

## ПРОЕКЦІЇ ПРИЗЕМНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ТА ВІДНОСНОЇ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ В ОБЛАСТЯХ УКРАЇНИ ДО СЕРЕДИНИ ХХІ СТ. ЗА ДАНИМИ АНСАМБЛІВ РЕГІОНАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

С.В. Краковська<sup>1</sup>, Л.В. Паламарчук<sup>1,2</sup>, Н.В. Гнатюк<sup>1,3</sup>, Т.М. Шпиталь<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Український гідрометеорологічний інститут, просп. Науки, 37, м. Київ, 03028, Україна, e-mail: svitlanakrakovska@gmail.com, shpital@bigmir.net

<sup>2</sup>Київський національний університет імені Тараса Шевченка, вул. Володимирська, 64/13, м. Київ, 01601, Україна, e-mail: palamarchuk.l@ukr.net

<sup>3</sup>Міжнародний центр з навколишнього середовища та дистанційного зондування імені Нансена, 14-а Лінія, В.О., буд. 7, оф. 49, м. Санкт-Петербург, 199034, Росія, e-mail: gnatiuk@niersc.spb.ru

Наведено проєкції температури та відносної вологості повітря до середини ХХІ ст. для України в цілому, окремих регіонів, адміністративних областей та АР Крим, які визначено за ансамблями регіональних кліматичних моделей Європейського рамкового проєкту FP-6 ENSEMBLES для сценарію SRES A1B. Значення цих моделей за базовий період для температури повітря верифіковано за даними бази E-Obs, а показники відносної вологості — за даними Кліматичного кадастру України. До середини ХХІ ст. отримано зростання середніх місячних значень температури повітря у межах від 0,4 до 3,0 °С, середніх річних — від 1,6 до 2,1 °С. Найбільше потепління відносно стандартного кліматичного періоду очікується на північному сході, сході та півдні України, що підтверджує основні тенденції змін та їх просторову локалізацію, які виявили автори у попередніх роботах. Вперше для території України розраховано значення проєкцій відносної вологості повітря до середини ХХІ ст. Діапазон прогнозованих змін відносної вологості повітря становить  $\pm 1\%$  для середніх річних та  $\pm 3\%$  — для середніх місячних значень. Показано, що в межах установленого діапазону коливань значень відносної вологості при зростанні приземної температури повітря слід очікувати збільшення вологовмісту у приземному шарі, що може бути наслідком збільшення кількості випадків сильних опадів, особливо у тепле півріччя.

**Ключові слова:** приземна температура, відносна вологість повітря, регіональна кліматична модель, ансамбль моделей, кліматичний період.

**Вступ.** Прогноз змін регіонального клімату певної території зводиться переважно до визначення трендів таких основних кліматичних показників, як приземна температура повітря і кількість опадів [4, 5, 7, 8 та ін.]. Це основні характеристики термічного режиму та режиму зволоження нижнього шару атмосфери. Інші кліматичні показники, в тому числі характеристики вологості повітря, залежать від його температури, а також температури підстильної поверхні й ступеня її зволоження. Окремо взяті такі показники дають менш чітке уявлення про стан атмосфери. Очевидно, що для розуміння особливостей майбутнього клімату необхідна якомога більша кількість характеристик, які слід розглядати у комплексі. Разом з тим кожен з параметрів стану атмосфери відзначається своїм унікальним впливом на навколишнє середовище та діяльність людини.

Мета запропонованої роботи — для основних регіонів України та її адміністративних областей на підставі даних ансамблів регіональних кліматичних

моделей (РКМ) розрахувати проєкції<sup>1</sup> приземної температури і відносної вологості повітря [1] та визначити просторові відмінності очікуваних змін і трансформацію сезонного ходу вказаних кліматичних показників до середини ХХІ ст.

Відомо, що характеристики вологості повітря, які використовують у метеорології, умовно можна поділити на дві групи: а) визначення кількості (маси) водяної пари, яка утримується у повітрі на момент вимірювання (абсолютна вологість, парціальний тиск та ін.); б) визначення ступеня насичення повітря водяною парою за певної температури (відносна вологість, дефіцит вологості, дефіцит температури точки роси тощо).

Для оцінювання змін вологості повітря до середини сторіччя розраховано проєкції відносної вологості — характеристики, яку визначають під час метеорологічних спостережень, використовують у прогнозах погоди для населення і яка є одним із важливих кліматичних показників.

<sup>1</sup> Проєкція — це потенційна майбутня еволюція кількісного показника чи сукупності кількісних показників, які часто розраховують за допомогою моделі. На відміну від прогнозів проєкції є умовними щодо припущень стосовно, наприклад, майбутніх соціально-економічних і технологічних розробок, які можуть або не можуть бути реалізовані (пер. з рос. [1]).

У публікаціях [2, 3] достатньо повно висвітлено просторовий розподіл, сезонні та добові зміни відносної вологості на території України за різні часові періоди, у тому числі стандартний кліматичний — 1961—1990 рр. Окремо у дослідженнях розглянуто повторюваність днів та умов, за яких спостерігаються низькі (30 % і менше) та високі (80 % і більше) значення відносної вологості. Такі періоди є непрямими кліматичними показниками ступеня зволоження території [2]. Велику кількість робіт присвячено вивченню та оцінюванню стану атмосфери за різних комбінацій значень метеорологічних величин (температури, вологості, швидкості вітру та ін.) і їх впливу на навколишнє середовище й населення. Так, у статті [13] досліджено показники пожежонебезпечності, у статті [9] — комфортні погодні умови, у публікації [4] наведено, зокрема, й комплексні погодні індекси для Луганської області, у статті [22] — детальний аналіз як окремих, так і комбінованих кліматичних характеристик для Карпатського регіону. Інший напрям досліджень стосується розподілу з висотою характеристик вологості й температури повітря для території України, що ґрунтується на аерологічних і супутникових спостереженнях [11, 12]. Подібні дослідження важливі з точки зору формування масивів даних для оцінювання характеристик зволоження атмосфери у сучасний кліматичний період, показники яких можуть бути базовими для визначення проєкцій розподілу з висотою відповідних характеристик у майбутньому.

Проєкції майбутніх змін розподілу температури та вологості повітря на території України також розглянуто у багатьох публікаціях, але більшість з них усе ж присвячені прогнозуванню температурного режиму. Зокрема, використано розрахунки глобальних кліматичних моделей для аналізу тенденцій змін температури повітря в межах різних природних зон України до 2030 р. методом побудови емпірико-статистичного сценарію [8]. Дані глобальних моделей проаналізовано для трьох доменів різного розміру, вкладених один в одній, центром яких є м. Львів, для отримання проєкцій у два майбутні періоди — 2040—2060 і 2080—2100 рр. [14]. Проте це не сприяло виявленню регіональних особливостей розподілу досліджуваних величин на всій території України, оскільки крок розрахункової сітки глобальних моделей становить від 1 до 5 градусів і результати, як правило, репрезентують як середнє для великих регіонів (країна, природна зона тощо). Автори статті [15] проаналізували взаємозв'язок температури повітря з вологістю та іншими кліматичними показниками, що були розраховані за РКМ з проєкту ENSEMBLES [23] для сценарію A1B [20] подібно до запропонованого дослідження, однак не верифікували їх для окремих регіонів, не вибрали кращі з них, як у публікації [19], а осереднили розрахунки всіх 17 моделей. Крім того, аналіз виконано

до середини сторіччя (для періоду 1961—2050 рр.) для всієї Європи з фокусом на території Франції, тобто регіональні особливості на території України не досліджували. У інших публікаціях висвітлено можливі майбутні зміни температури та вологості на підставі розрахунків РКМ, але тільки для окремих невеликих регіонів України, наприклад для басейну р. Буг [17], для регіону Чорного моря [16] — з використанням лише декількох РКМ. Зауважимо також, що у статті [21] для аналізу уразливості лісів України до зміни клімату також було використано проєкції температури та відносної вологості повітря за тими самими ансамблями РКМ, що наведено далі, але ні детальні дані, ні їх аналіз не подано.

На сьогодні для регіонів України розраховано проєкції температури повітря [5], кількості опадів [7] та загальної хмарності [6], які отримано за подібними методиками використання ансамблів РКМ. Нижче вперше для всієї території України і для всіх адміністративних одиниць за даними ансамблів РКМ наведено проєкції значень температури і вологості повітря для періоду 2021—2050 рр. та їхні зміни щодо кліматичної норми періоду 1961—1990 рр., а також подано аналіз просторового розподілу, річного ходу та взаємозв'язку кліматичних характеристик.

**Методичні підходи та використані дані.** Під час дослідження було використано дані метеорологічних спостережень за стандартний період 1961—1990 рр., що наведені у Кліматичному кадастрі України (ККУ) [2] та у базі даних E-Obs [18]. Отримані за цей період значення у часовому вимірі визначено як багаторічні середні місячні величини, а у просторовому вимірі їх осереднено за площею кожної адміністративної області та АР Крим. Ці значення були базовими при визначенні проєкцій приземної температури повітря для майбутнього кліматичного періоду 2021—2050 рр.

Проєкції температури повітря визначали за ансамблем з 10 РКМ, які розраховано в Європейському рамковому проєкті FP-6 ENSEMBLES [23] для сценарію SRES A1B [20]. Підходи до його формування викладено у публікаціях [10, 19]. Вологість повітря визначали за даними трьох РКМ (REMO, RCA3, RCMO2), які входять до попереднього ансамблю, що є мінімально допустимою кількістю моделей для формування ансамблю. Вибір такого скороченого ансамблю з трьох моделей зумовлений переважно технічними причинами, а саме відсутністю показників відносної вологості для інших моделей в базі результатів розрахунків РКМ.

Методику отримання проєкцій кліматичних характеристик детально викладено в роботах [6, 10, 19]. По суті проєкції змін температури повітря та його відносної вологості визначали як різницю за періоди 2021—2050 і 1961—1990 рр. осереднених за ансамблями та відповідними територіями даних РКМ. Значення РКМ за базовий період для температури повітря верифікували даними бази E-Obs

[18], а показники відносної вологості — даними ККУ [2]. Значення проєкцій величин отримували в усіх вузлах розрахункової сітки РКМ для України і осереднювали за площами адміністративних областей та основних регіонів. Визначали середні ансамблеві значення обох характеристик та довірчі інтервали за ансамблем для температури повітря за рівня достовірності 95 % так само, як і в статті [5].

