

УДК 551.577.37:551.583.16(477.74), PACS: 92.60.Wc, 92.60.Ry

ІНДЕКСИ ETCCDI В ОДЕСЬКОМУ РЕГІОНІ ЗА РЕАНАЛІЗОМ ERA5-LAND ТА ДАНИМИ МЕТЕОСТАНЦІЙ: ТРЕНДИ ТА ВЕРИФІКАЦІЯ ЗА 1991–2020 РР.

А. Б. Семергей-Чумаченко

Одеський національний університет імені І. І. Мечникова,
вул. Всеволода Змієнка, 2, 65082, Одеса, Україна,
alina.semerhei-chumachenko@onu.edu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-8718-4073>

Досліджено зміни режиму екстремальних опадів у Північно-Західному Причорномор'ї на основі десяти індексів ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices), розрахованих за даними реаналізу ERA5-Land (просторова роздільність $0,1^\circ$) за стандартний кліматичний період 1991–2020 рр. Для оцінювання трендів використано непараметричний критерій Манна-Кендалла з оцінюванням величини тренду за методом Сена. Просторовий аналіз виконано для сітки ERA5-Land у межах домену $46,0\text{--}47,5^\circ\text{N}$, $30,0\text{--}31,5^\circ\text{E}$; сезонний аналіз проведено окремо для холодного (листопад–березень) та теплого (квітень–жовтень) сезонів. Верифікацію результатів реаналізу здійснено шляхом порівняння з даними метеостанції Одеса (ECA&D, STAID: 400) за той самий період.

Річний трендовий аналіз виявив статистично незначущу при стандартному рівні $p < 0,05$, але виражену тенденцію до зменшення сумарних опадів у дощові дні (PRCPTOT: $-3,48$ мм/рік, $p = 0,064$). Сезонна декомпозиція трендів показала, що всі статистично значущі тренди зосереджені у теплому сезоні: зменшення PRCPTOT ($-2,60$ мм/рік, $p = 0,032$), скорочення кількості днів з опадами ≥ 10 мм (R10MM: $-0,088$ дн/рік, $p = 0,012$) та статистично незначуще при $p < 0,05$, але виражене збільшення тривалості сухих періодів (CDD: $+0,208$ дн/рік, $p = 0,094$). У холодний сезон значущих трендів не виявлено.

Просторовий аналіз трендів методом Манна-Кендалла виявив переважання значущого від'ємного сигналу для PRCPTOT та R10MM на більшій частині досліджуваного регіону, з найбільш вираженим зменшенням у північній та центральній частинах домену. Для індексу CDD просторовий розподіл трендів характеризується неоднорідністю: значущі позитивні тренди зафіксовано у східній частині регіону, тоді як прибережна зона демонструє незначущі від'ємні або нейтральні значення, що може свідчити про модифікуючий вплив акваторії Чорного моря. Для RX1DAY просторовий аналіз виявив значущі від'ємні тренди у північній частині регіону, що суперечить зростаючому тренду, зафіксованому на метеостанції Одеса ($+0,90$ мм/рік, $p = 0,010$), і вказує на обмеження реаналізу у відтворенні точкових екстремумів опадів. Верифікація за даними ECA&D показала задовільну узгодженість для індексів накопичених опадів (PRCPTOT: $R = 0,45$, $p = 0,012$; R10MM: $R = 0,51$, $p = 0,004$).

Отримані результати можуть свідчити про зростання посушливості теплового сезону в Північно-Західному Причорномор'ї у 1991–2020 рр., що узгоджується з регіональними тенденціями зменшення літніх опадів, характерними для Причорноморського та Середземноморського секторів. Виявлені тренди мають практичне значення для оцінювання водних ресурсів та агрокліматичних умов півдня України.

Ключові слова: реаналіз ERA5-Land, індекси ETCCDI, екстремальні опади, тренд Манна-Кендалла, Північно-Західне Причорномор'я, кліматична норма 1991–2020, сильні опади, регіональні зміни клімату.

1. ВСТУП

Зміни режиму атмосферних опадів є одним із найбільш значущих проявів сучасного регіонального кліматичного сигналу, особливо в зонах переходу між вологим помірним та посушливим середземноморським кліматами.

За даними Всесвітньої метеорологічної організації, Європа залишається одним із регіонів

світу з найбільш вираженими змінами кліматичних екстремумів, зокрема у частоті та інтенсивності екстремальних опадів [1].

Північно-Західне Причорномор'я розташоване у зоні переходу між вологим помірним та посушливим середземноморським кліматом [13, 14], що визначає його підвищену чутливість до змін у частоті та інтенсивності опадів. Одеський регіон, як один із найважливіших сільсько-

господарських районів України, зазнає значного впливу як дефіциту вологи в теплий сезон, так і епізодичних екстремальних опадів, що спричиняють паводки та ерозію ґрунтів [2, 3]. Зростання повторюваності та інтенсивності екстремальних гідрометеорологічних явищ у регіоні Чорного моря, зафіксоване в останні десятиліття, актуалізує необхідність кількісної оцінки змін режиму опадів на основі стандартизованих індексів та сучасних кліматичних продуктів.

Аналіз екстремальних кліматичних подій на основі стандартизованих індексів ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) є загальноприйнятим підходом у сучасній кліматології [4]. Ці індекси забезпечують порівнянність результатів між різними регіонами та дослідженнями, що робить їх особливо цінними для регіональних кліматичних оцінок. Для території України подібні дослідження проводились з використанням даних реаналізу ERA5 та наземних спостережень [8, 10, 11], однак просторово деталізовані оцінки для Одеського регіону на основі ERA5-Land за стандартний кліматичний період 1991–2020 рр. залишаються практично відсутніми.

Реаналіз ERA5-Land (ECMWF) з просторовою роздільністю $0,1^\circ$ є одним із найбільш деталізованих глобальних кліматичних продуктів, доступних для наукових досліджень [15, 16, 17]. Його перевагою є висока просторова роздільність порівняно з ERA5 ($0,25^\circ$), що є особливо важливим для регіонів зі складним рельєфом берегової зони та неоднорідним розподілом опадів. Водночас верифікація реаналізу за даними наземних спостережень залишається необхідним етапом будь-якого кліматичного дослідження, особливо для екстремальних характеристик опадів [18, 19].

Метою даного дослідження є визначення змін режиму екстремальних опадів в Одеському регіоні на основі індексів ETCCDI, розрахованих за даними реаналізу ERA5-Land за стандартний кліматичний період 1991–2020 рр., а також верифікація отриманих результатів за даними метеорологічної станції Одеса (ECA&D).

Вперше для Одеського регіону на основі реаналізу ERA5-Land ($0,1^\circ$) розраховано десять стандартних індексів ETCCDI за кліматичний період 1991–2020 рр. з покомірковим просторовим аналізом трендів методом Манна-Кендалла для всіх суходільних вузлів сітки у межах домену $46,0\text{--}47,5^\circ\text{N}$, $30,0\text{--}31,5^\circ\text{E}$. Вперше для регіону виконано сезонну декомпозицію трендів з розмежуванням холодного (листопад–

березень) та теплого (квітень–жовтень) сезонів, що дозволило виявити асиметрію кліматичного сигналу між сезонами. Проведено кількісну верифікацію результатів ERA5-Land за даними метеостанції Одеса-обсерваторія з оцінкою зміщення, RMSE та кореляції для ключових індексів, включаючи виявлення розходження трендів RX1DAY між реаналізом і метеорологічними спостереженнями як методологічного обмеження продукту для прибережної зони.

Дослідження виконано в рамках науково-дослідної роботи «Сталий розвиток управління і моделювання водних ресурсів Північно-Західного Причорномор'я в умовах зростання екстремальності клімату та антропогенного навантаження» (державний реєстраційний номер 0126U001796, 2026–2028 рр.), що визначає актуальність отримання базових кількісних оцінок змін режиму екстремальних опадів у регіоні за сучасний кліматичний період.

2. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Дослідження екстремальних опадів та їх змін у контексті глобального потепління активно розвивається у світовій кліматології. Методологічною основою таких досліджень є стандартизовані індекси ETCCDI, запропоновані спільною експертною групою WMO-CCL/CLIVAR. В 2003 р. А. М. G. Klein Tank та G. P. Können [5] одними з перших систематично застосовували ці індекси для аналізу трендів температурних та опадових екстремумів у Європі за 1946–1999 рр. на основі бази даних ECA та виявили неоднорідні просторові закономірності змін. У 2011 р. Zhang X. зі співавторами [4] узагальнили методологію розрахунку індексів ETCCDI та обґрунтували їх використання для моніторингу змін екстремумів клімату на глобальному та регіональному рівнях.

Для регіону Південно-Східної Європи та Північно-Західного Причорномор'я характерне зменшення опадів у теплий сезон на тлі зростання інтенсивності окремих екстремальних подій. Група румунських дослідників (Micu D.M., Amihaesei V.A., Milian N. та ін.) у 2021 р. [6] виявила значуще потепління при відсутності чітких трендів опадів при дослідженні зміна індексів ETCCDI у Південних Карпатах (Румунія) за 1961–2018 рр. Інша група (Ionita M. та ін.) виявила значущі від'ємні тренди середніх та екстремальних опадів для окремих станцій у прибережній зоні на півдні Румунії за 1961–2020 рр. [7], що узгоджується з результатами нашого дослідження.

Для території України дослідження екстрема-

льних опадів проводились переважно з використанням реаналізу ERA5 та даних метеостанцій. Агайар Е.В. та ін. в 2023 р. [8] проаналізував 82 події екстремальних опадів (≥ 100 мм/добу) над Україною за 1979–2019 рр., виявили що більшість з них відбувається влітку та пов'язана з вологопостачанням з Чорного та Середземного морів. Далі вчені розвинули цей аналіз із зосередженням на динамічних аспектах та великомасштабній циркуляції [9], що обумовлює екстремальні опади в Україні. Ця група вчених досліджувала екстремальні опади в Україні та для ідентифікації подій та розрахунку траєкторій вологи використовувала саме ERA5, що підтверджує, що для синоптичного аналізу реаналіз у нашому регіоні застосовується успішно, хоча для абсолютних значень опадів його використання може вимагати калібрування.

У роботі [10] здійснено просторово-часовий аналіз сильних опадів над Україною за 1979–2019 рр. за даними реаналізу ERA5. Встановлено просторову неоднорідність розподілу екстремальних опадів — максимальна повторюваність характерна для Карпатського регіону та південного узбережжя, тоді як степова зона, включаючи Причорномор'я, характеризується меншою частотою та нижчими значеннями добових максимумів. Отримані результати формують базові кліматологічні характеристики екстремальних опадів для України та слугують основою для регіональних досліджень, зокрема у Північно-Західному Причорномор'ї.

В 2020 р. Семергей-Чумаченко А.Б. та Слободяник К.Л. [11] аналізували виникнення сильних опадів (>30 мм/12 год) на станції Херсон за даними метеорологічних спостережень та реаналізу ERA5 за 2005–2021 рр. Виявлено 19 випадків сильних дощів, які відбувались виключно у теплий період року з максимальною повторюваністю у липні. Порівняно з 1961–1990 рр. кількість сильних дощів у 2005–2021 рр. зросла у червні та липні, але зменшилась у серпні. Встановлено, що більшість реальних випадків сильних опадів задовільно відтворюється реаналізом ERA5, однак приблизно у третині епізодів реаналіз не фіксував сильних опадів на координатах станції або центр опадів був зміщений. Цей результат є методологічно важливим для нашого дослідження, оскільки підтверджує відомі обмеження ERA5 у відтворенні точкових екстремумів опадів для окремих станцій Причорноморського регіону.

