

## Кліматичні проєкції опалювального періоду в Україні до середини ХХІ сторіччя

*С. В. Краковська, А. В. Паламарчук, Т. М. Шпиталь, 2019*

Український гідрометеорологічний інститут, Київ, Україна  
Надійшла 24 липня 2019 р.

В работе представлен прогноз по сбалансированному сценарию А1В специализированных климатических показателей отопительного периода для территории Украины по десятилетиям до середины ХХІ ст. Прогноз средней температуры, продолжительности и величины градусо-дней составлен на расчетах ансамбля 10 региональных климатических моделей Европейского проекта ENSEMBLES, предварительно сформированного и адаптированного для Украины. Рассчитанные во всех узлах регулярной сетки 25×25 км основные и специализированные климатические показатели были верифицированы данными E-Obs для периода 2001—2010 гг. Обнаружены незначительная погрешность средней температуры отопительного периода, усредненное значение которой на всей территории меньше 0,01 °С, и приемлемая погрешность продолжительности с усредненным значением менее 6,4 дня (<4 %), что в результате позволило получить осредненную погрешность градусо-дней около 4 %. Прогнозирование на будущие периоды специализированных показателей отопительного сезона проводилось с учетом полученных в базовом периоде ошибок. Проанализированы пространственно-временные изменения показателей отопительного периода по десятилетиям к середине ХХІ ст. и рассчитаны усредненные значения для административных единиц Украины. Получен несущественный, в пределах 0—0,2 °С, рост средней температуры отопительного периода на большей части территории страны в современном десятилетии 2011—2020 гг. относительно базового периода 2001—2010 гг., сокращение продолжительности отопительного периода в среднем на 3 дня и уменьшение величины градусо-дней на 2—3 %. К середине ХХІ ст. существенно возрастут средние температуры отопительного периода с максимальными приростами в 1,5 °С на северо-востоке, в центре и на Левобережье и наименьшими, до 0,8 °С, — на юге, юго-западе и в Крыму. Продолжительность периода будет сокращаться на 15—18 суток, максимально на 20 суток на юге. Величины градусо-дней уменьшатся на большей части территории на 12—16 %, максимально в Крыму на 20 %, а минимальное снижение получено для Карпат — 9—12 %. Полученные в исследовании результаты можно использовать прежде всего для проведения расчетов расходов энергии на отопление и прочие потребности энергетического сектора, а также других отраслей экономики для общего развития инфраструктуры и разнообразных потребностей любого населенного пункта на территории Украины.

**Ключевые слова:** ансамбль региональных климатических моделей, верификация данных моделирования, специализированные климатические показатели, средняя температура отопительного периода, продолжительность отопительного периода, градусо-дни.

**Вступ.** Зміни стану кліматичної системи, що відбуваються в останні десятиріччя, зумовлюють зміни стандартних кліматичних показників, як глобальних, так і регіональних [Балабух та ін., 2013; ІРСС, 2013; Petri, Caldeira, 2015; Shvidenko et al., 2017;

IPCC, 2018; Park et al., 2018]. Варіативність основних кліматичних показників, у свою чергу, визначатиме також зміну параметрів, що використовують для встановлення спеціалізованих кліматичних характеристик та оцінювання й прогнозування стану

природного середовища для потреб різних секторів економіки [Оцінка..., 2011]. Традиційно в кліматології спеціалізовані кліматичні параметри, які необхідні для вирішення конкретного прикладного завдання, отримують на підставі статистичного аналізу результатів метеорологічних спостережень з використанням відповідних методик й перевірки достовірності отриманих результатів. Набір відповідних поставленому завданню кліматичних параметрів, методика їх отримання та оцінки мають статус стандартних, їх можна використовувати для розрахунків у будь-якому регіоні [СНиП, 1996; Кобышева и др., 2004; Руководство..., 2008; Національний ..., 2011].

На сьогодні при оцінюванні та прогнозуванні регіонального клімату використовують переважно результати, що отримані за глобальними та регіональними кліматичними моделями (ПКМ) [Van der Linden, Mitchell, 2009; IPCC, 2013; Гнатюк и др., 2015; Краковська та ін., 2016а,б, 2018; Shvidenko et al., 2017; Краковська, Шпиталь, 2018]. Такий підхід має певні переваги, тому що дає змогу визначити стан кліматичної системи для значних часових періодів, як сучасних, так і майбутніх, а також прогнозувати на цій основі стандартні та спеціалізовані кліматичні показники. Крім того, дані моделювання зазвичай представляють у вузлах розрахункової сітки, що спрощує визначення необхідних параметрів для будь-якої географічної області за відомими координатами. При використанні таких методик виникає необхідність верифікації модельних результатів даними метеорологічних спостережень для сучасного періоду, що необхідно для визначення похибок моделювання та їх урахування у прогнозі спеціалізованих показників на майбутні періоди [Van der Linden, Mitchell, 2009; Berg et al., 2012; Краковська та ін., 2016б; Краковская, 2018].

До важливого кліматозалежного сектору економіки, для якого визначення спеціалізованих кліматичних показників та їх динаміки є обов'язковим, належить теплоенергетика. Основні спеціалізовані параметри стану атмосфери, які розрахо-

вують для теплоенергетики у кліматології такі: дати початку та закінчення періоду із середніми добовими температурами повітря  $\leq 8$  °С, що визначає опалювальний період; тривалість періоду; середня температура повітря за опалювальний період та ін. [Національний..., 2011]. Видається, що до переліку параметрів доцільно включити також розрахунок величини градусо-днів у цілому для опалювального періоду або для його окремих частин [СНиП, 1996; Petri, Caldeira, 2015; Park et al., 2018]. За цією величиною можна безпосередньо розрахувати витрати енергії на опалення в разі відомого діапазону значень приземної температури повітря.

*Мета дослідження:* прогнозування спеціалізованих кліматичних показників опалювального періоду в Україні до середини ХХІ ст. на підставі результатів ансамблю ПКМ з корекцією на визначені верифікацією похибки; визначення тенденцій змін по десятиріччях основних показників опалювального періоду (тривалості, його середньої температури та величини градусо-днів) шляхом порівняння отриманих результатів з відповідними даними за базовий період 2001—2010 рр.; розрахунок осереднених значень названих показників для адміністративних одиниць України.

*Використані дані:* для складання прогнозів кліматичних показників використовували дані моделювання, отримані ансамблем 10 ПКМ Європейського проекту ENSEMBLES [Van der Linden, Mitchell, 2009] за збалансованим сценарієм A1B [Nakićenović, Swart, 2000]. Принципи формування ансамблю та оцінку точності прогнозування температури наведено у статті [Краковская, 2018], методику визначення тривалості періодів з температурою понад порогові значення — у публікації [Краковська, Шпиталь, 2018]. Для верифікації модельних даних застосовано базу даних E-Obs [Haylock et al., 2008], створену на підставі стандартних спостережень на метеорологічних мережах європейських країн. Дані цієї бази щодо температури повітря та кількості опадів верифіковано й рекомендовано для використання в Укра-

їні [Шедеменко та ін., 2012]. Прогностичні показники проаналізовано у порівнянні з розрахованими за аналогічними методиками кліматичними індексами на підставі даних E-Obs у базовий період 2001—2010 рр.

**Отримані результати.** *Проекції зміни температури повітря до середини XXI ст. в Україні.* Спеціалізовані кліматичні показники опалювального періоду обґрунтовано прогностичними даними (проекціями) приземної температури повітря, отриманими раніше авторами на підставі результатів ансамблевого моделювання. Було розраховано середні місячні, сезонні та річні проекції змін температури повітря до середини XXI ст. й отримано динаміку приземної температури повітря відносно періоду 1991—2010 рр. за різних інтервалів осереднення [Краковська та ін., 2016а, 2018]. Так, у найближчому майбутньому (2011—2030) прогноз показав як додатні, так і від'ємні прирости середніх місячних температур повітря для різних регіонів країни. Зниження температури повітря найімовірніше у березні (до  $-0,3$  °C) для усієї території з максимальними значеннями на сході. Можливе також незначне зниження температури у лютому на заході, в центрі та на півдні. У квітні й травні очікуються помірні прирости температури, які в середньому становитимуть  $0,3$  °C. Починаючи з червня до кінця року прогнозується однозначне потепління, що матиме найвищі значення у грудні ( $0,8$ — $1,3$  °C). Найімовірніші та значні зміни температури повітря очікуються у східному регіоні практично в усі місяці, а для періоду серпень—жовтень значне потепління прогнозується ще і для західного регіону.

Оцінювання річного ходу температури повітря на підставі середньомісячних прогностичних значень для періоду 2011—2030 рр. для континентальних регіонів помірних широт указує на збереження стандартного характеру розподілу: з мінімальними значеннями в січні і максимальними — у липні для всіх регіонів. Амплітуди річного ходу змінюються від максимальних  $26,8$  °C на сході до мінімальних  $22,5$  °C на заході, що відповідає наростанню конти-

нентальності клімату із заходу (північного заходу) на схід (південний схід). Річна амплітуда для півдня України становить  $25,1$  °C, тоді як для північного регіону —  $24,8$  °C, що дещо порушує існуючий нині розподіл амплітуд.

Проекції змін температури повітря, що розраховані до середини XXI ст. (2031—2050) вказують на однозначне підвищення температури відносно сучасних значень в усі місяці року. Максимальні прирости, що перевищують  $2$  °C, отримано для грудня на всій території України. На відміну від попереднього періоду у січні також очікується значне потепління до  $2$  °C. Тому холодний період, зокрема зимові місяці, у цей період стануть значно теплішими [Краковська та ін., 2016а, 2018].

Найменші зміни прогнозуються навесні: від  $0,7$  до  $1,2$  °C. Максимальне підвищення — на півдні та сході, а найменші прирости значень — на заході. Улітку та восени теплішати буде приблизно однаково на усій території з максимумом значень приростів температури у серпні. При цьому у холодний період року максимальні прирости температури очікуються на півночі та сході, у теплий — на півдні та сході країни.

До середини XXI ст. переважно зберігається стандартний річний розподіл температури повітря, але відзначається зміщення зимового мінімуму на лютий (за винятком західного регіону). На півдні упродовж усього року прогнозуються додатні середньомісячні температури, що вказує на суттєве зменшення тривалості зимового термічного (кліматичного) сезону у регіоні. Амплітуди річного ходу для усіх регіонів дещо знижуватимуться, очевидно, можливим буде зменшення континентальності клімату у цей період. Просторові закономірності розподілу амплітуд зберігатимуться з найвищими значеннями на сході —  $26,4$  °C, а найменшими — на заході, північному заході —  $21,8$  °C [Краковська та ін., 2016а, 2018].

Отже, на фоні зростання приземної температури повітря до середини XXI ст., особливо, у південному та південно-східному регіонах очікується зміна тривалості опа-

лювального періоду та його середніх температур, що важливо враховувати при плануванні виробництва теплової енергії.