**Результати дослідження.** Проєкції приземної температури повітря з розрахованими довірчими інтервалами для середніх значень за ансамблем 10 РКМ, а також значення відносної вологості для

окремих областей, регіонів і для всієї території країни наведено в табл. 1—4. На рис. 1, 2 показано просторовий розподіл для 24 областей України та АР Крим середніх місячних змін досліджуваних характеристик у період 2021—2050 рр. щодо стандартного 1961—1990 рр.

Згідно з наведеними результатами (рис. 1), в усіх областях найбільше потепління з високою узгодженістю в прогнозах РКМ (найменші довірчі інтервали) отримано для зимових місяців. Однак максимальний ріст температури упродовж року очікується в жовтні в діапазоні +2,3...3,0 °С з найбіль-

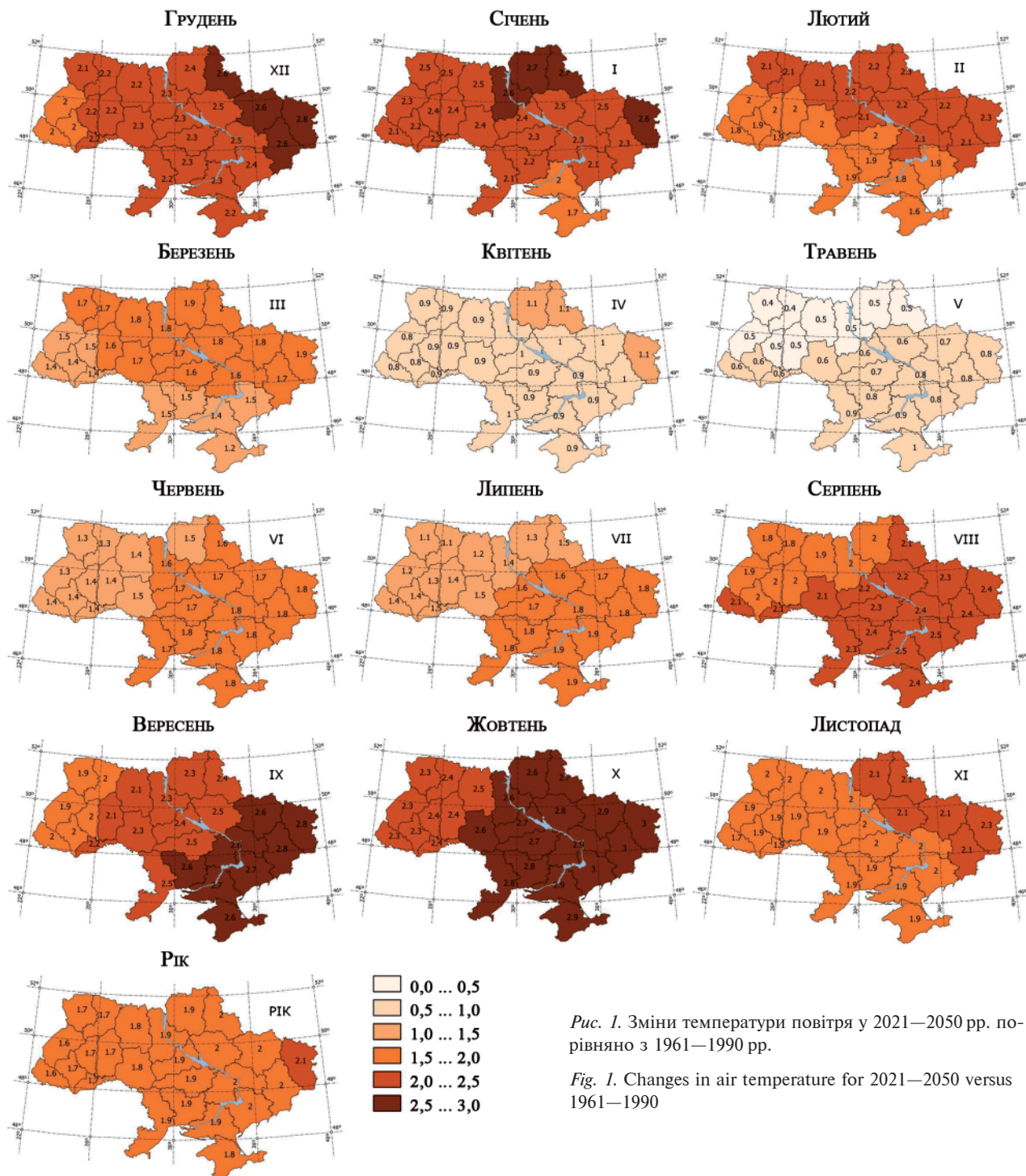


Рис. 1. Зміни температури повітря у 2021—2050 рр. порівняно з 1961—1990 рр.

Fig. 1. Changes in air temperature for 2021—2050 versus 1961—1990

шим значенням на сході країни. Дещо менші, але все ж високі значення отримано для грудня і січня та серпня і вересня. Найменші зміни температури та найбільшу неузгодженість серед РКМ в ансамблі (найбільші довірчі інтервали) отримано для квітня (+0,8...1,1 °C) й травня (+0,4...1,0 °C). Особливість прогнозованих змін приземної температури повітря на території країни — істотніше підвищення температури у холодне півріччя у північному регіоні та на сході, у тепле півріччя — на сході та на півдні, що було отримано і за попереднім оцінюванням [5, 21].

У цілому для України річні значення відносної вологості (рис. 2) дещо знижуватимуться в межах  $-1,0...+0,3\%$ , тобто зміни, які прогнозують, незначні і не перевищують точності визначення величини. При цьому переважно додатні прирости величини очікуємо у грудні ( $-0,3...+1,5\%$ ) і травні ( $-0,5...+1,2\%$ ), а переважно від'ємні — у березні ( $-2,3...-0,2\%$ ), червні ( $-2,7...+0,2\%$ ), лютому ( $-1,5...+0,7\%$ ). В інші місяці року відзначається суттєва просторова неоднорідність прогнозованих змін відносної вологості, які мають різнонапрямні прирости

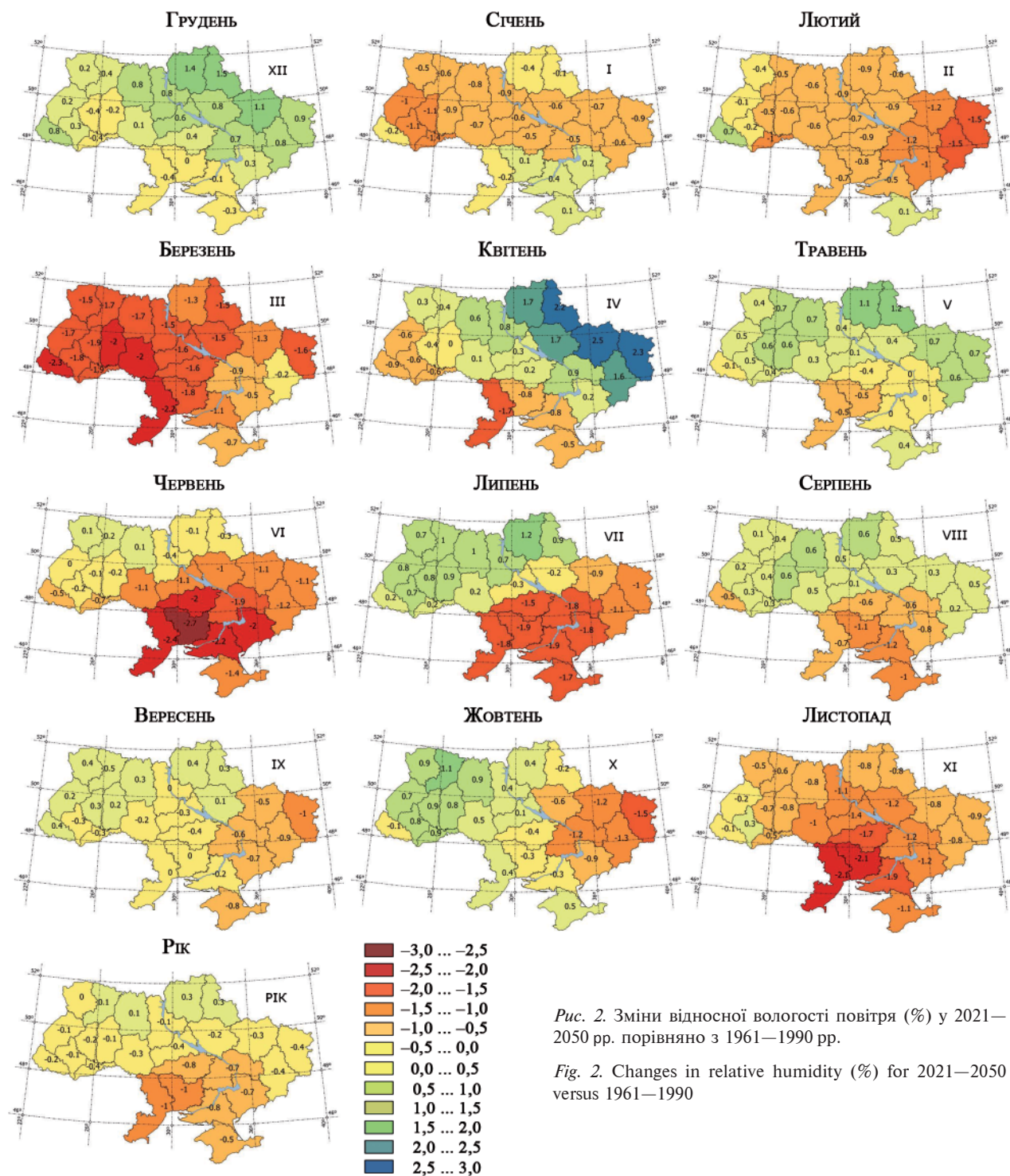


Рис. 2. Зміни відносної вологості повітря (%) у 2021—2050 рр. порівняно з 1961—1990 рр.

