

Моделі EURO-CORDEX у визначенні змін термічного режиму приземного повітря в Українських Карпатах до середини ХХІ сторіччя

*Л.В. Паламарчук¹, О.Я. Скряник^{1,2}, В.В. Путренко³, О.А. Скряник^{4,1},
Д.О. Ошурок¹, В.П. Сіденко¹, З.М. Кирєєва¹, 2024*

¹Український гідрометеорологічний інститут ДСНС та НАН України, Київ, Україна

²Центр кліматичних змін, Університет Ровіра і Віргілі, Таррагона, Іспанія

³Американ Юніверсіті Київ, Київ, Україна

⁴Національний університет біоресурсів та природокористування України,
Київ, Україна

Надійшла 13 березня 2024 р.

У статті наведено результати оцінювання майбутніх змін термічного режиму приземного повітря в Українських Карпатах для періоду до 2050 р. Оцінювання виконано на підставі набору кліматичних індексів (середньої річної температури повітря, кількості морозних днів (FD), кількості літніх днів (SU) і кількості тропічних днів (TR)), розрахованих з високою просторовою роздільністю ($0,05^\circ \times 0,05^\circ$) на основі добових даних метеорологічних спостережень (1961—2020 рр.) і результатів розрахунків 11 регіональних кліматичних моделей проєкту EURO-CORDEX (2021—2050 рр.). Для отримання надійних, незміщених проєкцій температури повітря скориговано модельні дані (bias correction) методом лінійного масштабування та масштабування дисперсії. Кліматичні зміни оцінено на підставі розрахунку приростів індексів для періоду 2021—2050 рр. щодо періоду поточного клімату 1991—2020 рр. Встановлено загальні тенденції до підвищення температури приземного шару повітря у регіоні до середини ХХІ ст. Кількісні показники таких змін: фонові прирости знаходяться у межах $0,35\text{—}0,41\text{ }^\circ\text{C}$ (або, умовно, $0,12\text{—}0,14\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{декада}^{-1}$) для сценарію RCP4.5 і $0,53\text{—}0,56\text{ }^\circ\text{C}$ ($0,18\text{—}0,19\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{декада}^{-1}$) для сценарію RCP8.5. Максимальні прирости середньої річної температури у порівнянні з періодом сучасного клімату 1991—2020 рр. — на рівні $0,56/0,71\text{ }^\circ\text{C}$ відповідно до сценарію. Вони тяжіють до високогірних ділянок у південно-східній частині регіону, тобто очікуються більші швидкості потепління для високогірних ділянок. Зміни порогових кліматичних індексів до середини ХХІ ст. матимуть певні просторові відмінності: більш високі літні температури (SU, TR) ймовірніші для північно-східного макросхилу та південно-східної частини розрахункової області, а у холодний період (FD) року, за обома сценаріями, температура повітря зростатиме переважно у північно-західній та південно-західній частинах досліджуваного регіону.

Ключові слова: приземна температура повітря, кліматичні індекси, кліматичні проєкції, EURO-CORDEX, Українські Карпати.

Вступ. Сучасний етап розвитку людства супроводжується проблемами кліматичних змін, які обумовлюють різноманітні несприятливі природні процеси, усклад-

нюють функціонування окремих галузей господарства, часто створюють негативний вплив на життя населення. У зв'язку з цим основні практичні проблеми та зав-

Citation: Palamarchuk, L.V., Skrynyk, O.Y., Putrenko, V.V., Skrynyk, O.A., Oshurok, D.O., Sidenko, V.P., & Kyreieva, Z.M. (2024). Near-surface air temperature in the Ukrainian Carpathians up to the middle of the XXI century by the EURO-CORDEX models. *Geofizychnyi Zhurnal*, 46(3), 3—31. <https://doi.org/10.24028/gj.v46i3.299699>.

Publisher Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, 2024. This is an open access article under the CC BY-NC-SA license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

дання наукових досліджень як на глобальному, так і на регіональному рівнях полягають у недопущенні збільшення викидів парникових газів в атмосферу з метою стабілізації глобального потепління, а також у розробці та реалізації механізмів адаптації господарства окремих регіонів до нових кліматичних умов, що виникають як наслідок кліматичних трансформацій [IPCC, 2021]. Для вирішення зазначених задач важливо володіти фізично обґрунтованою інформацією високої просторової та часової роздільності щодо очікуваних кліматичних змін.

Регіон дослідницьких інтересів — Українські Карпати. Особливості формування кліматичних умов тут проявляються у дещо нижчих величинах потоків сонячної енергії біля земної поверхні (сумарна радіація — $3400\text{—}4000 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{рік}^{-1}$; радіаційний баланс — $1300\text{—}1600 \text{ МДж}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{рік}^{-1}$) порівняно з іншими регіонами України, що знаходяться на тих самих широтах. Зменшення потоків енергії відбувається переважно через вищу повторюваність тут хмарних днів. Підстильна поверхня також зменшує енергетичні потоки за відносно високих значень альbedo (A), взимку — через наявність снігового покриву ($A=50\div 60\%$), влітку — через залісненість ($A=20\div 21\%$) [Клімат ..., 2003]. Крім того, гірський рельєф, завдяки зміні абсолютних висот та різній експозиції схилів обумовлює мезо- та мікрокліматичні неоднорідності щодо засвоєння сонячної радіації, які формують відмінності термічного режиму повітря, суттєво залежного від абсолютної висоти та місцеположення точки спостережень. Середні річні температури повітря у регіоні впродовж базового кліматичного періоду спостерігалися в межах від $2,7\text{ }^\circ\text{C}$ на високогір'ях (метеостанція Пожижевська, 1451 м над рівнем моря) до $9,9\text{ }^\circ\text{C}$ на рівнині (метеостанція Берегове, 113 м над рівнем моря) [Кліматичний ..., 2006].

Циркуляційні процеси, у загальних рисах, характеризуються циклонічною діяльністю на Полярному фронті та впливом відрогів Азорського і континентальних антициклонів. Існують певні сезонні

відмінності: над регіоном у теплий період року домінують західні та північно-західні циклони, у холодний — переважають південно-західні та південні траєкторії переміщення циклонів. Окремі відмінні риси цих сезонних циркуляційних утворень, особливо в полях хмарності та опадів, дають підставу умовно поділяти Українські Карпати на північно-східний та південно-західний макросхили. Зауважимо, що гірська система Карпат може трансформувати траєкторії переміщення та структуру синоптичних утворень, дещо змінює інтенсивність процесів у них, крім того тут утворюються власні гірські мезомасштабні циркуляції, які перерозподіляють тепло і вологу та формують у регіоні як особливий термічний режим, так і характерний режим зволоження. Очевидно, що в останні десятиліття під впливом динаміки глобальних процесів у кліматичній системі, характеристики клімату змінюються і в регіоні Українських Карпат.

Визнаним дослідниками інструментом для оцінювання змін клімату в майбутні періоди часу є чисельне моделювання, яке виконується з використанням як глобальних моделей загальної циркуляції атмосфери та океану (МЗЦАО, або коротко, — глобальних кліматичних моделей (ГКМ), так і регіональних кліматичних моделей (РКМ), за якими прогнозують майбутній стан кліматичної системи, спираючись на певні сценарії викидів парникових газів та розвитку людського суспільства у цілому. Існують певні обмеження у використанні чисельних моделей, проте вони є практично *єдиним інструментом*, який може надати параметри стану атмосфери в майбутньому з необхідною для практичних потреб часовою та просторовою деталізацією.

На сьогодні вивчення регіональних кліматичних змін проводиться переважно з використанням результатів чисельних моделей, які представлені проектом CORDEX (Coordinated Downscaling Experiment, <https://cordex.org/>). Це проект з регіонального динамічного масштабування (dynamical downscaling) результатів розра-

хунків ГKM, він започаткований у 2009 р. і триває досі. На підставі даних моделей, що включені в проєкт, отримано обґрунтовані результати у прогнозуванні динаміки кліматичних показників для багатьох регіонів (див., наприклад; [Jakob et al., 2014; Mishra et al., 2020; Dosio et al., 2022]), що вказує на перспективу використання моделей цього проєкту у подальшому вивченні змін клімату.

У поданому дослідженні використані дані РКМ Координованого експерименту з масштабування для Європи (EURO-CORDEX) (<https://www.euro-cordex.net>) у межах проєкту глобального моделювання CMIP5 (<https://www.wcrp-climate.org/wgcm-cmip/wgcm-cmip5>). Регіональні моделі, що входять до цього проєкту ініціюються даними глобальних моделей, розрахунки яких базуються на сценаріях RCP (Representative Concentration Pathways), мають покращені фізичні параметризації та високу просторову роздільну здатність ($0,11^\circ \times 0,11^\circ$). Використовуючи моделі цього проєкту дослідники оцінюють переважно зміни термічного режиму та режиму зволоження окремих регіонів, зокрема Карпатського [Torma, Kis, 2022; Simon et al., 2023].

Крім загальних проблем адаптації модельних розрахунків та усунення неточностей, що існують у моделюванні для будь-яких регіонів [Giorgi, 2005, 2019; Beniston et al., 2007], для гірських місцевостей існують додаткові проблеми. Так, глобальні та регіональні моделі не завжди можуть коректно враховувати фізичні механізми, що впливають на розподіл температури повітря з висотою [Tabony, 1985; Jin et al., 2022]. Вважається, що температура повітря на станціях, розташованих на нижчих гіпсометричних рівнях, визначається переважно сукупністю впливів підстильної поверхні та мезомасштабними циркуляціями, тоді як на високогірних станціях термічний режим більше залежний від циркуляційний процесів у вільній атмосфері. Саме ці аспекти формування термічного режиму не завжди точно параметризуються у модельних розрахунках. Існує також

проблема повного врахування багатьма моделями впливу на термічний режим зимових гірських інверсій, які часто формуються і у Карпатському регіоні [Клімат ..., 2003]. Зазначене вище, може призвести до невірнього трактування отриманих у моделюванні значень температури повітря на високогірних станціях. У дослідженні [Jin et al., 2022] вказується на існуючу тенденцію, коли результати моделювання показують більші швидкості зростання температури у високогірних районах порівнянно з такими на суміжних територіях. За даними авторів, модельні розрахунки дають можливість прогнозувати значення температури повітря на високогір'ях на $2,5\text{—}2,9^\circ\text{C}$ вищими, ніж для долин.

Значний обсяг вітчизняних наукових досліджень зосереджений на вивченні кліматичних змін в Україні та окремих її регіонах. Наприклад, у статті [Краковська та ін., 2018] з використанням даних моделей проєкту ENSEMBLES за сценаріями SRES (Special Report on Emissions Scenarios) оцінено зміни приземної температури та сум опадів у річному та сезонному вимірах. Подібні роботи з вивчення динаміки термічного режиму, опубліковано й іншими авторами (див., наприклад [Хохлов, Єрмоленко, 2015; Балабух, Малицька, 2017]). Отримані результати моделювання вказують на однозначне підвищення приземної температури повітря в Україні до середини ХХІ ст. Так, у статті [Краковська та ін., 2018] прогнозується підвищення на $1,6\text{—}2,1^\circ\text{C}$ середніх річних температур стосовно періоду 1961—1990 рр. Використовуються й інші типи моделей для оцінювання змін термічного режиму в Україні, наприклад, у статті [Boychenko, Maidanovych, 2023] для прогнозування загальних тенденцій температурного режиму застосовують напівемпіричні фізико-статистичні моделі.

За останнє десятиліття з'явилися чисельні моделі, що базуються на нових сценаріях викидів парникових газів у майбутньому — RCP (Representative Concentration Pathways) і SSP (Shared Socioeconomic Pathways), також використовуються нові підходи до визначення параметрів сучас-

ного й майбутнього клімату — для оцінювання змін розраховуються *кліматичні індекси* за рекомендаціями Експертної групи ETCCDI (Expert Team on Climate Change Detection and Indices, <https://www.climdex.org>).

Подібні підходи застосовано і в останніх дослідженнях клімату України, що ґрунтуються на моделях проєкту EURO-CORDEX, сучасних сценаріях і розрахунках кліматичних індексів (див., наприклад [Krakovska et al., 2021; Замфірова, Хохлов, 2020]). У цих публікаціях розглянуто динаміку кліматичних показників для усієї території або окремих міст в Україні.

Закономірності майбутніх кліматичних змін окремо у великому Карпатському регіоні обговорюються переважно у зарубіжних публікаціях (наприклад: [Birsan et al., 2014; Dumitrescu et al., 2015]). Так, у статті [Торма, Кіс, 2022] отримано показники змін термічного режиму на основі ансамблю моделей EURO-CORDEX. Автори використовували дані моделювання за сценарієм RCP8.5, з коригуванням кліматичних проєкцій методом квантильного масштабування. Еталонними для проведення коригування були набори сіткових даних CARPATCLIM [Spinoni et al., 2015] та E-OBS [Cornes et al., 2018]. Отримано стійкі тенденції до зростання температури повітря у регіоні, яке до середини поточного століття оцінюється приростом температури порівнюючи з 1976—2005 рр. на 1,2—1,7 °С.

Як показав аналіз сучасних досліджень динаміки клімату, для обґрунтованого та коректного встановлення регіональних кліматичних змін необхідними і обов'язковими умовами є: статистичний ансамбль регіональних кліматичних моделей, набір надійних даних наземних спостережень (таких як, наприклад, CARPATCLIM чи E-OBS) для сучасного кліматичного періоду, обґрунтований метод коригування модельних даних (bias correction), який виконується на підставі даних спостережень.

Основна мета статті — встановлення/оцінювання кліматичних змін термічного режиму в Українських Карпатах до сере-

дини XXI ст. Для досягнення поставленої мети вирішено низку завдань: 1) створення для регіону дослідження еталонного набору кліматичних сіткових даних за період 1961—2020 рр. (observation gridded data), що відповідає усім сучасним вимогам Всесвітньої метеорологічної організації (ВМО) до вимірювання, обробки та подання результатів метеорологічних спостережень; 2) формування статистичного ансамблю кліматичних моделей на основі проєкту EURO-CORDEX; 3) коригування модельних даних методом лінійного масштабування та масштабування дисперсії для отримання надійних та обґрунтованих проєкцій температури повітря до 2050 р.; 4) визначення особливостей термічного режиму приземного шару повітря регіону Українських Карпат до середини XXI ст. на підставі кліматичних індексів, розрахованих за результатами спостережень і модельними проєкціями температури.

Дані та методи. Метеорологічні спостереження та їх обробка. Для розрахунків кліматичних параметрів і верифікації/корекції даних кліматичних моделей необхідні дані спостережень за довідковий (reference) період, який містить або є спільним із періодом історичних моделювань ГKM-PKM. Для дослідження (рис. 1) було обрано 12 метеорологічних станцій національної гідрометеорологічної мережі, розташованих у Закарпатській, Івано-Франківській та Львівській областях. Використано добові значення спостережень метеорологічних станцій за температурою повітря за період 1961—2020 рр. (60 років). Строкові виміри станційного ртутного термометра стали основою для визначення середньої добової температури повітря (TG), тоді як дані мінімального та максимального термометрів були основою часових рядів мінімальної (TN) та максимальної (TX) добової температури. Усі дані спостережень отримані з архівів Центральної геофізичної обсерваторії ім. Бориса Срезневського ДСНС України.

