

УДК 551.58.001.57;551.58.001.18+551.509.3

Л.В. Паламарчук, Н.В. Гнатюк, С.В. Краковська,
І.П. Шедеменко, Г.О. Дюкель

СЕЗОННІ ЗМІНИ КЛІМАТУ В УКРАЇНІ В ХХІ СТОЛІТТІ

Наведено результати дослідження та перша кількісна оцінка зміни температури повітря та кількості опадів для території України на ХХІ століття по сезонах з використанням ансамблю з 10 глобальних моделей проекту СМІР3. Проаналізовано та представлено відмінності у прогнозах досліджуваних величин для трьох спеціально розроблених МГЕЗК сценаріїв: В1, А1В, А2.

Ключові слова: модель загальної циркуляції атмосфери та океанів (МЗЦАО), проекція сезонних змін клімату в Україні, швидкість зміни кліматичних характеристик, ансамблеве середнє.

Вступ

Сьогодні виникає все більше питань щодо причин та наслідків глобальних кліматичних змін. Серед прогресивних методів дослідження можливих сценаріїв розвитку кліматичної системи на передній план виступає глобальне та регіональне моделювання. У розробках моделей загальної циркуляції атмосфери та океану (МЗЦАО) протягом останніх десятиріч відмічається значний прогрес, який пов'язаний зі збільшенням обчислювальних ресурсів, що забезпечують кращу деталізацію та повноту модельних описів кліматичних процесів і дозволяють проводити розрахунки тенденцій кліматичних змін на багато десятків років. Серед недоліків даного методу можна виділити наступні два аспекти: оскільки розрахунки проводяться на значний період часу, пряме порівняння отриманих сьогодні результатів з даними спостережень (верифікація) стане можливим лише в далекому майбутньому, коли вони вже не матимуть вагомого практичного значення. Крім того, дані розрахунки не можна вважати повною мірою прогнозами, оскільки зовнішні впливи на модельну кліматичну систему (наприклад, антропогенні викиди парникових газів та аерозолів в атмосферу) задаються відповідно до різних сценаріїв розвитку людства, вірогідність яких в свою чергу не визначена. Незважаючи на висвітлені недоліки, математичне моделювання залишається одним із найефективніших методів

довгострокового прогнозу змін метеорологічних величин для дослідження клімату майбутнього. А для України використання засобів моделювання є значущим кроком у розвитку методів дослідження клімату та дозволяє йти в ногу з методологічними тенденціями сучасної науки.

Формування ансамблю моделей та розрахунків як прогресивний метод дослідження змін клімату

Для зменшення величини похибки прогнозу, отриманого за допомогою МЗЦАО, використовуються паралельні розрахунки однієї або кількох моделей за однакових зовнішніх впливів – ансамблевий метод аналізу. Результат осереднення за мультимодельним ансамблем (складений з розрахунків незалежних моделей), як правило, має найбільший успіх у порівнянні з даними спостережень. Це пов'язано з тим, що систематичні похибки, властиві кожній окремій моделі, часто є випадковими у відношенні до ансамблю моделей і при осередненні взаємно компенсуються.

З метою проведення науково-технічних та соціально-економічних оцінок глобальних змін клімату та пов'язаних з цим проблем у 1988 році дві спеціалізовані організації ООН (ВМО та ЮНЕП) створили Міжурядову групу експертів зі змін клімату (МГЕЗК) – Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), яка сьогодні є найбільш авторитетною міжнародною організацією, що займається оцінкою змін глобального та регіонального клімату минулого, сучасного та майбутнього, впливу кліматичних змін на глобальному та регіональному рівні та можливостей адаптації до них. У 1990, 1996, 2001 та 2007 році МГЕЗК підготувала чотири доповіді з оцінками загального стану навколишнього середовища, які є зведеннями вже відомих знань та питань, які ще необхідно з'ясувати стосовно кліматичної системи та пов'язаних з нею факторів. Доповіді МГЕЗК – це результати всебічного аналізу даних спостережень за кліматом та прогнозу його майбутніх змін і останні досягнення світової науки в області фундаментальних досліджень глобальної кліматичної системи. Зауважимо, що автори 4-ої доповіді здобули Нобелівську премію миру 2007 року, що є загальносвітовим визнанням їх наукових досягнень.

У рамках підготовки Четвертої доповіді МГЕЗК було організовано безпрецедентний за своїми масштабами та кількістю учасників проект з аналізу прогнозів клімату за допомогою МЗЦАО нового покоління. Основу даного проекту, який отримав назву СМІРЗ і є третьою фазою

проекту CMIP (Coupled Model Intercomparison Project), склали розрахунки клімату ХХ століття (20С3М) на основі даних спостережень та вимірів концентрації парникових газів та аерозолів, а також розрахунки змін клімату в ХХІ столітті для сценаріїв зміни цих концентрацій, розроблених МГЕЗК [11]. Усього в проекті взяло участь більш як два десятки МЗЦАО, розроблених у відомих дослідницьких центрах світу, багато з яких представили результати ансамблевих розрахунків (з різними початковими умовами) для кожного типу чисельного експерименту [9, 12]. Аналізуючи отримані результати проекту CMIP3, вчені дійшли спільного висновку, що використання мультимодельного ансамблю в оцінках майбутніх змін клімату дає більш точні прогнози. До того ж ансамблевий підхід має чимало переваг порівняно з використанням однієї моделі, навіть якщо вона зарекомендувала себе як найбільш успішна в розрахунках минулого та сучасного клімату. Серед таких переваг слід відзначити те, що в разі залучення декількох моделей і їх розрахунків, можна отримати більш реалістичні межі майбутніх змін клімату.

Ансамбль МЗЦАО у дослідженні сезонних змін клімату для території України в ХХІ столітті

Для оцінки очікуваних сезонних змін регіонального клімату на території України в ХХІ сторіччі, а саме, розподілу двох метеорологічних величин – температури повітря та кількості опадів, з-поміж 23 МЗЦАО, що використовувались у проекті CMIP3, було відібрано десять моделей (див. табл. 1). У результаті всебічного аналізу відібрані моделі були визнані найбільш придатними для аналізу кліматичної ситуації на території нашої держави з таких причин: вони розроблені науковцями провідних країн світу та є найбільш сучасними, чим викликають до себе певний ступінь довіри. Крім того, при відборі особлива увага приділялась величині просторового кроку моделі ($< 2,8^\circ$) та кількості вертикальних рівнів (> 20). Слід зауважити, що деякі з відібраних моделей мають кілька розрахунків для кожного із сценаріїв і, таким чином, всього було використано результати 84-х розрахунків 10 МЗЦАО.