Fig. 2. Changes in relative humidity (%) for 2021—2050 versus 1961—1990

Таблиця 1. Проекції приземної температури повітря ( $t$ , °C), довірчі інтервали ( $CI$ , °C) та відносна вологість повітря ( $RH$ , %) (місячні, за холодне (ХП) і тепле (ТП) півріччя та річні) на період 2021–2050 рр., за даними ансамблю з 10 РКМ для адміністративних областей західного регіону України  
 Table 1. Projections of air temperature ( $t$ , °C) with confidence intervals ( $CI$ , °C) and relative humidity ( $RH$ , %) (monthly, cold (CP) and warm (TP) half-year and annual values) for the period 2021–2050 based on 10 RCM ensemble for administrative units of the western region of Ukraine

Період	Захід																	
	Волинська		Закарпатська		Івано-Франківська		Львівська		Рівненська		Тернопільська		Хмельницька		Чернівецька			
	$t \pm CI$	$RH$	$t \pm CI$	$RH$	$t \pm CI$	$RH$	$t \pm CI$	$RH$	$t \pm CI$	$RH$	$t \pm CI$	$RH$	$t \pm CI$	$RH$	$t \pm CI$	$RH$		
I	-2,4±0,4	84	-2,2±0,5	84	-3,1±0,4	78	-2,2±0,5	82	-2,9±0,4	84	-2,8±0,4	82	-3,0±0,4	84	-2,8±0,4	82		
II	-1,4±0,5	83	-0,3±0,4	82	-1,6±0,4	80	-0,9±0,4	83	-1,9±0,5	83	-1,5±0,4	83	-1,9±0,5	84	-1,3±0,4	81		
III	2,5±0,5	77	3,7±0,5	74	2,2±0,5	76	2,8±0,5	77	2,2±0,5	78	2,4±0,5	77	2,2±0,5	78	2,8±0,5	77		
IV	8,6±1,1	72	8,9±1,0	71	7,9±1,0	73	8,6±1,0	73	8,7±1,1	72	8,8±1,1	70	8,8±1,1	71	9,0±1,0	73		
V	14,1±1,0	71	13,6±1,0	73	12,9±1,1	75	13,6±1,0	74	14,4±1,0	71	14,1±1,0	71	14,5±1,1	70	14,3±1,1	74		
VI	18,0±0,8	73	17,2±0,8	75	16,6±0,8	76	17,4±0,8	76	18,2±0,8	73	17,9±0,8	73	18,3±0,8	73	18,1±0,9	75		
VII	19,0±0,7	75	18,6±0,7	76	17,9±0,7	77	18,6±0,7	77	19,2±0,7	75	19,1±0,8	76	19,4±0,8	75	19,5±0,8	76		
VIII	19,0±0,5	76	18,9±0,5	77	18,0±0,5	78	18,7±0,5	78	19,2±0,6	76	19,2±0,5	76	19,5±0,6	75	19,5±0,5	78		
IX	15,0±0,6	80	15,2±0,6	80	14,4±0,6	78	15,0±0,6	80	15,2±0,6	79	15,4±0,6	78	15,6±0,6	77	15,9±0,6	78		
X	10,2±1,0	83	10,5±1,0	80	9,6±1,0	79	10,3±1,0	82	10,1±1,0	83	10,3±1,0	81	10,3±1,0	81	10,6±1,0	81		
XI	4,4±0,9	86	4,6±0,9	84	3,9±0,9	81	4,6±0,9	83	4,2±0,9	85	4,3±0,9	84	4,2±1,0	85	4,6±0,9	83		
XII	0,0±0,7	88	0,0±0,7	87	-0,8±0,7	82	0,1±0,7	85	-0,2±0,7	88	-0,1±0,6	86	-0,2±0,6	88	-0,1±0,6	84		
ХП	2,2±0,7	83	2,7±0,7	82	1,7±0,7	79	2,4±0,7	82	1,9±0,7	84	2,1±0,7	82	1,9±0,7	83	2,3±0,7	81		
ТП	15,6±0,8	74	15,4±0,8	75	14,6±0,8	76	15,3±0,8	77	15,8±0,8	74	15,8±0,8	74	16,0±0,8	73	16,0±0,8	76		
Рік	8,9±0,7	79	9,0±0,7	78	8,2±0,7	78	8,9±0,7	79	8,9±0,7	79	8,9±0,7	78	9,0±0,8	78	9,2±0,7	79		

Таблиця 2. Проекції приземної температури повітря ( $t$ , °C), довірчі інтервали ( $CI$ , °C) та відносна вологість повітря ( $RH$ , %) (місячні, за холодне (ХІІ) і тепле (ТІІ) півріччя та річні) на період 2021–2050 рр., за даними ансамблю з 10 РКМ для адміністративних областей східного та південного регіонів України

Table 2. Projections of air temperature ( $t$ , °C) with confidence intervals ( $CI$ , °C) and relative humidity ( $RH$ , %) (monthly, cold (CP) and warm (TP) half-year and annual values) for the period 2021–2050 based on 10 RCM ensemble for administrative units of the eastern and southern regions of Ukraine

Період	Схід						Південь									
	Донецька		Луганська		Харківська		Запорізька		Одеська		Миколаївська		Херсонська		АР Крим	
	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$
I	-3,3±0,3	86	-4,1±0,3	82	-4,2±0,3	84	-2,1±0,3	85	-0,6±0,5	84	-1,6±0,4	83	-1,1±0,3	86	0,8±0,4	82
II	-2,5±0,6	83	-3,4±0,6	80	-3,3±0,6	82	-1,3±0,6	83	0,4±0,5	83	-0,6±0,5	81	-0,2±0,5	84	1,4±0,4	81
III	2,1±0,6	81	1,8±0,7	78	1,7±0,7	80	2,8±0,6	80	4,1±0,6	77	3,5±0,6	77	3,6±0,6	80	4,3±0,6	77
IV	10,4±1,3	70	10,3±1,4	69	10,0±1,3	71	10,4±1,2	71	10,6±1,1	69	10,6±1,2	68	10,6±1,1	72	10,6±1,0	72
V	16,6±1,1	63	16,5±1,2	61	16,3±1,2	62	16,7±1,1	66	16,5±1,1	68	16,7±1,1	65	16,8±1,1	69	16,3±1,0	72
VI	21,3±1,1	63	21,2±1,1	62	20,7±1,0	64	21,7±1,0	63	21,1±1,0	65	21,4±1,0	63	21,9±1,0	64	21,4±1,0	67
VII	23,3±0,8	61	22,9±0,8	62	22,2±0,8	66	23,8±0,8	61	23,0±0,8	65	23,2±0,8	63	24,2±0,8	61	23,9±0,9	64
VIII	23,0±0,6	61	22,5±0,6	62	22,0±0,6	66	23,7±0,6	61	23,0±0,6	64	23,2±0,6	61	24,1±0,6	61	23,8±0,5	65
IX	18,1±0,9	65	17,5±0,9	65	17,0±0,8	70	18,9±0,8	66	18,9±0,8	69	18,6±0,8	67	19,3±0,8	68	19,5±0,8	69
X	11,2±1,2	74	10,5±1,1	73	10,4±1,1	76	12,3±1,2	75	13,2±1,2	76	12,3±1,2	75	12,8±1,2	76	13,7±1,1	76
XI	4,6±1,0	86	3,9±1,0	84	3,6±1,0	86	5,6±1,0	85	6,8±1,0	81	5,8±1,0	82	6,4±1,0	84	8,0±1,0	80
XII	0,5±0,6	90	-0,3±0,7	87	-0,6±0,6	89	1,7±0,6	89	2,5±0,6	85	1,7±0,6	86	2,5±0,6	88	4,3±0,6	83
XП	2,1±0,7	83	1,4±0,8	81	1,3±0,7	83	3,1±0,7	83	4,4±0,7	81	3,5±0,7	81	4,0±0,7	83	5,4±0,7	80
ТП	18,8±1,0	64	18,5±1,0	63	18,0±1,0	66	19,2±0,9	65	18,9±0,9	67	19,0±0,9	64	19,5±0,9	66	19,2±0,9	68
РІК	10,4±0,8	73	9,9±0,9	72	9,6±0,8	75	11,2±0,8	74	11,6±0,8	74	11,2±0,8	72	11,7±0,8	74	12,3±0,8	74

Таблиця 3. Проекції приземної температури повітря ( $t$ , °C), довірчі інтервали ( $CI$ , °C) та відносна вологість повітря ( $RH$ , %) (місячні, за холодне (ХІІ) і тепле (ТІІ) півріччя та річні) на період 2021–2050 рр. за даними ансамблю з 10 РКМ для адміністративних областей північного та центрального регіонів України

Table 3. Projections of air temperature ( $t$ , °C) with confidence intervals ( $CI$ , °C) and relative humidity ( $RH$ , %) (monthly, cold (CP) and warm (TP) half-year and annual values) for the period 2021–2050 based on 10 RCM ensemble for administrative units of the northern and central regions of Ukraine