*Верифікація спеціалізованих кліматичних показників.* Прогностичні розрахунки спеціалізованих кліматичних показників бажано виконувати за результатами моделювання, що пройшли процедуру верифікації даними, отриманими на підставі наземних спостережень. У дослідженні для цієї процедури використовували дані E-Obs [Haylock et al., 2008] за базовий період 2001—2010 рр. для верифікації кліматичних показників, розрахованих на основі результатів моделювання ансамблем 10 РКМ. Слід враховувати, що ансамблеве моделювання має певні переваги, оскільки дає змогу визначити діапазон можливих коливань прогнозованої величини за різних способів урахування майбутніх змін стану кліматичної системи у моделях, що складають ансамбль, та деякою мірою нівелювати систематичні помилки окремих РКМ [Berg et al., 2012; Краковская, 2018]. При цьому обов'язковим є визначення точності результатів моделювання та їх відповідності даним спостережень.

Результати верифікації значень тривалості опалювального сезону та його середньої температури ілюструють рис. 1—3, на яких подано різниці значень розрахованих показників, отриманих на підставі результатів моделювання та даних E-Obs, які взято за еталонні.

Аналіз результатів розрахунків показав таке: структура просторового розподілу середніх значень температури опалювального періоду була подібна у обох варіантах наборів даних: простягання ізотерм з північного заходу на південний схід, північніше 48-ї паралелі, і зональний розподіл температури на півдні (рис. 1) [Краковська та ін., 2016б]. Розрахунки за ансамблем 10 РКМ дещо занижують значення середніх температур опалювального періоду для північного сходу та сходу України з найвищою повторюваністю різниць 0...–0,2 °С. У модельних розрахунках отримуємо більші площі поширення градацій занижених температур порівняно із завищеними. Мо-

дельні дані також показують нижчі значення температури опалювального періоду порівняно з даними спостережень у гірських районах. Вищі значення, ніж дані E-Obs, отримано у моделюванні для півдня України, при цьому в центрі і на заході тільки збільшуються площі поширення температурних градацій завищених модельних температур. Очевидно, що значення різниць понад 0,6 °С виникають унаслідок незбігу або відсутності даних одного з наборів на узбережжях морів або водосховищ, а менших –0,6 °С — через відомий факт завищення значень приземної температури бази E-Obs в Карпатах [Шедеменко та ін., 2012]. Найбільша повторюваність отриманих різниць у діапазоні –0,2...0,2 °С займає більше половини території країни. У зв'язку з цим значення різниці температур між двома наборами даних у середньому дорівнюють –0,0073 °С, або ~0,01 °С. Величини похибок середньої температури опалювального періоду для всіх адміністративних одиниць України наведено у табл. 1—3, а усереднені для регіонів і усієї території — у статті [Краковська та ін., 2016б].

Згідно з результатами розрахунків ансамблю 10 РКМ та їх порівнянням з даними E-Obs (рис. 2), моделі дещо завищують значення тривалості опалювального періоду. Так, для північних і північно-східних регіонів України, для більшості центральних й західних областей різниці становлять 8—12 діб, а для півдня — отримані менші тривалості періоду, ніж у розрахунках за даними E-Obs, — на 3—8 діб. На більшій частині території різниці мають діапазон ±8 діб. Середнє значення похибки у визначенні тривалості опалювального періоду для території України ансамблем моделей становить 6,4 доби. Заниження тривалості опалювального сезону для деяких районів півдня країни і Криму, що показують модельні розрахунки, можна пояснювати деяким завищенням значень температури повітря для цих регіонів ансамблем 10 РКМ (рис. 1, 2). Похибки у визначенні тривалості опалювального періоду, ймовірно, пов'язані з методичними прийомами, застосованими для визначення показника

на підставі модельних даних. Згідно з існуючими у кліматології підходами [Руководство..., 2008], дати переходу середніх добових температур через  $\leq 8^\circ\text{C}$  і тривалість періоду визначають відповідно до спеціальних методик, якщо отриманий період є неперервним.

У цьому дослідженні застосовано інший підхід, що полягав у визначенні кількості днів у році із середньою температурою  $\leq 8^\circ\text{C}$ , що приводило до можливої дискретності та подовження опалювального періоду в регіонах з найбільшою мінливістю температурного режиму. Опалювальний період в модельних даних визначали як суму всіх днів, якщо середня добова температура повітря була нижча за  $8^\circ\text{C}$ , а далі встановлювали середню кількість таких днів у році за досліджуваний період. Отримані на основі модельних даних похибки у визначенні тривалості опалювального періоду (табл. 1—3) враховували при прогнозуванні.

Зауважимо, що при визначенні тривалості опалювального періоду для значних за площею регіонів похибки для РКМ REMO були меншими порівняно з ансамблевим середнім, але при цьому точність визначення середньої температури опалювального періоду виявилася вищою за ансамблевими розрахунками порівняно з кожною окремою РКМ [Краковська та ін., 2016а,б].

Для оцінювання витрат енергії в опалювальний період розраховують величини нагрівання (heating degree days). Відповідно, за аналогічними методиками можна визначити градусо-дні на охолодження (cooling degree days) [Petri, Caldeira, 2015]. Названі величини по суті є комплексними показниками, що залежать як від температурного режиму зовнішнього середовища, а саме середніх добових температур повітря та їх мінімальних/максимальних значень, комфортних температур у приміщеннях, так і від тривалості опалювального періоду (періоду кондиціонування). Величини градусо-днів розраховують переважно у прикладній метеорології для забезпечення потреб енергетики, комунального господарства та будівництва.

Існує декілька методик розрахунку, що різняться переважно деталями визначення базової температури. Підходи у визначенні градусо-днів у різних країнах систематизовано у публікації [Park et al., 2018]. Автори огляду при цьому зазначають, що у більшості країн як базову використовують температуру  $18^\circ\text{C}$ , або  $65\text{ F}$  ( $18,3^\circ\text{C}$ ), див., наприклад, [Petri, Caldeira, 2015].

У цьому дослідженні для розрахунків застосовано співвідношення [СНиП, 1996; Petri, Caldeira, 2015]

$$\text{ГДОП} = (t_{\text{б}} - t_{\text{с}}) \cdot T_{\text{п}}$$

де ГДОП — градусо-дні опалювального пе-

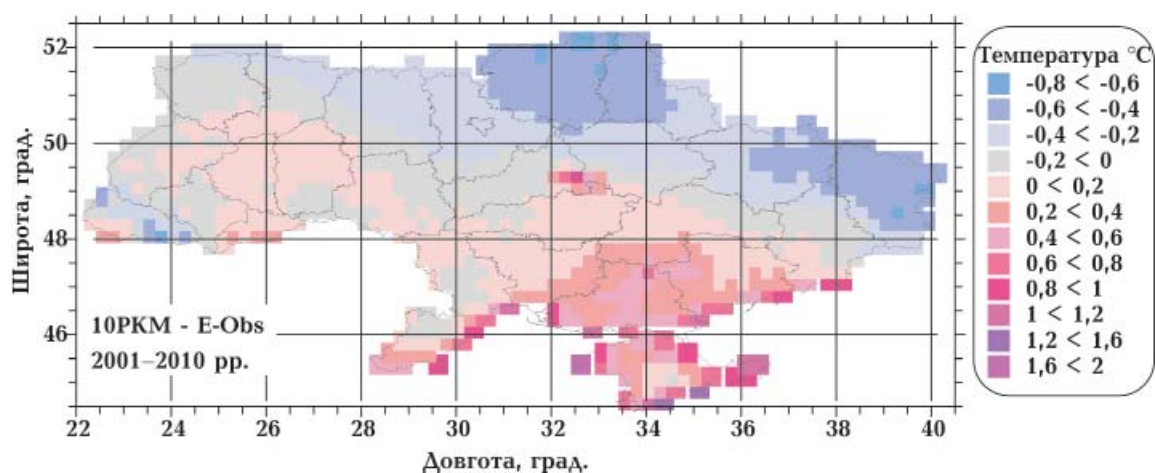


Рис. 1. Різниці (похибки) між даними ансамблю 10 РКМ та E-Obs щодо середньої температури опалювального сезону ( $^\circ\text{C}$ ) у базовий період 2001—2010 рр.

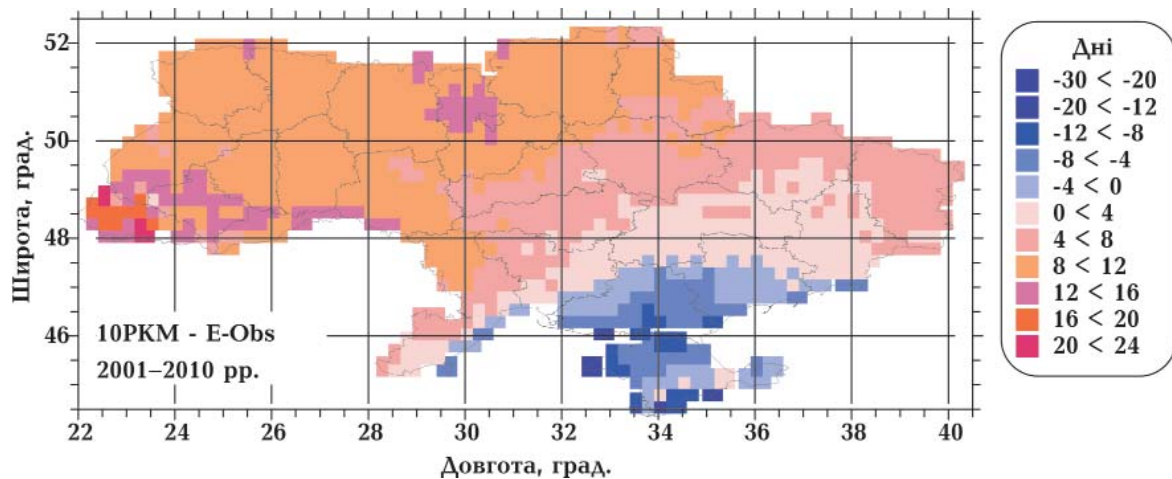


Рис. 2. Різниці (похибки) між даними ансамблю 10 РКМ та E-Obs щодо тривалості опалювального сезону (дні) у базовий період 2001—2010 pp.

ріоду;  $t_6$  — базова температура (у розрахунках 18 °C);  $t_c$  — середня температура повітря за опалювальний період;  $T_{\Pi}$  — тривалість опалювального періоду.

Розраховані величини градусо-днів можна використати для безпосереднього визначення витрат енергії на опалення однієї площі приміщень з урахуванням типу споруди, рівня теплоізоляції та інших технічних характеристик.