Насамперед було надіслано запит до архіву CMIP3 та отримано середньомісячні дані температури повітря та кількості опадів на ХХІ століття для 10 МЗЦАО на основі трьох сценаріїв розвитку людства: В1, А1В та А2 (всього 84 набори даних для двох метеорологічних величин). Наступним кроком було виділення території України за її географічними

координатами з масивів даних. Кількість вузлів розрахункової сітки для кожної моделі, що потрапили у виділену прямокутну область з координатами 22,5°– 40,0° сх. д та 44,4°– 52,0° пн. ш наведено в табл. 1 та наочно представлено на рис. 1. Тільки в 4-х із вибраних моделей однакові розміри та розташування вузлів розрахункової сітки, у решти вони не співпадають, що ускладнює задачу порівняння результатів окремих обраних МЗЦАО між собою. Також у зв'язку з тим, що кількість вузлів розрахункових сіток обраних моделей для України незначна, осереднення за площею проводилось з використанням усіх вузлів, тобто для всієї прямокутної області, представленої на рис. 1.

Таблиця 1

МЗЦАО, що були застосовані для оцінки прогнозу сезонних кліматичних змін на території України в XXI ст. для різних сценаріїв

Номер та назва моделі	Рік версії	Країна	Горизонтальні кроки та кількість вертикальних рівнів	Кількість розрахунків для сценаріїв			Розмір координатної сітки: Україна
				B1	A1B	A2	
1: BCCR-BCM2.0	2005	Norway	T63 (1,9°x1,9°) L31	1	1	1	7 x 3
2: NCAR-CCSM3	2005	USA	T85 (1,4°x1,4°) L26	9	7	4	13 x 5
3: CGCM3.1 (T47)	2005	Canada	T47 (~2,8°x2,8°) L31	5	5	5	5 x 2
4: CGCM3.1 (T63)	2005	Canada	T63 (~1,9°x1,9°) L31	1	1	0	7 x 3
5: ECHAM5 / MPI-OM	2005	Germany	T63 (~1,9°x1,9°) L31	5	3	4	10 x 4
6: GFDL-CM2.1	2005	USA	2,0° x 2,5° L24	1	1	1	7 x 4
7: MIROC3.2 (hires)	2004	Japan	T106 (~1,1°x1,1°) L56	1	1	0	16 x 7
8: MIROC3.2 (medres)	2004	Japan	T42 (~2,8°x2,8°) L20	3	3	3	7 x 3
9: MRI-CGCM2.3.2	2003	Japan	T42 (~2,8°x2,8°) L30	5	5	5	7 x 3
10: UKMO-HadGEM1	2004	UK	~1,3°x1,9° L38	1	1	1	10 x 6

У цьому випадку проводився аналіз даних і визначалися загальні тенденції зміни значень температури повітря та кількості опадів за окремими сезонами для території України в ХХІ ст. Оскільки територія України займає значну площу та має неоднорідні фізико-географічні умови, у подальшому слід звернути увагу на дослідження особливостей сезонних кліматичних змін в окремих регіонах України та їх порівняння між собою. У разі використання для цієї мети МЗЦАО, необхідно застосовувати спеціальні методи інтерполяції. Зважаючи на великі кроки модельної сітки МЗЦАО, у наступних дослідженнях більш доцільно використовувати не глобальні, а регіональні кліматичні моделі [3, 4, 7, 8].

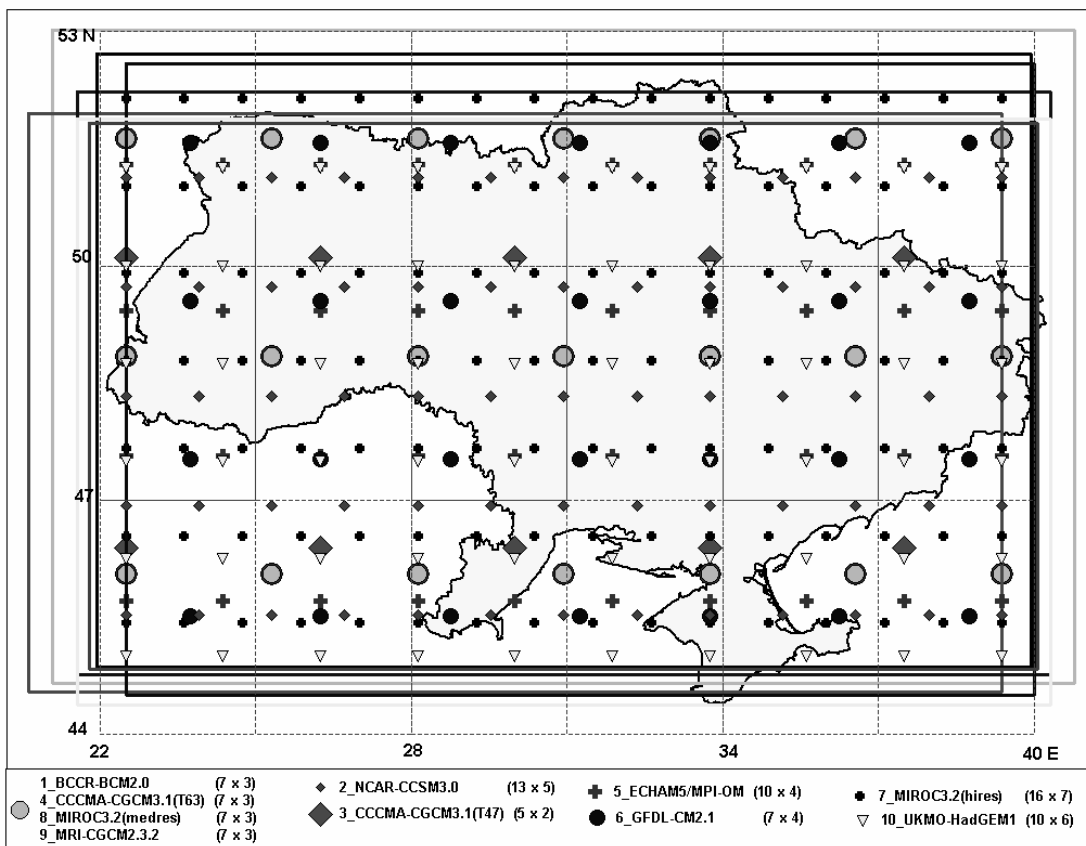


Рис. 1. Розрахункові сітки МЗЦАО з табл. 1 і відповідні їм області прогнозування клімату (рамки) для території України