Регіональні кліматичні зміни в Північно-Західному Причорномор'ї досліджувались і в контексті температурного режиму. В 2025 р. в

роботі Гончарової Л.Д. та Прокоф'єва О.М. [12] проаналізовані весняні відгуки термічного режиму регіону на глобальні кліматичні зміни на прикладі станцій Одеської області, встановлено потепління на $1,1^{\circ}\text{C}$ від першого до другого тридцятиріччя. Боровська Г.О. та Хохлов В.М. у 2024 р. [13] створили набір кліматичних даних CP_OdU (Climate Projections for Odesa, Ukraine), що містить добові вихідні змінні з 102 модельних прогонів та 76 місячних (річних) індексів, розрахованих для 2021–2050 рр. для найближчої до Одеси суходільної точки сітки. Прогнозні дані засновані на 26 та 76 симуляціях для сценаріїв RCP4.5 та RCP8.5 відповідно, з 14 РКМ проекту EURO-CORDEX з просторовою роздільністю $\sim 0,11^{\circ}$ (~ 12 км). Короткий опис майбутнього клімату Одеси за сценарієм RCP8.5 демонструє тенденцію до формування середземноморського клімату — підвищення температури у поєднанні зі змінами внутрішньорічного розподілу опадів призведе до спекотного сухого літа та м'якої помірно вологої зими. Таким чином, результати [13] підтверджують та кількісно обґрунтовують довгострокову тенденцію до зменшення опадів теплого сезону в Одеському регіоні, виявлену у даному дослідженні на основі даних ERA5-Land за 1991–2020 рр.

Згідно з [14], південна та центральна Україна належить до регіонів з найбільш вираженим ризиком посушливості в Європі, що підкреслює актуальність досліджень режиму опадів у Причорномор'ї. В [14] (VI доповіді МГЕЗК (IPCC AR6, 2021)) наведено комплексну оцінку спостережуваних та прогнозованих змін екстремальних кліматичних явищ на глобальному та регіональному рівнях. Встановлено, що частота та інтенсивність екстремальних опадів зросли щонайменше у половині регіонів світу, включаючи Східну Європу (EEU). Вплив людини, зокрема емісія парникових газів, визначено як основний чинник спостережуваного глобального посилення інтенсивних опадів над суходолом.

Водночас для Середземноморського регіону (MED), до якого функціонально тяжіє Північно-Західне Причорномор'я, доповідь фіксує протилежну тенденцію: зменшення середніх опадів за останні десятиліття, при цьому знак та величина трендів суттєво залежать від досліджуваного часового інтервалу та конкретного регіону. Південна та центральна Україна входить до переліку регіонів з найбільш вираженим ризиком збільшення сільськогосподарських та екологічних посух при глобальному потеплінні на 2°C відносно доіндустріального рівня.

3. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У дослідженні використано погодинні дані реаналізу ERA5-Land [16] для змінної total precipitation за стандартний кліматичний період 1991–2020 рр. ERA5-Land є продуктом ECMWF, отриманим шляхом відтворення земної компоненти реаналізу ERA5 [15] з підвищеною просторовою роздільністю близько 9 км (0,1°) порівняно з 31 км (0,25°) для ERA5 [17]. Дані отримано через Copernicus Climate Data Store (CDS) з використанням офіційного API-інтерфейсу cdsapi для мови програмування Python. Просторовий домен дослідження охоплює територію 46,0–47,5°N, 30,0–31,5°E, що відповідає Одеській області та суміжним районам Північно-Західного Причорномор'я. Сітка ERA5-Land містить 16×16 комірок у межах домену, з яких виключено комірки над акваторією Чорного моря та лиманів, де дані відсутні. У контексті даного дослідження термін «Одеський регіон» вживається як географічне поняття і відповідає зазначеному просторовому домену сітки ERA5-Land, який охоплює переважну частину Одеської області (адміністративний центр — м. Одеса, 46°29'N, 30°44'E) та включає узбережжя Чорного моря і систему лиманів на півдні, степову зону у центральній та північній частинах. Термін не є тотожним адміністративним межам Одеської області і використовується виключно для позначення просторового домену аналізу.

Погодинні дані осадів (м/год) агреговано до суточних сум (мм/добу) шляхом підсумовування 24 годинних значень та переведення одиниць виміру. Дані завантажувались окремо для кожного року та об'єднувались у єдиний масив за допомогою бібліотеки xarray для Python.

Для верифікації результатів реаналізу використано дані метеостанції Одеса (ODESA_OBSERV, STAD: 400) з бази European Climate Assessment & Dataset (ECA&D). Станція розташована за координатами 46°26'N, 30°46'E на висоті 42 м над рівнем моря. Індeksi ETCCDI для станції отримано безпосередньо з розділу «Indices of Extremes» порталу ECA&D за той самий період 1991–2020 рр.

Найближча суходільна комірka ERA5-Land до метеостанції розташована на відстані 9,3 км (46,4°N, 30,7°E). Слід зазначити, що просторове зміщення між точками порівняння, а також різниця в характері підстильної поверхні (безпосередня близькість станції до акваторії моря та лиманів) можуть частково обумовлювати виявлені розбіжності в трендах інтенсивних опадів.

Розраховано десять стандартних індексів ETCCDI [4], що характеризують різні аспекти режиму опадів (табл. 1). Розрахунок виконано з використанням бібліотеки xclim для Python. Індeksi R95p та R99p розраховано відносно перцентилів, обчислених по всьому базовому періоду 1991–2020 рр.

Таблиця 1 – Індeksi ETCCDI, які використані у дослідженні
Table 1 – ETCCDI Indices Used in the Study

Індекс / Index	Визначення / Definition	Одиниці / Units
Rx1day	Максимальна добова сума опадів / Maximum 1-day precipitation amount	мм / mm
Rx5day	Максимальна сума опадів за 5 послідовних діб / Maximum 5-day precipitation amount	мм / mm
PRCPTOT	Річна сума опадів у дощові дні (≥ 1 мм) / Annual total wet-day precipitation	мм / mm
SDII	Середня інтенсивність опадів у дощові дні / Simple daily intensity index	мм/день / mm/day
R10mm	Кількість днів з опадами ≥ 10 мм / Number of heavy precipitation days	дні / days
R20mm	Кількість днів з опадами ≥ 20 мм / Number of very heavy precipitation days	дні / days
CDD	Максимальна тривалість сухого періоду (< 1 мм) / Maximum consecutive dry days	дні / days
CWD	Максимальна тривалість вологого періоду (≥ 1 мм) / Maximum consecutive wet days	дні / days
R95p	Кількість днів з опадами вище 95-го перцентилі / Days above 95th percentile	дні / days
R99p	Кількість днів з опадами вище 99-го перцентилі / Days above 99th percentile	дні / days

Для оцінювання статистичної значущості трендів використано непараметричний критерій Манна-Кендалла, який не вимагає нормального розподілу даних та є стійким до викидів, що робить його стандартним інструментом у кліматологічних дослідженнях [4, 5]. Величину трен-

ду оцінено за методом Сена (Sen's slope estimator). Рівень статистичної значущості прийнято $p < 0,05$; тренди з p у діапазоні 0,05–0,10 розглядались як такі, що наближаються до статистичної значущості. Трендовий аналіз виконано окремо для річних рядів та для холодного

(листопад–березень) і теплого (квітень–жовтень) сезонів. Просторовий аналіз трендів виконано для кожної суходільної комірки сітки ERA5-Land у межах домену.

Якість відтворення індексів ETCCDI реаналізом ERA5-Land оцінено шляхом порівняння з даними метеостанції Одеса за такими статистичними характеристиками: коефіцієнт кореляції Пірсона (R), зміщення (Bias = ERA5 – OBS) та середньоквадратична похибка (RMSE). Додатково порівняно тренди Sen's slope для обох наборів даних з метою оцінювання узгодженості кліматичного сигналу між реаналізом та наземними спостереженнями [18, 19].

4. РЕЗУЛЬТАТИ

Середні значення індексів ETCCDI для Одеського регіону за 1991–2020 рр., розраховані за даними ERA5-Land, характеризують кліматологічний фон екстремальних опадів у Північно-Західному Причорномор'ї (рис. 1, рис. 2).

Максимальна добова сума опадів (Rx1day) в середньому становить 67,4 мм при значному міжрічному розкиді — від 27,7 мм (мінімум) до 240,2 мм (максимум). Максимальна сума за п'ять послідовних діб (Rx5day) у середньому дорівнює 82,3 мм. Підвищені значення Rx1day у прибережній зоні узгоджуються з результатами [8], де встановлено що осередки екстремальних опадів над Україною у несезонні місяці концентруються переважно вздовж узбережжя Чорного та Азовського морів.

Річна сума опадів у дощові дні (PRCPTOT) становить у середньому 432,5 мм, що відповідає напівпосушливому кліматичному режиму регіону та узгоджується з даними метеостанції Одеса за ECA&D (447,5 мм). Для порівняння, у роботі [10] для південних районів України отримано близькі значення річних сум опадів за реаналізом ERA5, що підтверджує коректність використання ERA5-Land для регіону. Середня інтенсивність опадів у дощові дні (SDII) дорівнює 10,2 мм/день, що перевищує середньоєвропейське значення (~5–7 мм/день) та відображає конвективний характер опадів у теплий сезон, характерний для Причорноморського регіону [8].

Кількість днів з опадами ≥ 10 мм (R10mm) у середньому становить 11,6 дн/рік, з опадами ≥ 20 мм (R20mm) — 4,0 дн/рік. Порівняно з даними ECA&D для станції Одеса (R10mm = 13,4 дн/рік), ERA5-Land дещо занижує цей показник, що є типовою характеристикою сіткових продуктів реаналізу [18, 19].

Максимальна тривалість сухого періоду

(CDD) у середньому дорівнює 48,2 дні — найбільший серед усіх розрахованих індексів за тривалістю, що відображає виражену посушливість клімату регіону. Для порівняння, у роботі [6] для Південних Карпат середнє CDD становить 20–30 днів, тоді як для Середземноморського узбережжя сягає 60–80 днів; одержані значення для Одеського регіону займають проміжне положення, що відповідає перехідному характеру клімату Північно-Західного Причорномор'я. Максимальна тривалість вологого періоду (CWD) у середньому становить лише 2,3 дні, що свідчить про переривчастий характер опадових серій та підтверджує дефіцит тривалих вологих епізодів у регіоні.

Кількість днів з опадами вище 95-го перцентилу (R95p) становить у середньому 1,5 дн/рік, вище 99-го (R99p) — 0,3 дн/рік, що відповідає визначенню перцентильних порогів та свідчить про коректність розрахунку. Просторовий розподіл середніх значень індексів характеризується помітною неоднорідністю в межах досліджуваного домену: підвищені значення Rx1day та PRCPTOT спостерігаються у прибережній зоні та на заході регіону, тоді як CDD зростає у північному та східному напрямках (рис. 2). Ця просторова структура узгоджується із загальновідомим збільшенням континентальності клімату у напрямку від узбережжя Чорного моря вглиб суходолу [13, 14].

Результати трендового аналізу методом Манна-Кендалла для річних рядів індексів ETCCDI за 1991–2020 рр. наведено у табл. 2 та на рис. 2. Статистично значущих при стандартному рівні $p < 0,05$ трендів серед річних рядів не виявлено, що є характерним для аналізу 30-річних кліматичних рядів у регіонах з високою міжрічною мінливістю опадів [5, 14].

Найбільш значущим результатом річного аналізу є виражена, хоча й статистично незначуща при $p < 0,05$, тенденція до зменшення сумарних опадів у дощові дні (PRCPTOT: $-3,48$ мм/рік, $p = 0,064$). За 30 років це відповідає загальному зменшенню річної суми опадів приблизно на 104 мм, що є суттєвим для посушливого регіону. Подібні тенденції до зменшення PRCPTOT у Причорноморському регіоні відзначались і в роботі [7], де для південних станцій Румунії виявлено від'ємні тренди річних сум опадів, а також узгоджуються з прогнозованим зменшенням опадів у Середземноморському регіоні та суміжних територіях за сценаріями глобального потепління [14].