На рис. 3 показано просторовий розподіл величини градусо-днів для території України, що розраховані на основі даних ансамблю 10 РКМ, даних E-Obs та величини їх різниць. У табл. 1—3 наведено осереднені значення для адміністративних областей, які можна використовувати з метою подальших розрахунків. Порівняння значень 10 РКМ та E-Obs дають змогу оцінити достовірність модельних розрахунків. Отриманий діапазон змін величини за ансамблем 10 РКМ становить 1,5...4,3 тис. градусо-днів за середніх значень 3,1 тис. градусо-днів (рис. 3, а). Найвищі значення, від 3,4 до 4,3 тис., градусо-днів отримано для північного сходу та сходу, для центру та заходу — їх зменшення до 3,0—3,2 тис. градусо-днів, для півдня та Криму 1,5—2,0 тис. градусо-днів. В Українських Карпатах значення підвищуються до 3,6—4,3 тис. градусо-днів.

Для цього самого періоду за даними

E-Obs значення градусо-днів становлять 1,8—4,0 тис. за середніх — 2,9 тис. Просторовий розподіл значень градусо-днів, отриманих на підставі даних вимірювань, має такі самі закономірності, як розподіл, одержаний за модельними даними (рис. 3, б). Північніше 48-ї паралелі величина азонально наростає у напрямку з південного заходу, заходу на північний схід, схід. На півдні розподіл величини зональний і, як і в разі розподілу температур, абсолютні значення зменшуються до 1,8—2,6 тис. градусо-днів, але вони дещо вищі, ніж отримані для цього регіону модельні значення. На більшості території (захід, центр, північ, північний схід) величини градусо-днів менші, ніж модельні, за розрахунками співвідношення 10 РКМ до E-Obs (рис. 3, в). Для 82,4 % точок розрахункової сітки вказане співвідношення становить 1,0—1,1, що означає невелике завищення величини ансамблем моделей для окремих районів (до 10 %). Для 14,0 % площі країни величина градусо-днів занижена переважно для південних районів України, але це співвідношення не менше від 0,8, тобто дорівнює ~20 %. Таким чином, верифікація модельних розрахунків градусо-днів показала задовільні результати. Слід зазначити, що ансамбль моделей розраховує величину градусо-днів у ширшому діапазоні значень, ніж E-Obs, дещо

Таблиця 1. Середня температура ( $t_c$ , °C), тривалість (Т, дні) та градоусо-дні (ГДОП, тис. °C) опалювального сезону за даними 10 РКМ (10 RCM) та E-Obs з похибками (RSM-EObs) у базовий період 2001—2010 рр. і за даними скоригованого ансамблю 10 РКМ у наступні десятирічні періоди (жирним) зі змінами відносно базового (курсив) для адміністративних одиниць Західного регіону України

Період	Захід																				
	Волинська		Закарпатська		Івано-Франківська		Львівська		Рівненська		Тернопільська		Хмельницька		Чернівецька						
	$t_c$ , °C	Т, дні	$t_c$ , °C	Т, дні	$t_c$ , °C	Т, дні	$t_c$ , °C	Т, дні	$t_c$ , °C	Т, дні	$t_c$ , °C	Т, дні	$t_c$ , °C	Т, дні	$t_c$ , °C	Т, дні					
10RCM	0,1	180	3,2	188	3,4	0,0	191	3,5	0,3	181	3,2	0,1	179	3,2	0,1	178	3,2	0,2	177	3,1	
E-Obs	<b>0,2</b>	<b>169</b>	<b>3,0</b>	<b>171</b>	<b>3,0</b>	<b>0,1</b>	<b>180</b>	<b>3,2</b>	<b>0,3</b>	<b>170</b>	<b>3,0</b>	<b>0,0</b>	<b>168</b>	<b>3,0</b>	<b>0,0</b>	<b>168</b>	<b>3,0</b>	<b>0,1</b>	<b>166</b>	<b>3,0</b>	
RSM-EObs	<i>-0,1</i>	<i>11</i>	<i>8 %</i>	<i>-0,2</i>	<i>17</i>	<i>13 %</i>	<i>-0,1</i>	<i>11</i>	<i>8 %</i>	<i>0,0</i>	<i>10</i>	<i>8 %</i>	<i>-0,1</i>	<i>11</i>	<i>8 %</i>	<i>0,0</i>	<i>10</i>	<i>6 %</i>	<i>0,1</i>	<i>11</i>	<i>6 %</i>
2011—2020	<b>0,2</b>	<b>166</b>	<b>3,0</b>	<b>171</b>	<b>3,0</b>	<b>0,1</b>	<b>178</b>	<b>3,2</b>	<b>0,4</b>	<b>168</b>	<b>3,0</b>	<b>0,1</b>	<b>167</b>	<b>3,0</b>	<b>0,1</b>	<b>167</b>	<b>3,0</b>	<b>0,2</b>	<b>166</b>	<b>3,0</b>	
2020—2010	<i>0,0</i>	<i>-2</i>	<i>-1 %</i>	<i>-0,1</i>	<i>0</i>	<i>-1 %</i>	<i>0,0</i>	<i>-2</i>	<i>0,0</i>	<i>-2</i>	<i>-1 %</i>	<i>0,0</i>	<i>-2</i>	<i>-1 %</i>	<i>0,1</i>	<i>-1</i>	<i>-1 %</i>	<i>0,1</i>	<i>0</i>	<i>-1 %</i>	
2021—2030	<b>0,5</b>	<b>163</b>	<b>2,8</b>	<b>167</b>	<b>2,9</b>	<b>0,4</b>	<b>174</b>	<b>3,1</b>	<b>0,7</b>	<b>165</b>	<b>2,9</b>	<b>0,3</b>	<b>163</b>	<b>2,9</b>	<b>0,4</b>	<b>164</b>	<b>2,9</b>	<b>0,4</b>	<b>162</b>	<b>2,9</b>	
2030—2010	<i>0,3</i>	<i>-6</i>	<i>-5 %</i>	<i>0,2</i>	<i>-4</i>	<i>-4 %</i>	<i>0,3</i>	<i>-5</i>	<i>0,3</i>	<i>-5</i>	<i>-5 %</i>	<i>0,4</i>	<i>-6</i>	<i>-5 %</i>	<i>0,4</i>	<i>-5</i>	<i>-5 %</i>	<i>0,3</i>	<i>-4</i>	<i>-4 %</i>	
2031—2040	<b>1,0</b>	<b>159</b>	<b>2,7</b>	<b>163</b>	<b>2,8</b>	<b>0,7</b>	<b>169</b>	<b>2,9</b>	<b>1,1</b>	<b>160</b>	<b>2,7</b>	<b>0,8</b>	<b>159</b>	<b>2,7</b>	<b>0,8</b>	<b>159</b>	<b>2,7</b>	<b>0,8</b>	<b>157</b>	<b>2,7</b>	
2040—2010	<i>0,8</i>	<i>-10</i>	<i>-10 %</i>	<i>0,6</i>	<i>-8</i>	<i>-9 %</i>	<i>0,6</i>	<i>-11</i>	<i>0,7</i>	<i>-10</i>	<i>-10 %</i>	<i>0,8</i>	<i>-10</i>	<i>-10 %</i>	<i>0,8</i>	<i>-9</i>	<i>-9 %</i>	<i>0,7</i>	<i>-9</i>	<i>-9 %</i>	
2041—2050	<b>1,3</b>	<b>153</b>	<b>2,6</b>	<b>156</b>	<b>2,6</b>	<b>1,0</b>	<b>165</b>	<b>2,8</b>	<b>1,4</b>	<b>155</b>	<b>2,6</b>	<b>1,1</b>	<b>154</b>	<b>2,6</b>	<b>1,1</b>	<b>154</b>	<b>2,6</b>	<b>1,1</b>	<b>152</b>	<b>2,6</b>	
2050—2010	<i>1,1</i>	<i>-15</i>	<i>-14 %</i>	<i>0,9</i>	<i>-15</i>	<i>-13 %</i>	<i>0,9</i>	<i>-15</i>	<i>1,0</i>	<i>-15</i>	<i>-14 %</i>	<i>1,2</i>	<i>-14</i>	<i>-14 %</i>	<i>1,1</i>	<i>-14</i>	<i>-13 %</i>	<i>1,0</i>	<i>-14</i>	<i>-13 %</i>	

Таблиця 2. Середня температура ( $t_c$ , °C), тривалість (Т, дні) та градусо-дні (ГАОП, тис. °C) опалювального сезону за даними 10 РКМ (10 RCM) та E-Obs з похибками (RCM-EObs) у базовий період 2001—2010 рр. і за даними скорингованого ансамблю 10 РКМ у наступні десятирічні періоди (жирним) зі змінами відносно базового (курсив) для адміністративних одиниць Північного та Центрального регіонів України

Період	Північ						Центр																				
	Житомирська		Київська		Чернігівська		Сумська		Вінницька		Дніпро-петровська		Кірово-градська		Полтавська		Черкаська										
	$t_{cv}$ , °C	Т, дні	$t_{cv}$ , °C	Т, дні	$t_{cv}$ , °C	Т, дні	$t_{cv}$ , °C	Т, дні	$t_{cv}$ , °C	Т, дні	$t_{cv}$ , °C	Т, дні	$t_{cv}$ , °C	Т, дні	$t_{cv}$ , °C	Т, дні	$t_{cv}$ , °C	Т, дні	$t_{cv}$ , °C	Т, дні							
10RCM	-0,5	180	3,3	-0,5	176	3,3	-1,2	183	3,5	-1,5	185	3,6	-0,1	175	3,2	0,1	164	2,9	0,0	168	3,0	-0,7	174	3,3	-0,2	172	3,1
E-Obs	<b>-0,3</b>	<b>170</b>	<b>3,1</b>	<b>-0,3</b>	<b>166</b>	<b>3,0</b>	<b>-0,6</b>	<b>173</b>	<b>3,2</b>	<b>-1,1</b>	<b>177</b>	<b>3,4</b>	<b>-0,1</b>	<b>165</b>	<b>3,0</b>	<b>-0,1</b>	<b>161</b>	<b>2,9</b>	<b>-0,1</b>	<b>163</b>	<b>2,9</b>	<b>-0,5</b>	<b>167</b>	<b>3,1</b>	<b>-0,2</b>	<b>165</b>	<b>3,0</b>
RCM-EObs	<i>-0,2</i>	<i>10</i>	<i>8</i> %	<i>-0,3</i>	<i>11</i>	<i>8</i> %	<i>-0,5</i>	<i>10</i>	<i>9</i> %	<i>-0,4</i>	<i>8</i>	<i>7</i> %	<i>0,0</i>	<i>10</i>	<i>7</i> %	<i>0,1</i>	<i>2</i>	<i>1</i> %	<i>0,1</i>	<i>5</i>	<i>3</i> %	<i>-0,2</i>	<i>7</i>	<i>5</i> %	<i>0,0</i>	<i>7</i>	<i>4</i> %
2011—2020	-0,2	169	3,1	-0,1	165	3,0	-0,5	171	3,2	-0,9	174	3,3	0,0	165	3,0	0,1	160	2,9	0,1	162	2,9	-0,3	166	3,0	0,0	164	3,0
2020—2010	0,1	-1	-1 %	0,1	-1 %	-1 %	0,1	-2 %	-2 %	0,2	-2 %	-2 %	0,1	0 %	-1 %	0,1	-1 %	-1 %	0,1	-1 %	0,1	0,2	-2 %	0,1	-2 %	0,1	-1 %
2021—2030	0,1	164	3,0	0,1	160	2,9	-0,3	166	3,0	-0,6	169	3,2	0,2	161	2,9	0,3	155	2,7	0,3	157	2,8	-0,1	161	2,9	0,2	160	2,8
2030—2010	0,3	-6	-5 %	0,4	-6 %	-5 %	0,4	-7 %	-6 %	0,4	-7 %	-6 %	0,3	-5 %	-4 %	0,4	-6 %	-6 %	0,3	-6 %	0,3	0,4	-6 %	0,4	-6 %	0,4	-5 %
2031—2040	0,6	161	2,8	0,7	157	2,7	0,3	164	2,9	-0,1	167	3,0	0,7	157	2,7	0,9	153	2,6	0,8	155	2,7	0,5	159	2,8	0,8	157	2,7
2040—2010	0,9	-9	-9 %	0,9	-9 %	-10 %	0,9	-9 %	-10 %	0,9	-9 %	-10 %	0,8	-9 %	-9 %	0,9	-8 %	-10 %	0,9	-8 %	0,9	1,0	-8 %	0,9	-10 %	0,9	-8 %
2041—2050	1,0	157	2,7	1,0	152	2,6	0,7	159	2,8	0,4	162	2,9	1,0	153	2,6	1,2	146	2,5	1,1	149	2,5	0,9	153	2,6	1,1	151	2,6
2050—2010	1,2	-13	-13 %	1,3	-13 %	-14 %	1,4	-14 %	-14 %	1,4	-15 %	-15 %	1,1	-13 %	-13 %	1,2	-15 %	-15 %	1,2	-15 %	1,2	1,4	-14 %	1,3	-14 %	1,3	-14 %