Період	Північ						Центр											
	Житомирська		Київська		Чернігівська		Сумська		Вінницька		Дніпропетровська		Кіровоградська		Полтавська		Черкаська	
	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$
I	-3,3±0,4	84	-3,2±0,4	83	-4,0±0,3	85	-4,7±0,3	85	-3,0±0,4	83	-3,0±0,3	84	-3,0±0,4	84	-3,7±0,3	84	-3,3±0,4	84
II	-2,2±0,5	82	-2,1±0,5	81	-3,1±0,5	82	-3,9±0,5	82	-1,8±0,5	83	-2,0±0,6	82	-1,9±0,5	83	-2,8±0,5	82	-2,2±0,5	82
III	2,0±0,6	78	2,3±0,6	78	1,6±0,6	80	1,0±0,7	80	2,3±0,6	78	2,5±0,6	80	2,5±0,6	79	2,0±0,6	79	2,3±0,6	79
IV	8,9±1,1	73	9,6±1,2	71	9,2±1,2	74	9,1±1,3	74	9,3±1,1	70	10,4±1,2	69	10,0±1,2	69	10,0±1,2	70	9,8±1,2	70
V	14,8±1,1	69	15,7±1,1	66	15,4±1,2	68	15,5±1,2	66	15,1±1,1	67	16,6±1,1	62	16,1±1,1	63	16,3±1,1	63	15,9±1,1	65
VI	18,7±0,9	72	19,7±0,9	69	19,5±0,9	71	19,6±1,0	70	19,1±0,9	70	21,3±1,0	62	20,5±1,0	64	20,5±1,0	65	20,1±1,0	68
VII	19,6±0,7	76	20,6±0,8	73	20,4±0,8	75	20,7±0,8	74	20,3±0,8	73	23,0±0,8	62	22,0±0,8	66	21,8±0,8	68	21,3±0,8	71
VIII	19,6±0,6	76	20,5±0,6	72	20,2±0,6	75	20,4±0,6	73	20,2±0,6	73	22,9±0,6	62	21,9±0,6	65	21,6±0,6	67	21,1±0,6	71
IX	15,5±0,7	79	16,1±0,7	74	15,6±0,7	78	15,6±0,8	76	16,1±0,7	75	18,1±0,8	66	17,3±0,8	68	16,8±0,8	70	16,5±0,8	73
X	10,1±1,1	83	10,5±1,1	80	9,8±1,1	82	9,5±1,1	81	10,6±1,1	80	11,5±1,2	74	11,0±1,2	76	10,5±1,1	77	10,6±1,1	79
XI	3,9±1,0	86	4,1±1,0	85	3,4±1,0	87	2,9±1,0	87	4,3±1,0	84	4,7±1,0	85	4,5±1,0	84	3,8±1,0	85	4,1±1,0	85
XII	-0,3±0,6	89	-0,1±0,6	88	-0,8±0,6	89	-1,3±0,6	89	0,1±0,6	87	0,6±0,6	89	0,4±0,6	88	-0,3±0,6	89	0,0±0,6	88
XIII	1,7±0,7	83	1,9±0,7	83	1,2±0,7	84	0,6±0,7	84	2,1±0,7	83	2,4±0,7	82	2,2±0,7	82	1,6±0,7	83	1,9±0,7	83
ТІІ	16,2±0,8	74	17,0±0,9	71	16,7±0,9	73	16,8±0,9	72	16,7±0,9	71	18,7±0,9	64	18,0±0,9	66	17,8±0,9	67	17,4±0,9	70
Рік	8,9±0,8	79	9,5±0,8	77	8,9±0,8	79	8,7±0,8	78	9,4±0,8	77	10,6±0,8	73	10,1±0,8	74	9,7±0,8	75	9,7±0,8	76

Таблиця 4. Проекції приземної температури повітря ( $t$ , °C), довірчі інтервали ( $CI$ , °C) та відносна вологість повітря ( $RH$ , %) (місячні, за холодне (XII) і тепле (III) півріччя та річні) на період 2021–2050 рр. за даними ансамблю з 10 РКМ для регіонів та всієї України

Table 4. Projections of air temperature ( $t$ , °C) with confidence intervals ( $CI$ , °C) and relative humidity ( $RH$ , %) (monthly, cold (CP) and warm (TP) half-year and annual values) for the period 2021–2050 based on 10 RCM ensemble on average for regions and the whole of Ukraine

Період	Північ		Захід		Центр		Схід		Південь		Україна	
	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$	$\pm CI$	$RH$
I	-3,8±0,3	84	-2,7±0,4	83	-3,2±0,4	84	-3,9±0,3	84	-0,9±0,4	84	-2,9±0,4	84
II	-2,8±0,5	82	-1,3±0,4	82	-2,2±0,5	82	-3,1±0,6	82	-0,1±0,5	83	-1,9±0,5	82
III	1,7±0,6	79	2,6±0,5	77	2,3±0,6	79	1,9±0,7	80	3,7±0,6	78	2,4±0,6	78
IV	9,2±1,2	73	8,7±1,0	72	9,9±1,2	69	10,2±1,3	70	10,6±1,1	71	9,7±1,2	71
V	15,3±1,1	67	13,9±1,0	72	16,0±1,1	64	16,4±1,2	62	16,6±1,1	68	15,7±1,1	67
VI	19,4±0,9	71	17,7±0,8	74	20,3±1,0	66	21,1±1,0	63	21,5±1,0	65	20,0±1,0	68
VII	20,3±0,8	74	18,9±0,7	76	21,7±0,8	68	22,8±0,8	63	23,6±0,8	63	21,5±0,8	69
VIII	20,2±0,6	74	19,0±0,5	77	21,5±0,6	67	22,5±0,6	63	23,6±0,6	63	21,4±0,6	69
IX	15,7±0,7	77	15,2±0,6	79	17,0±0,8	70	17,5±0,9	66	19,0±0,8	68	16,9±0,8	72
X	10,0±1,1	82	10,2±1,0	81	10,8±1,1	77	10,7±1,1	75	12,9±1,2	76	10,9±1,1	78
XI	3,6±1,0	86	4,3±0,9	84	4,3±1,0	85	4,0±1,0	85	6,5±1,0	82	4,5±1,0	84
XII	-0,6±0,6	89	-0,2±0,7	86	0,1±0,6	88	-0,1±0,6	89	2,5±0,6	86	0,4±0,6	88
XIII	<b>1,3±0,7</b>	84	<b>2,2±0,7</b>	82	<b>2,0±0,7</b>	82	<b>1,6±0,7</b>	82	<b>4,1±0,7</b>	81	<b>2,2±0,7</b>	82
TP	<b>16,7±0,9</b>	73	<b>15,6±0,8</b>	75	<b>17,7±0,9</b>	68	<b>18,4±1,0</b>	64	<b>19,1±0,9</b>	66	<b>17,5±0,9</b>	69
Рік	<b>9,0±0,8</b>	78	<b>8,9±0,7</b>	79	<b>9,9±0,8</b>	75	<b>10,0±0,9</b>	73	<b>11,6±0,8</b>	74	<b>9,9±0,8</b>	76



величини. Так, у квітні в Одеській обл. отримано зменшення відносної вологості на  $-1,7\%$ , на південному заході та півдні — до  $-0,9\%$ , а на північному сході — збільшення показника до  $+2,5\%$ .

Детальний аналіз сезонних і середніх місячних змін приземної температури повітря, визначеної за ансамблем 10 РКМ, наведено у статті [5]. Тому нижче детально розглянуто прогностичні значення відносної вологості повітря для досліджуваного періоду.

**Взимку**, згідно з даними праці [3], значення відносної вологості повітря перевищують  $80\%$  і розподіляються досить рівномірно на території України. Середнє квадратичне відхилення як міжрічна мінливість величини варіює від  $2,7$  до  $9,6\%$ , що зумовлено вищою інтенсивністю циркуляційних процесів взимку.

Прогнозовані для періоду 2021—2050 рр. значення відносної вологості повітря в зимовий сезон майже по всій території України високі, середнє значення для всієї зими та для січня —  $84\%$  (табл. 1—4). Діапазон коливань величини —  $78$ — $90\%$ . На заході та південному заході України значення відносної вологості прогнозуємо дещо нижчими за середні (Івано-Франківська обл. —  $80\%$ , Львівська —  $83$ , Чернівецька —  $82\%$ ). Також нижчу за середню відносну вологість прогнозуємо у Миколаївській та Луганській областях ( $83\%$ ) і в АР Крим ( $82\%$ ). До середини ХХІ ст. максимальні середні місячні значення відносної вологості спостерігатимуться у грудні і зменшуватимуться до закінчення зими.

В Україні до середини століття у грудні значення відносної вологості повітря порівняно зі стандартним кліматичним періодом 1961—1990 рр. зростатимуть (у середньому на  $0,5\%$ ), за винятком Тернопільської, Хмельницької, Чернівецької на заході та Одеської, Херсонської, Миколаївської областей та АР Крим на півдні (див. табл. 1, 2). У січні прогнозуємо зменшення значень відносної вологості повітря (в середньому на  $0,5\%$ ), за винятком Запорізької, Миколаївської, Херсонської областей та АР Крим (див. табл. 2). У лютому до 2050 р. порівняно із 1961—1990 рр. цей показник зменшиться у середньому на  $0,8\%$ , лише у двох регіонах (Закарпатська обл. та АР Крим) його значення зростатимуть. У цілому зимовий сезон у 2021—2050 рр. відзначатиметься зменшенням значень відносної вологості повітря (в середньому на  $0,3\%$ ) в усіх областях України, за винятком Закарпатської та Чернігівської (табл. 1—4).

**Навесні** у зв'язку із сезонним підвищенням температури повітря середньомісячні значення відносної вологості повітря в Україні поступово зменшуються приблизно на  $10\%$  і становлять, за даними [3], переважно  $68$ — $70\%$ , лише на узбережжях Чорного та Азовського морів зростають до  $75$ — $78\%$ . Міжрічна мінливість величини змінюється від  $4,4$  до  $7,7\%$ .

До середини ХХІ ст., за даними ансамблю РКМ, у березні прогнозуємо відносно високі показники вологості (у середньому  $78\%$ ). У квітні й трав-

ні середньомісячні значення відносної вологості повітря знижуватимуться до  $71$  і  $67\%$  відповідно (табл. 1—4). Більшими за середні сезонні значення ( $72\%$ ) очікуємо показники величини у північному (Житомирська, Чернігівська, Сумська області) та західному (Івано-Франківська, Львівська, Чернівецька області) регіонах у квітні ( $73$ — $74\%$ ) і західному (Закарпатська, Івано-Франківська, Львівська, Чернівецька області) — у травні ( $73$ — $75\%$ ).

Порівняно зі стандартним кліматичним періодом 1961—1990 рр. середні місячні значення відносної вологості повітря в Україні в 2021—2050 рр. у березні прогнозуємо меншими практично в усіх регіонах (в середньому на  $1,4\%$ ). У квітні й травні ці показники в середньому незначно зростатимуть на  $0,6$  та  $0,4\%$  відповідно і зменшуватимуться лише у західному регіоні, за винятком Волинської та Рівненської областей, де прогнозуємо зміни у бік додатних значень ( $0,3$  та  $0,4\%$  відповідно), та у південному, за винятком Запорізької області ( $0,2\%$ ). У травні до середини ХХІ ст. середні місячні значення відносної вологості повітря будуть меншими від значень стандартного кліматичного періоду тільки в 4 областях: Закарпатській (на  $0,1\%$ ), Кіровоградській (на  $0,4\%$ ), Одеській та Миколаївській (на  $0,5\%$ ). У Дніпропетровській, Запорізькій та Херсонській областях зміни значень відносної вологості повітря у травні не прогнозуємо.