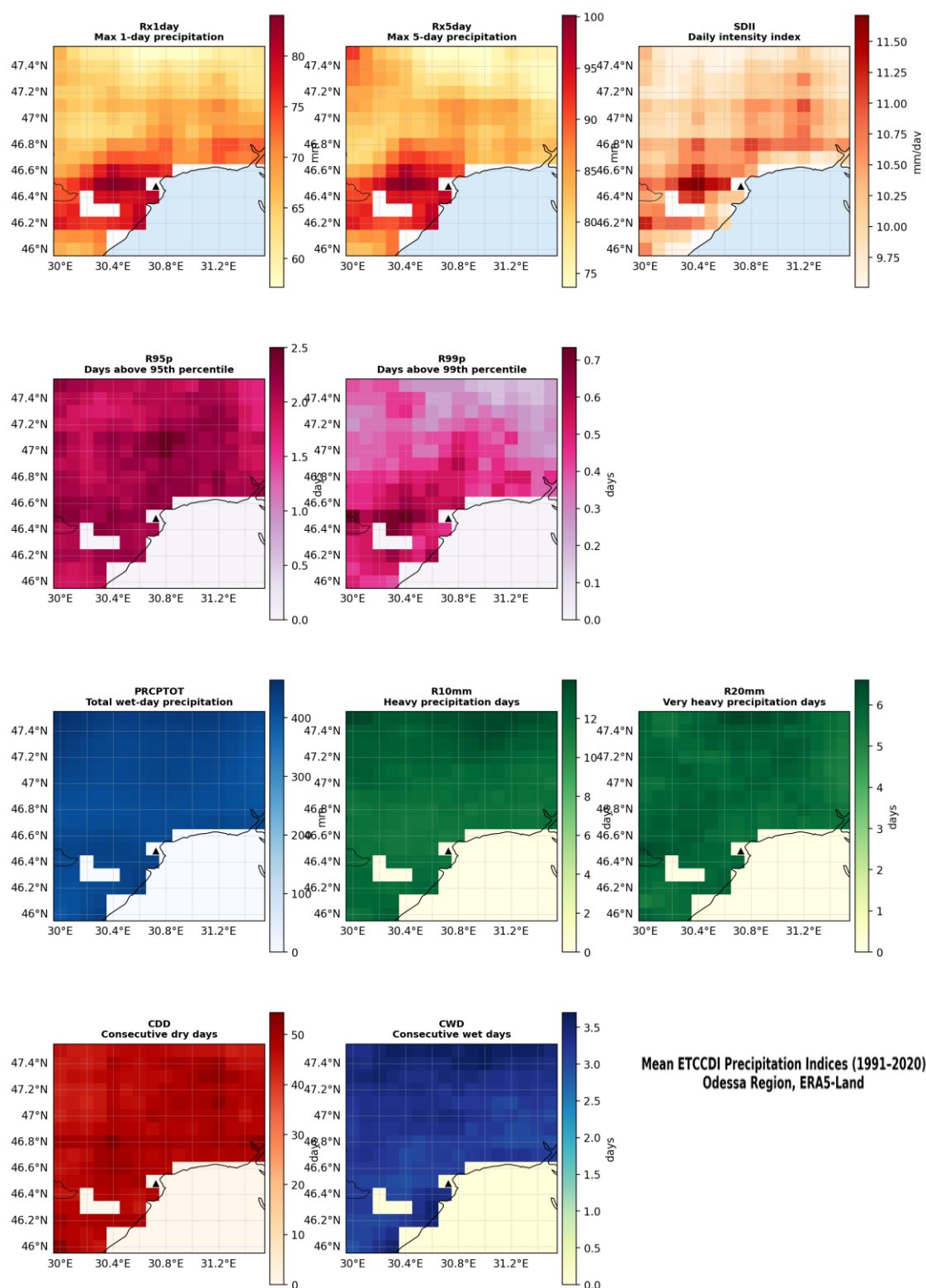


Рис. 1 – Просторовий розподіл середніх значень індексів ETCCDI за даними ERA5-Land для Одеського регіону (1991–2020): індекси інтенсивності (Rx1day, Rx5day, SDII), перцентильні індекси (R95p, R99p), індекси частоти та накопичення (PRCPTOT, R10mm, R20mm) та індекси тривалості (CDD, CWD). Трикутником позначено положення метеостанції Одеса (ECA&D); порожні комірки відповідають акваторії Чорного моря та лиманів у сітці ERA5-Land.

Fig. 1 – Spatial distribution of mean ETCCDI indices derived from ERA5-Land for the Odessa region (1991–2020): intensity indices (Rx1day, Rx5day, SDII), percentile-based indices (R95p, R99p), frequency and accumulation indices (PRCPTOT, R10mm, R20mm), and duration indices (CDD, CWD). The triangle marks the location of the Odessa meteorological station (ECA&D); empty grid cells correspond to the Black Sea and estuaries in the ERA5-Land grid.

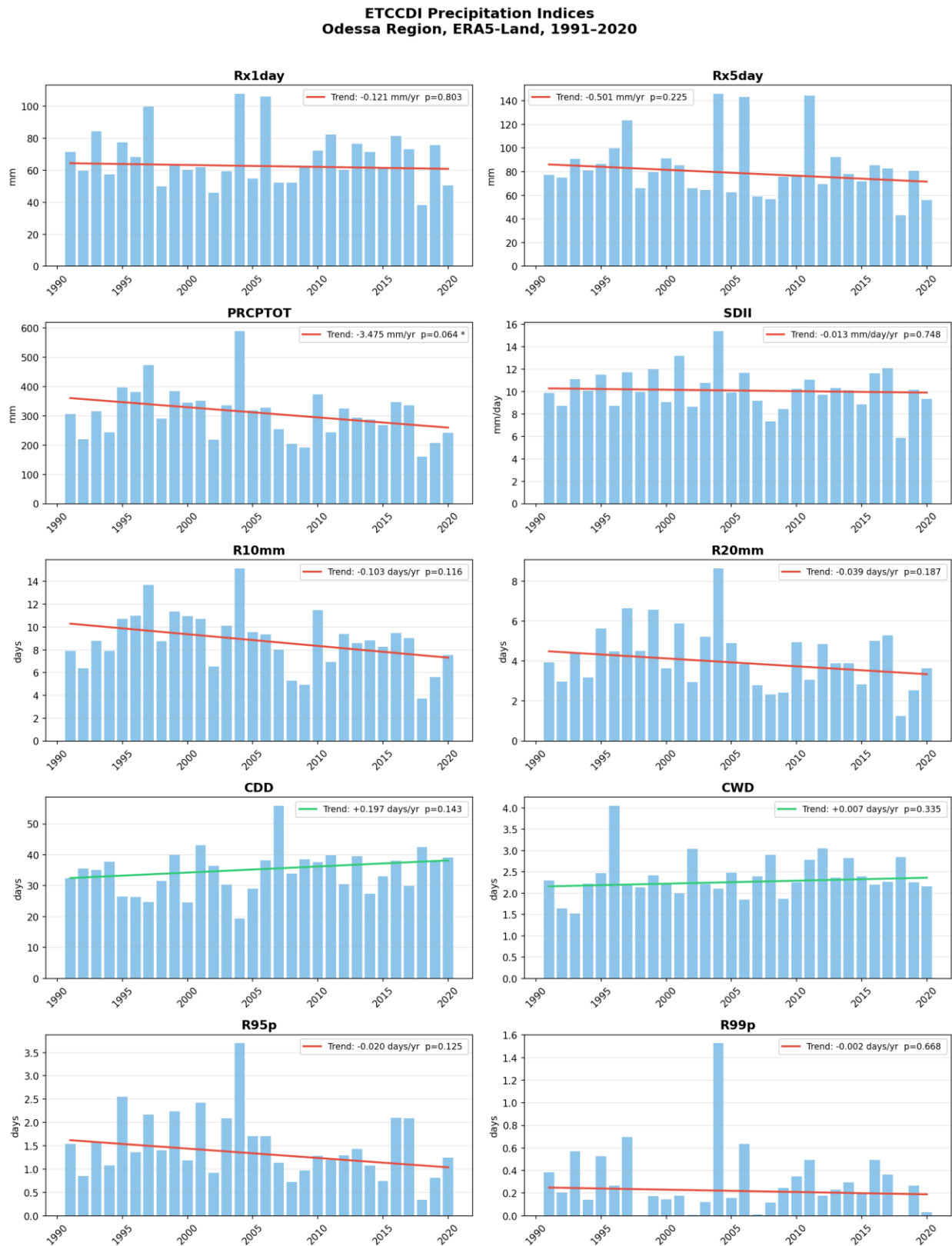


Рис. 2 – Річні ряди індексів ETCCDI за даними ERA5-Land для Одеського регіону (1991–2020). Столпчики — річні значення, усереднені по досліджуваному домену; лінії — тренди за методом Сена (червоний — від’ємний, зелений — додатний).

Зірочкою (*) позначено тренд на межі статистичної значущості ($p < 0.10$).

Fig. 2 – Annual ETCCDI precipitation indices derived from ERA5-Land for the Odessa region (1991–2020). Bars represent annual values averaged over the study domain; lines show Sen's slope trends (red — negative, green — positive).

Asterisk (*) denotes a trend approaching statistical significance ($p < 0.10$).

Таблиця 2 – Результати трендового аналізу річних рядів індексів ETCCDI (Mann-Kendall, 1991–2020)
Table 2 – Mann-Kendall Trend Analysis Results for Annual ETCCDI Indices (1991–2020)

Індекс	Нахил Сена	p-значення	Значущість
Rx1day	–0,121 мм/рік	0,803	—
Rx5day	–0,501 мм/рік	0,225	—
PRCPTOT	–3,475 мм/рік	0,064	~
SDII	–0,013 мм/день/рік	0,748	—
R10mm	–0,103 дн/рік	0,116	—
R20mm	–0,039 дн/рік	0,187	—
CDD	+0,197 дн/рік	0,143	—
CWD	+0,007 дн/рік	0,335	—
R95p	–0,020 дн/рік	0,125	—
R99p	–0,002 дн/рік	0,668	—

Примітка: ~ тренд на межі статистичної значущості ($0,05 < p < 0,10$); — тренд статистично незначущий ($p \geq 0,10$).

Для індексів частоти опадів — R10mm (–0,103 дн/рік, $p=0,116$) та R20mm (–0,039 дн/рік, $p=0,187$) — виявлено від'ємні тенденції, що свідчать про поступове зменшення кількості днів з помірно інтенсивними та сильними опадами. Аналогічні результати отримано в роботі [6] для Південних Карпат, де більшість індексів частоти опадів також демонструють від'ємні або нейтральні тренди за останні десятиліття, що свідчить про регіональний характер цього процесу.

Для індексів інтенсивності — Rx1day (–0,121 мм/рік, $p=0,803$) та SDII (–0,013 мм/день/рік, $p=0,748$) — тренди є незначущими та практично нульовими. Це означає, що, незважаючи на зменшення загальної кількості опадів, їхня середня інтенсивність у дощові дні суттєво не змінилась. Така картина — зменшення частоти опадів при збереженні інтенсивності — може відповідати характеристикам, що спостерігаються в регіонах із тенденцією до формування рис середземноморського типу клімату» [13, 14]. Водночас слід зазначити, що ERA5-Land може недооцінювати тренди інтенсивних опадів через просторове усереднення в межах комірки реаналізу [18, 19].

Для індексу максимальної тривалості сухого періоду (CDD) виявлено незначущу позитивну тенденцію (+0,197 дн/рік, $p=0,143$), що за 30 років відповідає збільшенню тривалості найдовшого сухого епізоду приблизно на 6 днів. Аналогічний сигнал подовження сухих серій характерний для всього Середземноморського регіону та Причорномор'я, що підтверджується як регіональними дослідженнями [6, 7], так і прогнозами МГЕЗК [14]. Для CWD тренд є практично

нульовим (+0,007 дн/рік, $p=0,335$), що свідчить про відсутність змін у тривалості вологих серій.

Для перцентильних індексів R95p (–0,020 дн/рік, $p=0,125$) та R99p (–0,002 дн/рік, $p=0,668$) тренди є від'ємними та статистично незначущими. Зменшення кількості днів з опадами вище 95-го та 99-го перцентилів при збереженні інтенсивності Rx1day може свідчити про зсув у розподілі екстремальних подій, однак для надійних висновків щодо цих змін 30-річного ряду є недостатньо — на що звертається увага і в роботі [5].