Таблиця 3. Середня температура ( $t_c$ , °C), тривалість (Т, дні) та градусо-дні (ГАОП, тис. °C) опалювального сезону за даними 10 РКМ (10 RCM) та E-Obs з похибками (RCM-EObs) у базовий період 2001–2010 рр. і за даними скоригованого ансамблю 10 РКМ у наступні десятирічні періоди (жирним) зі змінами відносно базового (курсив) для адміністративних одиниць Східного та Південного регіонів України

Період	Схід												Південь											
	Донецька			Луганська			Харківська			Запорізька			Одеська			Миколаївська			Херсонська			АР Крим		
	$t_c$ , °C	Т, дні	ГАОП, тис. °C	$t_c$ , °C	Т, дні	ГАОП, тис. °C	$t_c$ , °C	Т, дні	ГАОП, тис. °C	$t_c$ , °C	Т, дні	ГАОП, тис. °C	$t_c$ , °C	Т, дні	ГАОП, тис. °C	$t_c$ , °C	Т, дні	ГАОП, тис. °C	$t_c$ , °C	Т, дні	ГАОП, тис. °C	$t_c$ , °C	Т, дні	ГАОП, тис. °C
10RCM	-0,2	167	3,0	-1,1	174	3,3	-1,1	177	3,4	0,9	153	2,6	1,2	150	2,5	0,7	157	2,7	1,6	143	2,3	2,8	129	2,0
E-Obs	-0,2	<b>165</b>	<b>3,0</b>	-0,7	<b>169</b>	<b>3,2</b>	-0,7	<b>171</b>	<b>3,2</b>	<b>0,5</b>	<b>156</b>	<b>2,7</b>	<b>1,1</b>	<b>145</b>	<b>2,5</b>	<b>0,6</b>	<b>153</b>	<b>2,7</b>	<b>1,0</b>	<b>149</b>	<b>2,5</b>	<b>2,1</b>	<b>137</b>	<b>2,2</b>
RCM-EObs	0,0	2	2 %	-0,4	5	6 %	-0,3	5	6 %	0,4	-3	-4 %	0,2	5	2 %	0,2	3	2 %	0,6	-6	-7 %	0,7	-8	-9 %
2011–2020	0,0	163	2,9	-0,5	167	3,1	-0,6	169	3,1	0,6	154	2,7	1,1	144	2,4	0,6	151	2,6	1,0	147	2,5	2,1	135	2,2
2020–2010	0,1	-2	-2 %	0,1	-2	-2 %	0,2	-2	-2 %	0,1	-2	-2 %	0,1	-1	-1 %	0,1	-2	-2 %	0,0	-1	-2 %	0,0	-2	-2 %
2021–2030	0,2	158	2,8	-0,3	162	3,0	-0,3	164	3,0	0,9	150	2,6	1,3	140	2,3	0,9	148	2,5	1,3	144	2,4	2,3	130	2,0
2030–2010	0,4	-7	-6 %	0,4	-7	-6 %	0,4	-7	-6 %	0,4	-6	-6 %	0,2	-5	-5 %	0,3	-5	-5 %	0,3	-5	-6 %	0,2	-7	-7 %
2031–2040	0,8	155	2,7	0,3	160	2,8	0,2	163	2,9	1,3	146	2,4	1,8	136	2,2	1,4	144	2,4	1,8	139	2,3	2,6	125	1,9
2040–2010	0,9	-9	-10 %	1,0	-9	-10 %	1,0	-8	-10 %	0,8	-10	-11 %	0,7	-9	-10 %	0,8	-10	-11 %	0,7	-10	-12 %	0,6	-12	-13 %
2041–2050	1,0	149	2,5	0,6	154	2,7	0,6	157	2,7	1,6	140	2,3	2,0	129	2,1	1,6	137	2,3	1,9	132	2,1	2,8	117	1,8
2050–2010	1,2	-15	-15 %	1,3	-15	-15 %	1,3	-15	-15 %	1,1	-16	-17 %	0,9	-16	-16 %	1,1	-16	-16 %	0,9	-17	-18 %	0,7	-21	-20 %

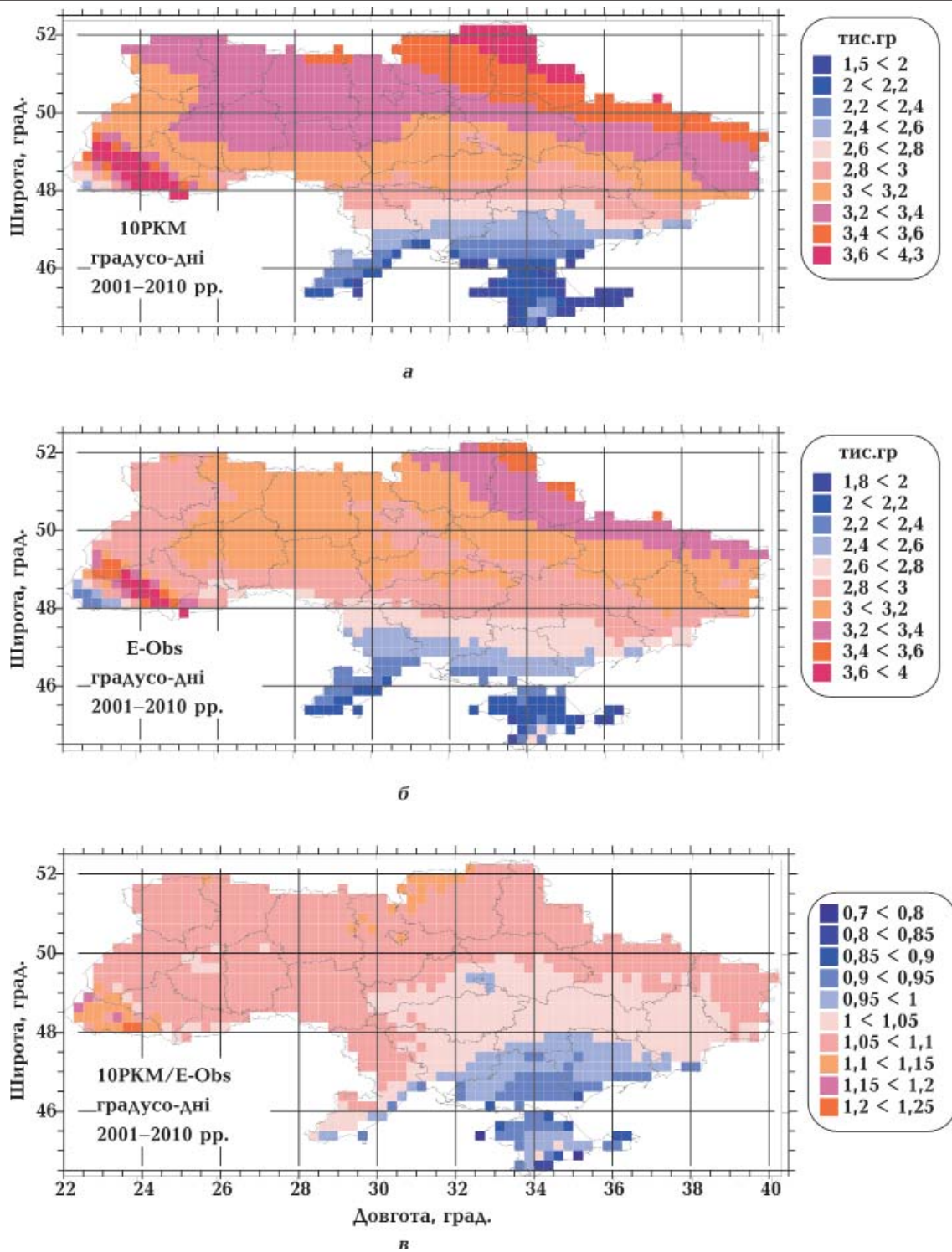


Рис. 3. Значення градусо-днів для періоду 2001—2010 рр.: а — за даними ансамблю 10 РКМ; б — E-Obs; в — та їх співвідношення.

зменшує абсолютний мінімум на півдні та завищує середні та максимальні значення показника на північному сході.