За вимогами ВМО [IPCC, 2015], дані спостережень, які використовуються для верифікації/корекції та оцінювання ре-

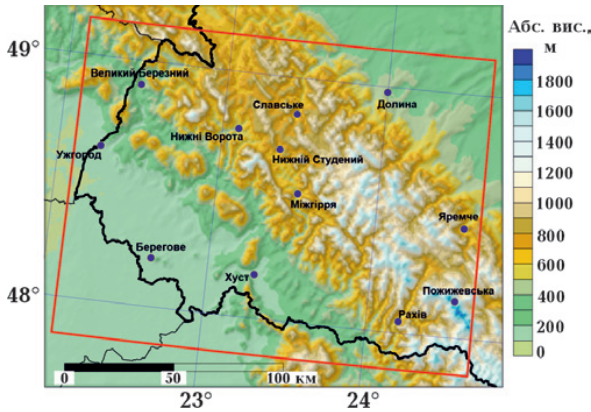


Рис. 1. Область дослідження, її рельєф та метеорологічні станції, дані яких було використано у розрахунках.

Fig. 1. The study area, its relief and meteorological stations used in the calculations.

зультатів кліматичних моделей, мають бути отримані сертифікованими приладами, підлягають кліматичному контролю якості, процедурі гомогенізації та інтерполяції у вузли просторових сіток. Дослідження потребувало створення базового набору даних для регіону, тому виконання усіх перелічених вище процедур було обов'язковим.

Контроль якості станційних часових рядів було виконано за допомогою пакета INQC (<https://CRAN.R-project.org/package=INQC>) у програмному середовищі R. Програмне забезпечення INQC [Aguilar, 2019] являє собою набір функцій/тестів для виявлення помилкових чи підозрілих значень у добових часових рядах основних метеорологічних величин (у тому числі TG,

TX і TN). Перелік та опис застосованих тестів подано у публікації [Skrupnyk et al., 2023]. Коротке узагальнення результатів роботи INQC наведено у табл. 1. Слід зазначити, що проведення контролю якості рядів кліматичних показників добового часового масштабу є надзвичайно важливим, оскільки дані такої часової роздільної здатності використовують для дослідження екстремальних кліматичних подій. Тому наявні помилки можуть дуже спотворити результати аналізу. За результатами процедури контролю якості було виправлено виявлені помилкові значення. Значення вилучалось, якщо помилка була очевидною та грубою, а першоджерело не було доступне для перевірки. У разі підтвердження значення на підставі аналізу паперових носіїв та/або даних сусідніх станцій його не вилучали. На основі проведеного аналізу було виправлено 23 значення, підтверджено — 26 і вилучено — 4.

Наступна обов'язкова для виконання процедура — гомогенізація часових рядів спостережень, тобто усунення неоднорідності часових рядів температур, що викликані не кліматичними причинами. Для гомогенізації рядів TG, TX і TN було використано R пакет Climatol (<https://CRAN.R-project.org/package=climatol>). Програмне забезпечення Climatol [Guijarro, 2023] обрано у зв'язку з його можливостями гомогенізації даних з добовою часовою роздільною здатністю та високою толерантністю щодо наявності пропусків у рядах первинних даних. Обраний програмний продукт

Т а б л и ц я 1. Результати контролю якості добових рядів середньої (TG), максимальної (TX) та мінімальної (TN) температур повітря за допомогою INQC

Етапи контролю якості	TG		TX		TN	
	Кількість	%	Кількість	%	Кількість	%
Пройшли контроль	261085	99,3	255168	97	255208	97
Грубі помилки	0	0	34	<0,1	19	<0,1
Ймовірні помилки	117	<0,1	45	<0,1	99	<0,1
Викиди, підозрілі значення	170	0,1	215	0,1	185	0,1
Групи підозрілих значень	24	<0,1	8	<0,1	37	<0,1
Пропуски	1584	0,6	7510	2,9	7432	2,8
Загальна кількість	262980	100	262980	100	262980	100

широко використовують у наукових дослідженнях. Так, у публікації [Skrynuk et al., 2023] програмне забезпечення Climatol було застосовано для гомогенізації добових часових рядів температури повітря та атмосферних опадів в Україні для періоду 1946—2020 рр., а у статті [Скриник та ін., 2019] показана висока ефективність методу.

Просторову інтерполяцію (gridding) гомогенізованих станційних часових рядів у вузли стандартної (широтно-довготної) регулярної сітки з роздільною здатністю $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ (приблизно 5 км) було здійснено за допомогою добре апробованого програмного забезпечення MISH [Szentimrey, Bihari, 2014]. Це — програмний продукт, спеціально розроблений для проведення інтерполяції метеорологічних/кліматологічних даних. У програмному забезпеченні використано гібридний підхід, у якому поряд із детерміністичним інтерполяційним алгоритмом застосовано також геопросторове стохастичне моделювання. Для врахування геофізичних/географічних особливостей області інтерполяції у MISH використовуються додаткові детерміністичні предиктори, такі як висота над рівнем моря, компоненти AURELHY (Analyse Utilisant le RELief pour les besoins de la Hydrométéorologie) [Benichou, Le Breton, 1987], які детально описують локальну топографію, та відстань до берегової лінії великих водних об'єктів. У дослідженні як додаткові предиктори використано висоту місцевості та 15 перших компонент

AURELHY. Рис. 2 ілюструє приклад розрахованих за допомогою MISH полів добових значень температури повітря (TG, TX, TN) для однієї доби періоду дослідження.

Зазначимо, що в більшості досліджень, що вивчають майбутні кліматичні зміни на території України як еталонні використовують набори даних, отриманих з бази E-OBS, або дані глобального реаналізу (напр., ERA5) [Краковська та ін., 2018; Балабух та ін., 2018]. У цій роботі з дотриманням всіх рекомендацій ВМО сформовано окремий набір емпіричних сіткових даних для періоду 1961—2020 рр. на підставі строкових спостережень регіональної метеорологічної мережі.

Кліматичні моделі EURO-CORDEX. Як зазначено вище, для прогнозування змін термічного режиму досліджуваного регіону використано моделі регіонального проєкту з динамічного масштабування EURO-CORDEX. Моделювання у проєкті EURO-CORDEX ґрунтується на використанні сценаріїв RCP, що були запропоновані у П'ятій оцінювальній доповіді Міжнародної групи експертів зі змін клімату [IPCC, 2013]. У сценаріях враховується вимушений радіаційний вплив на довкілля, що формується внаслідок викидів парникових газів. Величину такого додаткового енергетичного потоку в атмосфері (у $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-2}$) вказують числом біля назви сценарію, наприклад RCP4.5. Кількісні характеристики підвищення глобальної приземної температури повітря на кінець XXI ст., отримані з використанням сценаріїв RCP, задовільно узго-

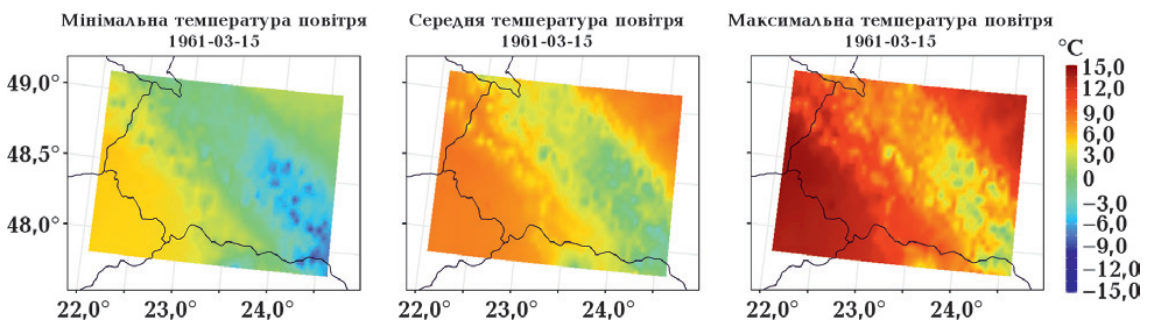


Рис. 2. Приклад розрахованих (інтерпольованих) полів добових значень мінімальної, середньої та максимальної температури повітря (для 15 березня 1961 р.).

Fig. 2. Example of calculated (gridded) fields of daily minimum, mean and maximum air temperature (March 15, 1961).

джуються з результатами, розрахованими за попередніми сценаріями SRES (Четверта оцінювальна доповідь) [IPCC, 2007]. Отже, результати отримані за сценарієм RCP4.5, відповідають B1 (SRES), а підвищення температури, що прогнозується за сценарієм RCP8.5 на кінець XXI ст., більш значне, ніж за сценарієм A2 (SRES) [Christensen, 2013].

Для формування статистичного ансамблю кліматичні моделі обрано за такими критеріями: 1) комбінація глобальної та регіональної моделей має бути реалізована у базових сценаріях RCP4.5, RCP8.5; 2) кожна комбінація глобальної та регіональної моделей може бути представлена тільки однією реалізацією; 3) у розрахунках кліматичних моделей потрібно використовувати стандартний григоріанський або сумісний з ним календар. Для прогнозування використано комбінації чотирьох глобальних моделей та ініційованих ними восьми регіональних моделей (табл. 2). У трьох випадках для однієї і тієї самої регіональної моделі задавали граничні умови, отримані різними глобальними моделями. Розрахунки проводились за сценаріями RCP4.5 та RCP8.5. Слід зауважити, що створений ансамбль добре узгоджується із набором моделей, які було використано у інших дослідженнях (див., наприклад: [Торма, Кіс, 2022]). Просторова роздільна здатність

розрахункових сіток усіх РКМ проєкту EURO-CORDEX становить $0,11^\circ \times 0,11^\circ$. Проте розрахункові сітки різних моделей не завжди узгоджені між собою (можуть бути зміщеними одна відносно одної). Крім того, просторова роздільність створених сіткових даних метеорологічних спостережень є іншою ($0,05^\circ \times 0,05^\circ$), що значно ускладнює процедуру корекції. З метою уніфікації всіх кліматичних даних і зведення їх до однієї розрахункової сітки, отримані дані кліматичних проєкцій було перераховано до стандартної широтно-довготної сітки кроком $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ за допомогою програмного забезпечення CDO (Climate Data Operator) [Schulzweida, 2020] з використанням методу білінійної інтерполяції.

Зазначимо, що у проєкті EURO-CORDEX прогностичним періодом для кліматичних симуляцій є період 2006—2100 рр. Проте розрахунки велись також для історичних періодів (до 2005 р. включно). Ці дані використовують для верифікації кліматичних симуляцій та їх корекції за потреби. У дослідженні для цих цілей використано період 1971—2005 рр. (далі — історичний період).

Корекція кліматичних проєкцій та розрахунок кліматичних індексів. Для отримання надійних незміщених кліматичних

Т а б л и ц я 2. Перелік комбінацій глобальних (ГКМ) і регіональних (РКМ) кліматичних моделей, з яких було сформовано статистичний ансамбль кліматичних проєкцій

Номер	ГКМ	РКМ	Код реалізації статистичного ансамблю (для РКМ)
1	CNRM-CERFACS-CM5 (Франція)	CNRM-ALADIN53 (Франція)	r1i1p1
2	CNRM-CERFACS-CM5 (Франція)	CNRM-ALADIN63 (Франція)	r1i1p1
3	CNRM-CERFACS-CM5 (Франція)	KNMI-RACMO22E (Нідерланди)	r1i1p1
4	ICHEC-EC-EARTH (Ірландія)	CLMcom-CLM-CCLM4-8-17 (EU)	r12i1p1
5	ICHEC-EC-EARTH (Ірландія)	DMI-HIRHAM5 (Данія)	r3i1p1
6	ICHEC-EC-EARTH (Ірландія)	GERICS-REMO2015 (Німеччина)	r12i1p1
7	ICHEC-EC-EARTH (Ірландія)	KNMI-RACMO22E (Нідерланди)	r12i1p1
8	ICHEC-EC-EARTH (Ірландія)	SMHI-RCA4 (Швеція)	r12i1p1
9	MPI-M-MPI-ESM-LR (Німеччина)	MPI-CSC-REMO2009 (Німеччина)	r1i1p1
10	MPI-M-MPI-ESM-LR (Німеччина)	SMHI-RCA4 (Швеція)	r1i1p1
11	NCC-NorESM1-M (Норвегія)	GERICS-REMO2015 (Німеччина)	r1i1p1

проекцій в межах певного регіону результати розрахунків ГКМ/РКМ підлягають процедурі статистичного коригування (bias correction) відповідно до даних метеорологічних спостережень. Метою процедури є отримання узгоджених розподілів ймовірностей (чи їх певних моментів), розрахованих кліматичними моделями значень та відповідних даних спостережень для деякого спільного довідкового історичного періоду. Корекційні фактори, визначені на основі цього періоду, застосовують до кліматичних проєкцій і для прогностичного періоду.

У статті розглянуто корекцію тільки двох перших статистичних моментів даних розрахунків РКМ: середніх значень і дисперсій. Для цього використано методи лінійного масштабування та масштабування дисперсії [Gado et al., 2022]. Корекцію проведено для кожної точки регулярної широтно-довготної сітки ($0,05^\circ \times 0,05^\circ$) на основі 35-річного періоду (1971—2005 рр.).

Для кількісного оцінювання динаміки кліматичних показників і різних їх аспектів (що характеризують зміни не тільки у середині розподілу ймовірностей кліматичних величин, й у його «хвостах»), у дослідженні використано індекси, які розраховують на основі сіткових полів *гобових значень* кліматичних показників. Методику їх визначення та порівняння з існуючими аналогами у вітчизняній кліматологічній науці можна знайти, наприклад, у публікації [Сіденко, 2022].

У нашому дослідженні для характеристики термічного режиму Карпатського регіону у поточному (1991—2020) та прогностичному (2021—2050) періодах визначали такі індекси: 1) середня річна температура повітря (розраховується за даними TG); 2) кількість морозних днів (FD, розраховується за даними TN; критерій визначає кількість днів у році, коли добовий мінімум $TN \leq 0^\circ\text{C}$); 3) кількість літніх днів (SU, розраховується за даними TX; критерій визначає кількість днів, коли добовий максимум $TX \geq 25^\circ\text{C}$); 4) кількість тропічних днів/ночей (TR, розраховується за даними TN; критерій визначає кількість днів, коли

добовий мінімум $TN \geq 20^\circ\text{C}$). Слід зазначити, що індекси 2, 3 і 4 належать до групи так званих порогових показників.

Усі кліматичні індекси визначали для кожного року та кожної точки регулярної сітки. Для базового періоду розрахунки велись на підставі даних спостережень, тоді як для прогностичного періоду вони проведені на основі отриманих кліматичних проєкцій кожної моделі створеного статистичного ансамблю, після чого було встановлено їхнє середнє ансамблеве значення (multi-model mean). Усі розрахунки індексів здійснено стандартними засобами у середовищі R (рис. 3).

Кліматичні зміни визначено як прирости/різниці середніх значень індексів, розрахованих для двох 30-річних періодів (2021—2050 та 1991—2020 рр.). Статистичну значущість різниць (відмінностей) середніх значень оцінено за допомогою Т-тесту Стьюдента.

Отримані результати. Результати коригування кліматичних проєкцій. Для визначення змін термічного режиму у Карпатському регіоні проаналізовано проєкції (прогностичні значення) температури повітря (TG, TN, TX), розраховані кожною із вибраних моделей (РКМ), що входять до ансамблю (див. табл. 2). На початку аналізу було проведено статистичне порівняння даних спостережень та моделювання. На рис. 4—6 подано середні добові значення TN, TG та TX, що розраховані для історичного періоду (1971—2005) у кліматичних моделях та отриманих на підставі метеорологічних спостережень. Як бачимо, в усіх 11 варіантах моделювання існують розбіжності з даними спостережень. Особливо вирізняються реалізації 3 та 7 створеного статистичного ансамблю (відповідно до табл. 2): РКМ KNMI-RASMO22E, що ініційована двома різними глобальними моделями, розрахунки суттєво знижують температуру порівняно з реальними вимірами (такі моделі умовно можна назвати «холодними»). Проєкції температури повітря, що отримані іншими моделями, краще узгоджуються з результатами вимірювань за той самий період для кожного з трьох



Рис. 3. Загальна схема опрацювання даних і розраховані кліматичні зміни термічного режиму Карпатського регіону України.