Загалом річний трендовий аналіз демонструє переважання від'ємного сигналу для більшості індексів опадів в Одеському регіоні за 1991–2020 рр., що узгоджується з загальною тенденцією до зменшення опадів Північно-Західного Причорномор'я та відповідає оцінкам регіональних кліматичних змін для Середземноморського та Причорноморського секторів [13, 14]. Відсутність статистичної значущості більшості трендів на рівні $p < 0,05$ пояснюється відносно коротким 30-річним рядом спостережень і значною міжрічною мінливістю опадів у регіоні, що є типовою характеристикою напівпосушливих зон [6, 7].

Сезонний аналіз виявив принципову асиметрію між холодним (листопад–березень) та теплим (квітень–жовтень) сезонами у характері трендів індексів ETCCDI за 1991–2020 рр. (рис. 3). Концентрація значущих кліматичних сигналів у теплому сезоні узгоджується з характером змін, що спостерігаються в регіонах через можливий вплив розширення субтропічного сухого поясу, і узгоджується з результатами досліджень для суміжних територій Румунії [7] та прогнозами МГЕЗК для Середземноморського регіону [14].

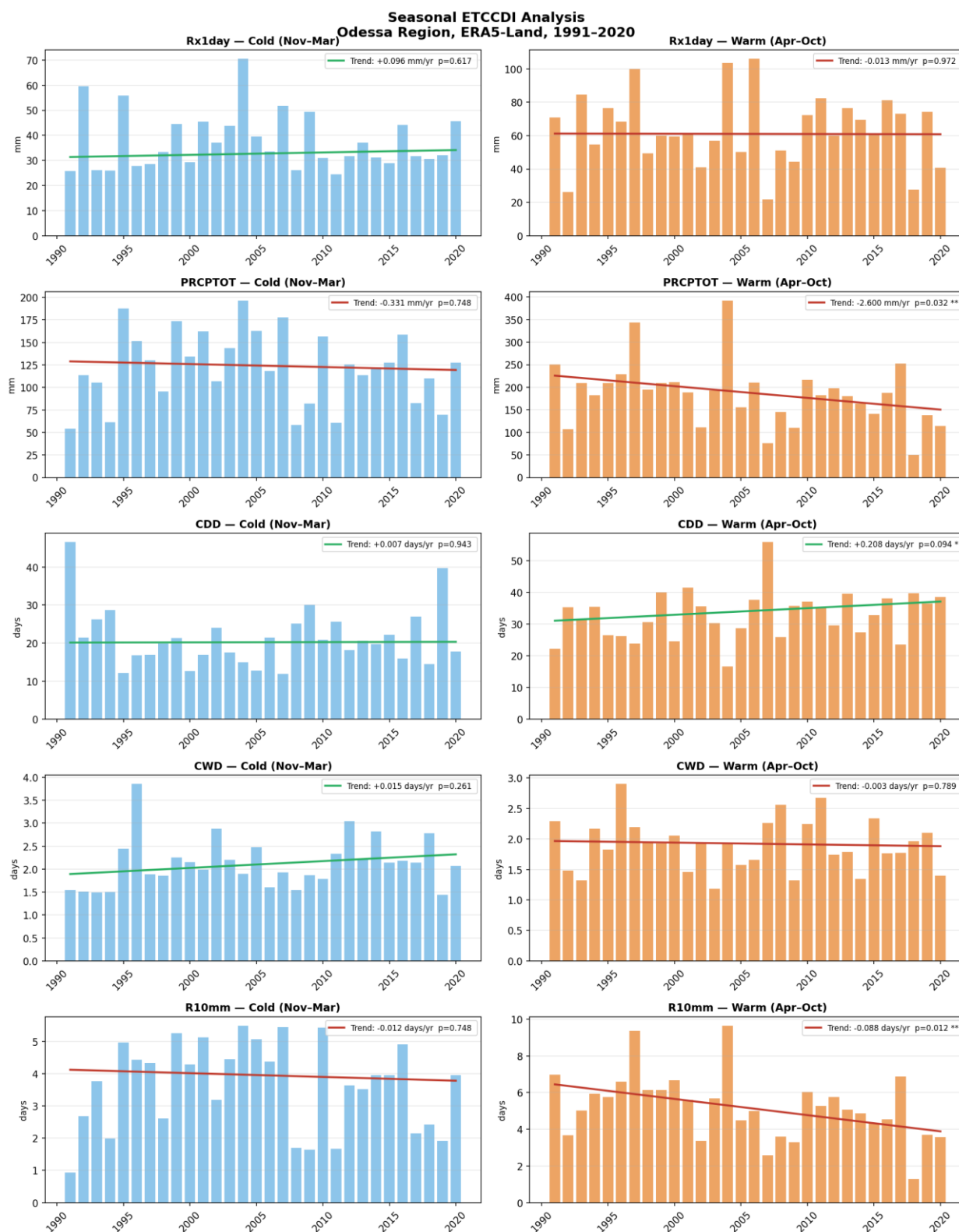


Рис. 3 – Сезонні індекси ETCCDI для Одеського регіону (ERA5-Land, 1991–2020): холодний сезон (листопад–березень, синій) та теплий сезон (квітень–жовтень, помаранчевий). Лінії — тренди за методом Сена; зірочками позначено статистичну значущість (* $p < 0,1$; ** $p < 0,05$).

Fig. 3 – Seasonal ETCCDI precipitation indices for the Odessa region (ERA5-Land, 1991–2020): cold season (November–March, blue) and warm season (April–October, orange). Lines show Sen's slope trends; asterisks denote statistical significance (* $p < 0,1$; ** $p < 0,05$).

У холодний сезон (листопад–березень) жодного статистично значущого тренду не виявлено для жодного з досліджуваних індексів. Тренди є практично нейтральними як для індексів кількості (PRCPTOT: $-0,331$ мм/рік, $p=0,748$), так і для індексів тривалості (CDD: $+0,007$ дн/рік, $p=0,943$; CWD: $+0,015$ дн/рік, $p=0,261$) та частоти (R10mm: $-0,012$ дн/рік, $p=0,748$). Стабільність холодносезонних опадів узгоджується з висновками роботи [8], де показано що більшість екстремальних опадових подій над Україною формується влітку та пов'язана з конвективними процесами, тоді як зимові опади визначаються великомасштабною адвекцією і є менш мінливими у часі. Результати роботи [12] також підтверджують що основні кліматичні зміни в Одеській області відбуваються переважно у теплий період року.

У теплому сезоні (квітень–жовтень) виявлено три статистично значущих або близьких до значущих сигнали, які формують узгоджену картину посушливості регіону.

По-перше, зафіксовано значуще зменшення сумарних опадів у дощові дні (PRCPTOT: $-2,60$ мм/рік, $p=0,032$). За 30 років це відповідає загальному зменшенню теплосезонних опадів приблизно на 78 мм, що є суттєвим для сільськогосподарського регіону з дефіцитом зволоження.

Подібне значуще зменшення літніх опадів виявлено у роботі [7] для прибережних станцій півдня Румунії, що свідчить про регіональний просторовий масштаб цього процесу. Зменшення теплосезонних опадів узгоджується також з прогнозами кліматичних моделей для Одеси на 2021–2050 рр., де передбачається формування сухого спекотного літа [13].

По-друге, встановлено значуще скорочення кількості днів з опадами ≥ 10 мм у теплий сезон (R10mm: $-0,088$ дн/рік, $p=0,012$). За 30 років це відповідає зменшенню кількості помірно інтенсивних опадових подій приблизно на 2,6 дні за сезон. Цей результат свідчить про зменшення не лише загальної суми теплосезонних опадів, а й частоти окремих значущих опадових подій. Аналогічні тенденції до зменшення частоти помірно інтенсивних опадів у літній період характерні для всього Середземноморського регіону та відзначаються в роботі [6] для Карпатського регіону, який також зазнає впливу зміни кліматичних режимів.

По-третє, виявлено тенденцію до збільшення тривалості сухих періодів у теплий сезон, яка є статистично незначущою при стандартному рівні $p < 0,05$, але вираженою (CDD: $+0,208$ дн/рік,

$p=0,094$). За 30 років це відповідає збільшенню тривалості найдовшого сухого епізоду у теплому сезоні приблизно на 6 днів. Подовження сухих серій у теплий сезон є одним із найбільш надійних і широко задокументованих сигналів кліматичних змін у Середземноморському та Причорноморському регіонах [6, 7, 14]. Відповідно до оцінок МГЕЗК [14], зростання тривалості посух у теплий сезон є одним із найбільш ймовірних наслідків потепління для регіонів, що межують із Середземноморським кліматичним поясом, до яких належить Північно-Західне Причорномор'я.

Важливо зазначити, що всі три виявлені значущі сигнали є взаємоузгодженими та формують єдину картину: зменшення загальної суми опадів теплому сезону відбувається за рахунок скорочення кількості помірно інтенсивних подій та одночасного подовження сухих міжопадових інтервалів. Відсутність значущих змін для Rx1day у теплий сезон ($-0,013$ мм/рік, $p=0,972$) при зменшенні PRCPTOT та R10mm може свідчити про зміни у частоті, а не інтенсивності опадових подій — тобто опади стають рідшими, але не обов'язково слабшими. Ця особливість потребує додаткового вивчення з використанням довгих рядів спостережень та верифікації за даними метеостанцій [10, 11].

Декадний просторовий аналіз дозволяє виявити не лише наявність тренду, а й його просторову еволюцію у часі - тобто визначити які саме частини регіону зазнають найбільш виражених змін та чи є ці зміни лінійними або нелінійними протягом досліджуваного періоду.

Для декадного просторового аналізу обрано шість індексів з десяти розрахованих, які репрезентують усі основні аспекти режиму опадів та забезпечують найбільш інформативну картину просторово-часових змін:

1. PRCPTOT - ключовий інтегральний індекс, що показує загальну суму опадів; демонструє найбільш виражений річний тренд ($p=0,064$)