Таким чином, верифікація ансамблю

10 РКМ показала задовільну узгодженість модельних значень приземної температури повітря з даними E-Obs, що важливо для підтвердження точності визначення

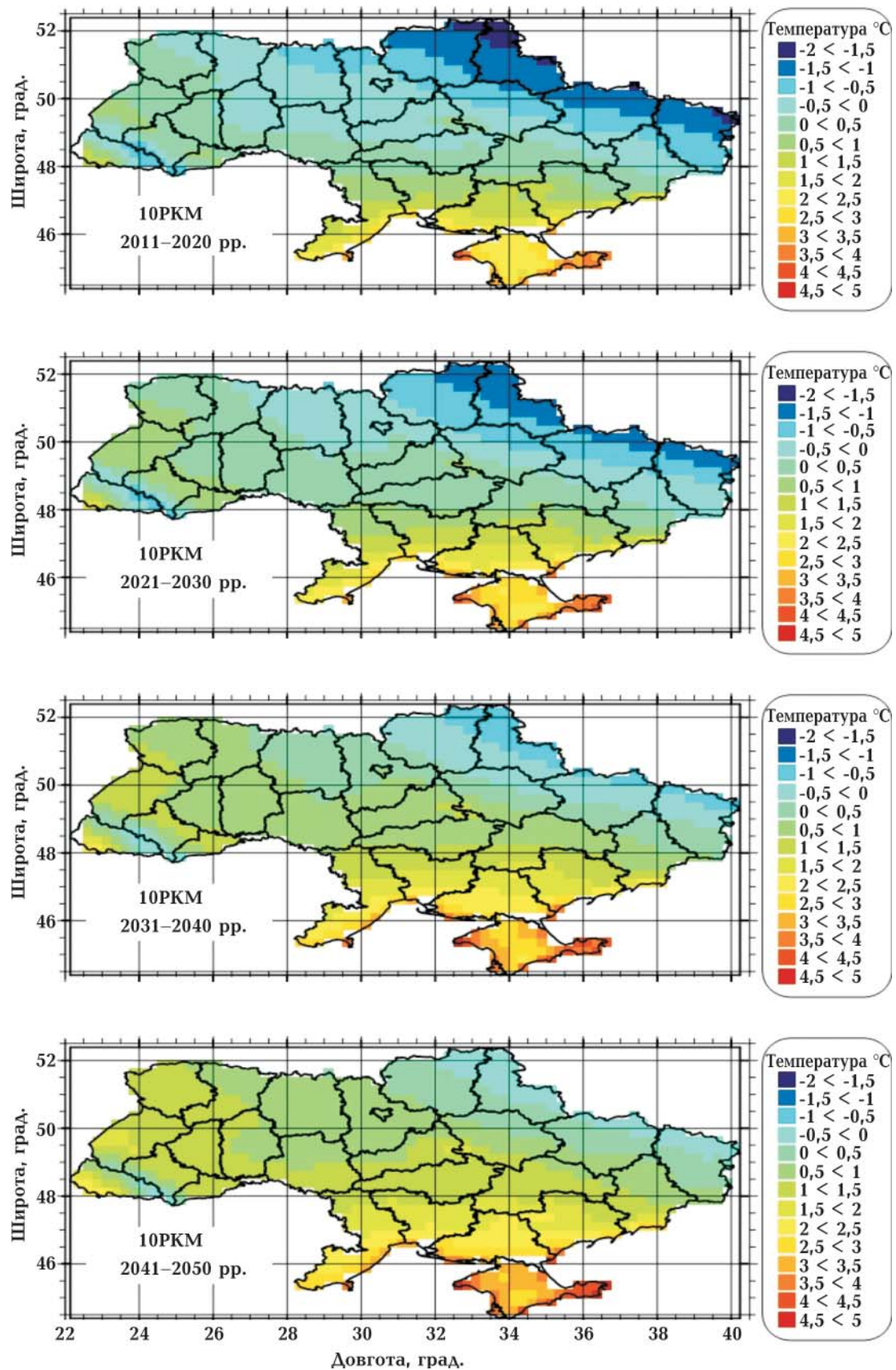


Рис. 4. Проекції середньої температури опалювального періоду (°C) по десятиріччях до середини XXI ст.

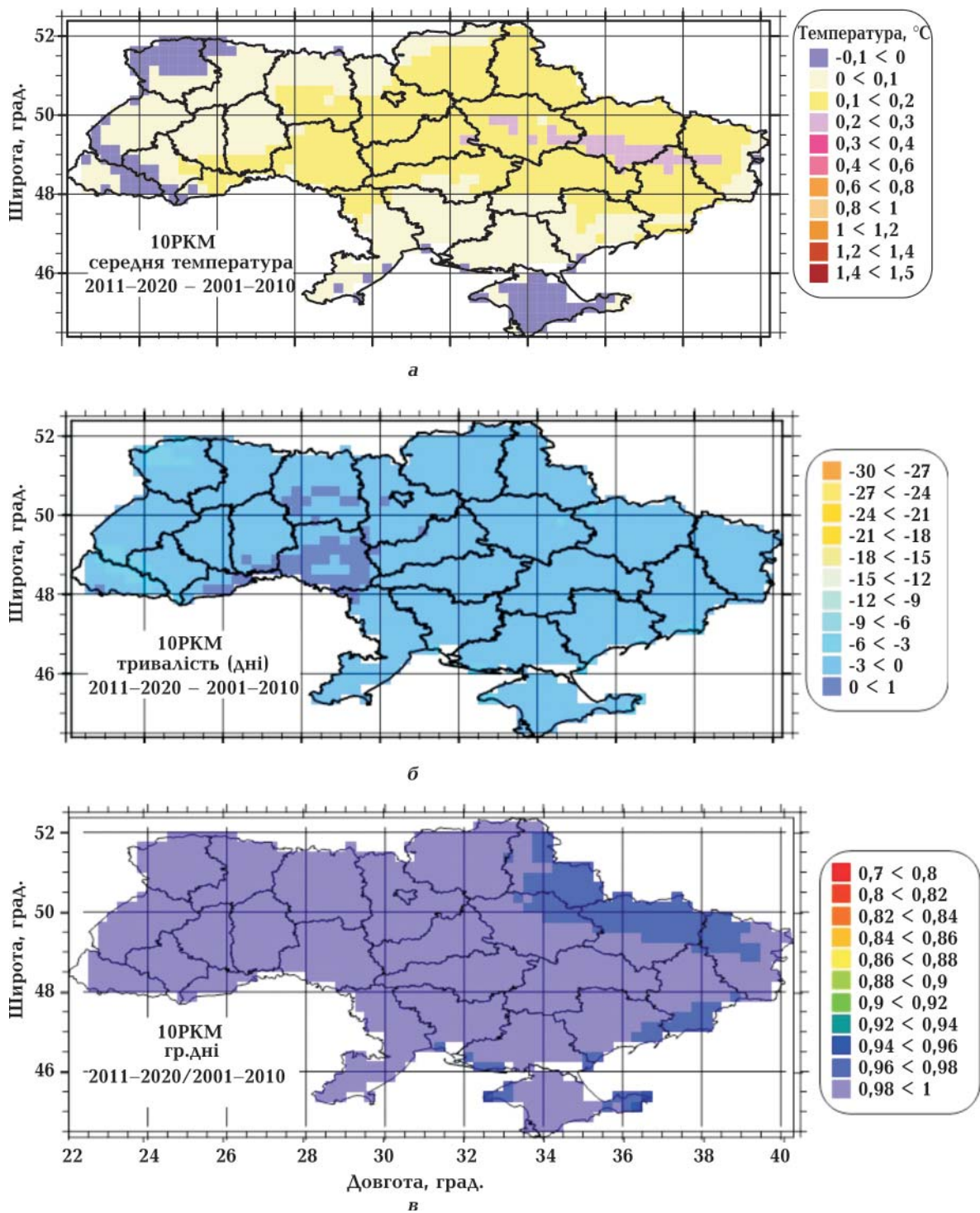


Рис. 5. Зміни значень кліматичних показників опалювального періоду у 2011—2020 рр. по відношенню до базового періоду 2001—2010 рр.: *а* — середня температура; *б* — тривалість; *в* — відношення величини градусо-днів.

як основних, так і спеціалізованих кліматичних показників. Отримано задовільне узгодження середніх температур опалювального періоду між обома наборами даних і деяке завищення значень тривалості

опалювального періоду в розрахунках на підставі модельних даних. Визначення величини градусо-днів ансамблем моделей показало задовільний збіг з даними, отриманими на основі спостережень, а також

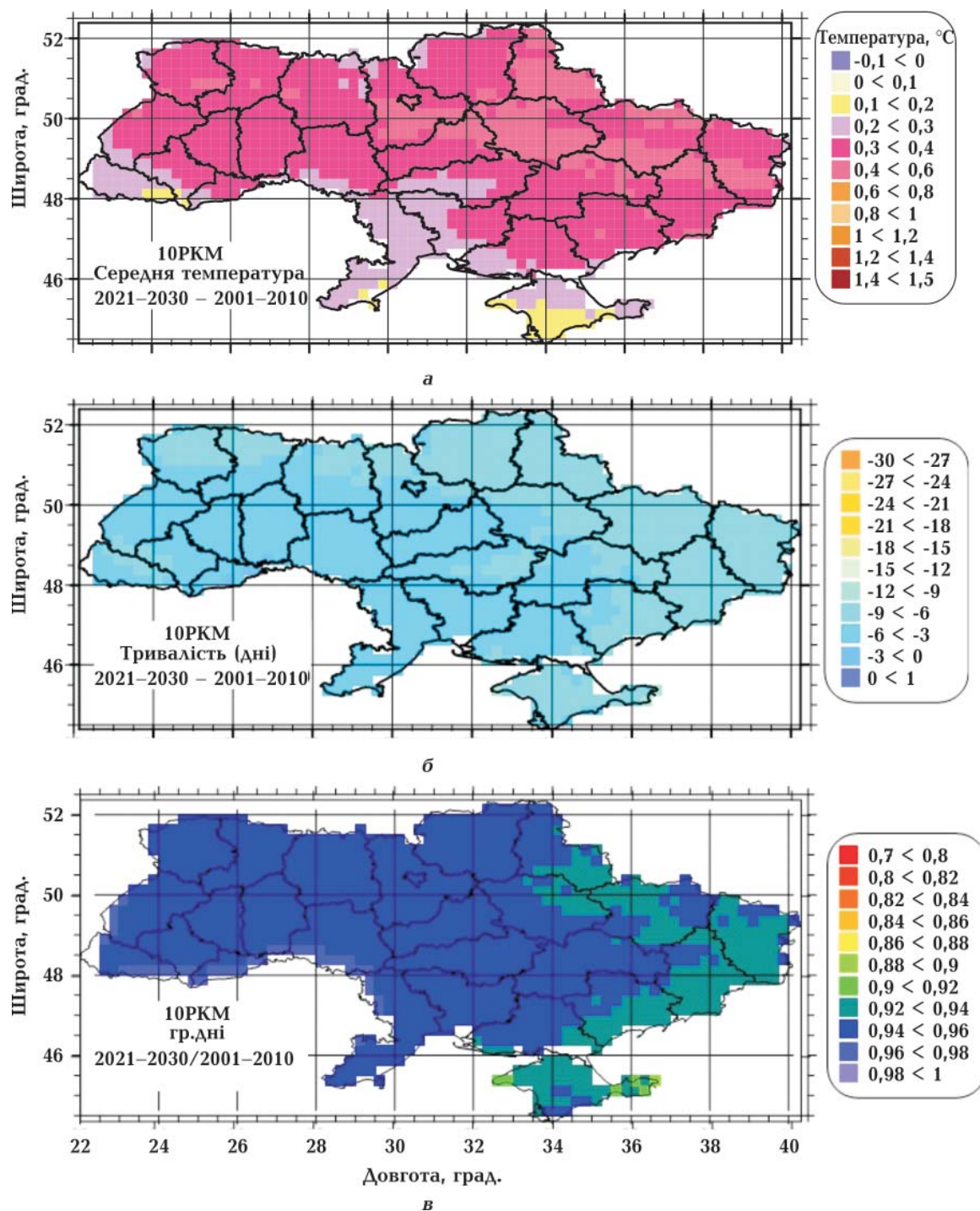


Рис. 6. Зміни значень кліматичних показників опалювального періоду у 2021—2030 рр. по відношенню до базового періоду 2001—2010 рр.: а — середня температура; б — тривалість; в — відношення величини градусо-днів.

