремі роки (2015, 2017 рр.) посухи фіксувалися безперервно до 6 місяців, виходячи за межі вегетаційного періоду [10].

Рекордні температури повітря у Європі були зафіксовані у 2018-2020 рр. і особливо в 2022 р. [33]. Усі ці події охопили значні території і вплинули на середньорічне значення аномалій кліматичних величин у окремі роки, а в деяких випадках навіть на середнє світове значення, наприклад, за 2010 р. і 2022 р. За даними модельних прогнозів, частота хвиль спеки в Європі непропорційно зростає порівняно з глобальною температурою, хоча основні причини цього не зовсім зрозумілі.

Традиційно, якщо у більшості регіонів досить повно вивчена мінливість температури повітря, з тенденцією до підвищення, то атмосферні опади показують значну просторово-часову мінливість, в тому числі для території України [1, 3]. Якщо найбільший приріст кількості опадів відзначався на початку фази сучасного потепління, то сучасна тенденція пов'язана з від'ємною аномалією, хоча характер значних опадів має внутрішньосезонні відмінності. Основною особливістю періоду потепління є нерівномірність випадання опадів, як міжсезонна, так і міжрічна, з розширенням бездощового періоду, що призводить до посилення ступеню посушливості [11, 12].

Встановлення описаного кліматичного режиму зумовлено особливим станом атмосферної циркуляції із підвищеною стійкістю синоптичних процесів і зростаючим ступенем телеконекцій і зумовленістю системами планетарного клімату. Режим атмосферної циркуляції в Атлантично-Європейському секторі під час епізоду сучасного потепління відрізняється від того, що спостерігався в середині 20 століття [6, 36]. Антициклональна циркуляція переважає над більшою частиною Європи з 1980-х років, як взимку, так і влітку, створюючи умови для адвекції і поадльшого формування тепліших повітряних мас. Зимове потепління у Східній Європі спричинено ослабленням сибірського максимуму та зміщенням зон дії північноатлантичних ЦДА на схід та посиленням зональних потоків [7, 19].

Багаторічна зміна регіональної атмосферної циркуляції з ідентифікацією її епох На основі типизації А.А. Гірса показала, що період похолодання 1949–1965 рр. відповідає комбінований тип циркуляції Е+С (східна + центральна), 1966–1989 рр. – східним меридіональним типом Е, з переходом до східного зонального після 1990 р. [20]. У свою чергу, у роботі [29] визначено переважання зонального типу (W) у 1992–2010 рр., що підтверджується динамікою головних регіональних індексів циркуляції, як Північно-Атлантичне коливання та ін.

Згідно з [6] посушливі явища розвиваються в антициклонах, що відповідає типу циркуляції Е (східна) класифікації Вангенгейма-Гірса. Для України характерні дві синоптичні ситуації, які призводять до утворення посух: основна їх кількість (до 70 %) виникає результаті домінування процесів антициклонічного блокування через порушення зонального переносу в атмосфері. Решта посух в Україні спостерігається за переважання малорухомих (стаціонарних) антициклонів із центром у східній Європі, із значною стійкістю у часі.

Відомо, що на сучасному рівні досліджень стан регіональної кліматичної системи та погодних умов у конкретному регіоні традиційно визначається і може бути передбачений за допомогою відповідних глобальних або регіональних кліматичних індексів. Основним джерелом міжрічної регіональної мінливості циркуляції атмосфери АЕС є Північноатлантичне коливання (ПАК), яке пов'язує ланцюгом західних хвиль Північну Атлантику та Європу та пояснює близько 40% зимової мінливості тиску в регіоні [18, 19, 22, 31]. Це квазісинхронні короткоперіодні коливання з типовими періодичностями від 2 до 6-10 років між двома ЦДА в Північній Атлантиці – Ісландським мінімумом та Азорським максимумом.

Впродовж періодів з високим позитивним значенням ПАК переважає західне перенесення та виникають позитивні аномалії ПТП в Україні, найбільш виражені у північних та західних регіонах країни, а сезони з низьким значенням формується значне меридіональне перетворення у АЕС, з утворенням висотної улоговини і значних контрастів у полях температури та опадів.

У багатьох роботах було продемонстровано, що східноатлантичний індекс (САК) краще пояснює загальні риси регіональної циркуляції на сході Європи. Центри аномалій САК дещо зміщені на південний схід до диполя ПАК [31]. В Україні позитивна фаза САК супроводжується підвищенням приземної температури повітря, особливо на заході та півдні країни, а під час негативної фази спостерігається зворотна картина [7].

У останній час з'явилося багато досліджень які враховують інші режими мінливості, яким історично приділялося менше уваги, і які краще пояснює та мінливість клімату та загальні риси циркуляції. Крім ПАК і САК, використовуються середземноморське коливання (MOI), східноєвропейське-західноєвропейське-російське (EA-WR). Гренландський індекс блокування (GBI) та скандинавський індекс (SCA) суттєво впливають на зимовий

європейський клімат, а також на чутливість таких величин, як температура та опади [7, 26-28].

Значний внесок великомасштабної телеконекції EA-WR на розповсюдження хвиль Росбі над Атлантичним океаном у зимовий сезон з формуванням режиму температури повітря та опадів досліджується у [38], вплив схеми телеконекції EA-WR на гідрокліматологію Європи досліджується в [22].

Залежність формування аномалій температури в різних районах України в зимовий сезон від різних кліматичних сигналів вивчалася в [7]. Відзначено, що на заході країни визначальну роль у формуванні аномалій ПТП відіграє ПАК, на решті території – Північноморсько-Каспійський індекс (NCP), на півночі країни – Арктичне коливання. У лютому скандинавське коливання є визначальним у формуванні температурних аномалій на більшій частині України, за винятком півдня.