2. Rx1day - індекс інтенсивності екстремальних подій; важливий через розходження між ERA5-Land та станційними даними

3. R10mm - індекс частоти помірно інтенсивних опадів; показує значущий тренд у теплому сезоні ($p=0,012$)

4. CDD - індекс тривалості сухих серій; демонструє тенденцію до зростання у теплому сезоні ($p=0,094$)

5. CWD - для порівняння з CDD та оцінки змін у тривалості вологих серій

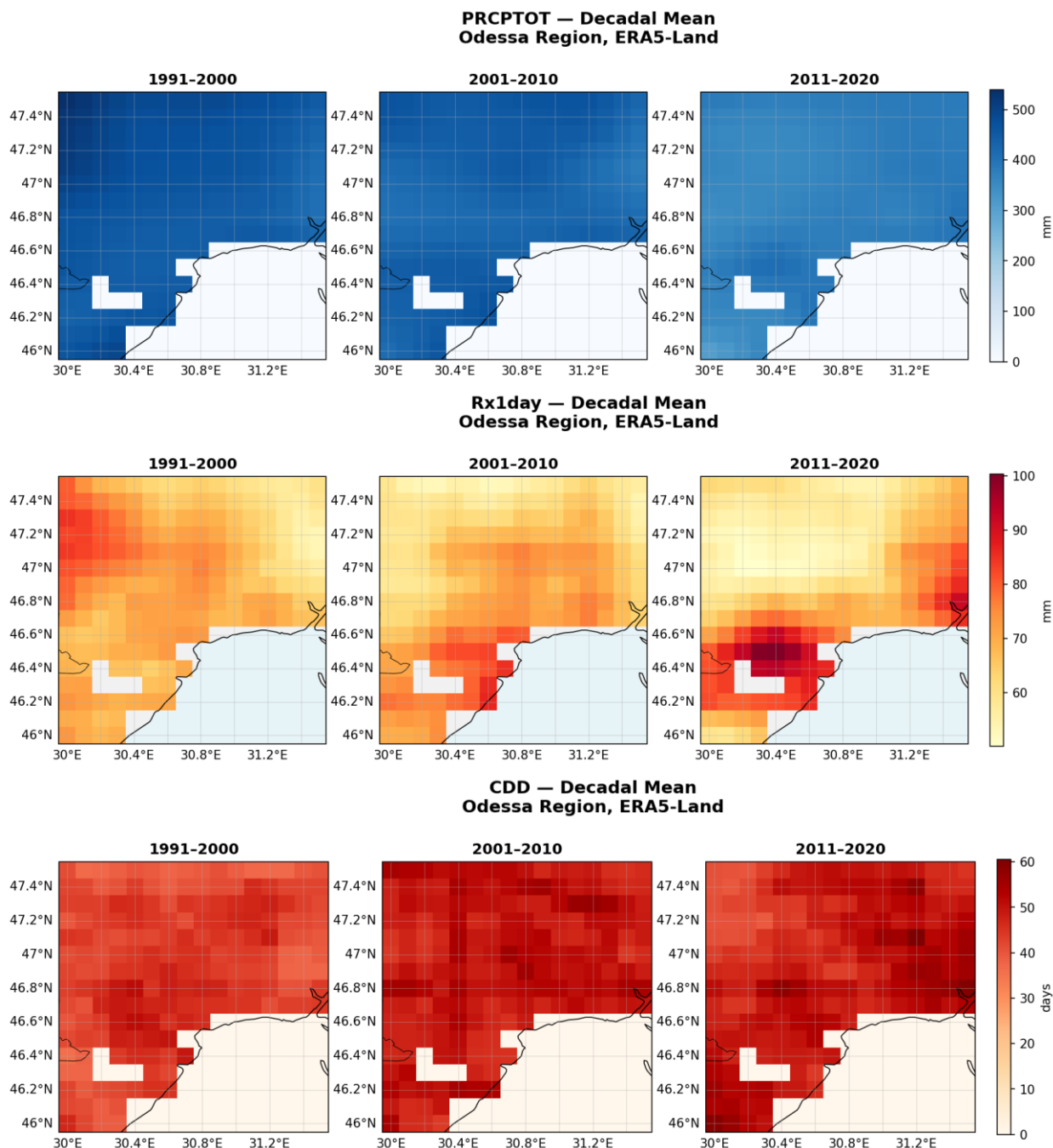
6. R95p - перцентильний індекс екстремальних опадів; характеризує зміни у частоті рідкісних подій.

Не включено: Rx5day (висока кореляція з Rx1day), SDII (низька просторова варіабельність), R20mm (мала кількість подій, нестійкі оцінки), R99p (екстремально рідкісні події, недостатньо для декадного аналізу).

Декадний аналіз просторового розподілу ше-

сти вибраних індексів ETCCDI дозволяє виявити еволюцію режиму опадів в Одеському регіоні на субперіодному рівні та оцінити просторову неоднорідність кліматичних змін у межах досліджуваного домену (рис. 4).

Декадний аналіз просторового розподілу шести вибраних індексів ETCCDI дозволяє виявити еволюцію режиму опадів в Одеському регіоні на субперіодному рівні (рис. 4).



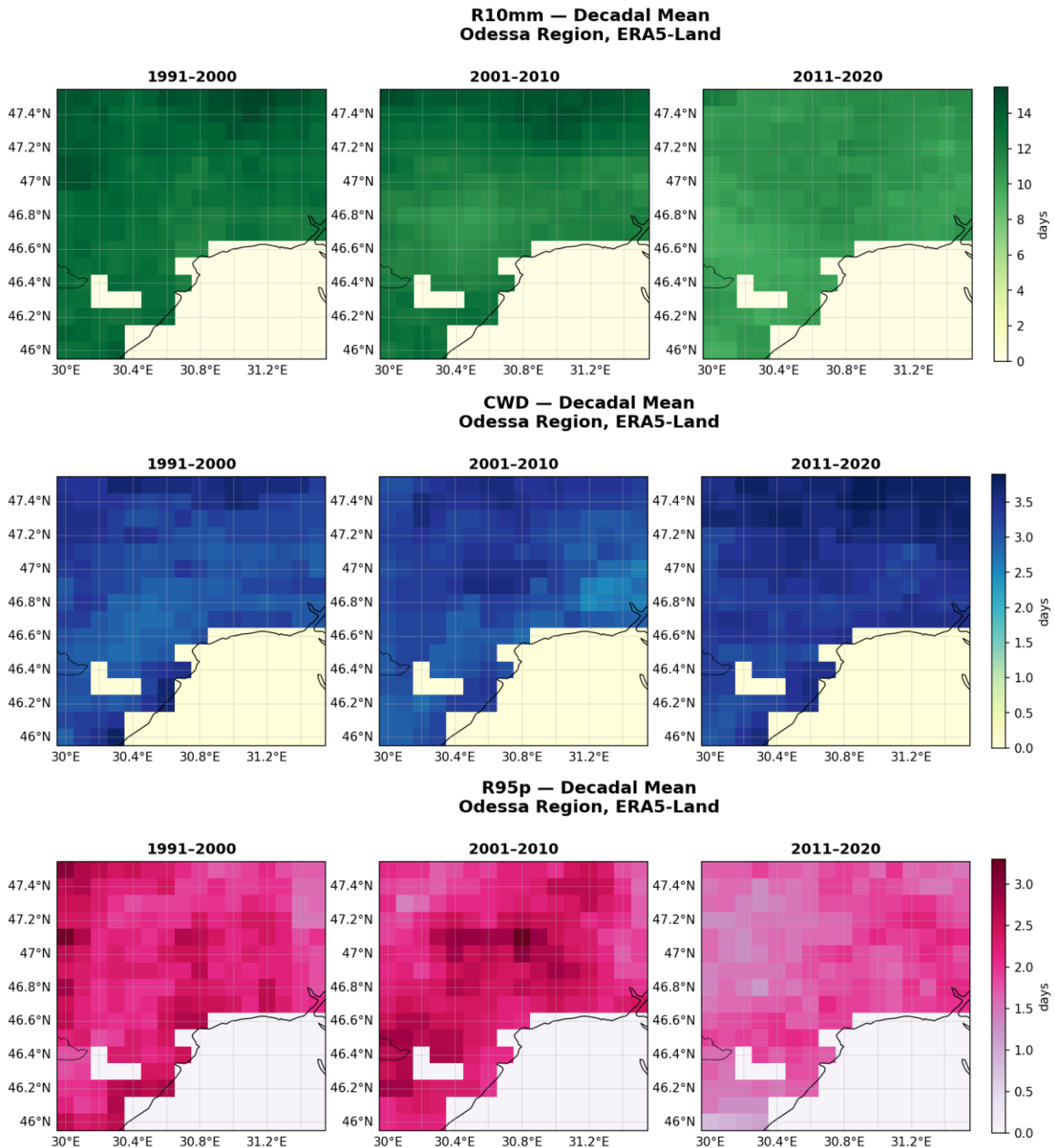


Рис. 4 – Просторовий розподіл вибраних індексів ETCCDI (PRCPTOT, Rx1day, R10mm, CDD, CWD, R95p) для Одеського регіону (ERA5-Land, 0,1°) у розрізі трьох суміжних десятиріч: 1991–2000, 2001–2010 та 2011–2020 рр.

Рисунок ілюструє поступове зменшення PRCPTOT та R10mm і збільшення CDD переважно у північній та центральній частинах регіону при відносній стабільності прибережної зони Чорного моря.

Fig. 4 – Spatial distribution of selected ETCCDI indices (PRCPTOT, Rx1day, R10mm, CDD, CWD, R95p) over the Odessa region (ERA5-Land, 0.1°) for three consecutive decades: 1991–2000, 2001–2010, and 2011–2020.

The figure illustrates a progressive decrease in PRCPTOT and R10mm and an increase in CDD predominantly in the northern and central parts of the region, with relative stability in the Black Sea coastal zone.

Індекси накопичення та частоти опадів (PRCPTOT, R10mm) демонструють узгоджену картину прогресуючого зменшення від першого (1991–2000) до третього (2011–2020) десятиріччя на більшій частині регіону. Просторова однорідність цього сигналу свідчить про регіональний, а

не локальний характер процесу, з найбільш вираженим зменшенням у північній та центральній частинах домену і відносною стабільністю прибережної зони. Ця просторова структура узгоджується з результатами роботи [7], де для суміжних районів Румунії також виявлено більш

виражене зменшення опадів у континентальній частині порівняно з прибережною зоною.

Індекс максимальних добових опадів (Rx1day) характеризується найбільшою просторовою неоднорідністю та міждекадною мінливістю. Характерною рисою є зміщення зони підвищених значень від північної частини домену у першому десятиріччі до прибережної смуги у третьому, що може бути пов'язане з посиленням конвективних процесів над прибережною зоною Чорного моря в умовах підвищення температури поверхні моря [8, 14].

Кількість днів з опадами ≥ 10 мм демонструє стійке просторово рівномірне зменшення від першого до третього десятиріччя практично на всій території регіону. Просторова однорідність цього сигналу свідчить про те, що зменшення частоти помірно інтенсивних опадів є регіональним процесом, а не локальним явищем, що підтверджується значущим від'ємним трендом у теплому сезоні.

Індекс тривалості сухих серій (CDD) демонструє поступове збільшення переважно у північно-східній частині регіону при відносній стабільності прибережної зони, що може свідчити про зростаючий вплив морської складової на зволоження прибережної смуги [13, 14].

Максимальна тривалість вологих серій (CWD) залишається стабільно низькою протягом усього періоду дослідження без чітко вираженої міждекадної тенденції, що узгоджується з відсутністю значущого річного тренду для цього індексу.

Для R95p спостерігається зменшення у більшості комірок регіону з найбільш вираженим сигналом у центральній частині домену, тоді як окремі прибережні комірки у третьому десятиріччі демонструють протилежну тенденцію, що може свідчити про зростання інтенсивності окремих екстремальних подій на тлі загального зменшення їхньої частоти [8].

Загалом декадний аналіз підтверджує та просторово деталізує висновки річного та сезонного трендового аналізу: найбільш виражені ознаки посушливості охоплюють північну та центральну частини регіону, тоді як прибережна зона Чорного моря характеризується меншою міждекадною мінливістю більшості індексів через вплив моря.

Просторовий аналіз трендів методом Манна-Кендалла для кожної суходільної комірки сітки ERA5-Land (рис. 5) дозволяє виявити внутрішньорегіональну неоднорідність кліматичного сигналу та визначити зони з найбільш вираженими змінами режиму опадів в Одеському регіо-

ні за 1991–2020 рр. Просторова візуалізація трендів із розрізненням за знаком та статистичною значущістю ($p < 0,1$) є стандартним підходом у регіональній кліматології [5, 6] та дозволяє отримати більш детальну картину порівняно з регіонально усередненими рядами.

Для просторового трендового аналізу обрано чотири індекси, що репрезентують ключові аспекти режиму опадів: PRCPTOT як інтегральний показник річної суми опадів з найбільш вираженим регіональним трендом ($p = 0,064$); Rx1day як індикатор інтенсивності екстремальних подій, що демонструє принципове розходження між ERA5-Land та станційними даними; R10mm як показник частоти помірно інтенсивних опадів зі значущим трендом у теплому сезоні ($p = 0,012$); та CDD як індикатор тривалості сухих серій з вираженою тенденцією до зростання ($p = 0,094$). Разом ці чотири індекси охоплюють три незалежні виміри режиму опадів — кількість, частоту та тривалість сухих серій — і є найбільш інформативними з точки зору виявлених кліматичних змін у регіоні.

Просторовий розподіл трендів річної суми опадів характеризується найбільш однорідним та статистично значущим від'ємним сигналом серед усіх аналізованих індексів. Значущий від'ємний тренд (темно-синій) охоплює переважну більшість суходільних комірок домену, з максимальним від'ємним нахилом Сена у північній та центральній частинах регіону ($-4,0$ до $-5,5$ мм/рік). Прибережна зона та окремі комірки у південно-західній частині домену демонструють незначущий від'ємний тренд (блакитний). Просторова однорідність сигналу для PRCPTOT свідчить про те, що зменшення річної суми опадів є регіональним процесом, характерним для всього Північно-Західного Причорномор'я, а не локальним явищем. Аналогічна просторова структура з переважанням від'ємних трендів PRCPTOT виявлена у роботі [7] для суміжного регіону півдня Румунії.