**Влітку**, за даними праці [3], значення середньої місячної відносної вологості повітря змінюються від  $87$ — $89\%$  в Українських Карпатах та від  $75\%$  на півночі і північному заході до  $60\%$  на сході та Приазовській височині. Середнє квадратичне відхилення середньої місячної відносної вологості становить  $3,7$ — $7,7\%$ .

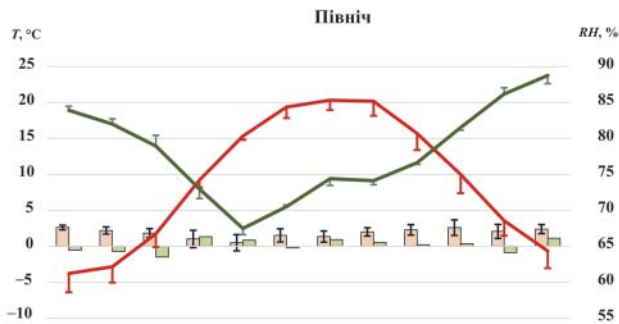
Значення середньої місячної відносної вологості повітря очікуються в діапазоні від  $68$  до  $78\%$  на заході, півночі та у центральних областях (Вінницькій та Черкаській). На решті території значення величини будуть нижчими, а в Донецькій і Херсонській областях (у липні—серпні) та у Миколаївській (у серпні) передбачається річний мінімум —  $61\%$  (табл. 1—4).

За даними розрахунків, у 2021—2050 рр. територію України за характером зміни відносної вологості поділено на дві частини (рис. 2). Так, на півночі та північному заході, а у серпні в центрі і на сході очікуємо прирости до  $1,2\%$ , в інших регіонах — зменшення до  $-2,7\%$ . У червні значення середньої місячної відносної вологості повітря до середини ХХІ ст. порівняно зі стандартним кліматичним періодом 1961—1990 рр. знижуватимуться майже на всій території країни, за винятком Волинської, Рівненської, Житомирської областей, де вони незначно зростуть, та Львівської, де зміни не прогнозуємо. Причому на заході та півночі очікуємо зміни величини від  $0,2$  до  $-0,7\%$ . На решті території зміни можуть бути значнішими: від  $-1,0\%$  у центрі

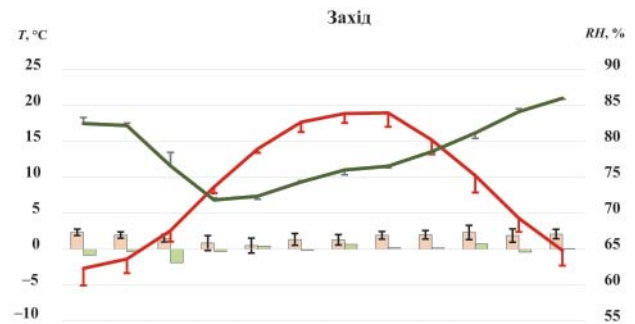
(Полтавська обл.) до  $-2,7\%$  на півдні (Миколаївська обл.). У липні на півночі, заході та у Вінницькій області зміни величини будуть додатними, але в більшості областей України — від'ємними. У серпні на більшій частині території України прогнозуємо вищі значення середньої місячної відносної вологості повітря порівняно зі стандартним періодом. Від'ємні значення в усі місяці літнього сезону передбачаємо тільки для південного регіону

та Дніпропетровської і Кіровоградської областей, а додатні — для Житомирської, Рівненської та Волинської областей.

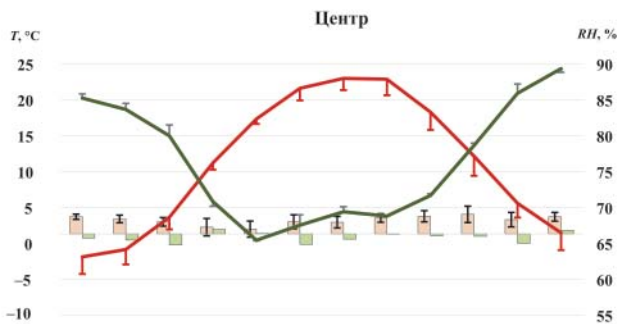
**Восени**, за даними праці [3], значення середньої місячної відносної вологості повітря змінюються від  $75$  до  $80\%$ , тобто відбувається сезонне підвищення вмісту вологи у повітрі. У північно-західних і північно-східних районах значення перевищують  $80\%$ , а на півдні становлять  $73$ – $75\%$ , зменшуючись



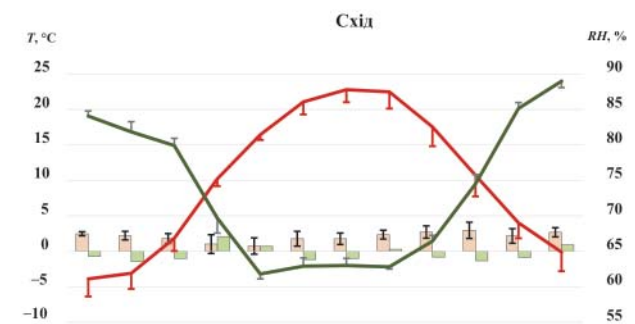
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	2,6	2,2	1,8	1,0	0,5	1,5	1,4	2,0	2,3	2,6	2,1	2,4
$\Delta RH, \%$	-0,6	-0,7	-1,5	1,3	0,9	-0,2	0,9	0,5	0,2	0,4	-0,9	1,1
$T, ^\circ\text{C}$	-3,8	-2,8	1,7	9,2	15,3	19,4	20,3	20,2	15,7	10,0	3,6	-0,6
$RH, \%$	84	82	79	73	67	71	74	74	77	82	86	89



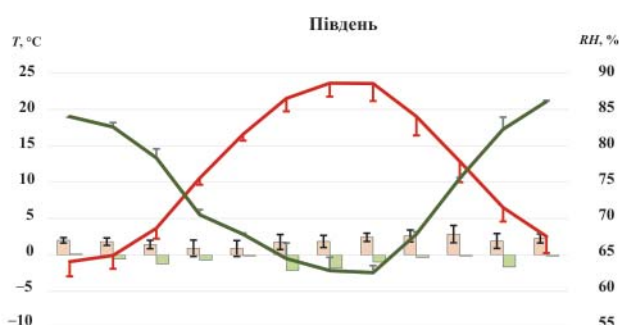
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	2,4	2,0	1,5	0,9	0,5	1,4	1,3	1,9	2,0	2,3	1,9	2,1
$\Delta RH, \%$	-0,8	-0,3	-1,9	-0,3	0,4	-0,2	0,7	0,2	0,2	0,7	-0,4	0,1
$T, ^\circ\text{C}$	-2,7	-1,3	2,6	8,7	13,9	17,7	18,9	19,0	15,2	10,2	4,3	-0,2
$RH, \%$	83	82	77	72	72	74	76	77	79	81	84	86



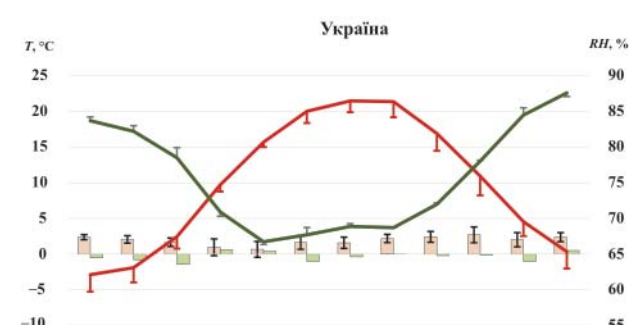
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	2,4	2,1	1,7	0,9	0,7	1,7	1,6	2,2	2,5	2,7	2,0	2,4
$\Delta RH, \%$	-0,6	-0,8	-1,5	0,6	0,1	-1,4	-0,7	-0,1	-0,2	-0,3	-1,3	0,5
$T, ^\circ\text{C}$	-3,2	-2,2	2,3	9,9	16,0	20,3	21,7	21,5	17,0	10,8	4,3	0,1
$RH, \%$	84	82	79	69	64	66	68	67	70	77	85	88



	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	2,5	2,2	1,8	1,0	0,7	1,8	1,8	2,4	2,7	3,0	2,2	2,7
$\Delta RH, \%$	-0,7	-1,4	-1,0	2,1	0,7	-1,2	-1,0	0,3	-0,8	-1,3	-0,8	0,9
$T, ^\circ\text{C}$	-3,9	-3,1	1,9	10,2	16,4	21,1	22,8	22,5	17,5	10,7	4,0	-0,1
$RH, \%$	84	82	80	70	62	63	63	63	66	75	85	89



	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	2,0	1,8	1,4	0,9	0,9	1,8	1,9	2,4	2,6	2,9	1,9	2,3
$\Delta RH, \%$	0,1	-0,6	-1,2	-0,7	-0,1	-2,1	-1,8	-1,0	-0,3	-0,1	-1,7	-0,1
$T, ^\circ\text{C}$	-0,9	-0,1	3,7	10,6	16,6	21,5	23,6	23,6	19,0	12,9	6,5	2,5
$RH, \%$	84	83	78	71	68	65	63	63	68	76	82	86



	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\Delta T, ^\circ\text{C}$	2,4	2,1	1,7	1,0	0,7	1,6	1,6	2,2	2,4	2,7	2,0	2,4
$\Delta RH, \%$	-0,5	-0,8	-1,4	0,6	0,4	-1,0	-0,4	0,0	-0,2	-0,1	-1,0	0,5
$T, ^\circ\text{C}$	-2,9	-1,9	2,4	9,7	15,7	20,0	21,5	21,4	16,9	10,9	4,5	0,4
$RH, \%$	84	82	78	71	67	68	69	69	72	78	84	88

Рис. 3. Річний хід проєкцій температури ( $T$ ) і відносної вологості повітря ( $RH$ ) на 2021–2050 рр. та їхні зміни відносно кліматичної норми 1961–1990 рр. для регіонів і всієї України

Fig. 3. Annual cycle of air temperature ( $T$ ) and relative humidity ( $RH$ ) projections for period 2021–2050 and their changes relatively to the climate norm of 1961–1990 for the regions and the whole territory of Ukraine

до 67–69 % на Південному березі Криму. Для осені значення міжрічної мінливості — 3,2–8,8 %.