Набори даних для кожного з трьох використаних сценаріїв розвитку людства та можливих кліматичних змін аналізувалися за наступним алгоритмом. Спочатку було отримано середні значення прогнозованих рядів даних для моделей, які мали більш як один розрахунок – ансамблеве усереднення, в результаті чого було отримано 20 наборів даних (два метеорологічні показники для 10 моделей). Потім для кожного з

отриманих рядів даних середньомісячні характеристики були трансформовані у сезонні середні значення температури повітря та суми опадів. Кінцевим етапом було виділення та усереднення за сезонами року даних середньомісячної температури повітря та кількості опадів для кожного з отриманих наборів даних по 10 моделях. Кінцевим результатом було отримання усереднених за площею прямокутних розрахункових сіток усіх обраних МЗЦАО мінімальних, середніх та максимальних за площею значень для кожного сезону.

Прогнозовані зміни кліматичних характеристик в Україні за сезонами

Згідно з [4, 8-10] очікується, що майбутні зміни клімату будуть мати чітко виражений сезонний характер. Тому проведений аналіз обраних метеорологічних величин є доцільним для прогнозування змін клімату в Україні на основі даних МЗЦАО. Подібні підходи щодо обраної методики досліджень пропонуються в [4, 5, 8]. Досвід верифікації регіональних моделей клімату [3, 7] також показує, що найвищий ступінь кореляції модельних результатів та даних спостережень відмічається для усереднених за площею характеристик.

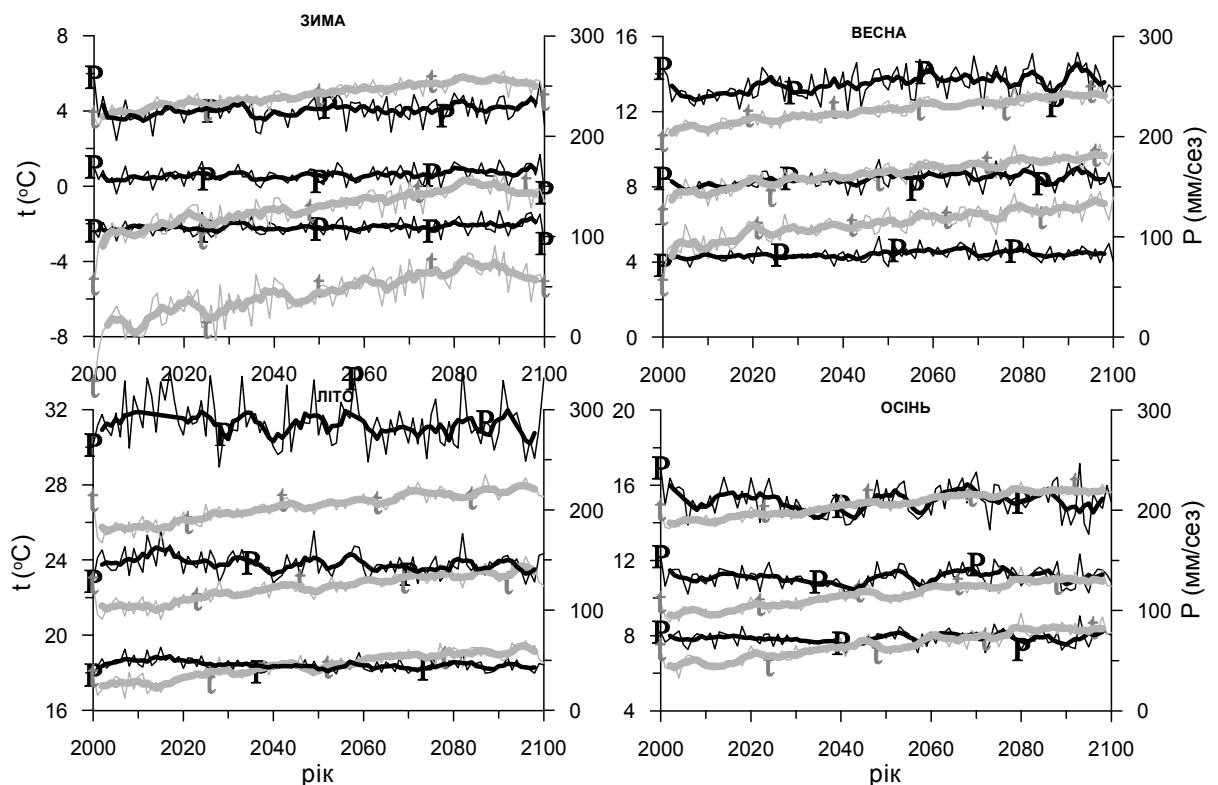


Рис. 2. Сезонні зміни температури повітря (t , сірі лінії) та кількості опадів (P , чорні лінії) для сценарію В1 (представлено мінімальні, середні та максимальні усереднені за площею значення)