Fig. 3. General scheme of data processing and calculations of climate change in the thermal regime of the Carpathian region of Ukraine.

температурних показників. У багатьох дослідженнях (див., наприклад [Giorgi, 2019; Torma, Kis, 2022]), що аналізують результати моделювання кліматичних показників, вказується на існування певних неточностей, з якими кліматичні моделі розраховують параметри стану атмосфери. Помилки розрахунків обумовлені низкою факторів, серед них найважливішими є такі: значна внутрішня мінливість кліматичної системи, врахування якої в моделях ускладнене (або неможливе); способи відображення динаміки атмосферних процесів у моделюванні, що залежать зокрема і від використаних параметризацій; невизначеність (неоднозначність) сценаріїв розвитку людства і, відповідно, неоднозначність розрахунків кількісного впливу викидів атмосферних поллютантів на стан кліматичної системи. Крім того додаються також систематичні помилки, що характерні для кожної моделі.

Очевидно, що об'єднання в ансамбль

усіх 11 моделей з подальшим розрахунком середньої за ансамблем реалізації може привести до взаємної компенсації систематичних помилок моделей та деякого наближення модельних значень до даних спостережень. Проте ансамблеве вирівнювання не завжди дає можливість досягати очікуваного результату. Сучасні методичні підходи, що базуються на оцінюванні даних моделювання [Lange, 2019; Casanueva et al., 2020; Navarro-Racines et al., 2020], вказують на важливість процедури корегування (bias correction) для отримання більш достовірних прогнозних значень кліматичних проєкцій, що і було застосовано у представленому дослідженні.

Для кількісного оцінювання/верифікації оригінальних і відкоригованих даних кліматичних моделей розраховано дві статистичні метрики, а саме BIAS та RMSE (середнє значення помилки та середня квадратична помилка відповідно). Метрики

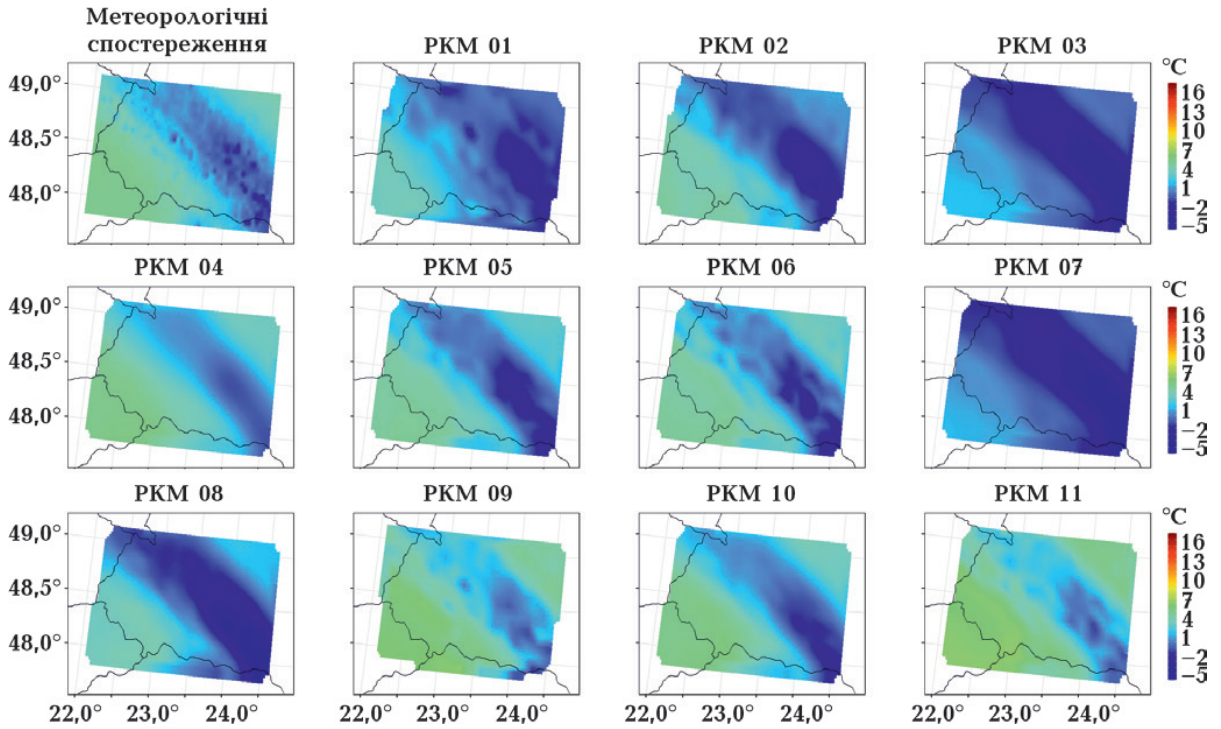


Рис. 4. Мінімальна добова температура повітря (TN), усереднена для періоду 1971—2005 рр. Верхня ліва панель — дані метеорологічних спостережень, інші панелі — дані кліматичних моделей до проведення процедури корекції.

Fig. 4. The minimum daily air temperature (TN) is averaged for the period 1971—2005. Upper left panel — meteorological observations, other panels — climate model data before the correction procedure.

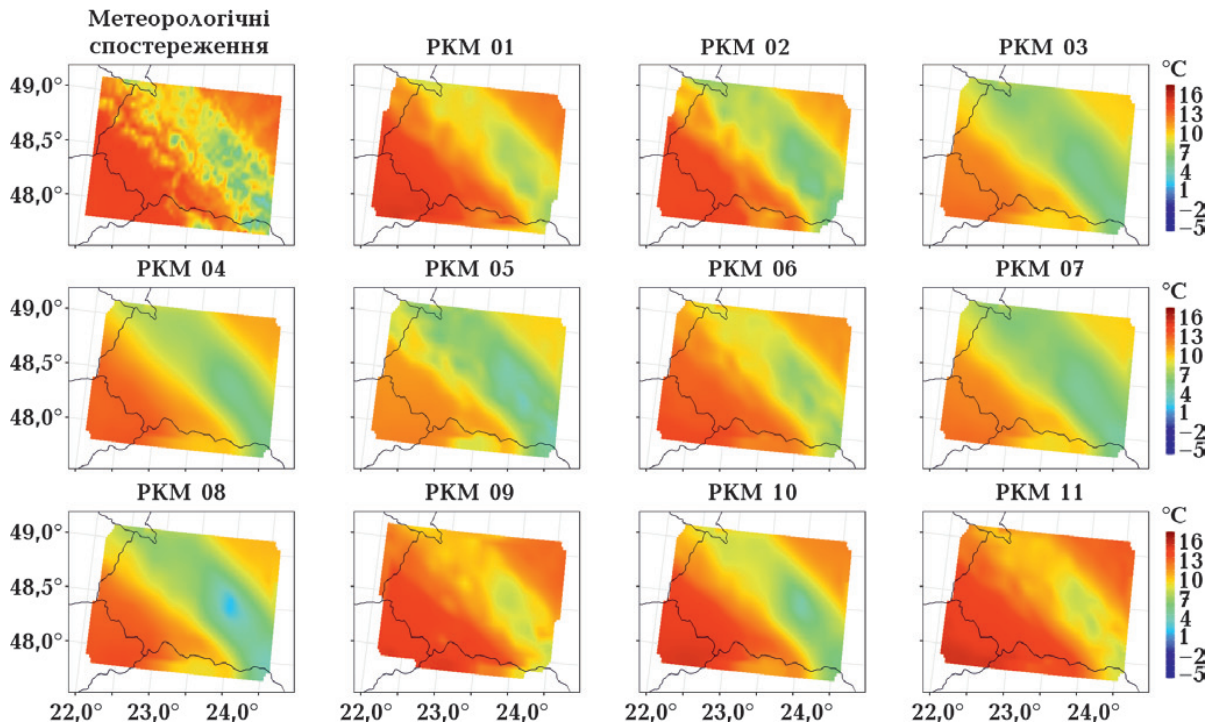


Рис. 5. Середня добова температура повітря (TG) для періоду 1971—2005 рр. Верхня ліва панель — дані метеорологічних спостережень, інші панелі — дані кліматичних моделей до проведення процедури корекції.

Fig. 5. Average daily air temperature (TG) for the period 1971—2005. Upper left panel — meteorological observations, other panels — climate model data before the correction procedure.

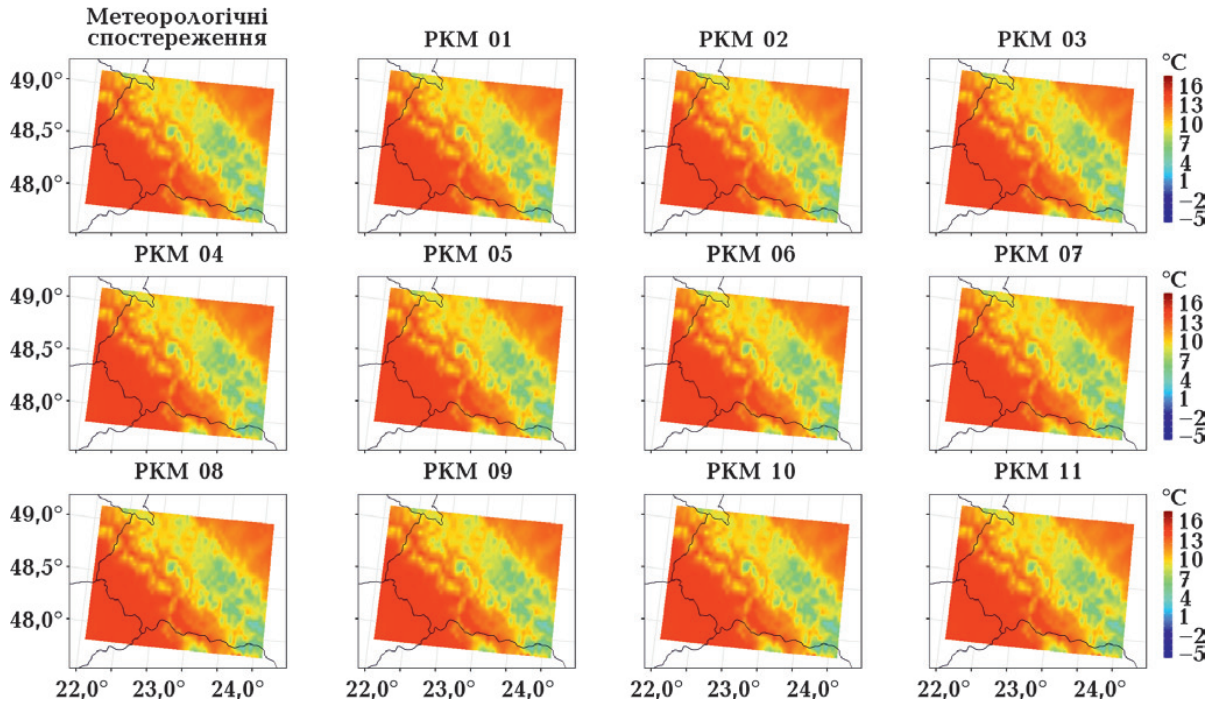


Рис. 6. Максимальна добова температура повітря (TX), усереднена для періоду 1971—2005 рр. Верхня ліва панель — дані метеорологічних спостережень, інші панелі — дані кліматичних моделей до проведення процедури корекції.

Fig. 6. Maximum daily air temperature (TX) averaged for the period 1971—2005. Upper left panel — meteorological observations, other panels — climate model data before the correction procedure.

Таблиця 3. Середні (для всього домену) значення верифікаційних статистичних метрик для вибраних кліматичних моделей для історичного періоду 1971—2005 рр. (до та після проведення процедури корекції)

ГКМ-ПКМ	BIAS (°C)						RMSE (°C)					
	TN		TG		TX		TN		TG		TX	
	до кор.	після кор.	до кор.	після кор.	до кор.	після кор.	до кор.	після кор.	до кор.	після кор.	до кор.	після кор.
1	-1,88	~0,00	-0,80	~0,00	0,14	~0,00	2,17	0,98	1,38	0,98	1,47	1,17
2	-1,31	~0,00	-0,70	~0,00	-1,03	~0,00	1,68	0,93	1,35	0,91	1,72	1,08
3	-3,10	~0,00	-2,35	~0,00	-2,41	~0,00	3,25	0,87	2,56	0,92	2,78	1,11
4	0,24	~0,00	-0,48	~0,00	-1,71	~0,00	0,99	0,87	1,17	0,90	2,20	1,11
5	-0,55	~0,00	-1,31	~0,00	-2,66	~0,00	1,13	0,81	1,54	0,72	2,81	0,80
6	-0,29	~0,00	-0,33	~0,00	-0,57	~0,00	1,27	0,92	1,18	0,93	1,58	1,12
7	-3,50	~0,00	-2,66	~0,00	-2,65	~0,00	3,66	0,98	2,89	1,00	3,02	1,25
8	-1,95	~0,00	-1,64	~0,00	-2,24	~0,00	2,23	0,96	1,96	0,97	2,59	1,15
9	1,16	~0,00	1,03	~0,00	0,74	~0,00	1,63	0,90	1,47	0,88	1,51	1,01
10	0,01	~0,00	0,18	~0,00	-0,55	~0,00	1,11	0,90	1,10	0,89	1,55	1,06
11	1,36	~0,00	1,17	~0,00	0,82	~0,00	1,85	1,08	1,65	1,07	1,66	1,23

було визначені для історичного періоду у кожній точці регулярної сітки, а потім їх було усереднено за усім просторовим до-

меном (за усіма вузлами сітки). Результати розрахунків наведено у табл. 3.

Очікувано, що найменші від'ємні зна-

чення BIAS (до проведення корекції) було отримано для «холодних» моделей 3 і 7 для всіх трьох кліматичних параметрів (TN, TG і TX). Середня недооцінка цими моделями даних спостережень є суттєвою і змінюється від $-3,50$ (TN) до $-2,35$ °C (TG). Відхилення інших моделей для всіх трьох кліматичних параметрів не таке значне (абсолютне значення BIAS не перевищує $2,0$ °C), за винятком моделей 5 і 8 для максимальної температури повітря. Згідно із даними табл. 3, корекція методом лінійного масштабування практично нівелювала відмінності у середніх значеннях модельних розрахунків і метеорологічних спостережень для всіх трьох параметрів — TN, TG і TX.

Середня квадратична помилка оригінальних даних кліматичних моделей (до корегування) є також суттєвою. Наприклад, максимальне значення RMSE дорівнює $3,66$ °C. Відповідно до розрахованих значень RMSE (див. табл. 3), наявний біль-

ший розкид величин проєкцій мінімальної та максимальної температур, ніж для її середніх значень. Крім збільшення абсолютних значень RMSE збільшується і кількість моделей, яким вони властиві. Проведення процедури масштабування дисперсії привело до суттєвого зменшення діапазонів розкиду даних моделювання та наблизило результати до значень отриманих під час спостережень за період 1971—2005 рр. Так, після корегування значення RMSE для TN та TG не перевищують $1,0$ °C (за винятком моделі 11 статистичного ансамблю, для якої отримано значення $1,08$ та $1,07$ °C для TN і TG відповідно). Для відкоригованих значень TX максимальне значення RMSE дорівнює $1,25$ °C.

Коефіцієнти, розраховані при коригуванні даних історичного періоду, було використано і для масштабування результатів моделювання клімату для прогностичного періоду.