За даними ансамблю РКМ, у 2021–2050 рр. значення відносної вологості очікувано прогнозуємо вищими щодо значень у літні місяці (72, 78, 84 % відповідно для вересня, жовтня та листопада). Просторова варіативність величини найвища, вона змінюється від 65 до 87 % (табл. 1–4).

У вересні прогнозуємо додатні значення змін середньої місячної відносної вологості повітря на півночі, заході (за винятком Івано-Франківської та Чернівецької областей, де вони знизяться на –0,3 %) та у Полтавській області. На півдні в Одеській та Миколаївській областях змін не очікуємо. В цілому у вересні середнє місячне значення змін відносної вологості повітря становитиме –0,2 %. У жовтні зміни величини матимуть різні знаки приростів. Зростання значень відносно стандартного періоду прогнозуємо у більшості областей України: на півночі (крім Сумської обл.), заході (за винятком Закарпатської обл.), у Вінницькій і Черкаській областях центрального регіону та в Одеській області і АР Крим на півдні. Втім унаслідок суттєвішого зменшення значень відносної вологості в інших областях у жовтні в середньому на території України очікуємо незначне зменшення величини (–0,1 %). В листопаді до середини століття значення відносної вологості повітря знижуватимуться в усіх регіонах України, крім Івано-Франківської області, у середньому на –1,0 % порівняно з періодом 1961–1990 рр.

До середини ХХІ ст. значення відносної вологості повітря у *холодне півріччя* з жовтня до березня знизяться відносно значень стандартного кліматичного періоду в усіх областях України. Діапазон цих змін становитиме від –0,2 до –0,9 %. За прогнозними значеннями відносної вологості повітря у *тепле півріччя* (квітень–вересень) її зменшення очікуємо у центральному регіоні (–0,3 %) і на півдні (–1,0 %). На півночі та заході прогнозуємо незначне підвищення значень (на 0,6 та 0,2 % відповідно). Діапазон цих змін по областях України — від –2,7 до 2,5 %. У східному регіоні змін відносної вологості в теплий період року не прогнозуємо.

Розрахунки *річних* прогностичних значень відносної вологості повітря у 2021–2050 рр. (див. рис. 2) засвідчують незначне їхнє зниження порівняно зі значеннями стандартного кліматичного періоду 1961–1990 рр. у переважній більшості областей України. Несуттєве підвищення передбачаємо у Рівненській та Житомирській областях (на 0,1 %) та у Чернігівській і Сумській (на 0,3 %). У Волинській області змін не очікуємо. У південному регіоні, Дніпропетровській та Кіровоградській областях прогнозуємо максимальне зниження річних значень відносної вологості (від –0,5 до –1 %). Для решти областей України зміни величини прогнозуємо у діапазоні від –0,1 до 0,4 %.

Річний розподіл температури повітря для періо-

ду 2021–2050 рр. (рис. 3) близький до нормального і не відрізняється від стандартного, що характерний для помірно континентального клімату. Розподіл, подібний за формою кривої, амплітудами, кількістю та часом настання екстремумів, отримано на основі ансамблю з 10 РКМ для періоду 2031–2050 рр. [5, 21]. У запропонованому дослідженні виявлено, що в окремих областях західного регіону (Івано-Франківській, Закарпатській, Тернопільській) за прогнозними даними річний максимум зміститься з липня на серпень, а у південному регіоні (Миколаївська, Одеська обл.) значення температури у липні і серпні вирівнюються (табл. 1–3).

**Обговорення.** Сезонний хід відносної вологості повітря розглянуто вперше для майбутнього кліматичного періоду в Україні, тому опишемо його детальніше. Відомо, що відносну вологість ( $RH$ ) визначають за співвідношенням

$$RH = \frac{e}{E} 100\%, \quad (1)$$

де  $e$  — фактичний парціальний тиск водяної пари, що утримується в повітрі на висоті вимірювання (розрахунку);  $E$  — тиск насичення водяної пари за відповідної температури повітря.

Парціальний тиск залежить від комплексу факторів: температури повітря та підстильної поверхні, ступеня зволоження поверхні, інтенсивності турбулентного обміну та ін. У помірних широтах вміст водяної пари в атмосфері також значною мірою залежить від адвекції або напрямку та інтенсивності циркуляції. Як результат, найбільшою є прямо пропорційна залежність парціального тиску від температури повітря, особливо у холодний період року, коли вплив інших факторів менш суттєвий.

Тиск насичення водяної пари ( $E$ ) описують рівнянням Клаузіуса—Клапейрона

$$\frac{dE}{E} = \frac{L}{R_n} \frac{dT}{T^2}, \quad (2)$$

де  $dE$  — приріст парціального тиску за зміни температури ( $dT$ );  $E$  — тиск насичення за температури  $T$ ;  $K$ ;  $L$  — питома теплота пароутворення;  $R_n$  — питома газова стала для водяної пари. Згідно з рівнянням (2), очевидно є залежність величини  $E$  тільки від температури повітря, яку описано показниковою функцією, що вказує на можливість нелінійного збільшення вмісту водяної пари в одиничному об'ємі повітря за зростання температури, особливо при додатних її значеннях.

Саме у зв'язку з більшою залежністю тиску насичення від температури прослідковується обернено пропорційна залежність фактичного розподілу відносної вологості від температури повітря. Особливо помітна така залежність за значного періоду осереднення величини, при цьому крива розподілу відносної вологості матиме практично обернений річний хід відносно температури повітря. Можливе

тільки незначне запізнення у настанні екстремумів відносної вологості через інерційність тепло- та водообміну в приземному шарі атмосфери.

Зауважимо, що криві річного розподілу відносної вологості повітря у 2021—2050 рр. (рис. 3) переважно відповідають таким у стандартний період. Деякі відхилення від стандартного розподілу, що особливо помітні для літніх місяців, отримано на заході, півночі і деякою мірою у центральному регіоні. Тут за зростання середніх місячних температур спостерігаються додатні прирости вологості. Такі зміни до певної міри узгоджуються з результатами, наведеними у статті [6], де показано прирости місячних сум опадів у літній сезон на заході, півночі та у центрі. Саме через зростання кількості опадів і високу температуру підстильної поверхні швидкість випаровування та швидкість надходження водяної пари до приземного шару повітря значно збільшуватимуться. Тому накопичення водяної пари у приземному шарі повітря відбуватиметься внаслідок вищої швидкості випаровування та наявності зволоженої підстильної поверхні, що вочевидь перевищуватиме ефект адвекції водяної пари.

Як указано вище, значення відносної вологості до середини століття на переважній частині території зменшуватиметься, але на фоні підвищення температур абсолютні значення вологовмісту все ж зростатимуть. Наприклад, у Тернопільській області (див. рис. 1, 2, табл. 1) у березні очікувана температура — 2,4 °С, її зміна +1,6 °С; відносна вологість (77 %) зменшиться на -2,0 %. Однак при цьому маса водяної пари у повітрі все ж збільшиться на 0,71 г/м<sup>3</sup>. Очевидно, що за вищих температур повітря (20—22 °С) і навіть незначного зменшення його відносної вологості (на -0,5...-1,0 %) на фоні підвищення приземної температури повітря на 1 °С зростання маси водяної пари у приземному шарі атмосфери становитиме 1,0...1,5 г/м<sup>3</sup>. Навіть у разі від'ємних значень середніх місячних температур (-1,5...-2,0 °С) за умови зростання температури повітря, що прогнозується, можливе збільшення маси водяної пари в межах 0,05—0,08 г/м<sup>3</sup>. Таким чином, наведені кількісні оцінки прогнозованих змін цих взаємопов'язаних характеристик засвідчують підвищення ймовірності збільшення вологовмісту нижнього шару атмосфери. Це може сприяти утворенню туманів, роси та інших явищ, пов'язаних з адвекцією холоду, особливо у теплий період року.

Проекції відносної вологості повітря визначено за ансамблем з 3 РКМ, але отримані результати є достатньо достовірними, що встановлено їх порівнянням з даними видань [2, 3] у стандартний період. Менша кількість моделей в ансамблі для вологості порівняно з ансамблем для температури повітря пояснюється тим, що мінливість середніх багаторічних значень відносної вологості повітря між окремими кліматичними періодами незначна, як і розмах значень величини, визначених за різними РКМ.

Отже, залучення великої кількості РКМ вважаємо недоцільним, оскільки це тільки ускладнює процес обробки даних.

**Висновки.** На основі ансамблю з 10 РКМ проєкції приземної температури повітря показують зростання середніх місячних значень у межах від 0,4 до 3,0 °С, середніх річних значень — від 1,6 до 2,1 °С до середини ХХІ ст. Найбільші прирости щодо стандартного кліматичного періоду очікуємо на північному сході, сході та півдні України. Вибрані одиниці просторового осереднення (адміністративні області) і часового (місяць) впливають тільки на значення прогнозованих проєкцій температури, які змінюються в межах інтервалів, отриманих авторами у попередніх дослідженнях, що підтверджує основні тенденції змін та їх просторову локалізацію.

Закономірності річного ходу температури повітря у прогнозований період практично не змінюються щодо стандартного періоду і залишаються типовими для помірно континентального клімату з мінімумом у січні та максимумом у липні. Помічено тенденцію до зміщення річного максимуму температури на серпень у західних та південних областях.

Уперше для території України отримано значення проєкцій відносної вологості повітря до середини ХХІ ст. за даними ансамблю РКМ. Діапазон прогнозованих змін відносної вологості повітря становить  $\pm 1$  % для середніх річних і  $\pm 3$  % для середніх місячних значень. Прирости переважно додатних значень середніх місячних величин очікуємо у грудні (-0,3...1,5 %) і травні (-0,5...1,2 %), а переважно від'ємних — у березні (-2,3...-0,2 %), червні (-2,7...-0,2 %) і лютому (-1,5...0,7 %). В інші місяці року передбачається істотна просторова неоднорідність прогнозованих змін відносної вологості, які мають різнонапрямні незначні за абсолютною величиною прирости значень.