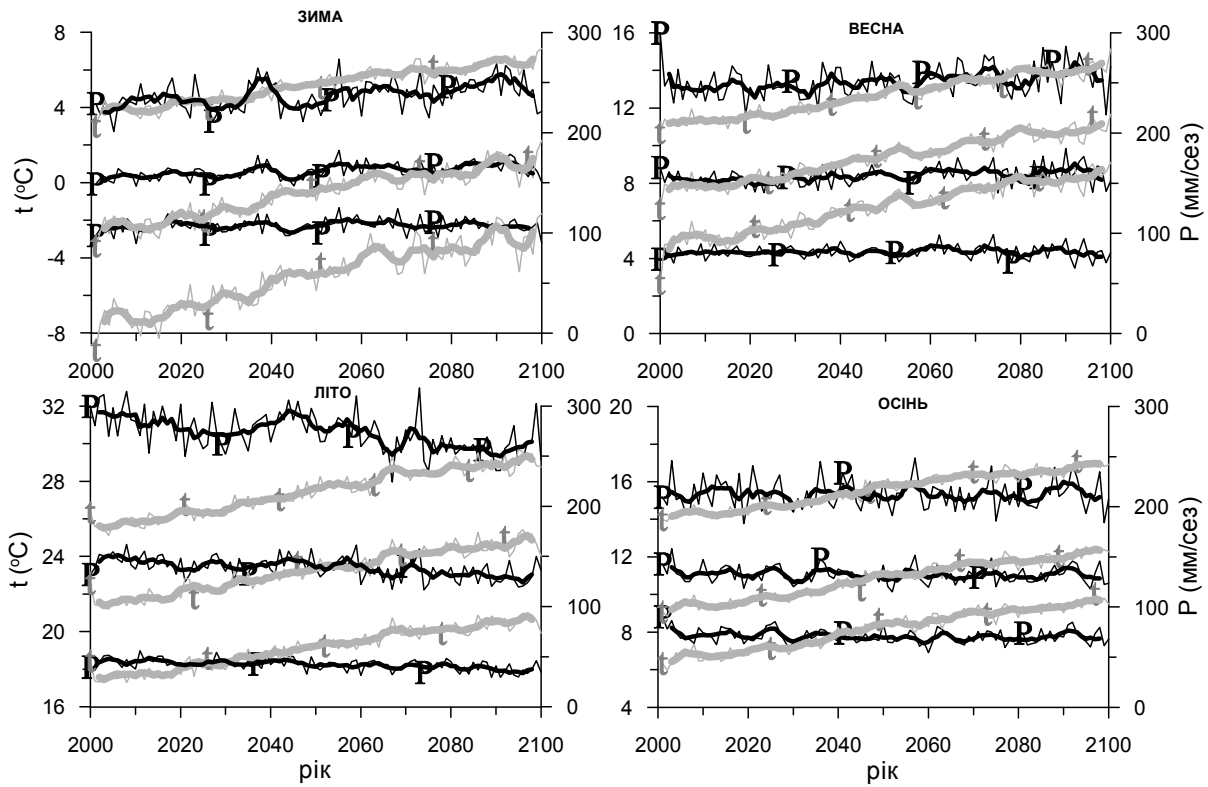


Рис. 3. Сезонні зміни температури повітря (t, сірі лінії) та кількості опадів (P, чорні лінії) для сценарію A1B

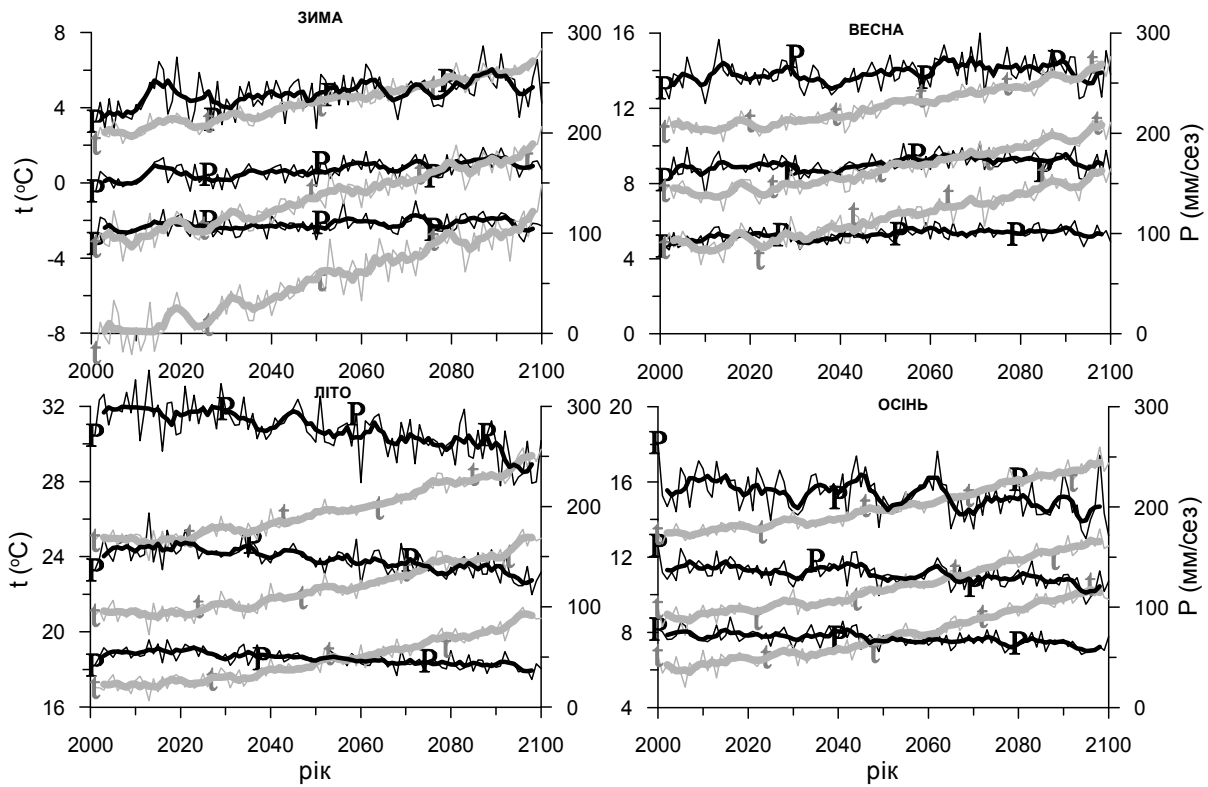


Рис. 4. Так як і на рис. 2-3 для сценарію A2

Таблиця 2

Коефіцієнти лінійного тренду температури та опадів для сезонів та сценаріїв (розраховані за даними, представленими на рис. 2-4)

Сценарії та сезони		температура, °/рік			опадів, мм/рік		
		мін. знач.	сер. знач.	макс. знач.	мін. знач.	сер. знач.	макс. знач.
B1	зима	0,035	0,029	0,019	0,047	0,061	0,072
	весна	0,024	0,022	0,020	0,054	0,103	0,163
	літо	0,021	0,021	0,023	-0,056	-0,080	-0,135
	осінь	0,022	0,021	0,019	0,023	0,017	-0,015
A1B	зима	0,053	0,041	0,031	0,017	0,123	0,208
	весна	0,041	0,037	0,034	0,008	0,103	0,162
	літо	0,035	0,037	0,040	-0,085	-0,185	-0,335
	осінь	0,040	0,037	0,035	-0,114	-0,035	-0,010
A2	зима	0,068	0,052	0,039	0,061	0,195	0,254
	весна	0,041	0,038	0,035	0,087	0,107	0,113
	літо	0,039	0,042	0,046	-0,174	-0,305	-0,552
	осінь	0,044	0,043	0,040	-0,130	-0,190	-0,265