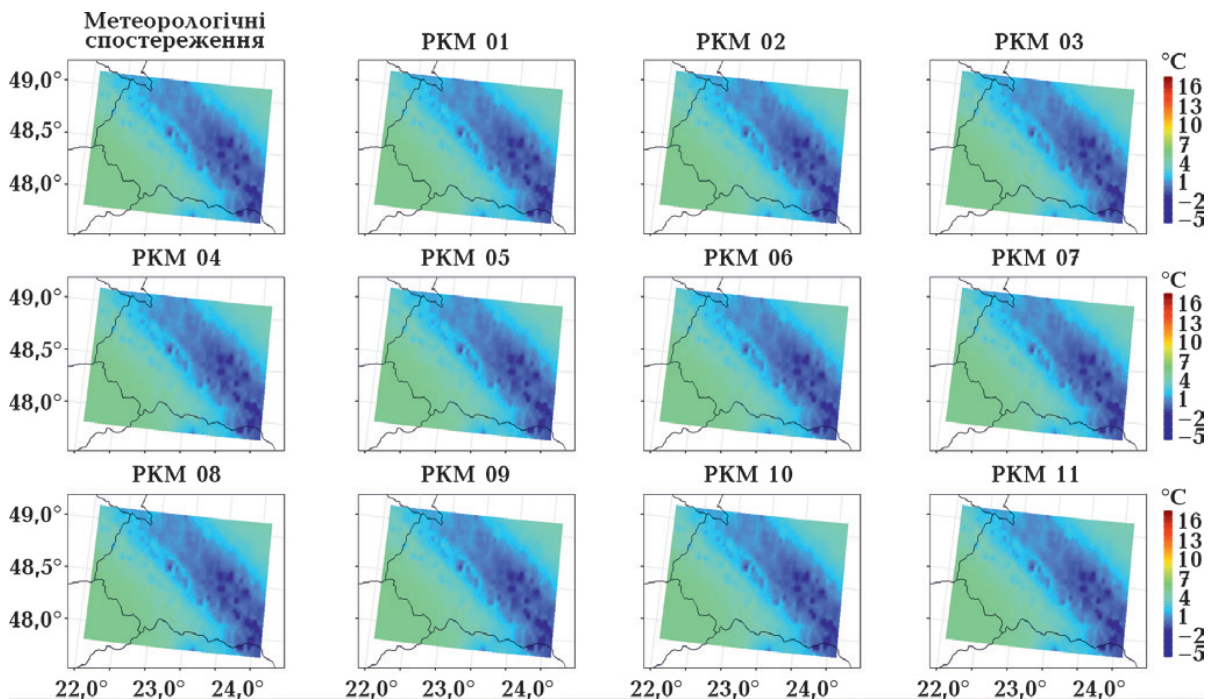


Рис. 7. Мінімумальна добова температура повітря (TN), усереднена для періоду 1971—2005 рр. Верхня ліва панель — дані метеорологічних спостережень, інші панелі — дані кліматичних моделей після проведення процедури корекції.

Fig. 7. The minimum daily air temperature (TN) is averaged for the period 1971—2005. Upper left panel — meteorological observations, other panels — climate model data after the correction procedure.

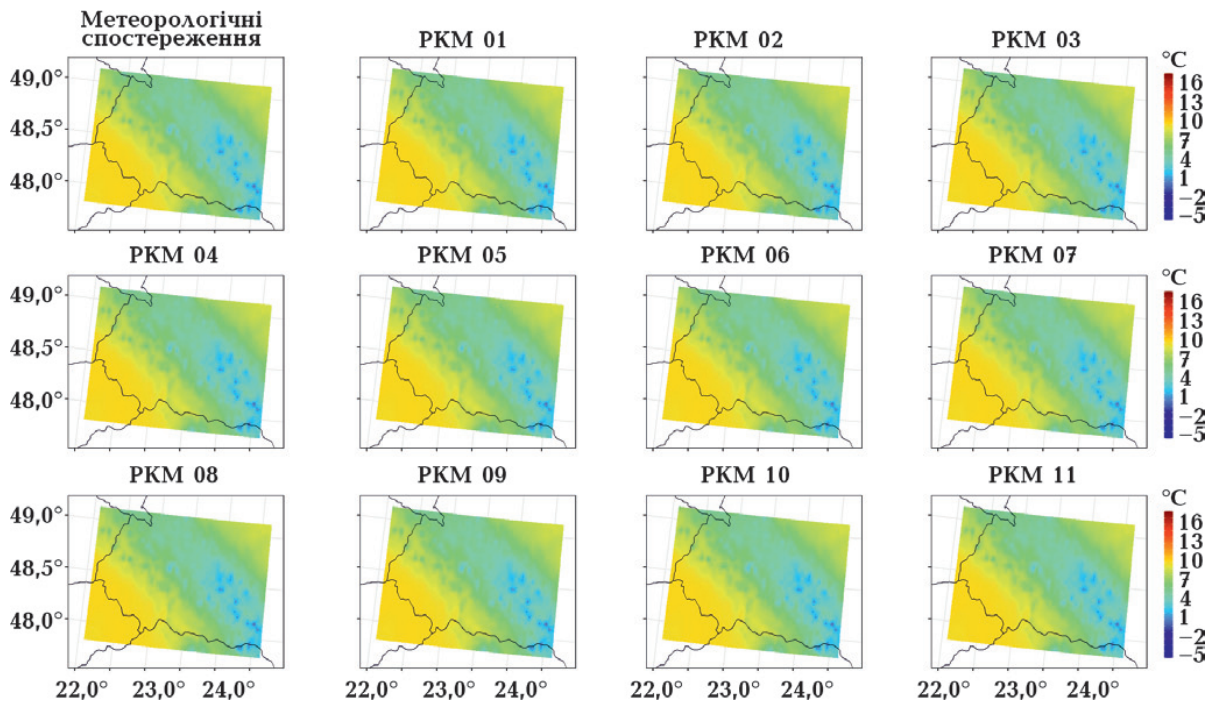


Рис. 8. Середня добова температура повітря (TG) для періоду 1971—2005 рр. Верхня ліва панель — дані метеорологічних спостережень, інші панелі — дані кліматичних моделей після проведення процедури корекції.
 Fig. 8. Average daily air temperature (TG) for the period 1971—2005. Upper left panel — meteorological observations, other panels — climate model data after the correction procedure.

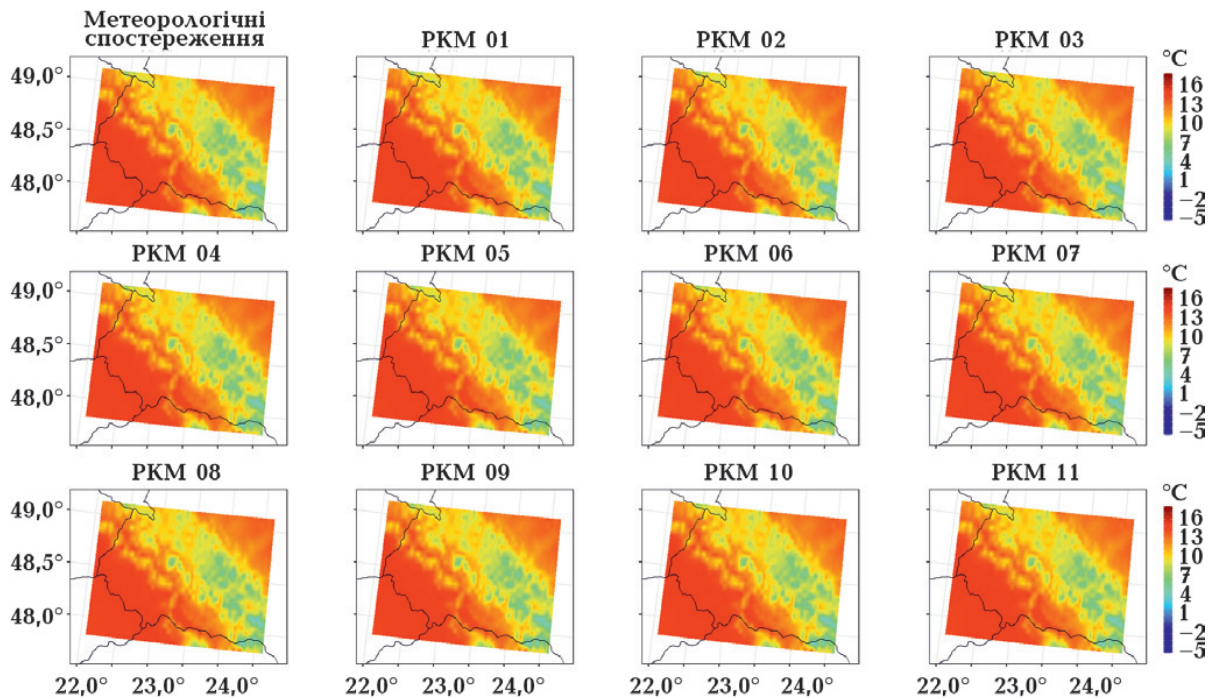
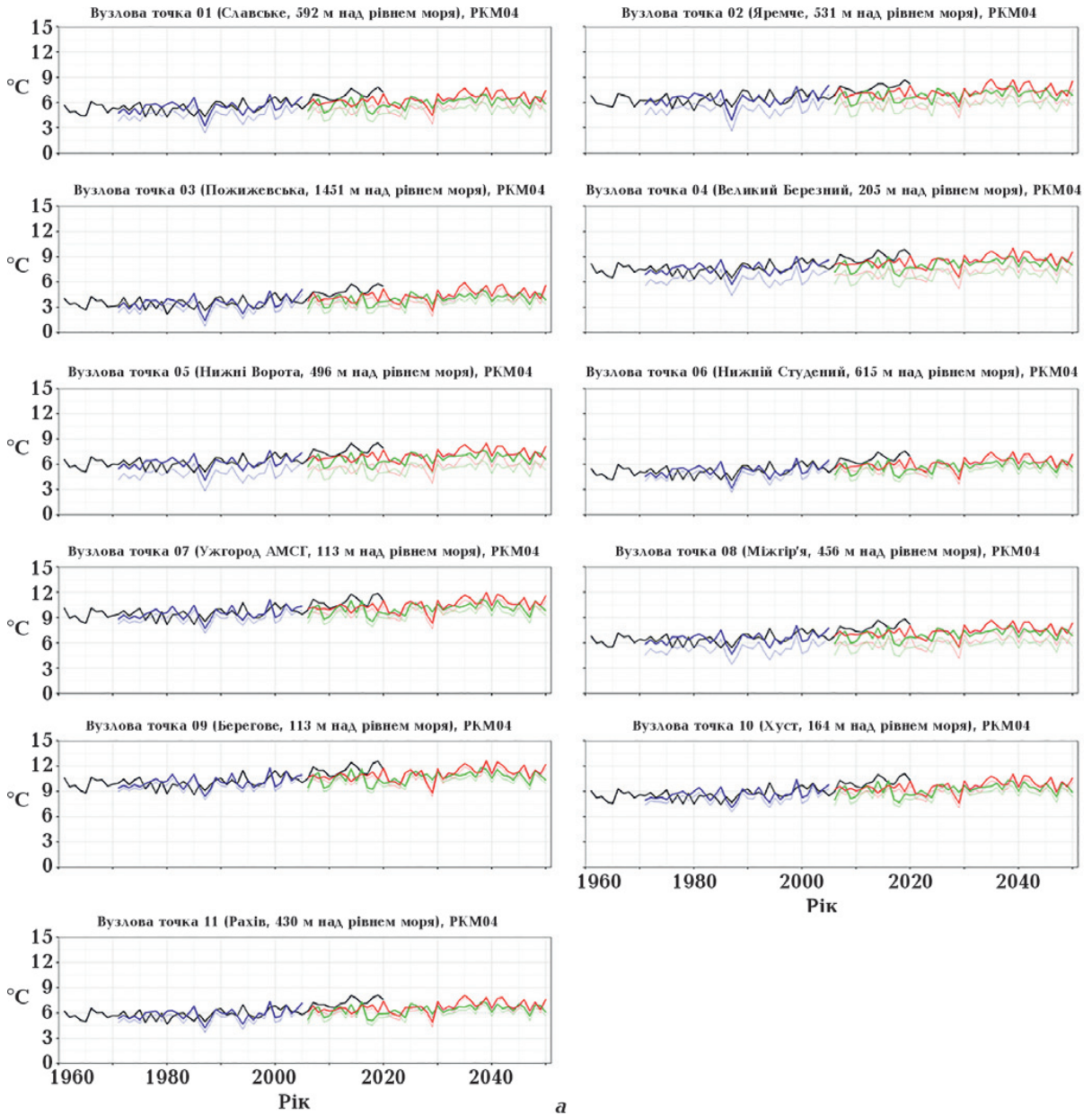


Рис. 9. Максимальна добова температура повітря (TX), усереднена для періоду 1971—2005 рр. Верхня ліва панель — дані метеорологічних спостережень, інші панелі — дані кліматичних моделей після проведення процедури корекції.
 Fig. 9. Maximum daily air temperature (TX) averaged for the period 1971—2005. Upper left panel — meteorological observations, other panels — climate model data after the correction procedure.



а

Середні багаторічні поля температури повітря (TN, TG і TX), побудовані за скоригованими модельними даними для історичного періоду 1976—2005 рр., показано на рис. 7—9. Як бачимо, в результаті коригування модельні поля за своїми показниками та їх просторовим розподілом значно наблизилися до полів температури, отриманих під час вимірювань.

Нагадаємо, що у проєкті EURO-CORDEX розраховані проєкції кліматичних показників для періоду 2006—2100 рр. У дослідженні використано проєкції температури повітря для періоду 2006—2050 рр.,

при цьому як прогностичний (майбутній клімат) розглянуто період 2021—2050 рр.