Річний хід відносної вологості, отриманий для майбутнього кліматичного періоду, для України в цілому і для більшості областей описується стандартною кривою, зворотною щодо річного ходу температури повітря. Тільки для західних, північних і окремих центральних областей спостерігатиметься підвищення відносної вологості у літні місяці, що ймовірно, пов'язане зі збільшенням кількості опадів на фоні високих температур повітря. Показано, що в межах установленого діапазону коливань значень відносної вологості за зростання приземної температури повітря слід очікувати збільшення вологовмісту у приземному шарі, що може спричинити подальше збільшення кількості випадків явищ погоди та опадів, що пов'язані з адвекцією холоду.

Отримані проєкції значень температури та відносної вологості повітря можна використовувати для подальших розрахунків та оцінювання впливу майбутніх кліматичних умов на сектори економіки, екосистеми, здоров'я населення та ін.

## Список бібліографічних посилан

1. Изменение климата. Физическая научная основа. Вклад Рабочей группы I в Пятый оценочный доклад Межправительственной группы экспертов по изменению климата; ред. Т.Ф. Стоккер, Д. Цинь, Дж.-К. Платтнер, М. Тигнор, С.К. Аллен, Дж. Бошунг, А. Науэлс, Ю. Ся, В. Бекс и П.М. Мидглей. Кембридж, Соединенное Королевство; Нью-Йорк, США: Кембридж юниверсити пресс, 2013 (Глоссарий); ред. С. Плантон. Москва: МГЭИК, 2013). [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGIAR5\\_SummaryVolume\\_FINAL\\_RUSSIAN.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGIAR5_SummaryVolume_FINAL_RUSSIAN.pdf).
2. Кліматичний Кадастр України (електронна версія). Київ: Державна гідрометеорологічна служба, УкрНДГМІ, Центральна геофізична обсерваторія, 2006. <http://www.cgo.kiev.ua/index.php?dv=pos-klim-kadastr> (дата звернення: 13.07.2018).
3. Клімат України; під ред. В.М. Ліпінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко. Київ: Вид-во Раєвського, 2003. 344 с.
4. Краковська С.В. Сучасні зміни клімату Луганської області. *Геоінформатика*. 2012. № 3 (43). С. 57—68.
5. Краковська С.В., Гнатюк Н.В., Шпиталь Т.М., Паламарчук Л.В. Проекції змін приземної температури повітря за даними ансамблю регіональних кліматичних моделей у регіонах України в XXI столітті. *Наукові праці УкрГМІ*. 2016. Вип. 268. С. 33—44.
6. Краковська С.В., Паламарчук Л.В., Білозерова А.В., Шпиталь Т.М. Загальна хмарність в Україні до середини XXI ст. за даними ансамблю регіональних кліматичних моделей. *Геоінформатика*. 2017. № 3(63). С. 56—66.
7. Краковська С.В., Паламарчук Л.В., Гнатюк Н.В. та ін. Зміни поля опадів в Україні у XXI ст. за даними ансамблю регіональних кліматичних моделей. *Геоінформатика*. 2017. № 4(64). С. 62—74.
8. Кульбіда М.І., Барабаш М.Б., Єлістратова Л.О. Прогноз змін клімату України на початку XXI століття. *Наукові записки Вінницького державного педагогічного університету імені Михайла Коцюбинського. Сер.: Географія*. 2011. № 23. С. 10—17.
9. Малицька Л.В. Кількісна оцінка комфортності погодних умов та клімату. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2016. № 2. С. 97—106.
10. Паламарчук Л.В., Краковська С.В. Регіональні зміни клімату України. Методичні вказівки до навчального курсу. Київ: ДП «Прінт-Сервіс». 2018. 88 с.
11. Савенець М.В. Короткострокова мінливість висотного розподілу показників вологості атмосфери над територією України та суміжними територіями. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2017. № 2(45). С. 68—76.
12. Шпиг В.М., Паламарчук Л.В., Гуда К.В. Оцінка точності відновлення вертикальних профілів температури і вологості тривимірною діагностичною моделлю. *Гідрологія, гідрохімія і гідроекологія*. 2015. № 2(37). С. 118—126.
13. Balabukh V., Malyska L. Impact of climate change on natural fire danger in Ukraine. *IDŐJÁRÁS Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*. 2017. Vol. 121. N 4. P. 453—477. <https://www.met.hu/en/ismeret-tar/kiadvanyok/idojaras/index.php?id=583> (Accessed 17.07.2018).
14. Barfus K., Bernhofer C. Assessment of GCM performances for the Arabian Peninsula, Brazil, and Ukraine and indications of regional climate change. *Environmental earth sciences*. 2014. Vol. 72, N 12. P. 4689—4703. DOI: 10.1007/s12665-014-3147-3 (Accessed 2.07.2018).
15. Boé J., Terray L. Land–sea contrast, soil–atmosphere and cloud–temperature interactions: interplays and roles in future summer European climate change. *Climate dynamics*. 2014. Vol. 42, N 3—4. P. 683—699. DOI: 10.1007/s00382-013-1868-8 (Accessed 8.07.2018).
16. Efimov V.V., Volodin E.M., Anisamov A.E., Barabanov V.S. Regional Projections of Climate Change for the Black Sea—Caspian Sea Area in Late 21st Century. *Physical Oceanography*. 2015. N 5. P. 49—65. DOI: 10.22449/1573-160X-2015-5-49-66 (Accessed 1.07.2018).
17. Fischer S., Pluntke T., Pavlik D., Bernhofer C. Hydrologic effects of climate change in a sub-basin of the Western Bug River, Western Ukraine. *Environmental earth sciences*. 2014. Vol. 72, N 12. P. 4727—4744. DOI: 10.1007/s12665-014-3256-z (Accessed 3.07.2018).
18. Haylock M.R., Hofstra N., Klein Tank A.M.G., Klok E.J., Jones P.D., New M. A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2008. Vol. 113(D20119). DOI: 10.1029/2008JD10201 (Accessed 10.07.2018).
19. Krakovska S., Gnatiuk N., Shpytal T., Shedemenko I. Methodology of the best RCMs ensemble selection applied for Ukraine. Proceedings of the International Conference on Regional Climate CORDEX. Brussels, 2013. P. 87—91. <https://www.researchgate.net/publication/294089331> (Accessed 10.07.2018).
20. Nakićenović N., Swart R. (eds). Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom; New York, USA: Cambridge University Press, 2000. 599 p. [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/emissions\\_scenarios.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/emissions_scenarios.pdf) (Accessed 15.07.2018).
21. Shvidenko A., Buksha I., Krakovska S., Lakyda P. Vulnerability of Ukrainian Forests to Climate Change. *Sustainability*. 2017. Vol. 9, iss. 7. 1152. DOI:10.3390/su9071152 (Accessed 5.07.2018).
22. Spinoni J., Szalai S., Szentimrey T. etc. Climate of the Carpathian Region in the period 1961—2010: climatologies and trends of 10 variables. *International Journal of Climatology*. 2015. P. 1322—1341. <https://doi.org/10.1002/joc.4059> (Accessed 5.07.2018).
23. Van der Linden P., J.F.B. Mitchell (eds). ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre, 2009. FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160 p. [http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles\\_final\\_report\\_Nov09.pdf](http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles_final_report_Nov09.pdf) (Accessed 6.07.2018).

Надійшла до редакції 19.07.2018 р.

# ПРОЕКЦИИ ПРИЗЕМНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА В ОБЛАСТЯХ УКРАИНЫ К СЕРЕДИНЕ XXI В. ПО ДАННЫМ АНСАМБЛЕЙ РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

С.В. Краковская<sup>1</sup>, Л.В. Паламарчук<sup>1,2</sup>, Н.В. Гнатюк<sup>1,3</sup>, Т.Н. Шпиталь<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Украинский гидрометеорологический институт, просп. Науки, 37, г.Киев, 03028, Украина, e-mail: [krasvit@ua.fm](mailto:krasvit@ua.fm), [shpital@bigmir.net](mailto:shpital@bigmir.net)

<sup>2</sup>Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, ул. Владимирская, 64/13, г. Киев, 01601, Украина, e-mail: [palamarchuk.l@ukr.net](mailto:palamarchuk.l@ukr.net)

<sup>3</sup>Международный центр окружающей среды и дистанционного зондирования имени Нансена, 14-я Линия, В.О., д. 7, оф. 49, г. Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация, e-mail: [gmatiuk@niersc.spb.ru](mailto:gmatiuk@niersc.spb.ru)

Представлены проекции температуры и относительной влажности воздуха к середине XXI в. для Украины в целом, отдельных регионов, административных областей и АР Крым, рассчитанные по ансамблям региональных климатических моделей (РКМ) Европейского рамочного проекта FP-6 ENSEMBLES сценария SRES A1B. Для базового периода верификация РКМ для температуры воздуха проводилась с использованием данных базы E-Obs, а показателей относительной влажности — данных Климатического кадастра Украины. К середине XXI в. ожидается рост средних месячных значений температуры воздуха в пределах от 0,4 до 3,0 °С, средних годовых значений — от 1,6 до 2,1 °С. Максимальное потепление относительно стандартного климатического периода ожидается на северо-востоке, востоке и юге Украины, что подтверждает основные тенденции изменений и их пространственную локализацию, полученные авторами ранее. Впервые для территории Украины рассчитаны значения проекций относительной влажности воздуха к середине XXI в. Диапазон прогнозируемых ее изменений  $\pm 1\%$  — для средних годовых и  $\pm 3\%$  — для средних месячных значений. В установленном диапазоне колебаний относительной влажности при росте приземной температуры воздуха следует ожидать повышения влагосодержания в приземном слое, что может быть следствием увеличения количества случаев сильных осадков, особенно в теплое полугодие.

**Ключевые слова:** приземная температура, относительная влажность воздуха, региональная климатическая модель, ансамбль моделей, климатический период.