Додатний тренд гренландського індексу блокування відображає посилення атмосферного блокування, що вже багато років викликає великий інтерес у синоптиків та кліматологів [18, 27]. Важливість явища синоптичного блокування підтверджено у роботі [6]. З ним пов'язана підвищена тривалість посух у теплий період року.

Результат використання певні комбінації індексів для більш надійного пояснення причин формування аномальної погоди з отриманням важливі в прогностичному плані зв'язків регіональної температури повітря з мінливістю головних регіональних атмосферних індексів та розробкою методів довгострокові прогнози наведено [14].

Характерною особливістю циркуляції епізоду потепління є підвищена часова стабільність переважаючих її типів та відповідних погодних умов. Це, в свою чергу, спричиняє підвищену тривалість НМЯ, таких як літні хвилі спеки та посухи. Однак залишається не повністю вивченим, як погодні умови змінюються на межі впливу ЦДА, наприклад, над Південно-Східною Європою (включаючи Україну) або Західною Азією.

Головною метою цього дослідження є підсумувати стан регіональної кліматичної системи та показати, як змінилася атмосферна циркуляція в Північній Атлантиці та Європейському секторі протягом періоду сучасного потепління. Аналіз проводиться для всіх місяців року, з більшою увагою до теплового періоду року - весна-літо.

Використані дані. Для аналізу атмосферної циркуляції використано дані геопотенціалу AT-500 і 1000 гПа, а також зональні та меридіональні компоненти швидкості вітру AT-500 гПа, реаналіз NCEP/NCAR, 1951-2020 рр., просторове розділення 1,5°, вузли регулярної сітки над Україною (крім гірських районів).

Джерело кліматичних індексів, представлених у вигляді величин, нормованих на середньоквадратичне відхилення у кожному місяці – Центр передбачення клімату, США (<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/>).

Аналіз багаторічної зміни приземної температури виконано за даними базових станцій всіх регіонів, ЦГО імені Бориса Срезневського ДСНС України, окремо використовувались дані станції ОГМС Київ, шляхом порівняння періодів 1951-1985 і 1986-2020 рр.

Результати досліджень. Особливості атмосферної циркуляції. Як вже вказувалось, стан циркуляції атмосфери в Атлантико-Європейському секторі за період сучасного потепління полягає у поширенні впливу субтропічних максимумів та розповсюдження зони дії головних ЦДА на північний схід, зокрема Ісландської депресії [24].

Сучасна ситуація протягом теплового періоду характеризується посиленням аномалії геопотенціалу AT-500 гПа, безпосередньо над Україною та загалом над східною Європою влітку, та західною Європою навесні (рис. 2). Одночасно, посилюється область від'ємних аномалій геопотенціалу над південною Європою, басейнами Середземного моря. В останні роки тут залишається значною активність циклонічних процесів, які забезпечують вологою південні регіони України, що важливо в умовах прогнозованого підвищення ступеню посушливості.

Просторовий розподіл аномалій полів геопотенціалу відображає наступні аномалії регіональних індексів: в літні місяці ПАК та САК > 0, NCP < 0, весняні ПАК та САК < 0, NCP > 0, в обидва сезони MOI < 0, GBI > 0 (рис. 2 вставка). Таким чином, в обидва сезони зберігають знак аномалій GBI та MOI, що відбиває посилення антициклогенезу у північній Європі та збереження циклогенезу у Середземноморському регіоні, а ПАК та САК змінюють знак від'ємної аномалії навесні на додатну у літні місяці.