Просторовий розподіл трендів максимальних добових опадів є найбільш неоднорідним серед аналізованих індексів та демонструє виражену просторову диференціацію. Значущий від'ємний тренд переважає у північній частині домену (нахил Сена $-0,4$ до $-0,6$ мм/рік), тоді як у прибережній зоні та в окремих південних комірках спостерігаються незначущі позитивні або нейтральні тренди. Ця просторова структура є методологічно важливою у контексті верифікації: метеостанція Одеса, розташована у прибережній зоні, фіксує значущий зростаючий тренд Rx1day ($+0,90$ мм/рік, $p = 0,010$), що узгоджується з прос-

торовою картою — прибережні комірки ERA5-Land також демонструють менш виражений від'ємний або нейтральний тренд порівняно з північною частиною регіону. Посилення інтенсивнос-

ті екстремальних опадів у прибережній зоні може бути пов'язане з підвищенням температури поверхні Чорного моря та зростанням конвективної нестабільності [8, 14].

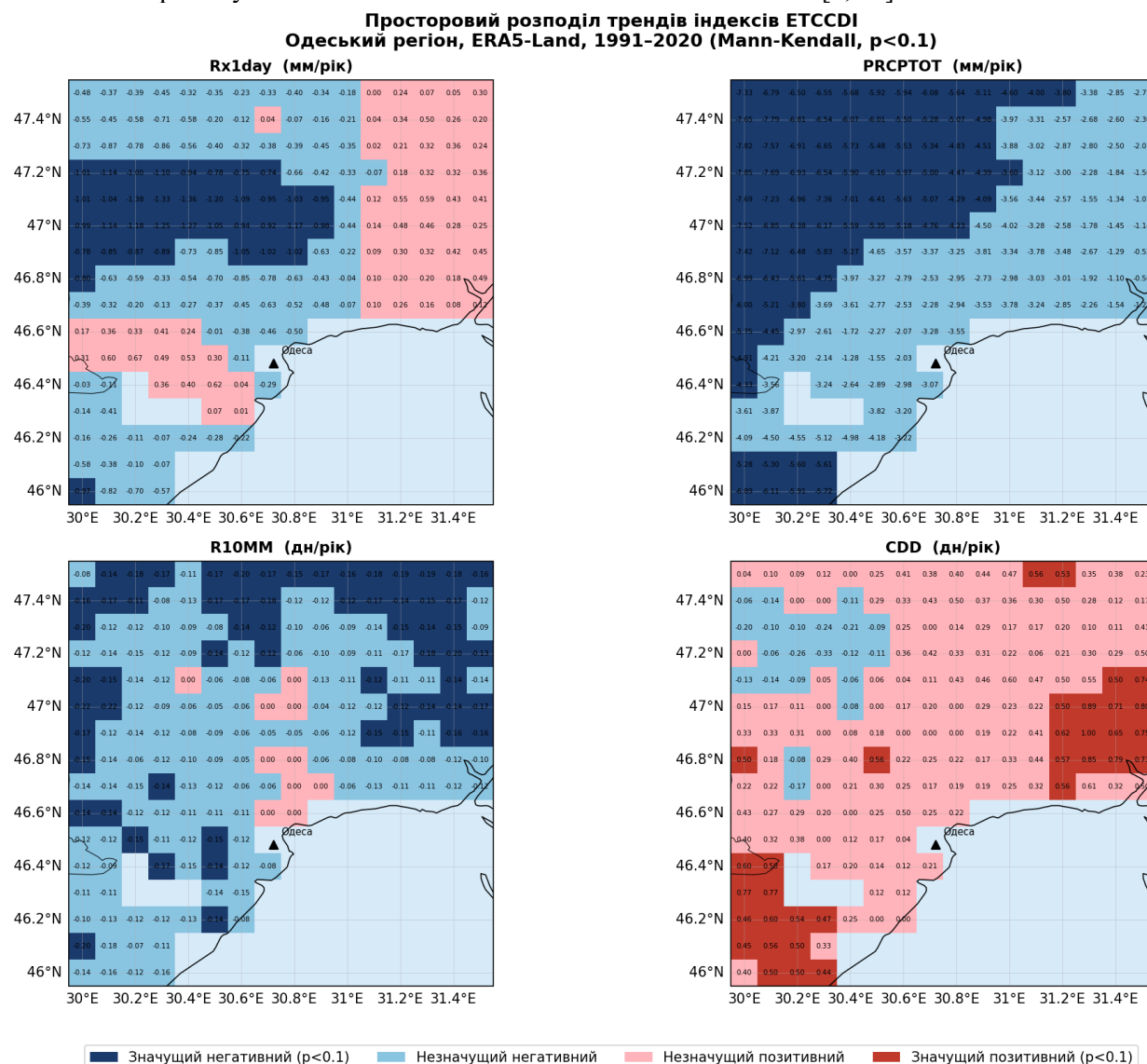


Рис. 5 – Просторовий розподіл трендів Sen's slope індексів ETCCDI за даними ERA5-Land (1991–2020).

Колір відображає знак та статистичну значущість тренду (критерій Манна-Кендалла, $p < 0.1$). Цифри на комірках — величина тренду (мм/рік або дн/рік). Трикутником позначено положення метеостанції Одеса-обсерваторія. Значущий від'ємний тренд PRCPTOT та R10mm охоплює більшість суходільних комірок домену; для CDD виражений позитивний тренд зосереджений у північно-східній частині регіону, тоді як прибережна зона демонструє нейтральні або незначущі значення.

Fig. 5 – Spatial distribution of Sen's slope for selected ETCCDI indices derived from ERA5-Land (1991–2020). Colours indicate the sign and statistical significance of the trend (Mann-Kendall test, $p < 0.1$). Values shown in each grid cell represent the trend magnitude (mm/yr or days/yr). The triangle marks the location of the Odessa meteorological station. Significant negative trends in PRCPTOT and R10mm cover most of the land grid cells; for CDD, a pronounced positive trend is concentrated in the north-eastern part of the region, while the coastal zone shows neutral or insignificant values.

Просторовий розподіл трендів кількості днів з опадами ≥ 10 мм характеризується переважанням значущого від'ємного сигналу у північній та центральній частинах домену. Нахил Сена становить -0.10 до -0.15 дн/рік для більшості комірок з значущим трендом. Прибережна зона та окремі комірки у південно-східній частині регіо-

ну демонструють незначущі тренди близькі до нуля. Просторова структура R10mm є близькою до PRCPTOT, що свідчить про те, що зменшення річної суми опадів відбувається переважно за рахунок скорочення кількості помірно інтенсивних подій, а не зміни їхньої середньої інтенсивності. Цей висновок узгоджується з відсутністю

значущого тренду для SDII на регіональному рівні.

Просторовий розподіл трендів тривалості сухих серій є найбільш неоднорідним серед усіх аналізованих індексів та демонструє чітку просторову диференціацію між внутрішніми та прибережними районами. Значущий позитивний тренд (червоний) зосереджений у північно-східній частині домену з нахилом Сена +0,3 до +0,5 дн/рік, тоді як незначущий позитивний тренд (рожевий) охоплює центральну частину регіону. Прибережна зона Чорного моря демонструє незначущі від'ємні або нейтральні значення, що може свідчити про модифікуючий вплив морської поверхні на тривалість сухих серій у прибережній смузі. Подібна просторова диференціація трендів CDD між прибережними та континентальними районами відзначається і в роботі [6] для Карпатського регіону, де морська та гірська складові суттєво модифікують регіональний кліматичний сигнал. Зростання тривалості сухих серій у внутрішніх районах Одеського регіону узгоджується з прогнозованим збільшенням частоти та тривалості посух для півдня України за сценаріями глобального потепління [13, 14].

Загалом просторовий аналіз трендів виявляє виражену внутрішньорегіональну диференціацію кліматичного сигналу в Одеському регіоні. Спільною рисою для більшості індексів є послаблення від'ємного сигналу або навіть його зміна на позитивний у прибережній зоні Чорного моря порівняно з внутрішніми районами. Це свідчить про важливу роль морської поверхні у формуванні регіональних особливостей змін режиму опадів у Північно-Західному Причорномор'ї та підкреслює необхідність просторово деталізованих досліджень для коректної оцінки регіональних кліматичних ризиків [8, 13, 14].

Верифікація індексів ETCCDI, розрахованих за даними реаналізу ERA5-Land, здійснена шляхом їх порівняння з відповідними індексами метеостанції Одеса (ODESA_OBSERV, STAIID: 400) з бази ECA&D за спільний період 1991–2020 рр. Порівняння проводилось між даними метеостанції Одеса та найближчою суходільною коміркою ERA5-Land (46,4°N, 30,7°E, відстань 9,3 км від центру міста), оскільки комірки над акваторією Чорного моря та лиманів не містять даних у продукті ERA5-Land. Слід зазначити що просторове зміщення між точками порівняння, а також різниця в характері підстильної поверхні – безпосередня близькість метеостанції до акваторії моря та лиманів порівняно з суходільною коміркою реаналізу — можуть частково обумов-

лювати виявлені розбіжності, зокрема для індексів інтенсивних опадів RX1DAY та SDII [11, 18, 19]. Результати верифікації наведено у табл. 3 та на рис. 6.

Індекси накопичених опадів. ERA5-Land задовільно відтворює міжрічну мінливість річної суми опадів у дощові дні: для PRCPTOT кореляція з даними станції становить $R=0,45$ ($p=0,012$), що є статистично значущим результатом для 30-річного ряду. Зміщення (Bias) для PRCPTOT є відносно невеликим (–15,1 мм або –3,4%), що свідчить про задовільну відтворюваність середнього рівня річних опадів реаналізом. RMSE становить 132,7 мм, що відображає значну міжрічну мінливість опадів у регіоні, яку реаналіз не завжди відтворює синхронно зі станційними даними. Для R10mm кореляція є найвищою серед усіх верифікованих індексів — $R=0,51$ ($p=0,004$), що свідчить про задовільне відтворення ERA5-Land міжрічної мінливості частоти помірно інтенсивних опадів. Зміщення для R10mm становить –1,8 дн/рік (–13,4%), тобто ERA5-Land дещо занижує кількість днів з опадами ≥ 10 мм порівняно зі станцією, що є типовою характеристикою сіткових продуктів реаналізу внаслідок просторового усереднення в межах комірки [18, 19].

Індекси інтенсивності. Для RX1DAY виявлено принципове розходження між реаналізом та станційними даними як за абсолютними значеннями, так і за характером міжрічної мінливості. ERA5-Land систематично завищує максимальні добові опади (Bias = +35,5 мм або +79%), при цьому кореляція між рядами є від'ємною ($R=-0,301$, $p=0,106$). Це означає що роки з екстремально високими добовими опадами за даними станції не збігаються з роками максимальних значень ERA5-Land. Таке розходження є відомою характеристикою реаналізів при відтворенні точкових екстремумів опадів — просторове усереднення в межах комірки $0,1^\circ$ призводить до перерозподілу інтенсивних конвективних подій у часі та просторі [18, 19]. Для SDII ERA5-Land також систематично завищує середню інтенсивність опадів у дощові дні (Bias = +3,1 мм/день або +44%), а кореляція є практично нульовою ($R=0,043$, $p=0,821$), що підтверджує відому обмеженість реаналізів у відтворенні точкових характеристик інтенсивності опадів [11, 18].

Індекс тривалості сухих серій. Для CDD кореляція між ERA5-Land та станційними даними є слабкою ($R=0,108$, $p=0,568$), а зміщення становить +11,9 дн/рік (+33%), тобто реаналіз систематично переоцінює тривалість сухих серій порівняно зі станцією. Це може бути пов'язане як з

різницею у підстильній поверхні (суходіл vs. прибережна зона), так і з особливостями відтворення ERA5-Land дрібних опадових подій (<1 мм), які фіксуються станцією але можуть не відтворюватись реаналізом у конкретній комірці [19].