з даними, наведеними у публікації [Національний..., 2011]. Отже, ансамбль 10 РКМ придатний для прогнозування кліматичних показників опалювального періоду на майбутнє за умови врахування встановлених похибок.

*Прогноз спеціалізованих кліматичних показників опалювального періоду до середини XXI ст. Аналіз результатів прогнозування спеціалізованих кліматичних показників буде представлено по десятиріччя до середини XXI ст. у порівнянні з*

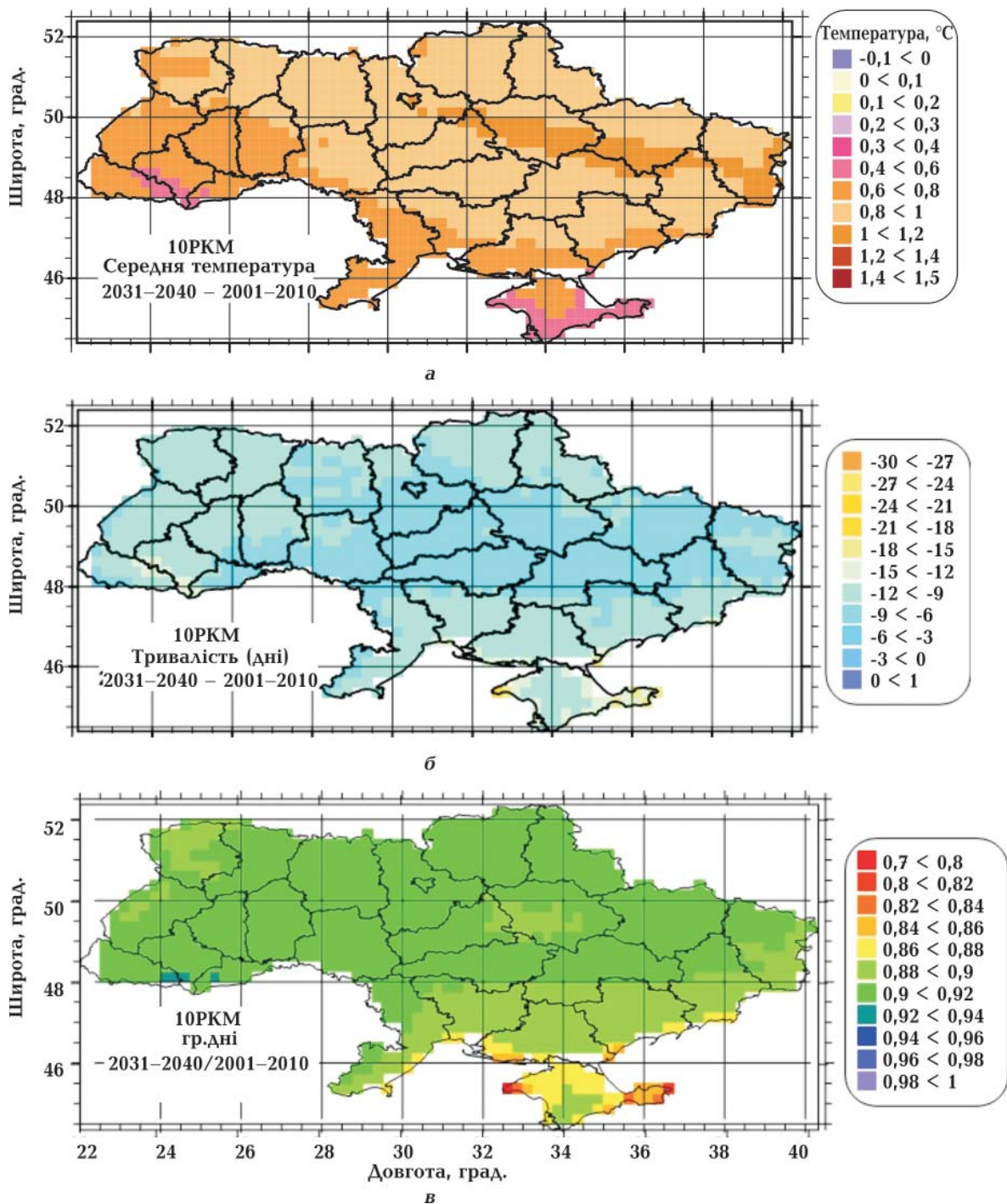


Рис. 7. Зміни значень кліматичних показників опалювального періоду у 2031—2040 рр. по відношенню до базового періоду 2001—2010 рр.: а — середня температура; б — тривалість; в — відношення величини градусо-днів.

базовим періодом 2001—2010 рр. за однаковою схемою: спочатку будемо аналізувати середню температуру, потім тривалість опалювального періоду і підсумовувати величинами градусо-днів. В табл. 1—3 систематизовано осереднені дані щодо

адміністративних одиниць України. Просторові розподіли середньої температури опалювального періоду подано на рис. 4, а зміни кожного з показників по десятиріччях — на рис. 5—8. Таким чином, отримані результати підготовлені для використання

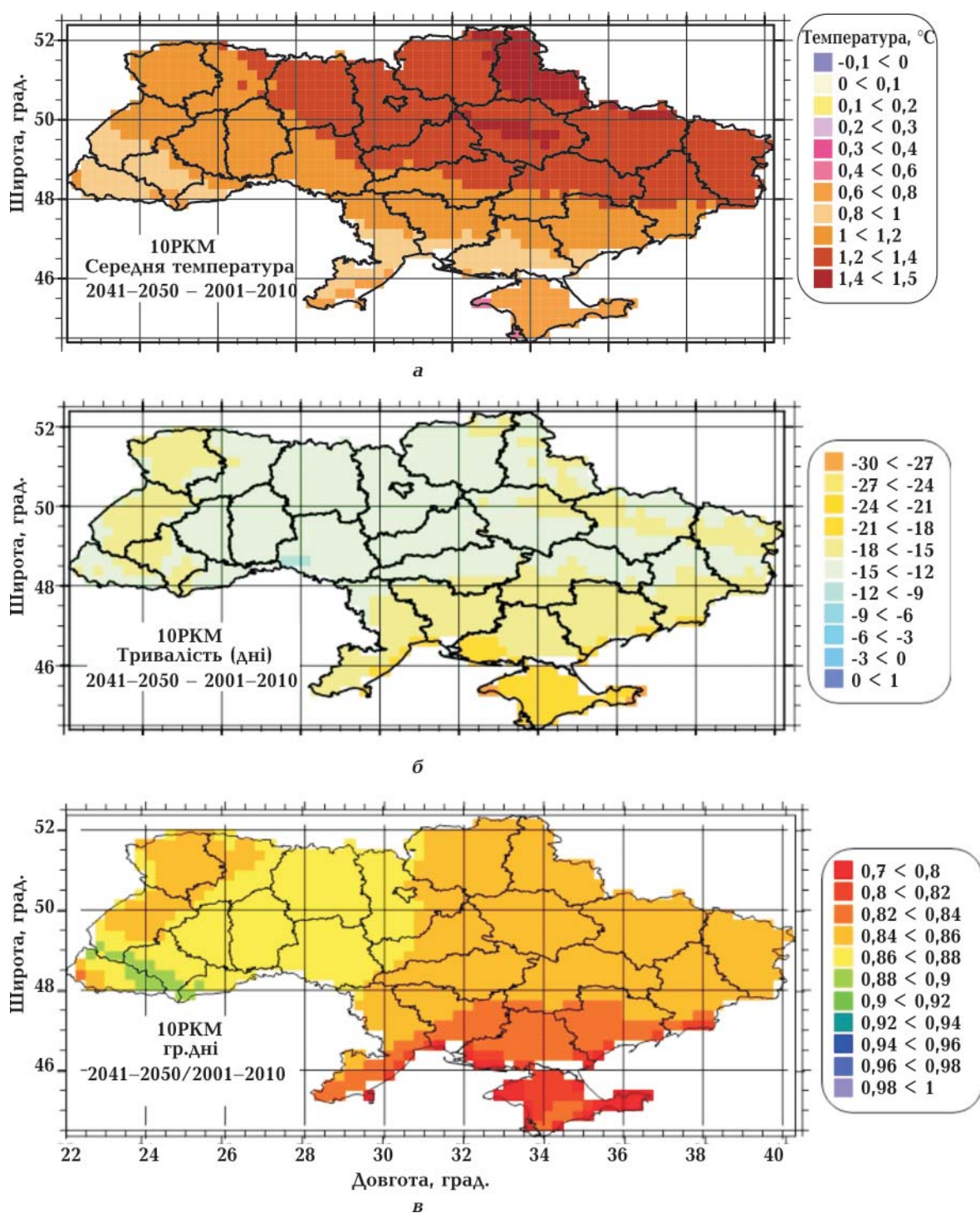


Рис. 8. Зміни значень кліматичних показників опалювального періоду у 2041—2050 рр. по відношенню до базового періоду 2001—2010 рр.: а — середня температура; б — тривалість; в — відношення величини градусо-днів.

у вирішенні тих чи інших прикладних завдань.

**2011—2020 рр.** Зміни осереднених значень температури повітря опалювального періоду, його тривалості у 2011—2020 рр.

та величини градусо-днів відносно періоду 2001—2010 рр. показано на рис. 4, 5. Очікується, що найнижчі середні температури опалювального періоду від  $-2,0$  до  $-1,5$  °С спостерігатимуться на північному сході та

сході країни, зі зростанням у напрямку на південний захід та південь до 2,0—3,0 °С у Криму. Особливо виділяється регіон Карпат, де середні температури змінюватимуться в межах –0,5...–1,0 °С (рис. 4). Отримано незначне, від 0 до 0,2 °С, підвищення середньої температури опалювального сезону порівняно з базовим періодом 2001—2010 рр. практично для усієї території України. Винятком є крайній північний захід, Крим та гірські райони Карпат, де, за розрахунками, середня температура знизиться на 0,1 °С (рис. 5, а). Для більшості території країни навіть незначне підвищення середньої температури опалювального періоду може супроводжуватися скороченням його тривалості. Так, за результатами розрахунків прогнозується саме незначне, близько 3 діб, зменшення тривалості опалювального сезону у досліджуваний період (рис. 5, б). У Карпатах, на межі Сумської та Харківської областей, в окремих малих за площею районах крайнього північного заходу тривалість цього сезону скоротиться приблизно на 5—6 діб, на півдні Поділля та у окремих районах Чернівецької області залишиться незмінною або збільшиться на 1 добу (табл. 1, 2).