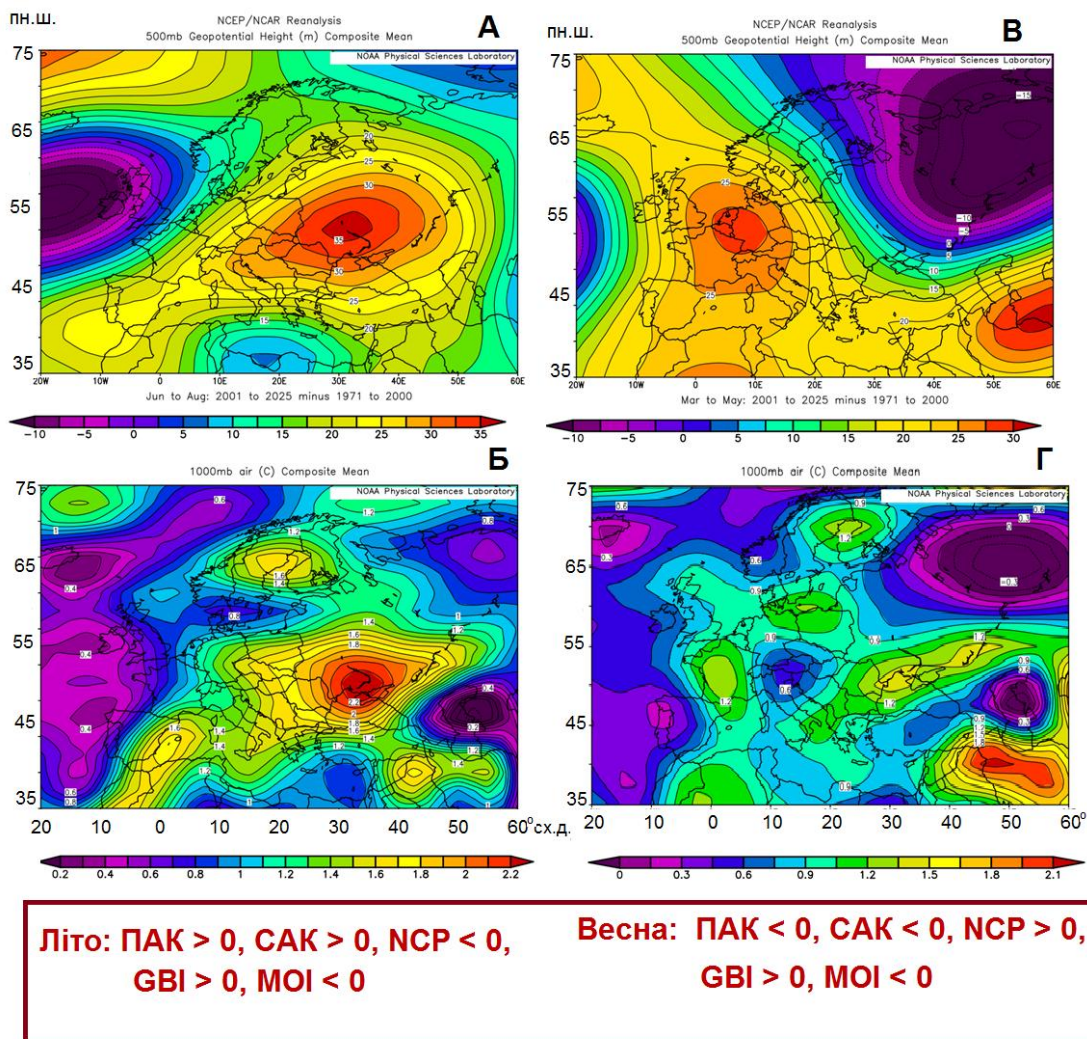


Рис. 2. Аномалія поля геопотенціалу АТ-500 гПа приземної температури повітря АТ-1000 гПа між десятиріччями 2001-2020 и 1971-2000 рр., липень-серпень (А, Б), березень-травень (В, Г), Атлантико-Європейський сектор (вставка внизу – Переважні знаки головних впливових атмосферних індексів)

Переходячи до аналізу змін на окремих ізобаричних рівнях АТ-500 (середній рівень тропосфери) та 1000 гПа (нижній рівень), зазначимо, що загальносезонне потепління в Україні супроводжується підвищенням рівня АТ-500 гПа, найбільш виражене у липні-вересні, листопаді-грудні та лютому (рис. 3). Цікаво що знаки трендів АТ-500 та 1000 гПа за 1986-2021 рр. різняться у більшості місяців, причому рівень АТ-1000 гПа знижується у січні-березні, травні, липні, жовтні, в інші місяці зміна статистично незначимий.

Аналіз багаторічних змін складових швидкості вітру 1986-2020 рр. показує сезонний хід з ослабленням зонального компонента вітру при переході від зими до літа, з позитивним знаком у лютому-квітні та переходом до негативної - у червні-вересні та листопаді. У той же час, тренд меридіонального компонента вітру значно менш виражений, з максимумом у грудні-січні, пояснюючи зимове потепління посиленням Південної складової. У той же час протягом теплого періоду зміна меридіональної компоненти є слабо вираженою.

Далі розглянемо статистичний зв'язок приземної температури повітря, ОГМС Київ з АТ-500 і 1000 гПа і складовими швидкості вітру у 1986-2020 рр. (рис. 4). Коефіцієнти кореляції ПТП з рівнем АТ-500 гПа виявилися найбільш значущими в усі місяці року, а з 1000 гПа – характерні різнознаковою незначущою кореляцією. З іншого боку, літньому потеплінню відповідає найбільша негативна кореляція ПТП із зональною складовою вітру, відображає загальне сезонне ослаблення градієнтів. При цьому значущість кореляції ПТП з меридіональним компонентом виявлена в січні - березні, а також у липні.

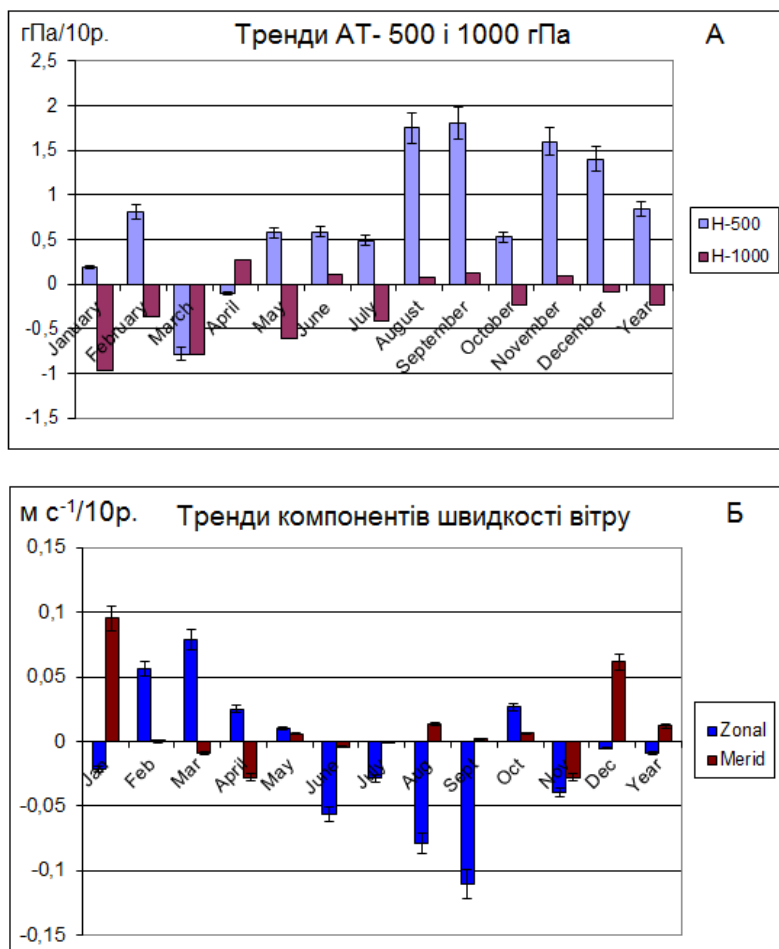


Рис. 3. Коефіцієнти лінійних трендів ізобаричних рівнів АТ-500 та 1000 гПа, (гПа/10р.) (А) та складових швидкості вітру (м с⁻¹/10р.) АТ-500 гПа (Б), січень – грудень, 1986-2020 рр., Україна. Довірчий інтервал змін показано на 95% рівні значущості