На рис. 2-4 представлено часові серії середніх, максимальних та мінімальних усереднених за площею значень двох досліджуваних кліматичних характеристик для основних та перехідних сезонів. У табл. 2 наведено коефіцієнти лінійного тренду, отримані за кривими рис. 2-4. Результати аналізу представлено в табл. 3, 4, а саме зміни ансамблевих середніх сезонних приземних температур та сум опадів для кожного десятиріччя XXI ст. по відношенню до періоду 2001-2010 рр. Також в табл. 3, 4 наведено стандартні відхилення (σ), найменші (мін.) та найбільші (макс.) значення усереднених за площею характеристик, які отримано з-поміж 10 МЗЦАО. Зауважимо, що ці найменші та найбільші значення вказують на міжмодельний розмах і по суті представляють можливі межі змін величин, що отримано в обраному ансамблі моделей.

Коефіцієнти лінійних трендів (табл. 2) та зміни сезонних температур відносно періоду 2001-2010 рр. (табл. 3) указують на те, що підвищення температури повітря в XXI ст. в Україні відбуватиметься за рахунок збільшення значень температур зимового сезону (середні значення коефіцієнтів лінійного тренду для B1 – 0,029°/рік, A1B – 0,041°/рік, A2 –

0,052°/рік). У всіх сценаріях розрахунки показують порівняно менші підвищення температур в інші сезони.

Слід зауважити, що загальне підвищення температур повинно відбуватися через зменшення повторюваності по території низьких температур у зимовий період і, меншою мірою, через збільшення повторюваності випадків високих температур у літній період. Для кожного з наведених сценаріїв значення коефіцієнта лінійного тренду для зимових мінімумів вище, ніж для літніх максимумів (відповідні пари: B1 – 0,035 та 0,023°/рік, A1B – 0,053 та 0,040°/рік, A2 – 0,068 та 0,046°/рік). Така тенденція зміни термічного режиму може призвести до зменшення амплітуди річного ходу приземної температури повітря, усередненої для розрахункової сітки.

Перехідні сезони приблизно однаково змінюватимуть свій термічний фон. Тільки для сценарію A2 отримано більш інтенсивний ріст температури в осінній сезон у порівнянні з весняним. Підвищення температури більшою мірою також відбуватиметься за рахунок зменшення повторюваності на території України низьких температур, ніж через значну повторюваність високих температур. Як показують коефіцієнти лінійного тренду середніх значень, швидкість зміни температури в перехідні сезони буде дещо меншою ніж взимку і наблизатиметься до швидкості її зміни в літній сезон. Указані закономірності зміни температури можуть дещо згладжувати річний розподіл температури (для усереднених за територією значень) та зменшити річні амплітуди через підвищення зимових мінімумів. Наведений факт можна розглядати як тенденцію до можливого зменшення континентальності клімату для території України.

Результати розрахунків, що представлені в табл. 3, указують на монотонне зростання температури повітря на території України в XXI ст. за всіх сценаріїв розвитку людства. На кінець століття найбільше підвищиться температура в зимовий період – від 2,2° C (B1) до 4,6° C (A2) та влітку – від 1,9° C (B1) до 3,6° C (A2). Повільніше підвищуватимуться температури восени – від 1,7° C (B1) до 3,9° C (A2). Дещо нижчі прирости, але подібні до зимових, отримано для весняного сезону – від 1,9° C (B1) до 3,1° C (A2).

Прогнозовані середні за сезони суми опадів мають не такі однозначні тенденції змін.

Таблиця 3

Зміна в Україні температури повітря (°C) по десятиріччях ХХІ ст.
порівняно з періодом 2001-2010 рр.