Порівняння трендів ERA5-Land та станційних даних. Порівняння трендів Sen's slope між ERA5-Land та метеостанцією Одеса (рис. 6) виявило узгодженість напрямку тренду лише для R10mm та CDD — обидва набори даних показують від'

ємну тенденцію для R10mm та позитивну для CDD, хоча величини трендів суттєво різняться. Для PRCPTOT та SDII тренди розходяться за знаком: ERA5-Land показує від'ємну тенденцію, тоді як станційні дані — позитивну, хоча обидва тренди є статистично незначущими. Найбільш принциповим є розходження для RX1DAY: станція фіксує значущий зростаючий тренд (+0,90 мм/рік, $p=0,010$), тоді як ERA5-Land демонструє незначущий від'ємний тренд (−0,29 мм/рік, $p=0,721$).

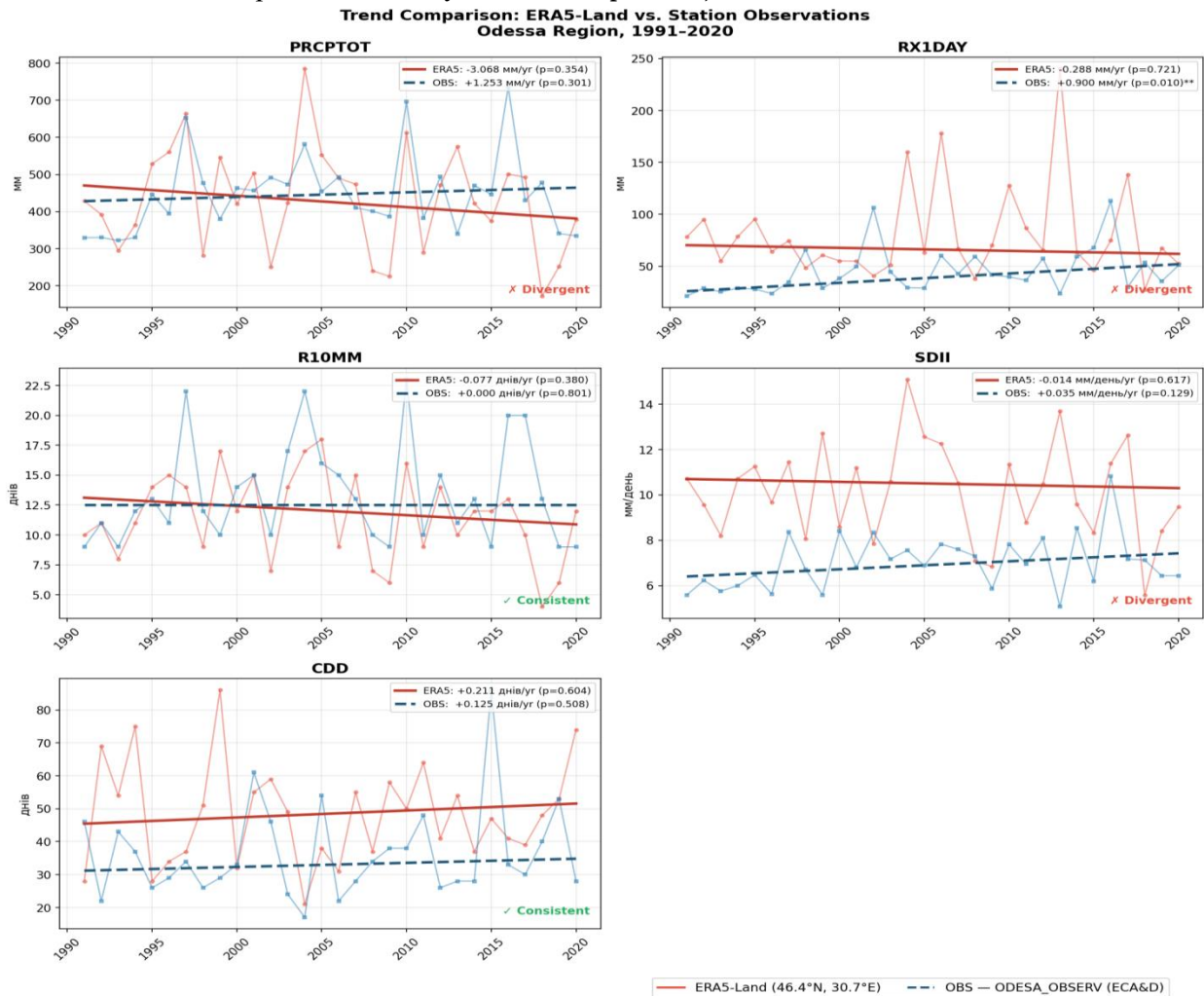


Рис. 6 – Тренди за методом Сена для вибраних індексів ETCCDI, розрахованих за даними ERA5-Land (червона суцільна лінія) та спостереженнями метеостанції ODESA_OBSERV, ECA&D (синя пунктирна лінія) за 1991–2020 рр.

Нахил Сена та р-значення наведено у легенді. Позначки (✓/✗) відображають узгодженість напрямку тренду між двома наборами даних. Принципове розходження знаків тренду RX1DAY — зростаючий значущий тренд за даними станції (+0,90 мм/рік, $p=0,010$) при незначущому від'ємному тренді ERA5-Land — є одним із ключових результатів роботи і свідчить про обмеження реаналізу у відтворенні точкових екстремумів опадів у прибережній зоні.

Fig. 6 – Mann-Kendall trend lines for selected ETCCDI indices derived from ERA5-Land (red solid) and station observations at ODESA_OBSERV, ECA&D (blue dashed) for 1991–2020. Sen's slope and p-values are shown in the legend.

Trend consistency (✓/✗) indicates agreement in trend direction between the two datasets.

The opposing trend signs for RX1DAY — a significant increasing trend at the station (+0.90 mm/yr, $p=0.010$) versus an insignificant negative trend in ERA5-Land — represent one of the key findings of this study, indicating limitations of the reanalysis in capturing point-scale precipitation extremes in the coastal zone.

Таблиця 3 – Верифікація індексів ETCCDI: ERA5-Land vs. метеостанція Одеса (ECA&D), 1991–2020
Table 3 – Validation of ETCCDI indices: ERA5-Land vs. Odessa meteorological station (ECA&D), 1991–2020

Індекс / Index	ERA5-Land	OBS (ECA&D)	Bias	RMSE	R	p
PRCPTOT, мм / mm	432,5	447,5	-15,1	132,7	0,451	0,012
RX1DAY, мм / mm	80,6	45,1	+35,5	66,2	-0,301	0,106
R10MM, дн / days	11,6	13,4	-1,8	4,3	0,509	0,004
SDII, мм/день / mm/day	10,2	7,0	+3,1	3,9	0,043	0,821
CDD, дн / days	48,2	36,2	+11,9	22,8	0,108	0,568

Примітка: Bias = ERA5-Land – OBS; R — коефіцієнт кореляції Пірсона;

p — рівень значущості кореляції; RMSE — середньоквадратична похибка.

Note: Bias = ERA5-Land – OBS; R — Pearson correlation coefficient;

p — significance level of correlation; RMSE — root mean square error.

Цей результат є важливим методологічним висновком: ERA5-Land не відтворює спостережуваного посилення максимальних добових опадів у прибережній зоні Одеського регіону, що підтверджується і просторовим аналізом трендів (розд. 4.5), де прибережні комірки демонструють менш виражений від'ємний або нейтральний тренд Rx1day порівняно з внутрішніми районами. Аналогічні обмеження ERA5 та ERA5-Land у відтворенні трендів екстремальних опадів для окремих станцій відзначаються і в роботах [10, 11, 18, 19].

Загалом верифікація показує що ERA5-Land є задовільним інструментом для аналізу просторово усереднених характеристик режиму опадів та їх міжрічної мінливості в Одеському регіоні, зокрема для індексів накопичених опадів (PRCPTOT, R10mm). Водночас реаналіз має суттєві обмеження у відтворенні точкових характеристик інтенсивних та екстремальних опадів (RX1DAY, SDII), що необхідно враховувати при інтерпретації результатів просторового трендового аналізу для цих індексів.

5. ВИСНОВКИ

1. Кліматологічні характеристики індексів ETCCDI для Одеського регіону за 1991–2020 рр. відповідають напівпосушливому перехідному клімату Північно-Західного Причорномор'я, а їх просторовий розподіл характеризується неоднорідністю з підвищеними значеннями опадових індексів у прибережній зоні та зростанням CDD у північному та східному напрямках.

2. Річний трендовий аналіз виявив статистично незначущу при стандартному рівні $p < 0,05$, але виражену тенденцію до зменшення річної суми опадів (PRCPTOT: $-3,48$ мм/рік, $p = 0,064$). Решта індексів демонструє від'ємні тенденції без досягнення статистичної значущості, що пояснюється відносно коротким 30-річним рядом і значною міжрічною мінливістю опадів у регіоні.

3. Сезонна декомпозиція трендів виявила принципову асиметрію між холодним та теплим

сезонами: у холодний сезон (листопад–березень) значущих трендів не виявлено, тоді як у теплому сезоні (квітень–жовтень) зафіксовано три статистично значущих або близьких до значущих сигнали - зменшення PRCPTOT ($-2,60$ мм/рік, $p = 0,032$), скорочення R10mm ($-0,088$ дн/рік, $p = 0,012$) та збільшення CDD ($+0,208$ дн/рік, $p = 0,094$), що може вказувати на розширення субтропічного сухого поясу над Причорноморським регіоном.

4. Декадний просторовий аналіз підтвердив прогресуюче зменшення PRCPTOT та R10mm від першого (1991–2000) до третього (2011–2020) десятиріччя на більшій частині регіону, з найбільш вираженим сигналом у північній та центральній частинах домену. Прибережна зона Чорного моря характеризується меншою міждекадною мінливістю більшості індексів, що свідчить про модифікуючий вплив морської поверхні на режим опадів у прибережній смузі.

5. Просторовий аналіз трендів методом Манна-Кендалла виявив виражену внутрішньорегіональну диференціацію кліматичного сигналу. Значущий від'ємний тренд PRCPTOT охоплює більшість суходільних комірок домену, тоді як для CDD виявлено значущий позитивний тренд у північно-східній частині регіону. Для Rx1day просторовий розподіл трендів неоднорідний — значущий від'ємний сигнал переважає у північній частині, тоді як прибережна зона демонструє нейтральні або незначущі тренди.

6. Верифікація за даними ECA&D показала задовільну узгодженість ERA5-Land з наземними спостереженнями для індексів накопичених опадів (PRCPTOT: $R = 0,45$, $p = 0,012$; R10MM: $R = 0,51$, $p = 0,004$) при незначному від'ємному зміщенні (Bias = $-15,1$ мм та $-1,8$ дн відповідно). Для індексів інтенсивності (RX1DAY, SDII) та тривалості сухих серій (CDD) виявлено слабку або від'ємну кореляцію та систематичне завищення значень ERA5-Land, що є типовою характеристикою сіткових продуктів реаналізу при

відтворенні точкових екстремумів опадів.

7. Задовільна узгодженість між ERA5-Land та станційними спостереженнями встановлена лише для індексів накопичених опадів (PRCPTOT: $R=0,45$, $p=0,012$; R10MM: $R=0,51$, $p=0,004$), що дозволяє розглядати відповідні тренди ERA5-Land як методологічно обґрунтовані для регіонального аналізу. Для індексів RX1DAY, SDII та CDD слабка або від'ємна кореляція між рядами унеможливорює коректне порівняння трендів. Зростаючий тренд RX1DAY за даними метеостанції Одеса (+0,90 мм/рік, $p=0,010$) слід розглядати як самостійний результат наземних спостережень, що вказує на посилення максимальних добових опадів у прибережній зоні, однак не може бути верифікований реаналізом ERA5-Land через принципову неузгодженість рядів для цього індексу.

8. Отримані результати в цілому можуть свідчити про прогресуюче зменшення кількості та частоти опадів у теплий сезон при одночасному збільшенні тривалості сухих серій в Північно-Західному Причорномор'ї протягом 1991–2020 рр., і встановлено вперше на основі ERA5-Land за кліматичну норму 1991–2020 для цього регіону. Виявлені тренди мають практичне значення для оцінювання водних ресурсів, агрокліматичних умов та планування адаптаційних заходів у Північно-Західному Причорномор'ї.