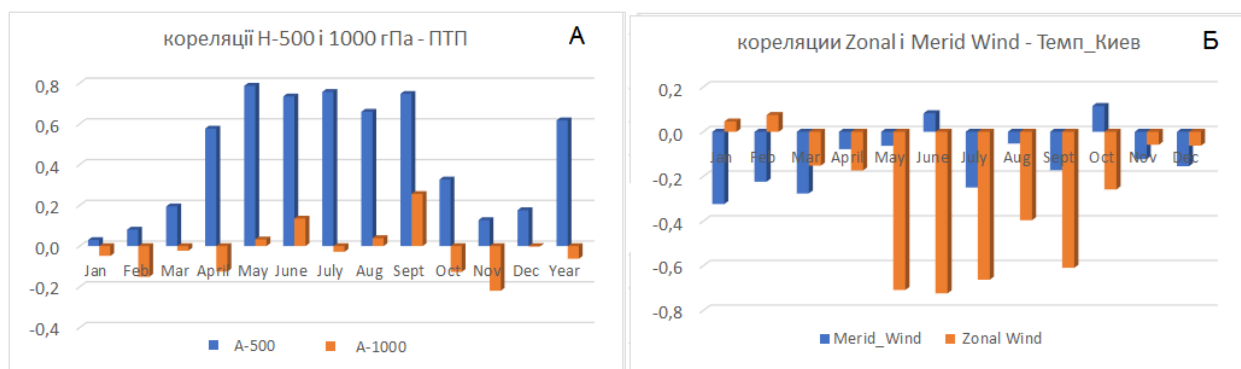


Рис. 4. Коефіцієнти кореляції приземної температури повітря з ізобаричними рівнями АТ-500 та 1000 гПа (А) та складовими швидкості вітру (Б), січень – грудень, 1986–2020 рр.

Дискусія. Наше дослідження підтвердило факт, що значні кліматичні зсуви поєднані зі змінами в атмосферній циркуляції. Так, потепління у низькій тропосфері над Україною та більшою частиною Європи приписується переважанню областей підвищеного тиску та їхній значній стійкості у часі.

Перебудова баричного поля кінця ХХ-го ст. - початку ХХІ-го ст., над Східною Європою та безпосередньо над Україною включає посилення антициклогенезу, за рахунок поширення зон дії субтропічних ЦДА не тільки на північ, але і на схід. Це сприяє

підвищенню ПТП, дефіциту опадів, зменшенню хмарності, збільшенню ТСС і, як результат, посиленню аридності, посиленню ступеня екстремальності клімату [11, 12]. Польські колеги також пояснюють значну мінливість річної тривалості сонячного сяйва у Центральній Європі зміною умов макроциркуляції та інтенсивністю термохалінної циркуляції [29].

Посилення впливу субтропічних максимумів і антициклогенезу в Європі підтверджується зростанням геопотенціалу середньої тропосфери та певним сполученням аномалій регіональних атмосферних індексів. Сучасне потепління супроводжується підвищенням висоти геопотенціалу АТ-500 гПа з 1986 р., причому знаки трендів АТ-500 та 1000 гПа різняться у більшості місяців. Коефіцієнти кореляції рівня АТ-500 гПа з ПТП виявилися значущими у всі місяці року, у той час як значно менший статистичний зв'язок відзначений для рівня 1000 гПа. Це свідчить про більшу важливість середнього рівня для діагнозу та прогнозу із застосуванням відповідних індексів.

Підвищення ступеня посушливості через посилення антициклогенезу корелюється зі зміною висоти геопотенціалу середнього рівня АТ-500 гПа з послабленням зонального компоненту вітру, що, з урахуванням динаміки індексів NCP та GBI, означає переважання східного вітру. Посилення меридіональної компоненти вітру в зимові місяці пояснює зимове потепління посиленням південної складової швидкості вітру.

Важливий у прогностичному плані Північноморсько-Каспійський індекс (NCP) відображає посилення східноєвропейського антициклону із зростанням впливу на погодні умови країни влітку. Це підтвердило висновки щодо трансформації циркуляції атмосфери останніх років, з інтенсифікацією гребеня на довготі Уралу-Каспійського моря, який безпосередньо впливає на схід Європи і Україну (перш за все, на східну частину) і зумовлює почастищення посушливих явищ останніх десятиліть. Крім того, динаміка індексів NCP разом із GBI підтверджують важливу роль блокуючих процесів у почастищенні посух і супроводжуваних явищ.

Значуща кореляція приземної температури з АТ-500 гПа, відбиваючи поширення впливу субтропічних антициклонів, розглядається в контексті підвищення глобальної температури і пов'язується з посиленням вертикальної комірки Хедлі в Північній півкулі, що узгоджується з раніше задокументованими змінами в позатропічних широтах, включаючи посилення західного потоку та циклогенезу [32]. Це є реакцією атмосфери на спостережувану тенденцію до потепління тропічного океану, разом з посиленням міжрічних коливань Ель-Ніньйо, включаючи збільшення частоти явищ ЕНПК після 1980х р.

Висновки. Загальна тенденція до потепління низьких шарів тропосфери у східній Європі зберігається протягом останніх двох десятиліть. Але процес потепління проходить більш відчутно в літньому сезоні у сучасному кліматичному періоді і супроводжується дефіцитом опадів та посиленням ступеня посушливості.

Значні кліматичні зсуви поєднуються зі змінами в атмосферній циркуляції. Сучасне потепління в Україні та Східній Європі є відбиттям змін у великомасштабній циркуляції в Атлантико-Європейському секторі. Головною рисою є посилення впливу антициклогенезу; з одночасним розширенням впливу північноатлантичних ЦДА.