Сезони, сценарії Десятиріччя, Показники		Зима			Весна			Літо			Осінь		
		В1	А1В	А2	В1	А1В	А2	В1	А1В	А2	В1	А1В	А2
2	Середнє, °C	0,5	0,2	0,6	0,4	0,0	0,1	0,2	0,2	-0,1	0,1	0,0	0,4
	Ст. відх. (σ)°C	0,7	0,7	0,6	0,3	0,4	0,3	0,5	0,2	0,5	0,6	0,5	0,3
	Мін., °C	-0,5	-1,4	-0,3	0,0	-1,0	-0,3	-0,9	-0,2	-0,9	-1,6	-0,9	0,1
	Макс., °C	2,0	1,4	1,6	1,0	0,4	0,4	1,1	0,6	0,5	0,6	0,5	0,8
3	Середнє, °C	0,9	0,7	0,6	0,7	0,3	0,1	0,7	0,8	0,2	0,4	0,5	0,7
	Ст. відх. (σ)°C	0,6	0,6	0,4	0,4	0,4	0,5	0,7	0,4	0,3	0,4	0,2	0,4
	Мін., °C	0,0	-0,3	0,0	0,2	-0,5	-0,9	-0,8	0,2	-0,5	-0,4	0,1	0,1
	Макс., °C	2,0	1,8	1,3	1,4	0,7	0,9	2,0	1,7	0,6	1,0	0,7	1,1
4	Середнє, °C	1,1	1,0	1,2	0,8	0,9	0,6	0,9	1,2	0,4	0,7	0,9	0,7
	Ст. відх. (σ)°C	0,9	0,7	0,6	0,7	0,3	0,5	0,6	0,5	0,5	0,7	0,5	0,6
	Мін., °C	-0,3	0,0	0,3	-0,4	0,2	-0,1	0,0	0,6	-0,2	-0,8	-0,2	-0,6
	Макс., °C	2,7	1,9	2,2	1,9	1,3	1,3	2,2	1,9	1,1	1,7	1,4	1,5
5	Середнє, °C	1,3	1,8	2,0	1,1	1,4	0,8	1,1	1,6	0,9	1,0	1,4	1,2
	Ст. відх. (σ)°C	0,7	0,7	1,0	0,5	0,4	0,6	0,7	0,6	0,6	0,8	0,3	0,3
	Мін., °C	0,6	0,9	1,0	0,2	0,9	-0,3	-0,5	0,8	-0,3	-0,8	0,9	0,9
	Макс., °C	2,9	3,2	4,2	1,9	2,3	1,8	2,5	2,7	1,7	2,2	1,8	1,6
6	Середнє, °C	1,7	2,2	2,5	1,3	1,8	1,4	1,2	1,9	1,3	1,0	1,7	1,7
	Ст. відх. (σ)°C	0,7	0,5	1,0	0,7	0,3	0,7	1,2	0,6	0,5	0,9	0,5	0,4
	Мін., °C	0,6	1,1	1,6	0,3	1,3	0,2	-0,9	1,0	0,8	-0,8	0,9	1,2
	Макс., °C	2,9	3,1	4,1	2,5	2,2	2,4	3,4	2,8	2,2	2,4	2,4	2,3
7	Середнє, °C	2,0	2,6	3,0	1,5	2,1	1,8	1,5	2,4	1,7	1,4	2,1	2,1
	Ст. відх. (σ)°C	1,0	0,6	0,6	0,7	0,7	0,9	0,9	0,6	0,7	1,0	0,5	0,5
	Мін., °C	0,9	1,4	2,3	-0,2	0,9	0,2	0,6	1,4	0,7	-0,6	1,4	1,2
	Макс., °C	3,9	3,5	4,0	2,4	3,4	3,1	3,1	3,2	3,1	2,8	3,0	2,9
8	Середнє, °C	2,2	2,8	3,5	1,6	2,5	2,2	1,7	2,7	2,5	1,5	2,3	2,8
	Ст. відх. (σ)°C	1,1	0,9	1,1	0,5	0,7	0,6	0,9	0,9	0,9	0,8	0,6	0,5
	Мін., °C	0,8	1,3	2,4	0,7	1,7	0,9	1,0	1,0	1,4	-0,2	1,6	2,2
	Макс., °C	4,1	3,8	4,9	2,2	4,0	2,7	3,9	3,8	3,6	2,4	3,2	3,6
9	Середнє, °C	2,8	3,1	4,0	1,8	2,7	2,8	1,8	3,0	2,8	1,7	2,4	3,4
	Ст. відх. (σ)°C	1,3	1,1	1,1	0,7	0,6	1,1	1,0	0,9	0,8	0,9	0,9	0,8
	Мін., °C	0,9	1,2	2,6	1,0	2,1	1,2	0,8	1,6	1,6	0,0	0,9	2,4
	Макс., °C	5,1	4,5	5,4	2,9	3,9	4,7	4,2	4,0	3,9	3,2	3,9	4,6
10	Середнє, °C	2,2	3,4	4,6	1,9	3,0	3,1	1,9	3,2	3,6	1,7	2,9	3,9
	Ст. відх. (σ)°C	0,9	1,1	1,2	0,7	0,8	1,0	1,0	1,0	1,2	1,1	0,7	0,8
	Мін., °C	1,0	1,7	3,2	1,0	2,1	1,8	1,1	2,0	1,7	-0,5	1,9	3,0
	Макс., °C	3,3	5,0	6,9	3,0	4,7	4,6	3,8	4,5	5,2	3,0	4,0	4,9

Таблиця 4

Зміна в Україні кількості опадів (% , мм) по десятиріччях ХХІ ст.
порівняно з періодом 2001 – 2010 рр.

Десятиріччя, Показники		Сезони, сценарії			Зима			Весна			Літо			Осінь		
		В1	А1В	А2	В1	А1В	А2	В1	А1В	А2	В1	А1В	А2			
2	Середнє, %	1,1	3,1	8,7	0,5	0,4	3,8	5,2	-1,2	2,9	2,5	-1,8	0,5			
	Середнє, мм	1,6	3,9	12,5	0,6	0,5	6,7	7,2	-3	3,3	3,2	-3,6	0,5			
	Мін., мм	-33,1	-27,5	-32,4	-22,7	-22,6	-25,6	-31,1	-30,8	-33,2	-29,7	-41,9	-23,1			
	Макс., мм	26,4	30,3	32,4	51,5	58,4	76,8	40,1	18,9	84,8	35,4	20,2	29,8			
3	Середнє, %	2,4	1,6	2,7	3,6	-0,1	4,4	-1,1	-4,7	1,6	0,5	-1,8	-4,1			
	Середнє, мм	4	1,7	3,3	5,7	-0,4	8,3	-2,7	-7,9	2,8	0,1	-2,9	-6			
	Мін., мм	-42,9	-34,4	-31,1	-29,2	-31,3	-20,6	-35,4	-34,7	-38	-28,3	-26,3	-23,4			
	Макс., мм	32,6	30,2	15,6	66,7	45,4	92,3	23,3	18,5	102,4	29,1	13,5	16			
4	Середнє, %	1,8	5,7	5,5	4,1	1,7	-1,6	-1,3	-4,9	-0,9	-3	-1,3	-1,2			
	Середнє, мм	2,9	7,9	7,9	6,7	2,1	-1,8	-2,8	-8,2	-1	-4,2	-3,1	-2,4			
	Мін., мм	-33,7	-33,6	-33	-18,9	-22,5	-31,2	-38	-33,9	-31,5	-21	-20	-16,2			
	Макс., мм	30,4	38,4	31,2	72,7	50	83	24,8	18,9	71,6	23,8	20	10,4			
5	Середнє, %	1,7	1,7	6,6	3,3	3	3,5	-1,3	-1,8	-2,1	-3,3	-2,8	-1,9			
	Середнє, мм	2,4	2	9,3	5,2	3,8	6,9	-3	-2,6	-2,8	-4,5	-4,2	-2,3			
	Мін., мм	-34	-35,5	-26,1	-25,1	-16,3	-32,8	-31,1	-37	-57,4	-35,8	-30,6	-40			
	Макс., мм	30,6	36,7	32,3	70,4	49	86,7	27,3	49,3	92,1	23,3	22,5	27,8			
6	Середнє, %	1,7	7,6	10,3	7,3	2,6	6	-1,1	-4,3	-6,5	0	-4,8	-6,3			
	Середнє, мм	2,5	10,7	15	11,2	3,9	11,1	-0,2	-6,8	-9,5	0	-6,8	-9,2			
	Мін., мм	-34,9	-29,4	-28,7	-14,9	-26,7	-32,3	-22,9	-39,1	-54,6	-16,7	-24,8	-26,9			
	Макс., мм	32,9	38,8	39,5	77,5	63,6	106,3	38,2	32,1	84,3	25,6	13,6	10,2			
7	Середнє, %	2,4	7,2	10,2	7,3	6,1	8,9	-4,5	-9,8	-6,4	5,4	-2,9	-5,3			
	Середнє, мм	4,1	10,9	14,8	11,2	8,6	15,3	-7,7	-14,6	-10,7	7,1	-4,8	-7,9			
	Мін., мм	-35,6	-31,9	-22,4	-11,7	-10,8	-26,2	-33,5	-51	-49,5	-20,7	-28,4	-23,9			
	Макс., мм	32,4	42,9	35,9	73,9	71,8	94,9	29,4	33,7	67	26,1	29,2	20			
8	Середнє, %	3,9	4,9	10,6	6,5	5,1	7,4	-5,1	-7,8	-11,9	2,9	-2,6	-7,2			
	Середнє, мм	5,8	6,4	15,5	9,6	6,6	12,6	-7,9	-11,9	-17,2	3,8	-4,6	-9,7			
	Мін., мм	-29,6	-23,9	-24,1	-15,7	-14,9	-25,6	-46,3	-59,2	-59,5	-14,1	-23,1	-44,6			
	Макс., мм	37,7	37,8	39,7	64,1	44	101,2	28,2	27,9	70,9	24,6	26,9	18,6			
9	Середнє, %	5,3	9,1	15,3	5,6	6,6	6,9	-1,9	-11,6	-10,7	1,5	-2,6	-8,1			
	Середнє, мм	8,3	13,5	22	8	8,2	12,6	-3,5	-17,2	-14,6	2	-4,6	-11,2			
	Мін., мм	-36,4	-26,2	-16,9	-11,4	-13,8	-38,7	-38,5	-64,5	-62,6	-18	-30	-53			
	Макс., мм	49,3	39,3	38	50,8	46	120,6	35,6	37,2	76,8	29,2	27	19,6			
10	Середнє, %	4	7,8	14	7	5,3	4,9	-2,4	-11,3	-18,9	0,3	-1,8	-13			
	Середнє, мм	6	9,6	18,5	9,9	6	7,3	-4,5	-17,3	-26,3	0,1	-3,5	-18,7			
	Мін., мм	-40,5	-20,5	-11,3	-25,6	-10,3	-28,5	-49,7	-77,2	-92,8	-21,7	-32	-44,5			
	Макс., мм	40,1	44,3	43,9	56,7	38	95,8	27,7	20,1	65,2	35,2	21,1	16,8			