ПОДЯКИ

Автор висловлює подяку рецензентам та редакційній колегії Журналу за критичні зауваження до тексту. Дослідження виконано за підтримки проекту «Сталий розвиток управління і моделювання водних ресурсів Північно-Західного Причорномор'я в умовах зростання екстремальності клімату та антропогенного навантаження» (ДР № 0126U001796, 2026–2028 рр.). Дані реаналізу ERA5-Land отримано через Copernicus Climate Data Store (CDS) в рамках Copernicus Climate Change Service (C3S), що реалізується ЕСМВФ від імені Європейської Комісії. Дані індексів екстремальних опадів для станції Одеса отримано з бази European Climate Assessment & Dataset (ECA&D).

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- World Meteorological Organization (2025): State of the Climate in Europe 2024. WMO, Geneva. <https://library.wmo.int/records/item/69475-state-of-the-climate-in-europe-2024> (Дата звернення: 20.05.2026).
- Ukraine's Climate Change Adaptation Communication to UNFCCC, 27 May 2024. <https://unfccc.int/sites/default/files/2025-05/Ukraine%201st%20Adaptation%20Communication.pdf> (Дата звернення:

20.05.2026).

- Ovcharuk, V. and Khomenko, I.: Flash Flood Events in the Northwestern Black Sea Region under Climate Change, *EGU General Assembly 2026*, Vienna, Austria, 3–8 May 2026, EGU26-14233. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu26-14233>
- Zhang, X., et al. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Climate Change*, 2, 851–870, 2011. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>
- Klein Tank, A. M. G., Können, G. P. Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946–99. *Journal of Climate*, 16, 3665–3680, 2003. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3665:TIHOTD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3665:TIHOTD>2.0.CO;2)
- Micu, D.M., Amihăse, V.A., Milian, N. et al. Recent changes in temperature and precipitation indices in the Southern Carpathians, Romania (1961–2018). *Theoretical and Applied Climatology*, 144, 691–710, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03560-w>
- Ionita, M. et al. On the Examination of the Relationship between Mean and Extreme Precipitation and Circulation Types over Southern Romania. *Atmosphere*, 14(9), 1345, 2023. <https://doi.org/10.3390/atmos14091345>
- Agayar, E., Aemisegger, F., Armon, M., Scherrmann, A., Wernli, H. Precipitation extremes in Ukraine from 1979 to 2019: climatology, large-scale flow conditions, and moisture sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24, 2441–2459, 2024. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-2441-2024>
- Agayar, E. Precipitation extremes in the Ukraine: dynamical aspects, large-scale circulation and moisture sources. *EGU General Assembly 2023*, Vienna, Austria, 24–28 April 2023, EGU23-2647. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-2647>
- Семергей-Чумаченко А. Б., Слободяник К. Л. Просторово-часовий розподіл сильних опадів над Україною протягом 1979–2019 рр. за даними реаналізу ERA5. *Український гідрометеорологічний журнал*, 2020, № 26, С. 50–59. <https://doi.org/10.31481/uhmj.26.2020.04>
- Слободяник К. Л., Семергей-Чумаченко А. Б., Веретнова В. О. Виникнення сильних опадів на станції Херсон за даними реаналізу ERA5 та метеорологічних спостережень. *World Science*, No 11 (72), 2021. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30122021/7720
- Прокоф'єв О. М., Гончарова Л. Д. Оцінка весняних регіональних відгуків термічного режиму Північно-Західного Причорномор'я на зміну глобального клімату. *Український гідрометеорологічний журнал*, 2025. № 34-35. С. 5-17. <https://uhmj.org.ua/index.php/journal/article/view/234>
- Borovska, H., Khokhlov, V. Climate data for Odesa, Ukraine in 2021–2050 based on EURO-CORDEX simulations. *Geoscience Data Journal*, 2024. <https://doi.org/10.1002/gdj3.197>
- IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049, 2020. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- Muñoz Sabater, J. ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019. <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac> (Дата звернення: 20.05.2026).
- Muñoz Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13, 4349–4383,

2021. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>

18. Diaz, D. et al. Evaluating the ability of gridded climate datasets to capture temperature and precipitation trends and extremes. *Scientific Reports*, 15, 12607, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97570-7>

19. de Gois, G. et al. Satellite–Reanalysis Contrasts in Extreme Rainfall around the Itaipu Reservoir, Brazil. *Earth Systems and Environment*, 2026. <https://doi.org/10.1007/s41748-026-01238-9>

REFERENCES

1. World Meteorological Organization (2025): State of the Climate in Europe 2024. WMO, Geneva. <https://library.wmo.int/records/item/69475-state-of-the-climate-in-europe-2024> (Accessed on 20-May-2026).

7. Ukraine's Climate Change Adaptation Communication to UNFCCC, 27 May 2024. <https://unfccc.int/sites/default/files/2025-05/Ukraine%201st%20Adaptation%20Communication.pdf> (Accessed on 26-May-2026).

8. Ovcharuk, V. and Khomenko, I.: Flash Flood Events in the Northwestern Black Sea Region under Climate Change, *EGU General Assembly* 2026, Vienna, Austria, 3–8 May 2026, EGU26-14233. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu26-14233>

9. Zhang, X., et al. Indices for monitoring changes in extremes based on daily temperature and precipitation data. *WIREs Climate Change*, 2, 851–870, 2011. <https://doi.org/10.1002/wcc.147>

10. Klein Tank, A. M. G., and Können, G. P. Trends in Indices of Daily Temperature and Precipitation Extremes in Europe, 1946–99. *Journal of Climate*, 16, 3665–3680, 2003. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016<3665:TIIODT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016<3665:TIIODT>2.0.CO;2)

11. Micu, D.M., Amihaesei, V.A., Milian, N. et al. Recent changes in temperature and precipitation indices in the Southern Carpathians, Romania (1961–2018). *Theoretical and Applied Climatology*, 144, 691–710, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03560-w>

12. Ionita, M. et al. On the Examination of the Relationship between Mean and Extreme Precipitation and Circulation Types over Southern Romania. *Atmosphere*, 14(9), 1345, 2023. <https://doi.org/10.3390/atmos14091345>

13. Agayar, E., Aemisegger, F., Armon, M., Scherrmann, A., Wernli, H. Precipitation extremes in Ukraine from 1979 to 2019: climatology, large-scale flow conditions, and moisture sources. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 24, 2441–2459, 2024. <https://doi.org/10.5194/nhess-24-2441-2024>

14. Agayar, E. Precipitation extremes in the Ukraine: dynamical aspects, large-scale circulation and moisture sources.

EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 April 2023, EGU23-2647. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-2647>

15. Semerhei-Chumachenko, A. B., & Slobodanyk, K. L. Spatial–temporal distribution of heavy precipitation over Ukraine during 1979–2019 according to the ERA5 reanalysis. *Ukrainian hydrometeorological journal*, (26), 50–59, 2020. <https://doi.org/10.31481/uhmj.26.2020.04> [in Ukrainian].

16. Slobodanyk, K. L., Semerhei-Chumachenko, A. B., Veretnova, V. O. Occurrence of heavy precipitation at Kherson station according to ERA5 reanalysis and meteorological observations. *World Science*, No 11 (72), 2021. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30122021/7720 [in Ukrainian].

17. Prokofiev, O.M., Goncharova, L.D. Assessment of spring regional responses of the thermal regime of the Northwestern Black Sea region to global climate change. *Ukrainian hydrometeorological journal*, 2025. <https://uhmj.org.ua/index.php/journal/article/view/234> [in Ukrainian].

18. Borovska, H., Khokhlov, V. Climate data for Odesa, Ukraine in 2021–2050 based on EURO-CORDEX simulations. *Geoscience Data Journal*, 2024. <https://doi.org/10.1002/gdj3.197>

19. IPCC: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report*. Cambridge University Press, 2021. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

20. Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., et al. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049, 2020. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>

21. Muñoz Sabater, J. ERA5-Land hourly data from 1950 to present. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), 2019. <https://doi.org/10.24381/cds.e2161bac> (Accessed on 20-May-2026).

22. Muñoz Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., et al. ERA5-Land: a state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 13, 4349–4383, 2021. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>

23. Diaz, D. et al. Evaluating the ability of gridded climate datasets to capture temperature and precipitation trends and extremes. *Scientific Reports*, 15, 12607, 2025. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-97570-7>

24. de Gois, G. et al. Satellite–Reanalysis Contrasts in Extreme Rainfall around the Itaipu Reservoir, Brazil. *Earth Systems and Environment*, 2026. <https://doi.org/10.1007/s41748-026-01238-9>

ETCCDI INDICES IN THE ODESSA REGION BASED ON ERA5-LAND REANALYSIS AND STATION OBSERVATIONS: TRENDS AND VALIDATION FOR 1991–2020

A. B. Semerhei-Chumachenko

Odesa I. I. Mechnikov National University,
2 V. Zmiiienka Str., 65082, Odesa, Ukraine, alina.semerhei-chumachenko@onu.edu.ua,
<https://orcid.org/0000-0001-8718-4073>

Changes in the precipitation extremes regime in the North-Western Black Sea region are investigated based on ten ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices) indices derived from the ERA5-Land reanalysis (spatial resolution 0,1°) for the standard climate normal period 1991–2020. Temporal trends are assessed using the non-parametric Mann-Kendall test with trend magnitude estimated by Sen's slope estimator. Spatial analysis is performed for the ERA5-Land grid within the domain 46,0–47,5°N, 30,0–31,5°E; seasonal analysis is conducted separately for the cold (November–March) and warm (April–October) seasons. Validation of the

reanalysis results is carried out by comparison with observational data from the Odessa meteorological station (ECA&D, STAD: 400) for the same period.

Annual trend analysis reveals a statistically insignificant at the standard level of $p < 0,05$, but pronounced decreasing tendency in total wet-day precipitation (PRCPTOT: $-3,48$ mm/yr, $p = 0,064$). Seasonal trend decomposition demonstrates that all statistically significant trends are confined to the warm season: a decrease in PRCPTOT ($-2,60$ mm/yr, $p = 0,032$), a reduction in the frequency of days with precipitation ≥ 10 mm (R10MM: $-0,088$ days/yr, $p = 0,012$), and a statistically insignificant at $p < 0,05$, but pronounced increase in the length of dry spells (CDD: $+0,208$ days/yr, $p = 0,094$). No significant trends are detected during the cold season. Spatial trend analysis using the Mann-Kendall test reveals the predominance of significant negative signals for PRCPTOT and R10MM across most of the study domain, with the most pronounced decrease in the northern and central parts of the domain. The spatial distribution of CDD trends is characterised by heterogeneity: significant positive trends are recorded in the eastern part of the region, while the coastal zone exhibits insignificant negative or neutral values, potentially indicating a modifying influence of the Black Sea. For RX1DAY, spatial analysis reveals significant negative trends in the northern part of the region, which contrasts with the increasing trend recorded at the Odessa meteorological station ($+0,90$ mm/yr, $p = 0,010$), indicating limitations of the reanalysis in capturing point-scale precipitation extremes. Validation against ECA&D data reveals satisfactory agreement for accumulated precipitation indices (PRCPTOT: $R = 0,45$, $p = 0,012$; R10MM: $R = 0,51$, $p = 0,004$).

The results may indicate increasing warm-season dryness in the North-Western Black Sea region during 1991–2020, consistent with regional tendencies of summer precipitation decline characteristic of the Black Sea and Mediterranean sectors. The identified trends have practical implications for water resource assessment and agroclimatic conditions in southern Ukraine.

Keywords: ERA5-Land reanalysis, ETCCDI indices, precipitation extremes, Mann-Kendall trend, Northwestern Black Sea region, climate normal 1991–2020, heavy precipitation, regional climate change.

Подання до редакції : 20. 02. 2026
Надходження остаточної версії : 20. 04. 2026
Публікація статті : 25. 05. 2026