Посилення антициклогенезу в Європі внаслідок розширення впливу субтропічних максимумів протягом періоду сучасного потепління підтверджується перш за все зростанням геопотенціалу середньої тропосфери та певним сполученням аномалій регіональних атмосферних індексів. Це дозволяє деталізувати причини формування аномальної погоди з отриманням важливих змін циркуляції атмосфери. Індекс NCP разом із GBI відображає важливу роль блокуючих процесів, на фоні яких формується більшість НМЯ.

Значуща кореляція приземної температури з АТ-500 гПа в усі місяці року дозволяє використовувати дані середнього рівня тропосфери для прогнозу погодних умов на сезонному інтервалі завчасності, враховуючи зв'язок інтенсифікації субтропічних антициклонів з посиленням вертикальної комірки Хедлі в Північній півкулі.

Список літератури

1. Клімат України / за ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. Київ: Вид-во Раєвського. 2003. 343 с.
2. Корнус А.О., Клок С.В., Бучний О.О. Характеристика хвиль тепла над Україною протягом

- 2000-2021 років. Актуальні проблеми дослідження довкілля: Матеріали X Міжнародної наукової конференції. Ред. А.О. Корнус, Сумський держ. Пед. університет ім. А.С. Макаренка, 2023. С. 92-97.
3. *Липинский В., Мартазинова В.Ф.* Глобальні та регіональні зміни клімату. Атлас «Клімат та водні ресурси України», Київ: 2011. С. 69-76.
 4. *Лозицький В., Єфіменко В.* Прогноз сонячної активності у 24-му циклі з врахуванням немонотонності його фази росту. Вісник КГУ. Сер. Астрономія. 2013. 1 (50). С. 30-32.
 5. *Мартазинова В.Ф., 2016, Иванова Е.К., Щеглов А.А.* Тенденция современного температурно-влажностного режима Украины к аномально сухим и знойным атмосферным процессам в летний сезон. Наук. пр. УкрГМІ, 2016. С. 15-24.
 6. *Мартазинова В.Ф., Сологуб Т.Н.* Атмосферная циркуляция, формирующая засушливые условия на территории Украины в конце XX ст. Тр. УкрНИГМИ, 2000. С. 36-47.
 7. *Полонский А.Б, Торбинский А.В., Башарин Д.В.* Влияние Северо-Атлантического колебания, Эль-Ниньо-Южного колебания и Индоокеанского диполя на пространственно-временную изменчивость приземной температуры воздуха и атмосферного давления Средиземноморско-Черноморского региона. Вісник Одеського державного екологічного університету, 2008. №6. С. 181-197.
 8. *Рибченко Л.С., Савчук С.В.* Особливості радіаційного режиму найбільш інтенсивних засух за 1991-2010 рр. в Україні. Часопис картографії, 12. С. 185-193.
 9. *Рибченко Л.С., Савчук С.В.* Потенціал геліоенергетичних кліматичних ресурсів сонячної радіації в Україні. Український географічний журнал. 2022. С. 16-23.
 10. *Рибченко Л., Савчук С.* Сонячна радіація при посухах у холодний період року протягом 1991-2020 рр. в Україні. Метеорологія. Гідрологія. Моніторинг довкілля, 2023. 1 (3). С. 4-13. URL: <http://doi.org/10.15407/Meteorology2023.03.004>
 11. *Савчук С.В. Тимофеев В.Є., Ювченко Н.М.* Районування України по впливу екстремальних значень максимальної температури повітря у теплий та холодний періоди року. Український гідрометеорологічний журнал, 2018. 22. С. 46-56.
 12. *Савчук Т.В.; Рокочинський А.М., Волощук В.А.* Глобальне потепління та його можливий вплив на природно-ресурсний потенціал західного регіону України. Науковий вісник НЛТУ України. 2009. 19: с. 15-27.
 13. Стихійні метеорологічні явища на території України за останнє десятиріччя (1986- 2005рр.) Під ред. М.В. Липінський, В.Н. Бабіченко. Київ : 2006. Ніка центр, 311 с.
 14. *Тимофеев В.Є., Клок С.В., Корнус А.О., Корнус О.Г.* Оцінка сучасного стану регіональної кліматичної системи України та східної Європи з можливостями сезонного прогнозування. Восьмі Сумські наукові географічні читання: збірник матеріалів Всеукраїнської наукової конференції. СумДПУ імені А.С. Макаренка, 2023. С. 163-176.
 15. *Шевченко О.Г.* Характеристика хвилі тепла літнього сезону 2010 р. на території України. Тр. УкрНИГМИ. 2012. 262. С. 259-270.
 16. *Bartoszek K., Matuszko D., Soroka.* Relationships between sunshine duration and air temperature in Poland. Geographia Polonica. 2022. 95 (3). P. 275-290.
 17. *Black E.* Global Change in Agricultural Flash Drought over the 21st Century. ADV. In atmospheric sciences, 2024. 41. P. 209-220.
 18. *Comas-Bru L., Hernández A.* Reconciling North Atlantic climate modes: revised monthly indices for the East Atlantic and the Scandinavian patterns beyond the 20th century. Earth Syst. Sci. Data, 2018. 10: P. 2329-2344. URL: <https://doi.org/10.5194/essd-10-2329-2018>.
 19. *Hurrell J.W., Kushnir Y., Visbeck M., Ottersen G. (eds.).* An Overview of the North Atlantic Oscillation. Geophysical Monograph Series, 134, Washington, DC: AGU: 2003. P. 279 -288.
 20. *Girs, A.A.* Some forms of atmospheric circulation and their utilisation in forecasts Proc. AARI, 1981. 373, P. 4–13.
 21. *Mikhailova N.V., Yurovsky A.* The East Atlantic Oscillation: Mechanism and Impact on the European Climate in Winter. 2016. *Morskoy gidrofizicheskiy zhurnal*. 2016. P. 27-37
 22. *Monica Ionita.* The Impact of the East Atlantic/Western Russia Pattern on the Hydroclimatology of Europe from Mid-Winter to Late Spring. Climate 2014, 2, P. 296-309;
 23. IPCC: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York: 2022. P. 3-33.
 24. *Jung T., M. Hilmer, E. Ruprecht, S. Kleppek, S.K. Gulev, Zolina O.* Characteristics of the Recent Eastward Shift of Interannual NAO Variability. Journal of Climate, 2003. 16 (20): P. 3371-3382. URL: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3371:COTRES>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3371:COTRES>2.0.CO;2)
 25. *K. Kouzмова, A. Ilina, Anatoliy N. Polevoy.* Features of the temperature regime effect on the duration of the crops vegetation period in southern Ukraine. Agricultural sciences, Vol. 13, Issue 31, 2021.