Із наведених розрахунків величин коефіцієнтів лінійних трендів для окремих сезонів (рис. 2-4, табл. 2) та зміни кількості опадів по десятиріччях (табл. 4) видно, що слід очікувати збільшення сум опадів у зимовий та весняний періоди.

Найбільше зростання сум опадів за всіма сценаріями отримано для зимового (B1 – 0,061 мм/рік, A1B – 0,123 мм/рік, A2 – 0,195 мм/рік) і для весняного сезону (B1, A1B – 0,103 мм/рік, A2 – 0,107 мм/рік). Очікуване зростання сум опадів, очевидно, буде обумовлене високою повторюваністю на території випадків сильних опадів у цей період, на що вказують величини коефіцієнтів лінійного тренду для максимальних значень у межах розрахункової сітки. Середні за ансамблем моделей дані показують, що зменшення кількості опадів у літній та осінній періоди відбуватиметься за усіма використаними сценаріями. Найбільші від'ємні значення коефіцієнту лінійного тренду отримано для A2 (-0,305 мм/рік – літо). Слід відмітити також, що для сценаріїв A1B та A2 швидкість зменшення сум опадів улітку перевищує швидкість їх приросту в зимовий сезон. Відомо, що сучасний річний хід опадів в Україні характеризується літнім максимумом та зимовим мінімумом [2]. Тому зростання кількості опадів у зимовий період з одночасним їх зменшенням у літній сезон може призвести до зменшення амплітуди їх річного розподілу.

Аналіз змін сум опадів упродовж XXI ст. за сезонами на території України (табл. 4) показав, що вони будуть немонотонними. Прогнозується збільшення середніх сум опадів до кінця XXI століття в зимовий та весняний сезони від 4,0 % (B1) до 14,0 % (A2) та від 4,9 % (A2) до 7,0 % (B1) відповідно. Збільшення сум опадів у ці сезони матиме коливальний характер упродовж досліджуваного періоду. У літній сезон для всіх сценаріїв прогнозується зменшення кількості опадів від 2,4 % (B1) до 18,9 % (A2) на кінець століття. Для B1 відмічається незначне підвищення опадів у 2 десятиріччі, а для A2 – у 2 та 3 десятиріччях. Літні сезони у другій половині століття прогноуються відносно посушливими за будь-якого сценарію. Зауважимо, що для весняного та літнього сезонів та для сценарію A2 знайдено найбільші міжмодельні розмахи в проєкціях змін опадів протягом всього XXI століття, що вказує на можливі значні відхилення від отриманих усереднених значень. В осінній сезон за даними ансамблю МЗЦАО на кінець століття очікується зменшення сум опадів до -1,8 % (A1B) та -13,0 % (A2), тільки для B1 прогнозується незначне зростання на 0,3 %.

Зауважимо, що отримані результати щодо кількості опадів, на відміну від температури повітря, повинні сприйматися з певними застереженнями. По-перше, ще раз відмітимо, що тут розглядалися усереднені сезонні суми опадів за площею всієї України (розрахункової сітки моделей). Відомо, що опади є досить мінливим у просторі та часі явищем, хоча й мають за достатнього усереднення певний сезонний хід та розподіл за площею. Вони обумовлені передусім географічним положенням та підстильною поверхнею [2]. Але в даному випадку дослідження було обмежене можливостями глобальних кліматичних моделей, і насамперед їх недостатньою роздільною здатністю для аналізу регіональних особливостей режиму зволоження. Ще однією причиною для обережного сприйняття отриманих результатів щодо кількості опадів та їх можливих майбутніх змін в Україні є те, що в кліматичних моделях використовують спрощені методи параметризації процесів формування опадів в атмосфері. Однак, проведене дослідження все ж виявило певні тенденції в можливих майбутніх змінах сезонних характеристик опадів, і отримані висновки відповідають сучасному стану розвитку кліматичної науки.