Результати розрахунків часових рядів та кліматичних індексів. Отримані у спостереженнях та модельних розрахунках за сценаріями RCP4.5 і RCP8.5 добові значення температури повітря та їх проєкції були узагальнені до середніх річних значень для визначення часових рядів, що об'єднують періоди історичного, поточного та майбутнього клімату. Це дає можливість порівняти показники, які отримані різними способами, на кожній із станцій спостережень чи для будь-якої точки роз-

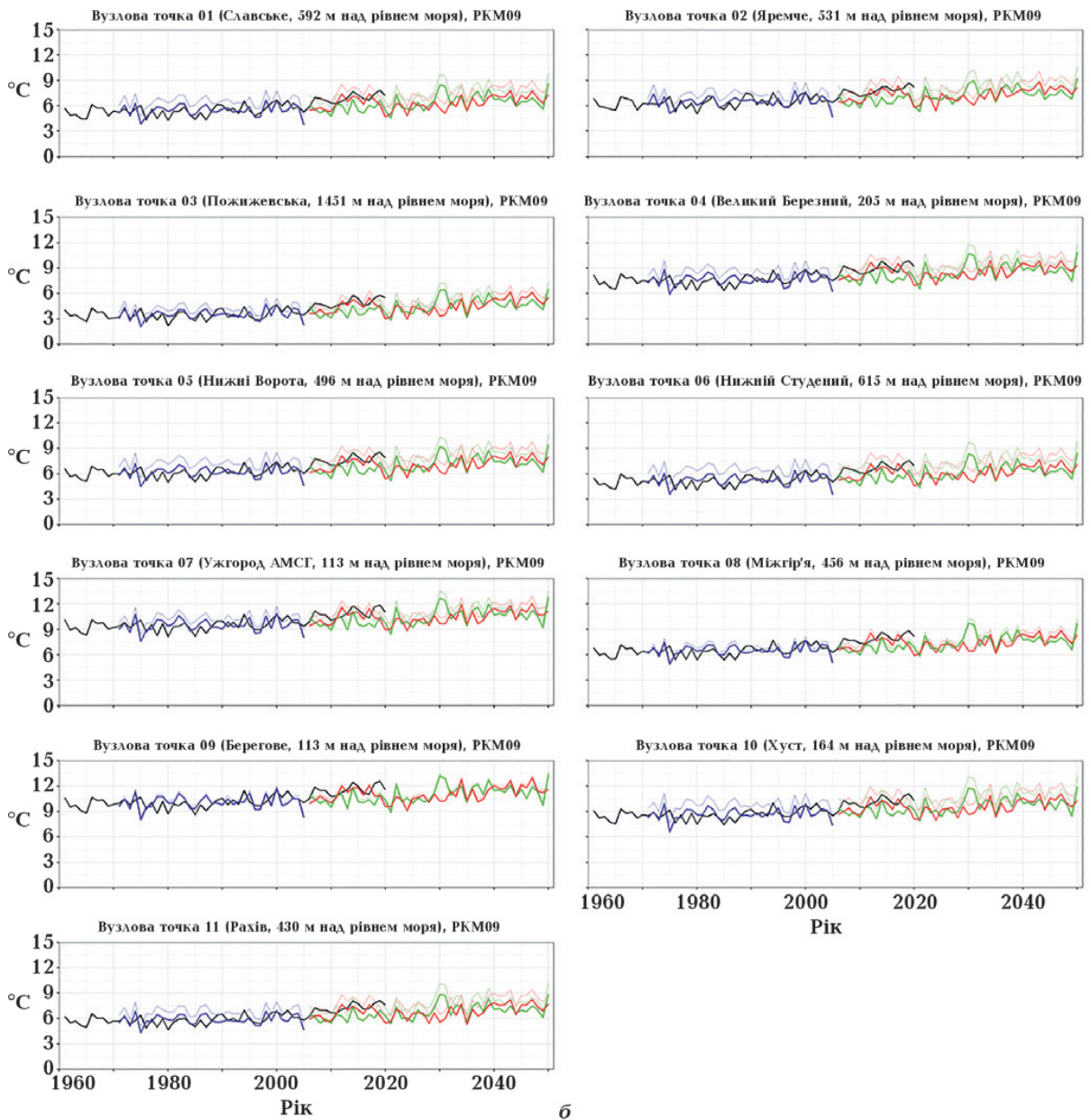


Рис. 10. Часовий розподіл середніх річних температур для метеорологічних станцій в межах області дослідження: *a* — модель 04 (CLMcom-CLM-CCLM4-8-17); *b* — модель 09 (MPI-CSC-REMO2009); чорні лінії — середні річні температури, отримані за результатами спостережень за період 1961—2020 рр.; сині лінії — середні річні температури, отримані за даними моделювання відповідної моделі (скориговані), період 1971—2005 рр.; червоні лінії — середні річні температури, отримані за даними відповідної моделі для сценарію RCP8.5 (скориговані), період 2006—2050 рр.; зелені лінії — середні річні температури, отримані за даними відповідної моделі для сценарію RCP4.5 (скориговані), період 2006—2050 рр.

Fig. 10. Temporal distribution of mean annual temperatures for meteorological stations within the study area: *a* — model 04 (CLMcom-CLM-CCLM4-8-17); *b* — model 09 (MPI-CSC-REMO2009); black lines — mean annual temperatures obtained from observations for the period 1961—2020; blue lines — mean annual temperatures obtained from the simulation data of the corresponding model (adjusted) for the period 1971—2005; red lines — mean annual temperatures obtained from the corresponding model for the RCP8.5 scenario (adjusted), 2006—2050; green lines — mean annual temperatures obtained from the corresponding model (adjusted) for the period 1971—2005; red lines — mean annual temperatures obtained from the corresponding model data for the RCP8.5 scenario (adjusted), 2006—2050; green lines — mean annual temperatures obtained from the corresponding model data for the RCP4.5 scenario (adjusted), 2006—2050.

рахункової сітки. На рис. 10 наведено часові ряди для моделей 4 і 9 (визнач. табл. 2), перша показує результати моделювання, близькі до значень, отриманих на метеорологічній мережі, друга належить до так званих «теплих» моделей.

Відрізки часових серій (1961—2020 рр.), що побудовані на підставі даних спостережень для кожної станції у регіоні, демонструють стале зростання температури повітря (рис. 10, а, б, чорні лінії). Для усіх станцій виділено три умовні періоди: 1961—1987 (1), 1988—2005 (2) і 2006—2020 рр. (3), у межах яких значення річних температур коливаються відносно деякого середнього з подальшим ступінчастим переходом до вищих показників (рис. 10, а, б, чорні лінії). Як приклад, на станції Пожижевська середня річна температура для 1-го періоду дорівнює 3,1; 2-го — 3,8; 3-го — 5,2 °С; на станції Яремче для 1-го періоду — 5,9; 2-го — 6,7; 3-го — 7,6 °С; на станції Берегове: для 1-го періоду — 9,7; 2-го — 10,7; 3-го — 11,3 °С. Стале підвищення середньої річної температури повітря для поточного клімату властиве і часовим рядами інших станцій регіону незалежно від їхнього місцеположення. Отримана за даними спостережень тенденція до підвищення температури повітря та однотипність змін у всьому досліджуваному регіоні можливі тільки завдяки впливу на формування тут термічного режиму чинників вищого масштабу — синоптичного або глобального.

Для відрізку часового ряду 2006—2020 рр. (див. рис. 10, а, б) наявні і дані спостережень, і проєкції температури повітря отримані у моделюванні за сценаріями RCP4.5 та RCP8.5. Отже, є можливість зіставляти результати спостережень за поточним кліматом та значення проєкцій температури, що отримані за даними РКМ для цього ж періоду за обома сценаріями. Скориговані проєкції температури повітря мають переважно близькі до спостережуваних показників значення, але в окремі моменти часу змодельовані показники можуть бути нижчими, ніж дані спостережень, особливо для сценарію RCP4.5 (див. рис. 9, а, б). Очевидно, що вибрані у моде-

люванні сценарії змін викидів, на основі яких проводяться прогностні розрахунки, в окремих реалізаціях можуть передбачати нижчі швидкості зростання температури, ніж ті, що спостерігалися в реальності.

Аналіз проєкцій температури, отриманих для поточного та прогностного періодів за усіма моделями, показав, що ALADIN53, ALADIN63 та RCA4 (ініційована ICHEC-EARTH) дають задовільну узгодженість зі спостереженнями на часовому проміжку 2006—2020 рр. для сценарію RCP4.5, а моделі REMO2009 та RCA4 (ініційована MPI-M-MPI-ESM-LR) — для сценарію RCP8.5. Моделі CLMcom-CLM-CCLM4-8-17 та GERICS-REMO2015 показують нижчі значення температури повітря порівняно з результатами спостережень, а отже, з високою ймовірністю, неточно відобразать сучасний клімат у цілому. Скориговані часові ряди проєкцій температури для прогностного періоду (2021—2050) демонструють (див. рис. 10, а, б) невеликі прирости температури повітря у регіоні, а в окремих реалізаціях (REMO2009 та SMHI-RCA4) вони більші для RCP4.5 порівняно з такими ж за сценарієм RCP8.5. Отримані часові серії для окремих моделей виявили менші швидкості зміни температури повітря за сценарієм RCP8.5 (найжорсткіший сценарій із серії) порівняно зі сценарієм RCP4.5 як у поточному, так і у прогностному періоді. Згідно з розрахунками, тільки після 2035—2040 рр. починає суттєво збільшуватися швидкість зростання температури, прогнозованої за сценарієм RCP8.5. Подібні дослідження для регіону [Kis et al., 2017; Torma, Kis, 2022] з використанням сценарію RCP8.5 оцінюють зростання приземної температури повітря до кінця XXI ст. на 3,9 °С.

Відносно низькі прирости значень температури повітря до 2050 р. за використаними сценаріями RCP можна пояснювати різними причинами, наприклад: неточне прогнозування емісії парникових викидів чи недостатнє врахування реальних масштабів антропогенних впливів на стан атмосфери у моделях, або неточність параметризації фізичних процесів в умовах

змін. Слід звернути увагу на те, що навіть скориговані дані моделювання можуть істотно відрізнитись від даних спостережень поточного клімату, очевидно, і прогностичні показники, що встановлені кожною з моделей, матимуть значну варіативність. Тому для визначення кліматичних індексів у прогностичний період краще використати ансамблеві (multi-model) значення 11 RCM, що забезпечить більш точні результати.

Показники зміни індексів для вузлів регулярної сітки були визначені як різниці між значеннями (розрахованими за період 2021—2050 рр.) середньої ансамблевої ре-

алізації кліматичних проєкцій та середнім значенням метеорологічних спостережень (розрахованим за період 1991—2020 рр.). На рис. 11 «гарячими» кольорами зображено більш значні зміни, що переважно призводять до суттєвого потепління, тоді як «холодними» кольорами — помірні зміни або їх відсутність/похолодання. Середня річна температура повітря (рис. 11, а—г), відповідно до отриманих даних ансамблевого моделювання, до середини ХХІ ст. буде зростати, позитивні тренди фіксуються в усьому досліджуваному регіоні. Фонові значення підвищення температури повіт-

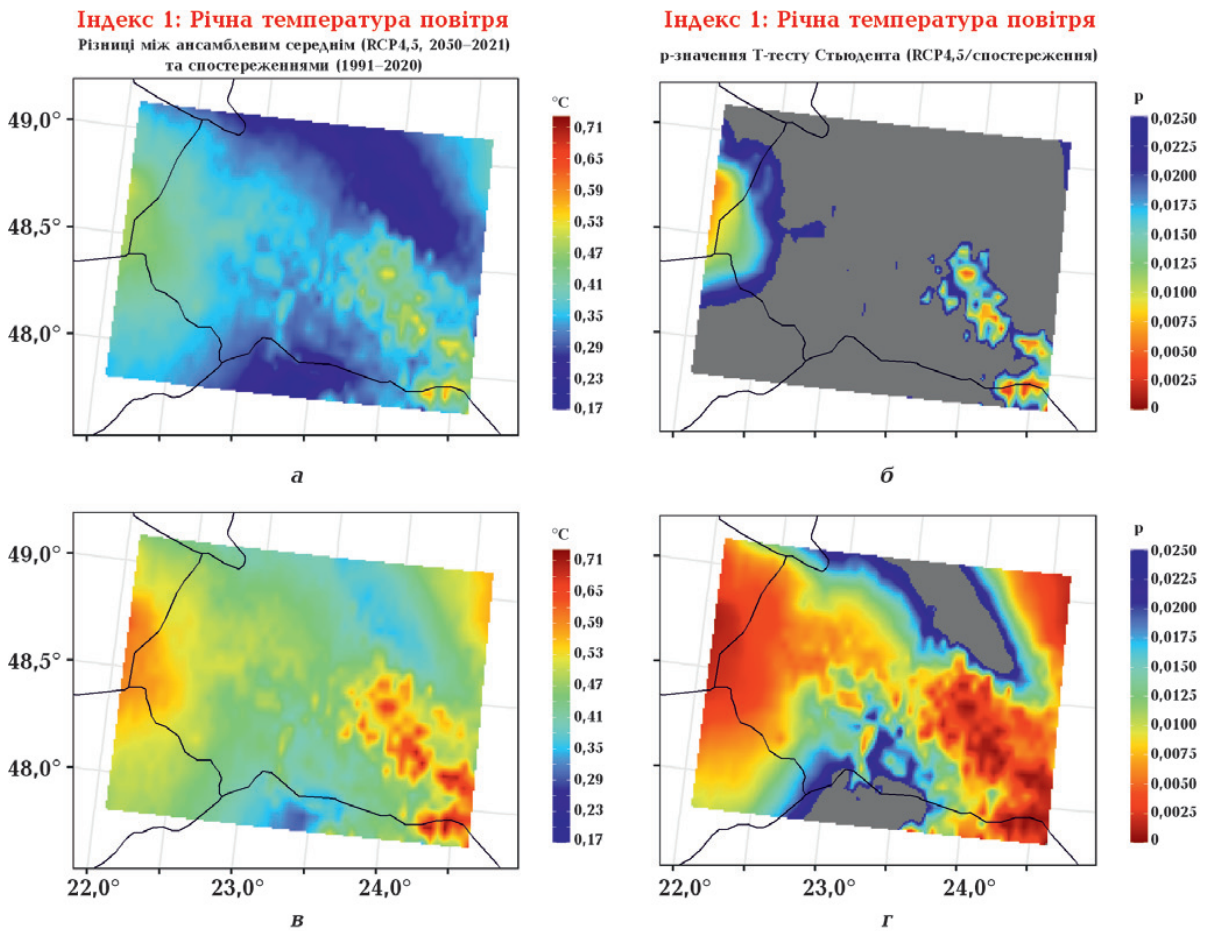


Рис. 11. Результати оцінювання кліматичних змін у майбутньому періоді 2021—2050 відносно сучасного періоду 1991—2020 (рис. 11—14). Ліва панель: різниці значень індексу 1 (середня річна температура), розраховані для RCP4.5 (а) та RCP8.5 (в) за періоди 2021—2050 та 1991—2020 рр. Права панель: кількісна характеристика статистичної значущості розрахованих різниць (р-значення Т-тесту Стьюдента) (б, г). Сірим кольором на картах праворуч позначені регіони із статистично незначущими різницями.

Fig. 11. Results of the climate changes assessment for the 2021—2050 future period compared to the 1991—2020 modern period (Fig. 11—14). Left panel: differences in the values of index 1 (mean annual temperature) calculated for RCP4.5 (a) and RCP8.5 (b) for the periods 2021—2050 and 1991—2020; Right panel: quantitative characterization of the statistical significance of the calculated differences (p-value of Student's T-test) (b, r). Gray color on the maps on the right indicates regions with statistically insignificant differences.

ря варіюють у межах $0,35\text{--}0,41\text{ }^{\circ}\text{C}$, (або, умовно, $0,12\text{--}0,14\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{декада}^{-1}$) для RCP4.5 і $0,53\text{--}0,56\text{ }^{\circ}\text{C}$ (0 або $0,18\text{--}0,19\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{декада}^{-1}$) для RCP8.5. Найвище зростання отримано для південної та південно-східної частин домену ($48,20^{\circ}\text{--}48,60^{\circ}$ пн.ш.; $23,6^{\circ}\text{--}24,5^{\circ}$ сх.д.) $0,50\text{--}0,56\text{ }^{\circ}\text{C}$ (RCP4.5) та $0,68\text{--}0,71\text{ }^{\circ}\text{C}$ (RCP8.5). Зазначимо, що у названій області статистично значущі прирости структуровані у смуги, орієнтовані з північного заходу на південний схід (приблизно як гірські хребти), з точковими максимумами, що відповідають високогір'ям. Інакше кажучи, результати моделювання дають підставу очікувати більші швидкості зростання температури в межах високогірних ділянок порівняно з такими в межах низинних ділянок.

У статті [Jin et al., 2022] отримано подібний результат, який, на думку авторів, можна розглядати і як проблему моделювання, а саме: неточностей (чи неможливості) достовірної параметризації панівного впливу на термічний режим гірських регіонів стану підстильної поверхні чи циркуляційних процесів у вільній атмосфері. Крім того, існує проблема коректного врахування температурної стратифікації в конкретному гірському регіоні, що важливо в разі добового часового розширення сіткових даних (див., наприклад [Tabony, 1985]).