URL: <https://doi.org/10.22620/agrisci.2021.31.001>

26. S. O. Krichak and P. Alpert, 2004. Decadal trends in the East Atlantic-West Russia pattern and the Mediterranean precipitation. *Int. Journal of Climatology*, 2005. 25(2). P. 183 – 192.
27. Linh N. Luu, E. Hanna, D. de Alwis Pitts, J. Maddison, J. A. Screen, J. L. Catto, X. Fettweis. Greenland summer blocking characteristics: an evaluation of a high-resolution multi-model ensemble. *Climate Dynamics*. 2024. 62: P. 10503–10523.
28. Luo B. W. X, Young-Min Y., and Jian Liu. Historical change of El Niño properties sheds light on future changes of extreme El Niño. *Earth, atmospheric, and planetary sciences*, 2019. 116 (45). P. 22512-22517.
29. Marsz A., Matuszko D., Styszyńska A. The thermal state of the North Atlantic and macrocirculation conditions in the Atlantic European sector, and changes in sunshine duration in Central Europe. *Int. Journal of Climatology*. 2021. 42(2). P. 1–14.
30. Meehl, G.A. & C. Tebaldi. More intense, more frequent, and longer lasting heatwaves in the 21st century. *Science*, 2004. 305 (5686). P. 994-997.
31. Pinto J. G., Raible C. Past and recent changes in the North Atlantic oscillation. *WIREs Climate Change*. 2012. 3 (1). P. 79-90.
32. Xiao-Wei Quan, Henry F. Diaz, and Martin P. Hoerling. Change of the Tropical Hadley Cell Since 1950. In: Diaz, H.F., Bradley, R.S. (eds), 2004. *The Hadley Circulation: Present, Past and Future*. Advances in Global Change Research, vol 21. Springer, Dordrecht.
33. Rousi E., Kornhuber K., Beobide-Arsuaga G., Fei Luo. Accelerated western European heatwave trends linked to more-persistent double jets over Eurasia. *Nat. Commun* 2022. 13. P. 3851-3870. URL: <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31432-y>
34. Semenova I. G., Vicente-Serrano S. M. Long-term variability and trends of meteorological droughts in Ukraine. *Int. Journal of Climatology*, 2024. 24 (6): P. 1-18.
35. Trenberth, K.E., Dai A., G. van der Schrier, Jones P. D., Barichivich J., Briffa K.R., Sheffield J. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*. 2014, 4: P. 17-22.
36. Tymofeyev V.E. Recent changes in the large-scale tropospheric circulation as viewed against climate change in Europe. *CLIVAR Newsletter*. 2008. № 46, vol.13, № 3. P. 6–8
37. Warda P. J., B. Jongmana, M. Kummuc, M. D. Dettingerd, F. C. Sperna, H. C. Winsemiusf. Strong influence of El Niño Southern Oscillation on flood risk around the world. *PNAS*, 2014, vol. 111. No. 44. P. 15659–15664
38. Young-Kwon Lim. The East Atlantic/West Russia (EA/WR) teleconnection in the North Atlantic: climate impact and relation to Rossby wave propagation. *Clim Dyn*. 44, 2015. Vol. 44, P 3211–3222.

References

1. *Klimat Ukrainy* [Climate of Ukraine] / za red. V. M. Lipinskoho, V. A. Diachuka, V. M. Babichenko. Kyiv: Vyd-vo Raievskoho. 2003. 343 s.
2. Kornus A.O., Klok S.V., Buchnyi O.O. Kharakterystyka khvyl tepla nad Ukrainoiu protiahom 2000-2021 rokiv [Characteristics of heat waves over Ukraine during 2000-2021]. Aktualni problemy doslidzhennia dovkillia: Materialy Kh Mizhnarodnoi naukovoï konferentsii. Red. A.O. Kornus, Sumskyi derzh. Ped. universytet im. A.S. Makarenka, 2023. C. 92-97.
3. Lypynskiy V., Martazynova V.F. Hlobalni ta rehionalni zminy klimatu [Global and regional climate changes]. Atlas «Klimat ta vodni resursy Ukrainy», Kyiv: 2011. C. 69-76.
4. Lozytskyi V., Yefimenko V. Prohnoz soniachnoi aktyvnosti u 24-mu tsykli z vrakhuvanniam nemonotonnosti yoho fazy rostu [Forecast of solar activity in the 24th cycle taking into account the non-monotonicity of its growth phase]. Visnyk KHU. Ser. Astronomiia. 2013. 1 (50). C. 30-32.
5. Martazynova V.F., Yvanova E.K., Shcheglov A.A. Tendentsiya srovennoho temperaturno-vlazhnostnoho rezhyma Ukrainy k anomalno suchym y znoinym atmosfernym protsessam v letnyi sezon [The tendency of the modern temperature-humidity regime of Ukraine towards anomalously dry and sultry atmospheric processes in the summer season]. Nauk. pr. UkrHMI, 2016. C. 15-24.
6. Martazynova V.F., Solohub T.N. Atmosfernaia tsyrkuliatsiia, formyuiushchaia zasushlyvye uslovia na terrytoryi Ukrainy v kontse XX st. [Atmospheric circulation forming arid conditions in the territory of Ukraine at the end of the 20th century] Tr. UkrNYHMY, 2000. S. 36-47.
7. Polonskyi A.B, Torbyskyi A.V., Basharyn D.V. Vlianye Severo-Atlanticheskoho kolebanyia, El-Nyno-Yuzhnoho kolebanyia y Yndookeanskoho dypolia na prostranstvenno-vremennuiu yzmenchyvost pryzemnoi temperatury vozdukha y atmosfernoho davleniia Sredyemnomorsko-Chernomorskoho rehyona [The influence of the North Atlantic Oscillation, El Niño-Southern Oscillation and the Indian Ocean Dipole on the spatiotemporal variability of surface air temperature and atmospheric pressure in the Mediterranean-Black Sea region]. Visnyk Odeskoho derzhavnoho ekolohichnoho universytetu, 2008. №6. S. 181-197.
8. Rybchenko L.S., Savchuk S.V. Osoblyvosti radiatsiinoho rezhymu naibilsh intensyvnykh zasukh