Прогнозована величина градусо-днів для періоду 2011—2020 рр. змінюється від максимальних значень, близьких до 4 тис. градусо-днів, на північному сході та у Карпатах, до найнижчих — у Криму, 1,6—2,0 тис. градусо-днів. На Закарпатті максимальні величини очікуються в діапазоні 2,4—2,6 тис. градусо-днів (табл. 1—3). Законмірність просторового розподілу величини практично повторює розподіл середньої температури опалювального сезону. Прогнозується зниження значень з північного сходу на південний захід для територій північніше 48-ї паралелі і в напрямку з півночі на південь для південніших територій. Розрахунок співвідношень середніх значень градусо-днів за період 2011—2020 рр. до базового 2001—2010 рр. показує незначне зменшення (близько 1—2 %) для більшості території і тільки в окремих районах на сході та у Приазов'ї зменшення цієї величини прогнозується на 4—5 % (рис. 5, в).

**2021—2030 рр.** У наступне десятиріччя, прогнозується подальше підвищення середньої температури опалювального періоду (рис. 4, б, а). Очікується підвищення мінімальних значень середніх температур до –1,5...–1,0 °С (північний схід, схід, Карпати) та зменшення площ територій, де середня температура за знаком буде від'ємною. Одночасно зростатимуть максимальні показники до 3,0—3,5 °С у Криму та до 2,0—2,5 °С на Закарпатті. На півдні збільшуються площі територій, де середня температура прогнозується у діапазоні 2,0—2,5 °С (рис. 4).

Для більшості території України очікуються прирости середньої температури щодо періоду 2001—2010 рр. у межах 0,2—0,4 °С і тільки в окремих районах, у центрі, на Лівобережжі та сході — до 0,6 °С (рис. 6, а). Інакше кажучи, очікується монотонне незначне підвищення середньої температури холодного періоду року. Для цього десятиріччя помітне деяке зменшення швидкостей приросту температури (0,1—0,2 °С) опалювального періоду для Криму та східних районів Закарпаття. Відповідно до підвищення температури, прогнозується скорочення тривалості опалювального періоду на сході, північному сході, в Карпатах, Криму на 6—9 діб, а на решті території — 3—6 діб (рис. 6, б). Прогностичні значення градусо-днів для періоду 2021—2030 рр. становлять від трохи менше 3,6 тис. (крайній північний схід) до 1,6—2,0 тис. у Криму та 2,4—2,6 тис. градусо-днів на Закарпатті (табл. 1—3). Практично на усій території прогнозується зменшення величини у абсолютному вимірі на 0,2—0,4 тис. градусо-днів, а у відносних до базового періоду величинах очікується зменшення на 4—6 % для більшості території країни, у Криму, Приазов'ї та на сході — на 6—8 % (рис. 6, в).

**2031—2040 рр.** У цей період за результатами ансамблевого моделювання прогнозується подальше зростання середньої температури опалювального сезону. Найнижчі середні значення не перевищуватимуть –1,0 °С (північний схід, Карпати) до максимальних у Криму — 3,5 °С. При цьому значно скорочуються площі тери-



торій, де прогноуються від'ємні значення середніх температур, такі райони залишаються тільки на північному сході та на сході. Поширення регіону із середньою температурою опалювального періоду до 2,0 °С прогноуються до 48-ї паралелі, тоді як у базовий період регіон з такими значеннями середніх температур поширювався до 46 ° пн. ш. (див. рис. 4). Очевидно, що для усієї території очікуються у цей час додатні прирости середньої температури: максимальні 1,0—1,2 °С в окремих районах Лівобережжя та на південному сході; для більшої частини території — 0,8—1,0 °С, а на південному заході, півдні — 0,6—0,8 °С. В Криму і окремих районах Закарпаття отримано найнижчі прирости — 0,4—0,6 °С (рис. 7, а). Для досліджуваного десятиріччя розподіл приростів середньої температури має більшу, ніж у попередні періоди, просторову неоднорідність та виявляє регіони (Лівобережжя, схід, Закарпаття та Крим) з різною швидкістю зростання показника.

Результати прогностичних розрахунків тривалості опалювального періоду у 2031—2040 рр. та її змін щодо базового показано на рис. 7, б. Абсолютні значення величини очікуються у межах від 180 діб на північному сході до значень, менших за 100 діб, у Криму. Основні тенденції змін тривалості відносно періоду 2001—2010 рр.: зменшення величини на 6—9 діб у центральних районах, на Лівобережжі та на сході країни; на заході, півдні та у Приазов'ї — на 9—12 діб, а у Криму — на 12—15 діб. Очевидно, що при такому скороченні тривалості опалювального періоду та підвищенні його середніх температур зменшаться розрахункові величини градусо-днів; у відносних значеннях для «материкової» території України на 8—12 %, для Криму та морських узбереж на 12—15 % (рис. 7, в).

**2041—2050 рр.** До середини ХХІ ст. підвищення середньої температури опалювального періоду досягне значень, що знаходяться у діапазоні від  $-0,5$  °С на північному сході, сході та у Карпатах до  $4,5$  °С в окремих районах Криму. Відповідно до розрахунків, до середини сторіччя практично на усій території України

середня температура опалювального періоду досягне додатних значень, за винятком незначних за площею регіонів, указаних вище (див. рис. 4). Найбільші зміни середньої температури опалювального періоду, згідно з результатами моделювання, слід очікувати на півночі, північному сході, у центральних регіонах і, особливо, на Лівобережжі. Це підтверджується просторовим розподілом приростів температури у 2041—2050 рр. (рис. 8, а) щодо першого десятиріччя ХХІ ст. В указаних вище регіонах максимальні прирости становитимуть  $1,2$ — $1,5$  °С. На південному заході та півдні зміни показника знижуються до  $0,8$ — $1,0$  °С, у Криму — до  $0,6$ — $0,8$  °С. Тривалість опалювального сезону (рис. 8, б) до середини сторіччя відносно його початку найбільше скоротиться у Криму (близько 20 діб), на півдні й заході, а також в окремих районах — на сході на 15—18 діб. Відносне зменшення величини градусо-днів до середини сторіччя становитиме у Карпатах 9—12 %, а максимальне зменшення показників (на 20 %) очікується у Криму (рис. 8, в). На більшій частині території України зменшення величини градусо-днів прогноуються у межах 12—16 %.

**Висновки.** Верифікація спеціалізованих кліматичних показників опалювального періоду в Україні, що розраховані за даними ансамблю 10 РКМ Європейського проекту ENSEMBLES, показала можливість використання цього ансамблю для прогнозування відповідних величин з урахуванням виявлених модельних похибок. Установлено, що незначна середня похибка визначення температури опалювального періоду близько  $0,01$  °С дала змогу отримати з високою точністю проекції на майбутні періоди як самої температури, так і величини градусо-днів. Середня похибка визначення тривалості опалювального періоду становила 6,4 доби і була врахована у прогностичних розрахунках.

Отримано несуттєве, в межах  $0$ — $0,2$  °С, зростання середньої температури опалювального періоду для більшості території країни у сучасне десятиріччя 2011—2020 рр. відносно базового періоду 2001—2010 рр.,

скорочення тривалості опалювального періоду в середньому на 3 доби та зменшення величини градусо-днів на 2—3 %. У сучасний період виділено регіони (північний захід, Карпати, окремі райони Криму), де середня температура опалювального періоду може знижуватися на 0,1—0,2 °С, а тривалість періоду залишатися незмінною або збільшуватися на 1—2 доби.

У наступному десятиріччі 2021—2030 рр. прирости середньої температури прогнозують у межах 0,2—0,4 °С, з максимальними значеннями на півночі та північному сході. Зменшуватимуться площі територій з найнижчими середніми температурами опалювального періоду на сході та північному сході, а на півдні і в Криму очікується збільшення площ територій з найвищими значеннями. Тривалість опалювального сезону зменшиться переважно на 3—6 діб, на північному сході та сході — до 9 діб, а величина градусо-днів — на 4—6 %, в окремих регіонах півдня та південного сходу — до 8 %.

Для десятиріччя 2031—2040 рр. прогнозуються прирости середньої температури

опалювального періоду на більшій частині території у межах 0,8—1,0 °С, менші прирости на півдні та в Криму — 0,6—0,8 °С. Тривалість періоду скорочуватиметься переважно на 6—7 і 12—15 діб на півдні та у Криму. На 8—15 % зменшиться величина градусо-днів, максимальне зниження очікується у Криму.

До середини ХХІ ст. суттєво зростатимуть середні температури опалювального періоду з максимальними приростами до 1,5 °С на північному сході, у центрі та на Лівобережжі і найменшими — до 0,8 °С на півдні, південному заході та у Криму. Тривалість періоду скорочуватиметься на 15—18 діб, максимальна до 20 діб на півдні. Величина градусо-днів зменшуватиметься на більшості території на 12—16 %, максимальна у Криму до 20 %, а мінімальна у Карпатах — 9—12 %.

Результати дослідження можна використовувати з метою розрахунків витрат енергії або енерговитрат на опалення та інших потреб теплоенергетики для будь-якого населеного пункту України.

### Список літератури

- Балабух В. О., Лавриненко О. М., Ягодінець С. М., Малицька Л. В., Базалєєва Ю. О. Зміна інтенсивності, повторюваності та локалізації небезпечних явищ погоди в Україні та їх регіональні особливості. *Збірник наук. праць МГП НАН України «Системи контролю навколишнього середовища»*. 2013. Вип. 19. С. 189—198.
- Гнатюк Н. В., Краковская С. В., Шпиталь Т. Н., Паламарчук Л. В. Характеристики отопительного периода в Украине до середины XXI века по региональной климатической модели REMO: *Материалы научной конференции «Проблемы гидрометеорологического обеспечения хозяйственной деятельности в условиях изменения климата»*. Минск, 5—8 мая 2015 г. Минск: Издательский центр Белорусского государственного университета, 2015. С. 210—212.
- Кобышева Н. В., Ключева М. В., Александрова А. А., Булыгина О. Н. Климатические характеристики отопительного периода в субъектах Российской Федерации в настоящем и будущем. *Метеорология и гидрология*. 2004. № 8. С. 46—52.
- Краковская С. В. Оптимальный ансамбль региональных климатических моделей для оценки изменений температурного режима в Украине. *Природопользование*. 2018. № 1. С. 114—126.
- Краковська С. В., Гнатюк Н. В., Шпиталь Т. Н., Паламарчук Л. В. Проекції змін приземної температури повітря за даними ансамблю регіональних кліматичних моделей у регіонах України в ХХІ столітті. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2016а. № 268. С. 33—44.
- 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 даними ансамблів регіональних кліматичних моделей. *Геоінформатика*. 2018. № 3(67). С. 62—77.