Суттєві прирости до $0,44\text{--}0,53$ і $0,50\text{--}0,62\text{ }^{\circ}\text{C}$, відповідно до сценаріїв, очікуються також на південному заході та заході домену (Закарпаття). Найменші зростання температури отримано для двох областей: на півдні та на північному сході домену відповідно $0,17\text{--}0,29\text{ }^{\circ}\text{C}$ (RCP4.5) та $0,35\text{--}0,47\text{ }^{\circ}\text{C}$ (RCP8.5).

Виявлено задовільний просторовий збіг областей значущих приростів температури повітря для обох розглянутих сценаріїв (див. рис. 11, б, г). Величини змін температури повітря, що отримані окремими моделями, варіюють відносно представлених середніх полів (див. рис. 11, а, в), але просторова локалізація основних областей максимальних/мінімальних приростів зберігається у розрахунках кожної моделі для обох сценаріїв.

Індекс FD, що представлений різницями між прогнозним і поточним періодами клімату (рис. 12) показує динаміку кількості днів з від'ємними мінімальними температурами повітря у приземному шарі впродовж року. У межах домену зафіксовано стійку тенденцію до зменшення кількості таких днів, що відповідає встановленим трендам до зростання температури у регіоні. Максимальне зменшення кількості днів упродовж року з від'ємними мінімальними температурами на $10\text{--}11$ (RCP4.5) та $12\text{--}14\text{ }^{\circ}\text{C}$ (RCP8.5) очікується на північному заході та заході регіону досліджень. Фонові зменшення значень індексу становлять $6\text{--}9$ днів для першого сценарію і $7\text{--}11$ днів — для другого. Для RCP4.5 існують невеликі області, де індекс не змінюється або набуває незначних додатних значень. Ці області очікувано, збігаються з поширенням мінімальних приростів середніх річних температур та виявляються у горах, де вони структуровані у смуги в межах високогірної частини регіону і, очевидно, відповідають схиловим ділянкам та міжгірним улоговинам. Отримані результати вказують на те, що принаймні за сценарію RCP4.5 до середини поточного сторіччя термічний режим у холодний період змінюватиметься повільно та існуватимуть ділянки (долини, улоговини), де температура повітря може бути нижчою, ніж у попередній період. Зниження температури повітря у прогнозний період можливе переважно внаслідок формування інверсій осідання, що є характерним процесом для регіону, особливо в зимовий сезон. Для сценарію RCP8.5 очікується незначне зростання температури повітря у холодний період року, але уже для усього домену.

Розраховані зміни значень індексу SU показали, що в межах області дослідження (рис. 13) кількість літніх днів збільшиться максимально на $2\text{--}3$ дні для RCP4.5 та $3\text{--}5$ днів для RCP8.5. Области підвищення температур теплого періоду очікуються переважно в межах широкої смуги спрямованої з крайнього південного сходу на північний захід регіону. Умовно це відповідає північно-східному макросхилу і час-

тині Передкарпаття. На південному заході і півдні (Закарпаття та частина південно-західного макросхилу) отримано переважно зменшення кількості літніх днів, з максимальними значеннями 3—4 дні. У межах названого регіону є тільки окремі незначні за розмірами ділянки, де за сценарієм RCP8.5 очікується збільшення літніх днів (1—2). Просторовий розподіл індексу SU відповідає існуючому поділу регіону Українських Карпат за регіональними відмінностями прояву циркуляційних процесів. У літній сезон на північно-східному макросхилі може збільшитися повторюваність

впливів континентальних гребенів та антициклонів помірних і субтропічних широт. У публікаціях, наприклад [Shevchenko et al., 2014], вказується, що в разі збільшення повторюваності антициклонального впливу на регіон у теплий період року з високою ймовірністю формуватимуться так звані «хвилі тепла», які можуть збільшувати тут кількість днів з максимальними температурами більш як 25 °С та мінімальними температурами більш як 20 °С. Зауважимо, що вплив континентальних гребенів на південно-західний макросхил та Закарпаття в разі збереження основних рис іс-

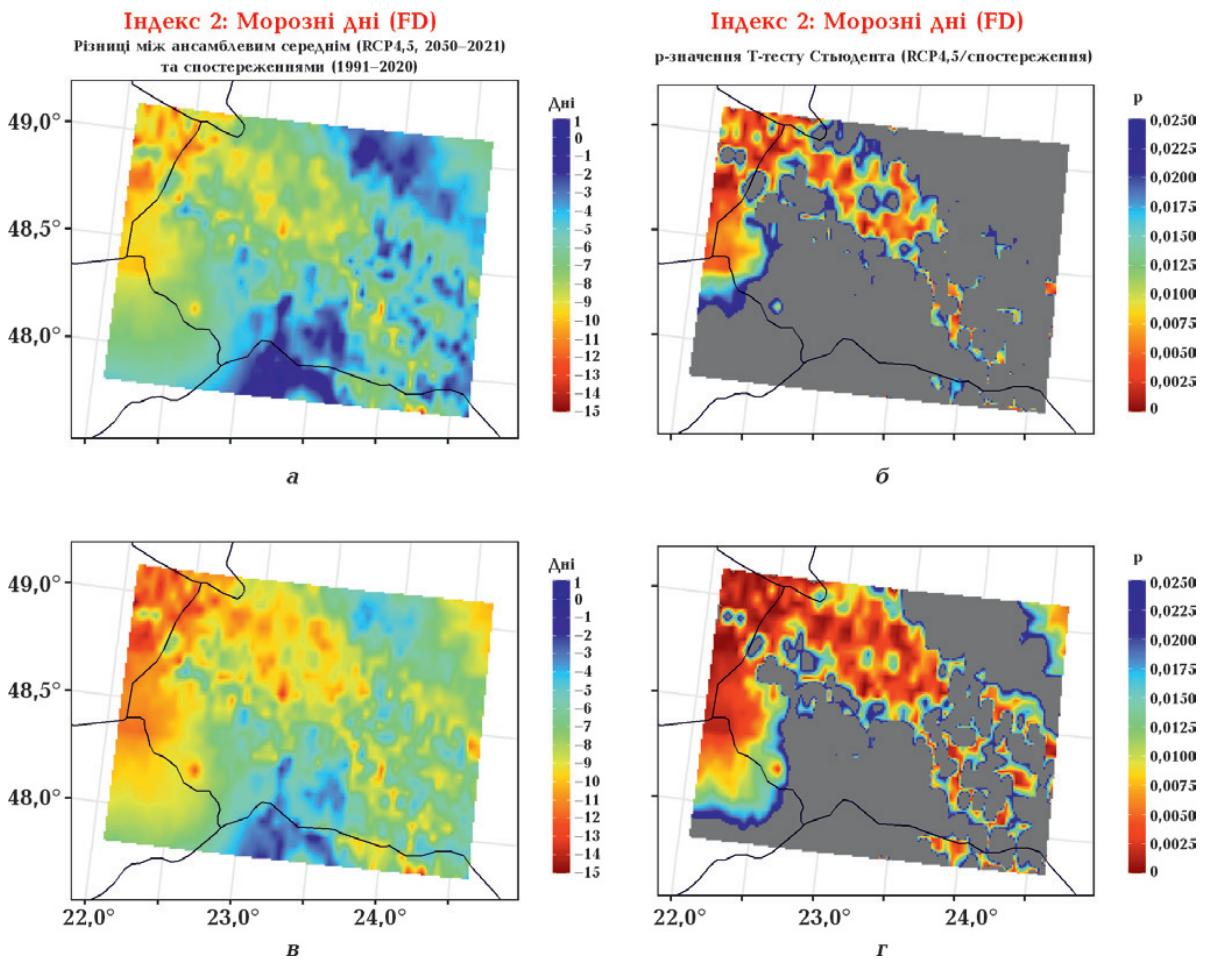


Рис. 12. Ліва панель: різниці середніх значень індексу 2 (морозні дні), розраховані для RCP4.5 (а) та RCP8.5 (в) за періоди 2021—2050 та 1991—2020 рр. Права панель: кількісна характеристика статистичної значущості розрахованих різниць (р-значення Т-тесту Стьюдента) (б, г). Сірим кольором на картах праворуч позначені регіони із статистично незначущими різницями.

Fig. 12. Left panel: differences in the average values of index 2 (frost days) calculated for RCP4.5 (a) and RCP8.5 (b) for the periods 2021—2050 and 1991—2020. Right panel: quantitative characterization of the statistical significance of the calculated differences (p-value of Student's T-test) (b, g). Gray color on the maps on the right indicates regions with statistically insignificant differences.

нуючої циркуляції буде значно меншим.

Подібний до попереднього просторовий розподіл матиме і індекс TR (рис. 14), значення якого показують динаміку тропічних днів (ночей). Це показник зміни кількості днів упродовж року, коли мінімальні добові температури $TN \geq 20^\circ\text{C}$. Величини приростів TR в межах домену розподіляються подібно до змін кількості літніх днів за дещо нижчих абсолютних значень. До середини сторіччя очікуються збільшення на 1—2 тропічних дні для сценарію RCP4.5 та 2—3 дні для сценарію RCP8.5 на більшій частині області дослідження, за винятком

південного заходу і півдня (Закарпаття), де за розрахунками кількість тропічних днів зменшиться на 1—2 дні. Отримані невисокі прирости значень індексів SU та TR, що описують характер змін температури повітря у літній сезон упродовж усього періоду досліджень, підтверджуючи оцінки, отримані при аналізі часових серій середніх річних значень про можливе зниження окремими модельними реалізаціями швидкості підвищення температури для часових проміжків поточного і майбутнього клімату.

Оцінювання динаміки кліматичних ін-

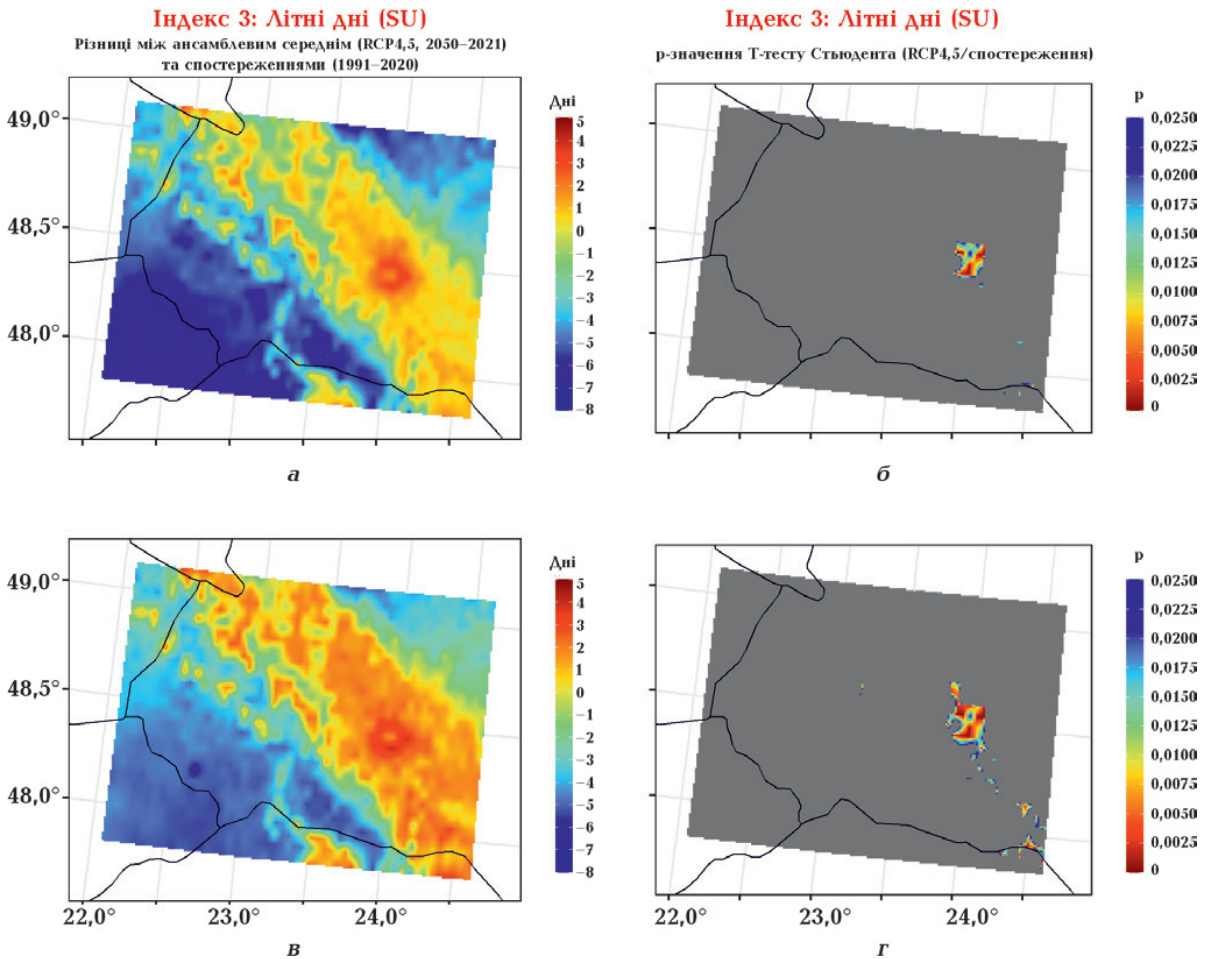


Рис. 13. Ліва панель: різниці середніх значень індексу 3 (літні дні), розраховані для RCP4.5 (а) та RCP8.5 (в) за періоди 2021—2050 та 1991—2020 рр. Права панель: кількісна характеристика статистичної значущості розрахованих різниць (p-значення T-тесту Стюдента) (б, г). Сірим кольором на картах праворуч позначені регіони із статистично незначущими різницями.

Fig. 13. Left panel: differences in the average values of index 3 (summer days) calculated for RCP4.5 (a) and RCP8.5 (b) for the periods 2021—2050 and 1991—2020. Right panel: quantitative characterization of the statistical significance of the calculated differences (p-value of Student's T-test) (b, r). Gray color on the maps on the right indicates regions with statistically insignificant differences.

дексів виявило загальні тенденції до підвищення температури приземного шару повітря у регіоні до середини XXI ст. Кількісні оцінки таких змін показують, що максимальні прирости середньої річної температури до середини сторіччя у порівнянні з періодом 1991—2020 рр. можуть досягти 0,56/0,71 °C, а середні значення — 0,38/0,55 °C відповідно до сценаріїв RCP4.5/RCP8.5. Причиною незначного зростання температури повітря може бути порівняння послідовних часових періодів та низькі швидкості зростання показника, що закладені у сценаріях. Результати інших до-

слідників [Torma, Kis 2022], що отримані за даними моделей CORDEX за сценарієм RCP8.5 для великого Карпатського регіону, дають підвищення температури повітря до 2050 р. порівняно з 1976—2005 рр. на 1,4 °C, тобто величини зіставні.