za 1991-2010 rr. v Ukraini [Features of the radiation regime of the most intense droughts in 1991-2010 in Ukraine]. *Chasopys kartohrafi*, 12. S. 185-193.

9. *Rybchenko L.S., Savchuk S.V.* Potentsial helioenerhetychnykh klimatychnykh resursiv soniachnoi radiatsii v Ukraini [Potential of solar energy climatic resources of solar radiation in Ukraine]. *Ukrainskyi heohrafichnyi zhurnal*. 2022. C. 16-23.

10. *Rybchenko L., Savchuk S.* Soniachna radiatsiia pry posukhakh u kholodnyi period roku protiahom 1991-2020 rr. v Ukraini [Solar radiation during droughts in the cold period of the year during 1991-2020 in Ukraine]. *Meteorolohiia. Hidrolohiia. Monitorynh dovkillia*, 2023. 1 (3). C. 4-13. URL: <http://doi.org/10.15407/Meteorology2023.03.004>.

11. *Savchuk S.V., Tymofieiev V.Ye., Yuvchenko N.M.* Raionuvannia Ukrainy po vplyvu ekstremalnykh znachen maksimalnoi temperatury povitria u teplyi ta kholodnyi periody roku [Zoning of Ukraine by the influence of extreme values of maximum air temperature in the warm and cold periods of the year]. *Ukrainskyi hidrometeorolohichnyi zhurnal*, 2018. 22. C. 46-56.

12. *Savchuk T.V.; Rokochynskyi A.M., Voloshchuk V.A.* Hlobalne poteplinnia ta yoho mozhlyvyi vplyv na pryrodno-resursnyi potentsial zakhidnoho rehionu Ukrainy [Global warming and its possible impact on the natural resource potential of the western region of Ukraine]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*. 2009. 19: S. 15-27.

13. Stykhiini meteorolohichni yavyscha na terytorii Ukrainy za ostannie desiatyrichchia (1986-2005rr. [Natural meteorological phenomena in the territory of Ukraine over the last decade (1986-2005)] Pid red. M.V. Lipinskyi, V.N. Babichenko. Kyiv : 2006. Nika tsentr, 311 c.

14. *Tymofeev V.Ye., Klok S.V., Kornus A.O., Kornus O.H.* Otsinka suchasnoho stanu rehionalnoi klimatychnoi systemy Ukrainy ta skhidnoi Yevropy z mozhlyvostiamy sezonnoho prohnozuvannia [Assessment of the current state of the regional climate system of Ukraine and Eastern Europe with the possibilities of seasonal forecasting]. *Vosmi Sumski naukovi heohrafichni chytannia: zbirnyk materialiv Vseukrainskoi naukovoï konferentsii. SumDPU imeni A.S. Makarenka*, 2023. S. 163-176.

15. *Shevchenko O.H.* Kharakterystyka khvyli tepla litnoho sezonu 2010 r. na terytorii Ukrainy [Characteristics of the heat wave of the summer season of 2010 in the territory of Ukraine]. *Tr. UkrNYHMY*. 2012. 262. C. 259-270.

16. *Bartoszek K., Matuszko D., Soroka.* Relationships between sunshine duration and air temperature in Poland. *Geographia Polonica*. 2022. 95 (3). P. 275-290.

17. *Black E.* Global Change in Agricultural Flash Drought over the 21st Century. *ADV. In atmospheric sciences*, 2024. 41. P. 209-220.

18. *Comas-Bru L., Hernández A.* Reconciling North Atlantic climate modes: revised monthly indices for the East Atlantic and the Scandinavian patterns beyond the 20th century. *Earth Syst. Sci. Data*, 2018. 10: P. 2329-2344. URL: <https://doi.org/10.5194/essd-10-2329-2018>.

19. *Hurrell J.W., Kushnir Y., Visbeck M., Ottensen G. (eds.).* An Overview of the North Atlantic Oscillation. *Geophysical Monograph Series*, 134, Washington, DC: AGU: 2003. P. 279 -288.

20. *Girs, A.A.* Some forms of atmospheric circulation and their utilisation in forecasts *Proc. AARI*, 1981. 373, P. 4-13.