## PROJECTIONS OF AIR TEMPERATURE AND RELATIVE HUMIDITY IN UKRAINE REGIONS TO THE MIDDLE OF THE 21<sup>ST</sup> CENTURY BASED ON REGIONAL CLIMATE MODEL ENSEMBLES

S.V. Krakovska<sup>1</sup>, L.V. Palamarchuk<sup>1,2</sup>, N.V. Gmatiuk<sup>1,3</sup>, T.M. Shpytal<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Ukrainian Hydrometeorological Institute, 37, Prospekt Nauki, Kyiv, 03028, Ukraine, e-mail: [svitlanakravovska@gmail.com](mailto:svitlanakravovska@gmail.com), [shpital@bigmir.net](mailto:shpital@bigmir.net)

<sup>2</sup>Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64/13, Volodymyrska Street, Kyiv, 01601, Ukraine, e-mail: [palamarchuk.l@ukr.net](mailto:palamarchuk.l@ukr.net)

<sup>3</sup>Nansen International Environmental and Remote Sensing Centre, 14th Line 7, Office 49, Vasilevsky Island, St. Petersburg, 199034, Russian Federation, e-mail: [natalia.gmatiuk@niersc.spb.ru](mailto:natalia.gmatiuk@niersc.spb.ru)

**Purpose.** The study aims at examining the main features of air temperature and relative humidity distribution in Ukraine to the middle of the 21st century and their changes relatively to the standard WMO climatic period 1961–1990 based on selected and verified regional climate model ensembles. The paper focuses on the analysis of the thermal and humidification regimes all for Ukraine as a whole, and for individual regions, administrative units and the Autonomous Republic of Crimea.

**Methodology.** In order to obtain long-term air temperature and relative humidity projections for the territory of Ukraine with high resolution, we used regional climate models (RCMs) from the EU FP-6 project ENSEMBLES (<http://ensembles-eu.metoffice.com/>) initiated with IPCC scenario SRES A1B. Multi-year monthly, cold and warm half-year and annual values of air temperature and relative humidity have been determined for the period 2021–2050 based on selected 10 RCMs ensemble for air temperature and 3 RCMs ensemble for relative humidity. Methodology of ensemble formation for air temperature projections is described previously in detail by authors. For relative humidity, according to the same methodology, three RCMs (REMO, RCA3, RACMO2) were selected that are part of the previous ensemble for air temperature and are the minimum number of models for the ensemble formation. The verification of the RCM's outputs was performed for the standard WMO climatic period 1961–1990 using data observations from European database E-Obs (<https://www.ecad.eu/>) for temperature and data from Climate Cadastre of Ukraine (<http://www.cgo.kiev.ua/index.php?dv=pos-klim-kadastr>) for relative humidity.

**Results.** According to the obtained projections of air temperature to the middle of the 21st century, the monthly air temperature will increase in the range from 0.4 to 3.0 °C and the annual air temperature will increase in the range

from 1.6 to 2.1 °C. Most intensive warming relative to the standard climatic period is expected in the northeast, east and south regions of Ukraine.

For the first time, relative humidity projections to the middle of the 21st century were obtained for the whole territory of Ukraine and for individual regions and administrative units of the country. The range of projected changes in relative humidity is within  $\pm 1$  % for annual and  $\pm 3$  % for monthly values. Generally, positive increments of the monthly values are expected in December ( $-0.3...1.5$  %) and May ( $-0.5...1.2$  %), and mostly negative — in March ( $-2.3...-0.2$  %), June ( $-2.7...0.2$  %) and February ( $-1.5...0.7$  %). Within the established range of relative humidity fluctuations, with the increase of the surface air temperature an increase in the moisture content in the surface layer should be expected, that could be result of projected increasing of heavy precipitation events particularly in warm half-year.

**Practical value.** The obtained air temperature and relative humidity projections may be used for further studies and assessments of the impacts of future climatic conditions on economy, ecosystems, health, etc.

**Keywords:** air temperature, relative humidity, regional climate model, ensemble of models.

## References

1. *Izmenenie klimata. Fizicheskaya nauchnaya osnova. Vklad Rabochey gruppy I v Pyatyy otsenochnyy doklad Mezhpriavitel'stvennoy gruppy ekspertov po izmeneniyu klimata*; red. T.F. Stokker, D. Tsing, Dzh.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, Dzh. Boshung, A. Nauels, Yu. Sya, V. Beks i P.M. Midgley. Cambridge, United Kingdom; New York, USA: Cambridge univ. press, 2013. (Glossariy; red. S. Planton. Moscow: MGЕIK, 2013). [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wgl/WGIAR5\\_SummaryVolume\\_FINAL\\_RUSSIAN.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wgl/WGIAR5_SummaryVolume_FINAL_RUSSIAN.pdf).
2. Klimatychnyi Kadastr Ukrainy (elektronna versiya) Derzhavna hidrometeorolohichna sluzhba, UkrNDHMI, Tsentralna Heofizichna Observatoriia. Kyiv, 2006 <http://www.cgo.kiev.ua/index.php?dv=pos-klim-kadastr> (Accessed 13 July 2018) [in Ukrainian].
3. Lipinskiy V.M., Diachuk V.A., Babichenko V.M. (eds). *Klimat Ukrainy*. Kyiv: Vydavnytstvo Raievs'koho, 2003. 344 p. [in Ukrainian].
4. Krakovska S.V. Current climate changes in the Luhansk region. *Geoinformatika*. 2012. N 3(43). P. 57—68 [in Ukrainian].
5. Krakovska S.V., Gnatiuk N.V., Shpytal T.M., Palamarchuk L.V. 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 Ukrainskoho hidrometeorolohichnoho instytutu*. 2016. N 268. P. 33—44 [in Ukrainian].
6. Krakovska S.V., Palamarchuk L.V., Bilozero A.K., Shpytal T.M. Total cloud cover in Ukraine till the mid-21st century, based on the data of an ensemble of regional climate models. *Geoinformatika*. 2017. N 3(63). P. 56—66 [in Ukrainian].
7. Krakovska S.V., Palamarchuk L.V., Gnatiuk N.V., Shpytal T.M., Shedemenko I.P. Changes in precipitation distribution in Ukraine for the 21st century based on data of regional climate model ensemble. *Geoinformatika*. 2017. N 4(64). P. 62—74 [in Ukrainian].
8. Kulbida M.I., Barabash M.B., Yelistratova L.O. Prohnoz zmin klimatu Ukrainy na pochatku XXI stolittia. *Naukovi zapysky Vynnytskoho derzhavnogo pedahohichnoho universytetu imeni Mykhaila Kotsiubynskoho. Seriya: Heohrafiia*. 2011. N 23. P. 10—17 [in Ukrainian].
9. Malyska L.V. Kilkisna otsinka komfortnosti pohodnykh umov ta klimatu. *Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolohiia*. 2016. Vol. 2. P. 97—106 [in Ukrainian].
10. Palamarchuk L.V., Krakovska S.V. Rehionalni zminy klimatu Ukrainy. *Metodychni vkazivky do navchalnoho kursu*. Kyiv: DP «Print-Servis», 2018. 88 p. [in Ukrainian].
11. Savenets M. Short-term variability of atmospheric humidity altitudinal distribution above Ukraine and adjacent territories. *Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolohiia: The scientific collection*. 2017. N 2(45). P. 68—76 [in Ukrainian].
12. Shpyg V.M., Palamarchuk L.V., Huda K.V. Evaluation of the accuracy of recovery of temperature and humidity vertical profiles of the three-dimensional diagnostic model. *Hidrolohiia, hidrokimiia i hidroekolohiia: The scientific collection*. 2015. N 2(37). P. 118—126 [in Ukrainian].
13. Balabukh V., Malyska L. Impact of climate change on natural fire danger in Ukraine. *IDŐJÁRÁS — Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*. 2017. Vol. 121, N 4. P. 453—477. <https://www.met.hu/en/ismeret-tar/kiadvanyok/idojaras/index.php?id=583> (Accessed 17 July 2018).
14. Barfus K., Bernhofer C. Assessment of GCM performances for the Arabian Peninsula, Brazil, and Ukraine and indications of regional climate change. *Environmental earth sciences*. 2014. Vol. 72, N 12. P. 4689—4703. DOI: 10.1007/s12665-014-3147-3 (Accessed 2 July 2018).
15. Boé J., Terray L. Land-sea contrast, soil-atmosphere and cloud-temperature interactions: interplays and roles in future summer European climate change. *Climate dynamics*. 2014. Vol. 42, N 3—4. P. 683—699. DOI: 10.1007/s00382-013-1868-8 (Accessed 8 July 2018).
16. Efimov V.V., Volodin E.M., Anisamov A.E., Barabanov V.S. Regional Projections of Climate Change for the Black Sea-Caspian Sea Area in Late 21st Century. *Physical Oceanography*. 2015. N 5. P. 49—65. DOI: 10.22449/1573-160X-2015-5-49-66 (Accessed 1 July 2018).
17. Fischer S., Pluntke T., Pavlik D., Bernhofer C. Hydrologic effects of climate change in a sub-basin of the Western Bug River, Western Ukraine. *Environmental earth sciences*. 2014, Vol. 72. N 12. P. 4727—4744. DOI: 10.1007/s12665-014-3256-z (Accessed 3 July 2018).

18. Haylock M.R., Hofstra N., Klein Tank A.M.G., Klok E.J., Jones P.D., New M. A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 2008. Vol. 113(D20119). DOI: 10.1029/2008JD10201 (Accessed 10 July 2018).
19. Krakovska S., Gnatiuk N., Shpytal T., Shedemenko I. Methodology of the best RCMs ensemble selection applied for Ukraine. *Proceedings of the International Conference on Regional Climate CORDEX*. Brussels, 2013. P. 87–91. <https://www.researchgate.net/publication/294089331> (Accessed 10 July 2018).
20. Nakićenović N., Swart R. (eds). Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change., Cambridge, United Kingdom; New York, NY, USA. Cambridge University Press 2000. 599 p. [https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/emissions\\_scenarios.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/emissions_scenarios.pdf) (Accessed 15 July 2018).
21. Shvidenko A., Buksha I., Krakovska S., Lakyda P. Vulnerability of Ukrainian Forests to Climate Change. *Sustainability*. 2017. Vol. 9, iss. 7. 1152. DOI: 10.3390/su9071152\_(Accessed 5 July 2018)
22. Spinoni J., Szalai S., Szentimrey T. etc. Climate of the Carpathian Region in the period 1961–2010: climatologies and trends of 10 variables. *International Journal of Climatology*. 2015. P. 1322–1341. <https://doi.org/10.1002/joc.4059> (Accessed 5 July 2018).
23. Van der Linden P., J.F.B. Mitchell (eds). ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre. 2009. FitzRoy Road, Exeter EX1 3PB, UK. 160 p. [http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles\\_final\\_report\\_Nov09.pdf](http://ensembles-eu.metoffice.com/docs/Ensembles_final_report_Nov09.pdf) (Accessed 6 July 2018).