Найбільші швидкості зростання температури очікуються у високогірних районах на південному сході та у західній частині. Зміни температурного режиму матимуть і деякі сезонні відмінності. Більш високі літні температури ймовірніші для північно-східного макросхилу та південно-східної частини розрахункової області, подібні

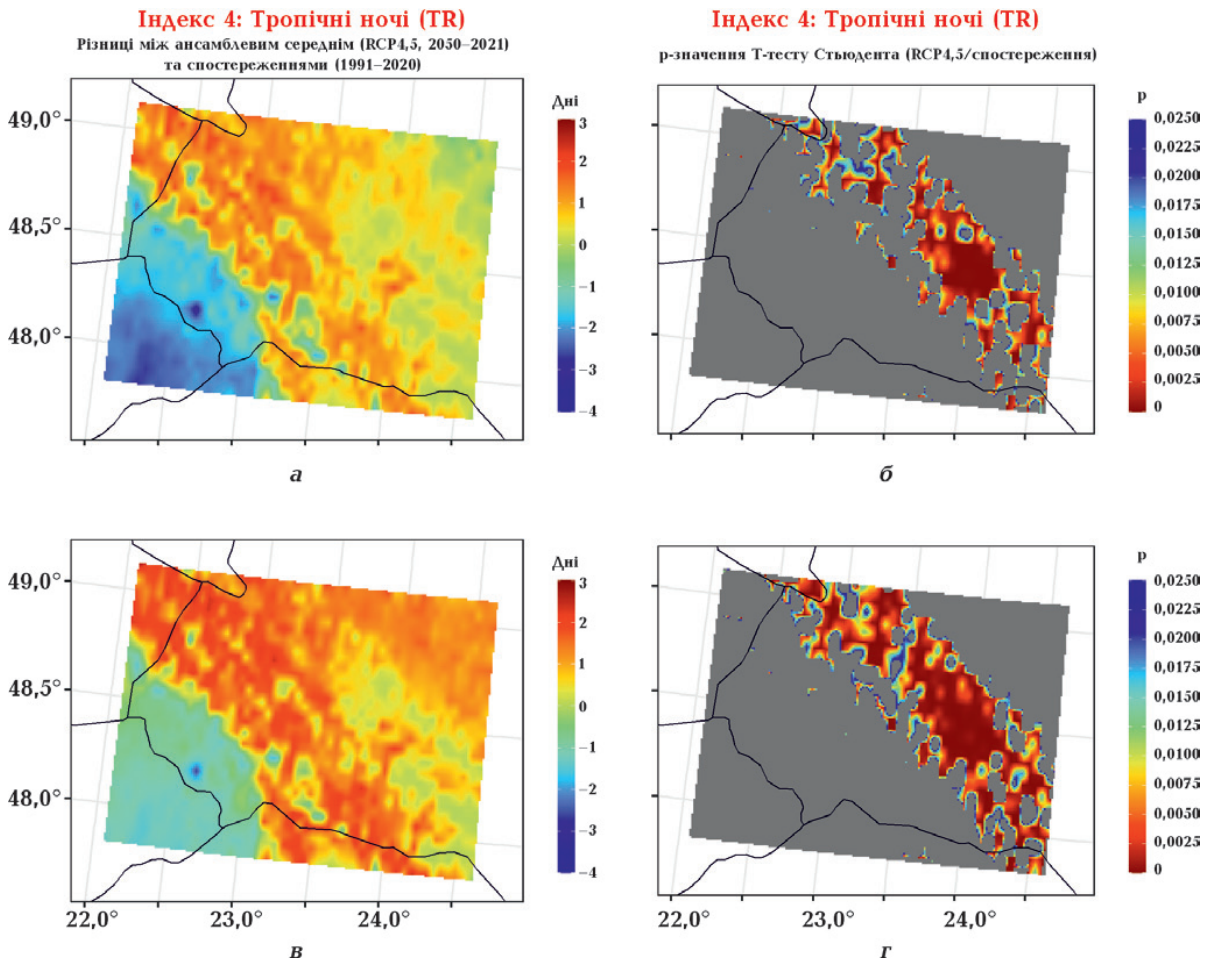


Рис. 14. Ліва панель: різниці середніх значень індексу 4 (тропічні ночі), розраховані для RCP4.5 (а) та RCP8.5 (в) за періоди 2021—2050 та 1991—2020 рр. Права панель: кількісна характеристика статистичної значущості розрахованих різниць (p-значення Т-тесту Стьюдента) (б, г). Сірим кольором на картах праворуч позначені регіони із статистично незначущими різницями.

Fig. 14. Left panel: differences in the mean values of index 4 (tropical nights), calculated for RCP4.5 (a) and RCP8.5 (b) for the periods 2021—2050 and 1991—2020. Right panel: quantitative characterization of the statistical significance of the calculated differences (p-value of Student's T-test) (c, d). Gray color on the maps on the right indicates regions with statistically insignificant differences.

дані для регіону отримані і у статті [Simon et al., 2023]. Температура повітря у холодний період року, за обома сценаріями, зростатиме переважно у північно-західній та південно-західній частині досліджуваного регіону.

Додаткового дослідження потребують питання більших темпів потепління на високогірних ділянках і врахування у моделюванні впливу на температурний режим тривалих інверсій у зимовий період, коли температура на високогір'ях буде вищою, ніж у міжгір'ях та долинах, і такі періоди можуть спостерігатися тривалий час.

Висновки. Для оцінювання змін термічного режиму в Українських Карпатах до середини XXI ст. розраховано кліматичні індекси на підставі даних моделювання 11 регіональних моделей проєкту EURO-CORDEX. Вибрані моделі мали просторове розширення ($0,11^\circ \times 0,11^\circ$), або (≈ 11 км), часове — 1 доба.

Моделі проєкту EURO-CORDEX у всіх 11 варіантах мали розбіжності проєкцій температури з даними спостережень при порівнянні за період 1971—2005 рр. Значні абсолютні похибки отримані для моделей 3 і 7 (KNMI-RACMO22E, ініційована двома різними глобальними моделями), їх розглядають як «холодні», та моделей 9, 11 (MPI-CSC-REMO 2009, GERICs-REMO 2015), які розглядають як «теплі». Найбільш близькими до даних спостережень є результати моделювання 4-ї, 6-ї і 10-ї моделей (CLMcom-CLM-CCLM4-8-17, GERICs-REMO2015, SMHI-RCA4). Названі моделі зберігають подібний розподіл абсолютних похибок і для полів мінімальної температури та максимальної температури.

Для виконання корекції результатів моделювання було набрано даних добових значень середньої, мінімальної та максимальної температури (observation gridded data). Для їх побудови використовували дані спостережень існуючих у регіоні метеорологічних станцій, які пройшли перевірку якості, гомогенізацію та були інтерпольовані у вузли розрахункових сіток з просторовим розширенням ($0,05^\circ \times 0,05^\circ$) та часовим — доба. Представлені у такому

вигляді дані спостережень придатні як для процедури корекції, так і для розрахунків кліматичних індексів у зазначений період.

Для корекції результатів моделювання використано метод лінійного масштабування та масштабування дисперсії. Статистичні прийоми дали змогу узгодити середні значення наборів модельних проєкцій та результатів спостережень і зменшити розкид значень моделювання. Отримані при проведенні корекції для періоду 1971—2005 рр. розрахункові коефіцієнти були використані для уточнення проєкцій температури повітря для поточного (1991—2020 рр.) та майбутнього (2021—2050 рр.) клімату.

З метою уніфікації всіх кліматичних даних і зведення їх до однієї розрахункової сітки дані проєкцій температури повітря також було перераховано у вузли стандартної широтно-довготної сітки кроком $0,05^\circ \times 0,05^\circ$ за допомогою програмного забезпечення CDO (Climate Data Operator) з використанням методу білінійної інтерполяції.

Моделіні розрахунки базувалися на сценаріях Representative Concentration Pathways: RCP4.5 та RCP8.5. Як показали порівняння часових серій даних спостережень і результатів моделювання, запрограмовані у моделях зміни температури повітря до кінця XXI ст. мають значну інерцію у часі. У межах часового проміжку 2006—2020 рр. скориговані модельні дані за обома сценаріями в окремі моменти часу показували нижчі значення температури повітря в регіоні ніж реальні. Тому, в разі використання даних моделювання отриманих за названими сценаріями, необхідно звертати увагу на швидкість зміни температури повітря у модельних розрахунках, щоб коректно оцінювати ці зміни впродовж відносно коротких проміжних періодів XXI ст.

Для оцінювання трансформації термічного режиму у регіоні використано зміни кліматичних індексів, розрахованих за добовими значеннями TG, TN, TX, ряди яких були отримані при спостереженнях та у модельних розрахунках. Встановлено за-

гальні тенденції до підвищення температури приземного шару повітря у регіоні до середини ХХІ ст. Кількісні показники таких змін порівняно з періодом 1991—2020 рр. становлять 0,35—0,41 °С (або умовно 0,12—0,14 °С·декада⁻¹), та 0,53—0,56 °С (0,18—0,19 °С·декада⁻¹), максимальні на рівні 0,56/0,71 °С залежно від сценарію.

Як проміжний результат і такий, що потребує додаткового дослідження, можна розглядати отримані більші швидкості зростання температури повітря в межах гірських хребтів орієнтованих з північного заходу на південний схід з точковими максимумами до 0,56/0,71 °С. Надалі підтвердженням/запереченням цього факту можуть бути розрахунки з використанням іншого набору регіональних кліматичних моделей.

Очікуються також просторові і сезонні відмінності у швидкостях зростання тем-

ператури повітря. Відтак, прогнозується більш швидке зростання літніх температур (SU, TR) на північному сході та півдні, а зимових (FD) — на північному заході та південному заході.

Визначення регіональних змін термічного режиму Українських Карпат на підставі даних чисельного моделювання та спроби порівняння отриманих результатів з іншими авторськими даними вказують на необхідність *вироблення певного стандарту таких досліджень*. Бажано витримувати однакову тривалість контрольних і прогнозних періодів (30 років), вибрати базовий (історичний) період, забезпечений даними спостережень, з виконанням усіх вимог до контролю якості, гомогенізації та подання результатів вимірювань, а також вказувати способи корекції модельних даних і застосовувати ансамблевий підхід при визначенні кліматичних індексів.

Список літератури

- Балабух В.О., Малицька Л.В. Оцінювання сучасних змін термічного режиму в Україні. *Геоінформатика*. 2017. № 4(64). С. 34—50.
- Балабух В.А., Малицькая Л.В., Ягодинец С.Н., Лавриненко Е.Н. Проекция изменения климатических средних и показателей экстремальности термического режима к середине XXI века в Украине. *Природопользование*. 2018. № 1. С. 97—113.
- Замфірова М.С., Хохлов В.М. Режим температури повітря та опадів в Україні в 2021—2050 роках за даними ансамблю моделей CORDEX. *Укр. гідрометеоролог. журн.* 2020. № 25. С. 17—27. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25>.
- Клімат України*. За ред. В.М. Ліпінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко. Київ: Вид-во Раєвського, 2003, 343 с.
- Кліматичний кадастр України*. Київ: Центральна геофізична обсерваторія, 2006. 1 електрон. опт. диск (CD-ROM).
- Краковська С.В., Паламарчук Л.В., Гнатюк Н.В., Шпиталь Т.М. Проекції приземної температури та відносної вологості повітря в областях України до середини ХХІ ст. за да-
- ними ансамблів регіональних кліматичних моделей. *Геоінформатика*. 2018. № 3(67). С. 62—77.
- Сіденко В.П. Кліматологічні дослідження екстремальних погодних умов, подій та явищ в Україні та у світі. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2022. Вип. 2(64). С. 53—70. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.2.5>.
- Скриник О.А., Бойчук Д.О., Сіденко В.П. Виявлення та усунення кліматологічної неоднорідності у часових рядах кліматологічних показників. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2019. Вип. 2(53). С. 88—100.
- Хохлов В.М., Єрмоленко Н.С. Майбутні зміни клімату та їх вплив на режим опадів та температури в Україні. *Укр. гідрометеоролог. журн.* 2015. № 16. С. 76—82.
- Aguilar, E. (2019). *INDECIS Quality Control Software and Manual: INQC, beta version*. Retrieved from http://www.indecis.eu/docs/Deliverables/Deliverable_3.1.a.pdf [Accessed December 14, 2023].
- Benichou, P., & Le Breton, O. (1987). AURELHY: une method d'analyse utilisant le relief pour les besoins de l'hydrometeorologie. In Deu-

- xièmes Journées Hydrologiques de l'ORS-TOM a Montpellier (Colloqueset Séminaires) (pp. 299—304). Paris: ORSTOM.
- Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, C.A.T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., & Woth, K. (2007) Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climate Change*, 81, 71—95. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9226-z>.
- Birsan, M.V., Dumitrescu, A., Micu, D.M., & Cheval, S. (2014). Changes in annual temperature extremes in the Carpathians since AD 1961. *Natural Hazards*, 74, 1899—1910. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1290-5>.
- Boychenko, S., & Maidanovych, N. (2023). Semi-empirical model of the spatiotemporal surface temperature distribution on the plain part of Ukraine. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 45(2), 63—76. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i2.278328>.
- Casanueva, A., Herrera, S., Iturbide, M., Lange, S., Jury, M., Dosio, A., Maraun, D., & Gutiérrez, J.M. (2020). Testing bias adjustment methods for regional climate change applications under observational uncertainty and resolution mismatch. *Atmospheric Science Letters*, 21, 1—12. <https://doi.org/10.1002/asl.978>.
- Christensen, J.H. (2013). Regional climate science: Findings of IPCC AR5 WG1. *International Conference on Regional Climate CORDEX*, 4—7 Nov. 2013, Brussels.
- Cornes, R., van der Schrier, G., van den Besseelaar, E.J.M., & Jones, P.D. (2018). An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>.
- Dosio, A., Lennard, C., & Spinoni, J. (2022). Projections of indices of daily temperature and precipitation based on bias-adjusted CORDEX-Africa regional climate model simulations. *Climatic Change*, 170, 13. <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03307-0>.
- Dumitrescu, A., Bojariu, R., Birsan, M.-V., Marin, L., & Manea, A. (2015). Recent climatic changes in Romania from observational data (1961—2013). *Theoretical and Applied Climatology*, 122, 111—119. <https://doi.org/10.1007/s00704-014-1290-0>.
- Gado, T.A., Mohameden, M.B. & Rashwan, I.M.H. (2022). Bias correction of regional climate model simulations for the impact assessment of the climate change in Egypt. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 20200—20220. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17189-9>.
- Giorgi, F. (2005). Climate change prediction. *Climatic Change*, 73, 239—265. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-6857-4>.
- Giorgi, F. (2019). Thirty years of regional climate modeling: where are we and where are we going next? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 5696—5723. <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>.
- Guijarro, J.A. (2023). *Homogenization of climatic series with Climatol. Version 4.0.7. Guide*. Retrieved from <https://www.climatol.eu/climatol4-en.pdf> [Accessed December 14, 2023].
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Pachauri, R.K, Reisinger, A. (Eds.). Geneva, Switzerland, 104 p.
- IPCC. (2013). *Climate Change 2013: the physical science basis*. In Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, M. (Eds.), *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge United Kingdom and New York, 1535 p. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.
- IPCC. (2015). *Workshop Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Workshop on Regional Climate Projections and their Use in Impacts and Risk Analysis Studies*. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M. (Eds.). IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, p. 171. Retrieved from <https://archive.ipcc.ch/pdf/supporting-material>.
- IPCC (2021). Summary for Policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitze, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science*

- Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (pp. 3—32). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- Jakob, D., Petersen, J., Eggert, B., & Alias, A. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563—578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>.
- Jin, H., Li, X., Frauenfeld, O.W., Zhao, Y., Chen, C., Du, R., Du, J., & Peng, X. (2022). Comparisons of statistical downscaling methods for air temperature over the Qilian Mountains. *Theoretical and Applied Climatology*, 149, 893—896. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04081-w>.
- Kis, A., Pongracz, R., & Bartholy, J. (2017). Multi-model analysis of regional dry and wet conditions for the Carpathian region. *International Journal of Climatology*, 37, 4543—4560. <https://doi.org/10.1002/joc.5104>.
- Krakovska, S., Balabukh, V., Chyhareva, A., Pysarenko, L., Trofimova, I., & Shpytal, T. (2021). Projections of regional climate change in Ukraine based on multi-model ensembles of Euro-CORDEX. *EGU general assembly 2021, online, 19—30 Apr 2021, EGU21-13821*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13821>.
- Lange, S. (2019). Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0). *Geoscientific Model Development*, 12, 3055—3070. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3055-2019>.
- Mishra, V., Bhatia, U., & Tiwari, A.D. (2020). Bias-corrected climate projections for South Asia from Coupled Model Intercomparison Project-6. *Scientific Data*, 7, 338. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00681-1>.
- Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, P., Jarvis, A., & Ramirez-Villegas, J. (2020). High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments. *Scientific Data*, 7. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0343-8>.
- Schulzweida, U. (2020). *CDO User Guide (2.0.0)*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5614769>.
- Shevchenko, O., Lee, H., Snizhko, S., & Mayer, H. (2014). Long-term analysis of heat waves in Ukraine. *International Journal of Climatology*, 34, 1642—1650. <https://doi.org/10.1002/joc.3792>.
- Simon, C., Kis, A., & Torma, C.Z. (2023). Temperature characteristics over the Carpathian Basin-projected changes of climate indices at regional and local scale based on bias-adjusted CORDEX simulations. *International Journal of Climatology*, 43(8), 3552—3569. <https://doi.org/10.1002/joc.8045>.
- Skrynyk, O., Sidenko, V., Aguilar, E., Guijarro, J., Skrynyk, O., Palamarchuk, L., Oshurok, D., Osypov, V., & Osadchyi, V. (2023). Data quality control and homogenization of daily precipitation and air temperature (mean, max and min) time series of Ukraine. *International Journal of Climatology*, 43(9), 4166—4182. <https://doi.org/10.1002/joc.8080>.
- Spinoni, J., Szalai, S., Szentimrey, T., Lakatos, M., Bihari, Z., Nagy, A., Németh, A., Kovacs, T., Mihic, D., Dacic, M., Petrovic, P., Kržič, A., Hiebl, J., Auer, I., Milkovic, J., Štepanek, P., Zahradníček, P., Kilar, P., Limanowka, D., Pyrc, R., Cheval, S., Birsan, M.-V., Dumitrescu, A., Deak, G., Matei, M., Antolovic, I., Nejedlík, P., Štastný, P., Kajaba, P., Bochníček, O., Galo, D., Mikulova, K., Nabyvanets, Y., Skrynyk, O., Krakovska, S., Gnatiuk, N., Tolasz, R., Antofie, T., & Vogt, J. (2015) Climate of the Carpathian region in the period 1961—2010: climatologies and trends of 10 variables. *International Journal of Climatology*, 35, 1322—1341. <https://doi.org/10.1002/joc.4059>.
- Szentimrey, T., & Bihari, Z. (2014). *Manual of Interpolation Software MISH v1.03*. Hungarian Meteorological Service. Budapest, Hungary.
- Tabony, R.C. (1985). Relations between minimum temperature and topography in Great Britain. *Journal of Climatology*, 5, 503—520. <https://doi.org/10.1002/joc.3370050504>.
- Torma, C.Z., & Kis, A. (2022). Bias-adjustment of high-resolution temperature CORDEX data over the Carpathian region: Expected changes including the number of summer and frost days. *International Journal of Climatology*, 42(12), 6631—6646. <https://doi.org/10.1002/joc.7654>.

Near-surface air temperature in the Ukrainian Carpathians up to the middle of the XXI century by the EURO-CORDEX models

L.V. Palamarchuk¹, O.Y. Skrynyk^{2,1}, V.V. Putrenko³, O.A. Skrynyk^{4,1},
D.O. Oshurok¹, V.P. Sidenko¹, Z.M. Kyreieva¹, 2024

¹Ukrainian Hydrometeorological Institute of the State Emergency Service of Ukraine and the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

²Center for Climate Change, Rovirai Virgili University, Tarragona, Spain

³American University Kyiv, Kyiv, Ukraine

⁴National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

The article presents estimates of future changes in the thermal regime of surface air in the Ukrainian Carpathians for the period up to 2050. The assessment was based on a set of climate indices (mean annual air temperature, number of frost days — FD, number of summer days — SU, and number of tropical days — TR) calculated with high spatial resolution (0.05°×0.05°) based on daily meteorological observations (1960—2020) and the results of 11 regional climate models of the EURO-CORDEX project (2021—2050). To obtain reliable, unbiased projections of air temperature, the model data were bias-corrected using linear scaling and variance scaling. Climate change was estimated based on the calculation of index increments for the period 2021—2050 relative to 1991—2020. General trends towards an increase in surface air temperature in the region by the middle of the twenty-first century were detected. Quantitative indicators of such changes: background increases in the range of 0.35—0.41 °C (or, conditionally, 0.12—0.14 °C·decade⁻¹) for the RCP4.5 scenario, and 0.53—0.56 °C (0.18—0.19 °C·decade⁻¹) for the RCP8.5 scenario. The maximum increases in average annual temperature compared to the period of the current climate in 1991—2020 are 0.56 and 0.71 °C, respectively, and are confined to the highlands in the southeastern part of the region, i.e., higher warming rates are expected for the highlands. Changes in the threshold climate indices by the middle of the XXI century will have certain spatial differences: higher summer temperatures (SU, TR) are more likely for the northeastern macro slope and the southeastern part of the study area, and in the cold season (FD) of the year, under both scenarios, air temperatures will increase mainly in the northwestern and southwest tern parts of the study region.

Key words: surface air temperature, climate indices, climate projections, EURO-CORDEX, Ukrainian Carpathians.

References

- Balabukh, V.O., & Malytska, L.V. (2017). Assessment of modern changes in the thermal regime in Ukraine. *Heoinformatyka*, (4), 34—50 (in Ukrainian).
- Balabukh, V.A., Malitskaya, L.V., Yagodinets, S.N., Lavrinenko, Ye.N. (2018). Projections of changes in climatic averages and indicators of extreme thermal regime by the middle of the 21st century in Ukraine. *Prirodopolzovanie*, (1), 97—113 (in Russian).
- Zamfirova, M.S., & Khokhlov, V.M. (2020). Air temperature and precipitation regime in ukraine in 2021—2050 by CORDEX model ensemble. *Ukrainskyi Hidrometeorolohichnyi Zhurnal*, (25), 17—27. <https://doi.org/10.31481/uhmj.25> (in Ukrainian).

- Lipinskyi, V.M., Diachuk, V.A., & Babichenko, V.M. (2003). *Climate of Ukraine*. Kyiv: Ravevsky Publ. House, 343 s. (in Ukrainian).
- Climatic cadastre of Ukraine*. (2006). Kyiv: Central Geophysical Observatory, 1 electronic disc (CD-ROM) (in Ukrainian).
- Krakovska, S.V., Palamarchuk, L.V., Hnatiuk, N.V., & Shpital, T.M. (2018). Projections of ground temperature and relative humidity in regions of Ukraine until the middle of the XXI century. According to the data of regional climate model ensembles. *Heoinformatyka*, (3), 62—77. (in Ukrainian).
- Sidenko, V.P. (2022). Climatological studies of extreme weather conditions, events and phenomena in Ukraine and the world. *Hidrolohia, hidrokimiia i hidroeholohia*, (2), 53—70. <https://doi.org/10.17721/2306-5680.2022.2.5> (in Ukrainian).
- Skrynyk, O.A., Boichuk, D.O., & Sidenko, V.P. (2019). Detection and removal of inhomogeneity in time series of climatological variables. *Hidrolohia, hidrokimiia i hidroeholohia*, (2), 88—100 (in Ukrainian).
- Khokhlov, V.M., & Yermolenko, N.S. (2015). Future climate change and its impact on precipitation and temperature in Ukraine. *Ukrainskyi Hidrometeorologichnyi Zhurnal*, (16), 76—82 (in Ukrainian).
- Aguilar, E. (2019). *INDECIS Quality Control Software and Manual: INQC, beta version*. Retrieved from http://www.indecis.eu/docs/Deliverables/Deliverable_3.1.a.pdf [Accessed December 14, 2023].
- Benichou, P., Le Breton, O. (1987). AURELHY: une method d'analyse utilisant le relief pour les besoins de l'hydrometeorologie. In Deuxiemes Journées Hydrologiques de l'ORS-TOM a Montpellier (Colloqueset Séminaires) (pp. 299—304). Paris: ORSTOM.
- Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, C.A.T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., & Woth, K. (2007) Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climate Change*, 81, 71—95. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-9226-z>.
- Birsan, M.V., Dumitrescu, A., Micu, D.M., & Cheval, S. (2014). Changes in annual temperature extremes in the Carpathians since AD 1961. *Natural Hazards*, 74, 1899—1910. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1290-5>.
- Boychenko, S., & Maidanovych, N. (2023). Semi-empirical model of the spatiotemporal surface temperature distribution on the plain part of Ukraine. *Geofizicheskiy Zhurnal*, 45(2), 63—76. <https://doi.org/10.24028/gj.v45i2.278328>.
- Casanueva, A., Herrera, S., Iturbide, M., Lange, S., Jury, M., Dosio, A., Maraun, D., & Gutiérrez, J.M. (2020). Testing bias adjustment methods for regional climate change applications under observational uncertainty and resolution mismatch. *Atmospheric Science Letters*, 21, 1—12. <https://doi.org/10.1002/asl.978>.
- Christensen, J.H. (2013). Regional climate science: Findings of IPCC AR5 WG1. *International Conference on Regional Climate CORDEX, 4—7 Nov. 2013, Brussels*.
- Cornes, R., van der Schrier, G., van den Besseelaar, E.J.M., & Jones, P.D. (2018). An Ensemble Version of the E-OBS Temperature and Precipitation Datasets. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123. <https://doi.org/10.1029/2017JD028200>.
- Dosio, A., Lennard, C., & Spinoni, J. (2022). Projections of indices of daily temperature and precipitation based on bias-adjusted CORDEX-Africa regional climate model simulations. *Climatic Change*, 170, 13. <https://doi.org/10.1007/s10584-022-03307-0>.
- Dumitrescu, A., Bojariu, R., Birsan, M.-V., Marin, L., & Manea, A. (2015). Recent climatic changes in Romania from observational data (1961—2013). *Theoretical and Applied Climatology*, 122, 111—119. <https://doi.org/10.1007/s00704-04-1290-0>.
- Gado, T.A., Mohameden, M.B. & Rashwan, I.M.H. (2022). Bias correction of regional climate model simulations for the impact assessment of the climate change in Egypt. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 20200—20220. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-17189-9>.
- Giorgi, F. (2005). Climate change prediction. *Climatic Change*, 73, 239—265. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-6857-4>.

- Giorgi, F. (2019). Thirty years of regional climate modeling: where are we and where are we going next? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 5696—5723. <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>.
- Guijarro, J.A. (2023). *Homogenization of climatic series with Climatol. Version 4.0.7. Guide*. Retrieved from <https://www.climatol.eu/climatol4-en.pdf> [Accessed December 14, 2023].
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Core Writing Team, Pachauri, R.K., Reisinger, A. (Eds.). Geneva, Switzerland, 104 p.
- IPCC. (2013). Climate Change 2013: the physical science basis. In Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S.K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V., Midgley, M. (Eds.), *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge United Kingdom and New York, 1535 p. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324>.
- IPCC. (2015). *Workshop Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Workshop on Regional Climate Projections and their Use in Impacts and Risk Analysis Studies*. Stocker, T.F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M. (Eds.). IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, p. 171. Retrieved from <https://archive.ipcc.ch/pdf/supporting-material>.
- IPCC (2021). Summary for Policymakers. In V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, B. Zhou (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 3—32). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- Jakob, D. Petersen, J., Eggert, B., & Alias, A. (2014). EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact re- search. *Regional Environmental Change*, 14(2), 563—578. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0499-2>.
- Jin, H., Li, X., Frauenfeld, O.W., Zhao, Y., Chen, C., Du, R., Du, J., & Peng, X. (2022). Comparisons of statistical downscaling methods for air temperature over the Qilian Mountains. *Theoretical and Applied Climatology*, 149, 893—896. <https://doi.org/10.1007/s00704-022-04081-w>.
- Kis, A., Pongracz, R., & Bartholy, J. (2017). Multi-model analysis of regional dry and wet conditions for the Carpathian region. *International Journal of Climatology*, 37, 4543—4560. <https://doi.org/10.1002/joc.5104>.
- Krakovska, S., Balabukh, V., Chyhareva, A., Pysarenko, L., Trofimova, I., & Shpytal, T. (2021). Projections of regional climate change in Ukraine based on multi-model ensembles of Euro-CORDEX. *EGU general assembly 2021, online, 19—30 Apr 2021, EGU21-13821*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-13821>.
- Lange, S. (2019). Trend-preserving bias adjustment and statistical downscaling with ISIMIP3BASD (v1.0). *Geoscientific Model Development*, 12, 3055—3070. <https://doi.org/10.5194/gmd-12-3055-2019>.
- Mishra, V., Bhatia, U., & Tiwari, A.D. (2020). Bias-corrected climate projections for South Asia from Coupled Model Intercomparison Project-6. *Scientific Data*, 7, 338. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00681-1>.
- Navarro-Racines, C., Tarapues, J., Thornton, P., Jarvis, A., & Ramirez-Villegas, J. (2020). High-resolution and bias-corrected CMIP5 projections for climate change impact assessments. *Scientific Data*, 7. <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0343-8>.
- Schulzweida, U. (2020). *CDO User Guide (2.0.0)*. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5614769>.
- Shevchenko, O., Lee, H., Snizhko, S., & Mayer, H. (2014). Long-term analysis of heat waves in Ukraine. *International Journal of Climatology*, 34, 1642—1650. <https://doi.org/10.1002/joc.3792>.
- Simon, C., Kis, A., & Torma, C.Z. (2023). Temperature characteristics over the Carpathian Basin-projected changes of climate indices at regional and local scale based on bias-adjusted

- CORDEX simulations. *International Journal of Climatology*, 43(8), 3552—3569. <https://doi.org/10.1002/joc.8045>.
- Skrynyk, O., Sidenko, V., Aguilar, E., Guijarro, J., Skrynyk, O., Palamarchuk, L., Oshurok, D., Osypov, V., & Osadchyi, V. (2023). Data quality control and homogenization of daily precipitation and air temperature (mean, max and min) time series of Ukraine. *International Journal of Climatology*, 43(9), 4166—4182. <https://doi.org/10.1002/joc.8080>.
- Spinoni, J., Szalai, S., Szentimrey, T., Lakatos, M., Bihari, Z., Nagy, A., Németh, A., Kovacs, T., Mihic, D., Dacic, M., Petrovic, P., Kržič, A., Hiebl, J., Auer, I., Milkovic, J., Štepanek, P., Zahradníček, P., Kilar, P., Limanowka, D., Pyrc, R., Cheval, S., Birsan, M.-V., Dumitrescu, A., Deak, G., Matei, M., Antolovic, I., Nejedlík, P., Štastný, P., Kajaba, P., Bochníček, O., Galo, D., Mikulova, K., Nabyvanets, Y., **Skrynyk, O.,** **Kra-**
kovska, S., Gnatiuk, N., Tolasz, R., Antofie, T., & Vogt, J. (2015). Climate of the Carpathian region in the period 1961—2010: climatologies and trends of 10 variables. *International Journal of Climatology*, 35, 1322—1341. <https://doi.org/10.1002/joc.4059>.
- Szentimrey, T., & Bihari, Z. (2014). *Manual of Interpolation Software MISH v1.03*. Hungarian Meteorological Service. Budapest, Hungary.
- Tabony, R.C. (1985). Relations between minimum temperature and topography in Great Britain. *Journal of Climatology*, 5, 503—520. <https://doi.org/10.1002/joc.3370050504>.
- Torma, C.Z., & Kis, A. (2022). Bias-adjustment of high-resolution temperature CORDEX data over the Carpathian region: Expected changes including the number of summer and frost days. *International Journal of Climatology*, 42(12), 6631—6646. <https://doi.org/10.1002/joc.7654>.