21. *Mikhailova N.V., Yurovsky A.* The East Atlantic Oscillation: Mechanism and Impact on the European Climate in Winter. 2016. *Morskoy gidrofizicheskii zhurnal*. 2016. P. 27-37

22. *Monica Ionita.* The Impact of the East Atlantic/Western Russia Pattern on the Hydroclimatology of Europe from Mid-Winter to Late Spring. *Climate* 2014. 2. P. 296-309;

23. IPCC: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York: 2022. P. 3-33.

24. *Jung T., M. Hilmer, E. Ruprecht, S. Kleppek, S.K. Gulev, Zolina O.* Characteristics of the Recent Eastward Shift of Interannual NAO Variability. *Journal of Climate*, 2003. 16 (20): P. 3371-3382. URL: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3371:COTRES>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3371:COTRES>2.0.CO;2)

25. *K. Kouzмова, A. Ilina, Anatoliy N. Polevoy.* Features of the temperature regime effect on the duration of the crops vegetation period in southern Ukraine. *Agricultural sciences*, Vol. 13, Issue 31, 2021. URL: <https://doi.org/10.22620/agrisci.2021.31.001>

26. *S. O. Krichak and P. Alpert*, 2004. Decadal trends in the East Atlantic-West Russia pattern and the Mediterranean precipitation. *Int. Journal of Climatology*, 2005. 25(2). P. 183 – 192.

27. *Linh N. Luu, E. Hanna, D. de Alwis Pitts, J. Maddison, J. A. Screen, J. L. Catto, X. Fettweis.* Greenland summer blocking characteristics: an evaluation of a high-resolution multi-model ensemble. *Climate Dynamics*. 2024. 62: P. 10503–10523.

28. *Luo B. W. X, Young-Min Y., and Jian Liu.* Historical change of El Niño properties sheds light on future changes of extreme El Niño. *Earth, atmospheric, and planetary sciences*, 2019. 116 (45). P. 22512-22517.

29. Marsz A., Matuszko D., Styszyńska A. The thermal state of the North Atlantic and macrocirculation conditions in the Atlantic European sector, and changes in sunshine duration in Central Europe. *Int. Journal of Climatology*. 2021. 42(2). P. 1–14.
30. Meehl, G.A. & C. Tebaldi. More intense, more frequent, and longer lasting heatwaves in the 21st century. *Science*, 2004. 305 (5686). P. 994–997.
31. Pinto J. G., Raible C. Past and recent changes in the North Atlantic oscillation. *WIREs Climate Change*. 2012. 3 (1). P. 79–90.
32. Xiao-Wei Quan, Henry F. Diaz, and Martin P. Hoerling. Change of the Tropical Hadley Cell Since 1950. In: Diaz, H.F., Bradley, R.S. (eds), 2004. *The Hadley Circulation: Present, Past and Future. Advances in Global Change Research*, vol 21. Springer, Dordrecht.
33. Rousi E., Kornhuber K., Beobide-Arsuaga G., Fei Luo. Accelerated western European heatwave trends linked to more-persistent double jets over Eurasia. *Nat. Commun* 2022. 13. P. 3851–3870. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-31432-y>
34. Semenova I. G., Vicente-Serrano S. M. Long-term variability and trends of meteorological droughts in Ukraine. *Int. Journal of Climatology*, 2024. 24 (6): P. 1–18.
35. Trenberth, K.E., Dai A., G. van der Schrier, Jones P. D., Barichivich J., Briffa K.R., Sheffield J. Global warming and changes in drought. *Nature Climate Change*. 2014, 4: P. 17–22.
36. Tymofeyev V.E. Recent changes in the large-scale tropospheric circulation as viewed against climate change in Europe. *CLIVAR Newsletter*. 2008. № 46, vol.13, № 3. P. 6–8
37. Warda P. J., B. Jongmana, M. Kummuc, M. D. Dettingerd, F. C. Sperna, H. C. Winsemiusf. Strong influence of El Niño Southern Oscillation on flood risk around the world. *PNAS*, 2014, vol. 111. No. 44. P. 15659–15664
38. Young-Kwon Lim. The East Atlantic/West Russia (EA/WR) teleconnection in the North Atlantic: climate impact and relation to Rossby wave propagation. *Clim Dyn*. 44, 2015. Vol. 44, P 3211–3222.

Current state of atmospheric circulation in the Atlantic-European sector and its impact on weather conditions in Ukraine

Tymofeiev V.Ye.

The paper studies the current state of atmospheric circulation – the main internal climate-forming factor that determines the climatic and weather conditions of Ukraine, including dangerous phenomena. An overview of the current state of the regional climate is provided, with an assessment of the state of atmospheric circulation in the Atlantic-European sector, existing teleconnections and prognostic potential. The general trend towards warming of the lower layers of the troposphere in Ukraine and Eastern Europe has persisted over the past decades and is accompanied by a deficit of precipitation and an increase in the degree of aridity.

It is confirmed that significant climatic shifts are combined with changes in atmospheric circulation, including the transition to modern warming in Ukraine and Eastern Europe. The main feature is the expansion of the influence of the centers of atmospheric action with increased anticyclogenesis, reflecting a special state of atmospheric circulation with increased stability of synoptic processes. Typical combinations of regional climate index anomalies are found that can be used for the diagnosis and forecast of hazardous events.

The significant correlation of surface temperature with AT-500 hPa, reflecting the spread of the influence of subtropical anticyclones, is considered in the context of global temperature increase and is associated with the strengthening of the vertical Hadley cell in the Northern Hemisphere, which is consistent with previously documented changes in extratropical latitudes, including the strengthening of the westerly flow and cyclogenesis. This is a response of the atmosphere to the observed trend of warming of the tropical ocean, together with the strengthening of the interannual El Niño oscillations, including an increase in the frequency of ENPC events after the 1980s.

During the period of modern warming, the largest changes are noted for the geopotential of the middle level of the tropospheric AT - 500 hPa, reflecting the strengthening of anticyclogenesis. The significant correlation of surface temperature with AT-500 hPa in all months of the year also allows the use of mid-tropospheric data for long-term weather forecasting, taking into account the connection between the intensification of anticyclones and the strengthening of the vertical Hadley cell in the Northern Hemisphere.

Key words: atmospheric circulation, mid-level, drought phenomena, climate indices, anticyclones.

Надійшла до редакції 14.03.2026