- Краковська С. В., Паламарчук Л. В., Шпиталь Т. М. Електронні бази метеорологічних даних та результати чисельних кліматичних моделей у визначенні спеціалізованих кліматичних показників. *Гідрологія, гідрохімія та гідроекологія*. 2016б. № 3(42). С. 95—105.
- Краковська С. В., Шпиталь Т. М. Дати переходу температури повітря через 0, 5, 10 і 15 °С та тривалість відповідних кліматичних сезонів з другої половини ХХ до середини ХХІ ст. в Україні. *Геоінформатика*. 2018. № 4(68). С. 74—92.
- Національний стандарт України. Будівельна кліматологія. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Київ: Вид. Мінрегіонбуду України, 2011.
- Оцінка впливу кліматичних змін на галузі економіки України. Ред. С. М. Степаненко, А. М. Польовий. Одеса: Екологія, 2011. 696 с.
- Руководство по специализированному климатологическому обслуживанию экономики. Ред. Н. В. Кобышева. Санкт-Петербург, 2008. 336 с.
- СНиП 2.04.05-91\*У. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Издание неофициальное. Киев: КиевЗНИИЭП, 1996. 89 с. Режим доступа: [https://dnaop.com/html/1671/doc/СНиП\\_2.04.05-91\\_У](https://dnaop.com/html/1671/doc/СНиП_2.04.05-91_У).
- Шедеменко І. П., Краковська С. В., Гнатюк Н. В. Верифікація даних Європейської бази E-OBS щодо приземної температури повітря та кількості опадів у адміністративних областях України. *Наук. Праці УкрНДГМІ*. 2012. Вип. 262. С. 36—48.
- Berg, P., Feldmann, H., & Panitz, H.-J. (2012). Bias correction of high resolution regional climate model data. *Journal of Hydrology*, 448-449, 80—92. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.026>.
- Haylock, M. R., Hofstra, N., Klein Tank, A. M. G., Klok, E. J., Jones, P. D., & New, M. A. (2008). A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation for 1950—2006. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113. D20119. doi:10.1029/2008JD10201.
- IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. (2013). *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 1535 p.
- IPCC: Summary for Policymakers. Global warming of 1.5 °C. (2018). Retrieved from [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15\\_SPM\\_version\\_report\\_LR.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf).
- Nakićenović, N., & Swart, R. (Eds.). (2000). *Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 599 p.
- Park, C., Fujimori, S., Hasegawa, T., Takakura, J. Y., Takahashi, K., & Hijioka, Y. (2018). Avoided economic impacts of energy demand changes by 1.5 and 2 °C climate stabilization. *Environmental Research Letters*, 13(4), 045010. doi.org/10.1088/1748-9326/aab724.
- Petri, Y., & Caldeira, K. (2015). Impacts of global warming on residential heating and cooling degree-days in the United States. *Scientific reports*, 5, 12427. doi: 10.1038/srep12427.
- Shvidenko, A., Buksha, I., Krakovska, S., & Lakyda, P. (2017). Vulnerability of Ukrainian Forests to Climate Change. *Sustainability*, 9(7), 1152. doi:10.3390/su9071152.
- Van der Linden, P., & Mitchell, J. F. B. (Eds.). (2009). *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160 p.

## Climatic projections of heating season in Ukraine up to the middle of the 21st century

S. V. Krakovska, L. V. Palamarchuk, T. M. Shpytal, 2019

The paper presents projections for the balanced scenario A1B of specialized climatic indicators of the heating period for the territory of Ukraine for decades until the middle of the 21<sup>st</sup> century. Prediction of mean temperature, duration and heating degree-days are based on calculations of the previously formed and adapted to Ukraine ensemble of 10 regional climate models from the European project ENSEMBLES. The main and specialized climatic indicators calculated on all nodes of a regular grid of 25×25 km were verified by E-Obs data for the period 2001—2010. A negligible bias in the heating period mean temperature (in average less than 0.01°C) and an acceptable bias in duration (with a mean value of less than 6,4 days or <4 %) were found in the verification that resulted in obtaining an average bias in heating degree-days by about 4 %. Forecasting of specialized indicators of the heating season for future periods was performed with corresponding bias corrections. The spatial and temporal changes of heating period indices for the decades to the middle of the 21<sup>st</sup> century have been analyzed and averaging values for administrative units of Ukraine have been calculated. Obtained insignificant, within the limits of 0—0,2 °C, increase of the mean heating period temperature for most of the country in the modern decade of 2011—2020 in relation to the base period of 2001—2010, reducing the heating period duration by an average of 3 days and reducing values of heating degree-days by 2—3 %. By the middle of the 21<sup>st</sup> century the mean heating period temperature will increase significantly with maximum values of 1,5 °C in the northeastern, central and eastern parts of the country, and the least increasing of 0,8 °C to the south, southwest and the Crimea. The heating period duration will be reduced by 15—18 days in average, with a maximum of 20 days to the south. The values of heating degree-days will decrease in most areas by 12—16 %, with maximum by 20 % in the Crimea, and the minimum reduction by 9—12 % in the Carpathians. Results obtained in the study may be used, primarily, for the calculation of heating costs and other needs of the energy sector and other national economy sectors for the overall development of infrastructure and other needs of any settlement in the territory of Ukraine.

**Key words:** ensemble of regional climate models, verification of modeling data, specialized climatic indicators, heating period mean temperature, heating period duration, heating degree days.

### References

- Balabukh, V. O., Lavrynenko, O. M., Yahodynets, S. M., Malyska, L. V., Bazalieieva, Yu. O. (2013). Change in the intensity, frequency and localization of dangerous weather phenomena in Ukraine and their regional features. *Zbirnyk naukovykh prats MHI NAN Ukrainy «Systemy kontroliu navkolnyshnoho seredovyschcha»*, (19), 189—198 (in Ukrainian).
- Gnatyuk, N. V., Krakovska, S. V., Shpital, T. N., & Palamarchuk, L. V. (2015). Characteristics of the heating period in Ukraine until the middle of the 21st century according to the regional climatic model REMO: *Proc. of the sci. conf «Problems of hydrometeorological support of economic activity in the context of climate change»*. Minsk, May 5—8, 2015 (pp. 210—212). Minsk: Publ. Center of the Belarusian State University (in Russian).
- Kobysheva, N. V., Klyueva, M. V., Aleksandrova, A. A., & Bulygina, O. N. (2004). Climatic characteristics of the heating period in the subjects of the Russian Federation in the present and future. *Meteorologiya i gidrologiya*, (8), 46—52 (in Russian).
- Kravovska, S. V. (2018). Optimal ensemble of regional climate models for the assessment of temperature regime change in Ukraine. *Prirodopolzovaniye*, (1), 114—126 (in Russian).
- Kravovska, S. V., Gnatiuk, N. V., Shpytal, T. M.,

- & Palamarchuk, L. V. (2016a). Projections of surface air temperature changes based on data of regional climate models' ensemble in the regions of Ukraine in the 21st century. *Naukovi pratsi UkrNDHMI*, (268), 33—44 (in Ukrainian).
- Krakovska, S. V., Palamarchuk, L. V., Gnatiuk, N. V., & Shpytal, T. M. (2018). Projections of air temperature and relative humidity in ukraine regions to the middle of the 21st century based on regional climate model ensembles. *Geoinformatika*, (3), 62—77 (in Ukrainian).
- Krakovska, S. V., Palamarchuk, L. V., & Shpytal, T. M. (2016b). Electronic databases and results of numerical simulations in defining specialized climate indices. *Hidrolohiya, hidrokimiya ta hidroekolojiya*, (3), 95—105 (in Ukrainian).
- Krakovska, S. V., & Shpytal, T. M. (2018). Dates of air temperature transition over 0, 5, 10 and 15 °C and corresponding lengths of climatic seasons from the second part of the 20th to the middle of the 21st century in Ukraine. *Geoinformatika*, (4), 74—92 (in Ukrainian).
- National Standard of Ukraine. Building Climatology. DSTU-N B V.1.1-27:2010. (2011). Kyiv: Edition of the Ministry of Regional Construction of Ukraine (in Ukrainian).
- Stepanenko, S. M., & Polovyi, A. M. (Eds.). (2011). *Assessment of the impact of climate change on the economy of Ukraine*. Odesa: Ekolojiya, 696 p. (in Ukrainian).
- Kobysheva, N. V. (Ed.). (2008). *Guidelines for Specialized Climatological Services for the Economy*. Sankt-Peterburg, 336 p. (in Russian).
- SNiP 2.04.05-91\*U. (1996). Heating, ventilation and air conditioning. Unofficial Edition. Kiev: Edition Ukrainian Zonal Research and Design Institute for Civil Engineering., 89 p. Retrieved from [https://dnaop.com/html/1671/doc СНиП\\_2.04.05-91\\_У](https://dnaop.com/html/1671/doc СНиП_2.04.05-91_У) (in Russian).
- Shedemenko, I. P., Krakovska, S. V., & Gnatiuk, N. V. (2012). Verification of data of the European E-OBS database on surface air temperature and rainfall in administrative regions of Ukraine. *Naukovi pratsi UkrNDHMI*, (262), 36—48 (in Ukrainian).
- Berg, P., Feldmann, H., & Panitz, H.-J. (2012). Bias correction of high resolution regional climate model data. *Journal of Hydrology*, 448-449, 80—92. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.04.026>.
- Haylock, M. R., Hofstra, N., Klein Tank, A. M. G., Klok, E. J., Jones, P. D., & New, M. A. (2008). A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation for 1950—2006. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 113. D20119. doi:10.1029/2008JD10201.
- IPCC: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. (2013). *Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 1535 p.
- IPCC: Summary for Policymakers. Global warming of 1.5 °C. (2018). Retrieved from [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15\\_SPM\\_version\\_report\\_LR.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2019/05/SR15_SPM_version_report_LR.pdf).
- Nakićenović, N., & Swart, R. (Eds.). (2000). *Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, 599 p.
- Park, C., Fujimori, S., Hasegawa, T., Takakura, J. Y., Takahashi, K., & Hijioka, Y. (2018). Avoided economic impacts of energy demand changes by 1.5 and 2 °C climate stabilization. *Environmental Research Letters*, 13(4), 045010. doi.org/10.1088/1748-9326/aab724.
- Petri, Y., & Caldeira, K. (2015). Impacts of global warming on residential heating and cooling degree-days in the United States. *Scientific reports*, 5, 12427. doi: 10.1038/srep12427.
- Shvidenko, A., Buksha, I., Krakovska, S., & Lakyda, P. (2017). Vulnerability of Ukrainian Forests to Climate Change. *Sustainability*, 9(7), 1152. doi:10.3390/su9071152.
- Van der Linden, P., & Mitchell, J. F. B. (Eds.). (2009). *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project*. Met Office Hadley Centre, FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160 p.