Висновки

Для отримання прогностичних значень кліматичних характеристик для території України в XXI столітті сформовано ансамбль із 10 моделей загальної циркуляції атмосфери та океанів (МЗЦАО) та проаналізовано результати їх розрахунків (загалом 84 розрахунки) для 3 сценаріїв (B1, A1B, A2).

Усереднені для розрахункової сітки МЗЦАО прогностичні сезонні значення температури повітря та сум опадів до 2100 р. показали, що:

- очікується підвищення приземної температури повітря у всі сезони року, з найбільшими швидкостями зростання температур у зимовий період;
- з високою ймовірністю можна стверджувати, що підвищення річної температури повітря відбуватиметься за рахунок зменшення повторюваності низьких температур у зимовий сезон по всій території України;
- перехідні термічні сезони матимуть приблизно однакові швидкості та характер змін температури;

- такі зміни температури можуть призвести до згладжування річного ходу та зменшення його амплітуди переважно за рахунок підвищення температури у зимовий період;
- прогностичні дані вказують на можливість зміни режиму випадання опадів за рахунок збільшення їх сум у зимовий та весняний періоди та зменшення у літній та осінній сезони;
- найбільші швидкості змін приземної температури повітря та сум опадів отримано в моделях для сценарію A2, найменші – для B1.

Наведені вище результати оцінок прогнозованих змін за сезонами основних кліматичних характеристик потребують подальшого вивчення та уточнення як з використанням моделей загальної циркуляції атмосфери, так і регіональних кліматичних моделей.

Представлена кількісна оцінка можливих змін температури повітря та сум опадів для окремих сезонів року в XXI столітті для території України зроблена вперше. Отже, отримані результати є початковим, але дуже важливим і очікуваним кроком у розвитку нового напрямку вивчення тенденцій майбутніх кліматичних змін на тривалі періоди для нашої держави. Такий підхід потребує подальшого розвитку та вдосконалення методів і методик аналізу даних моделювань. Одним із методів уточнення модельних результатів МЗЦАО є застосування регіональних кліматичних моделей, що мають значно менші горизонтальні кроки розрахункових сіток. Це підвищить точність отриманих результатів та дасть можливість дослідити регіональні відмінності в майбутніх сезонних змінах клімату в межах країни.

Автори висловлюють подяку міжнародній спільноті розробників кліматичних моделей та робочій групі з об'єднаних моделей (WGCM) Всесвітньої програми з дослідження клімату (WCRP) за отримані для аналізу дані модельних розрахунків, та учасникам Програми діагнозу й порівняння кліматичних моделей (PCMDI) за зберігання модельних даних проекту СМІРЗ (Архів даних WCRP СМІРЗ підтримується Управлінням з науки Міністерства енергетики США). Автори також вдячні співробітникам відділу кліматичних досліджень і довгострокового прогнозу погоди УкрНДГМІ за обговорення результатів і конструктивні зауваження.

* *

1. *Говоркова В.А., Катцов В.М., Мелешко В.П., Павлова Т.В. Школьник И.М. Климат России в XXI веке. Ч. 2. Оценка пригодности моделей общей*

- циркуляції атмосфери і океана СМІРЗ для розрахунків майбутніх змін клімату Росії // *Метеорологія і гідрологія*. – № 8, 2008. – С. 5-19.
2. Клімат України / За ред. *В.М. Липінського, В.А. Дячука, В.М. Бабіченко* / – К.: Вид-во Раєвського, 2003. – 343 с.
 3. *Краківська С.В., Паламарчук Л.В., Шедеменко І.П., Дюкель Г.О., Гнатюк Н.В.* Верифікація даних світового кліматичного центру (CRU) та регіональної моделі клімату (REMO) щодо прогнозу приземної температури повітря за контрольний період 1961–90 рр. // *Наук. пр. УкрНДГМІ*. – № 257, 2008. – С. 42-60.
 4. *Кричак С.О.* Региональное моделирование современного климата европейской территории России с помощью модели RegCM3 // *Метеорологія і гідрологія*. – № 1, 2008. – С. 31-41.
 5. *Мелешко В.П., Катцов В.М., Говорков В.А., Спорышев П.В., Школьник И.М., Шнееров Б.Е.* Климат России в XXI веке. Ч. 3. Будущие изменения климата, рассчитанные с помощью ансамбля моделей общей циркуляции атмосферы и океана СМІРЗ // *Метеорологія і гідрологія*. – № 9, 2008. – С. 5-21.
 6. *Мелешко В.П., Катцов В.М., Мирвис В.М., Говоркова В.А., Павлова Т.В.* Климат России в XXI веке. Часть I. Новые свидетельства антропогенного изменения климата и современные возможности его расчета // *Метеорологія і гідрологія*. – № 6, 2008. – С. 5-19.
 7. *Паламарчук Л.В., Краківська С.В., Шедеменко І.П., Дюкель Г.О., Гнатюк Н.В.* Верифікація даних світового кліматичного центру (CRU) та регіональної моделі клімату (REMO) щодо прогнозу поля опадів в Україні за контрольний період 1961-1990 рр. // *Наук. пр. УкрНДГМІ*. – № 258, 2009. – С. 69-83.
 8. *Christensen J.H., B. Hewitson, A. Busuioc et al.* Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – 2007. – P. 847-940.
 9. *Meehl G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins et al.* Global Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – 2007. – P. 747-845.
 10. *Mitchell T.D., Carter T.R., Jones P.D., et al.* A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: The observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100) // *Tyndall Centre Working*

Paper No.55, Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich, UK, 2004.

11. *Nakićenović, N., and R. Swart (eds.)* Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – 2000. – 599 p.
12. *Randall, D.A., R.A. Wood, S. Bony et al.* Climate Models and Their Evaluation. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – 2007. – P. 589-662.

*Київський національний університет імені Тараса Шевченка,
Український науково-дослідний
гідрометеорологічний інститут, Київ,
Інститут проблем безпеки
атомних електростанцій НАН України, Київ*

**Л.В. Паламарчук, Н.В. Гнатюк, С.В. Краковская, И.П. Шедеменко,
Г.А. Дюкель**

Сезонные изменения климата в Украине в XXI столетии

Приведены результаты исследования и первая количественная оценка изменений температуры воздуха и количества осадков для территории Украины на XXI век по сезонам с использованием ансамбля из 10 моделей общей циркуляции атмосферы и океанов (МОЦАО) проекта СМIP3. Проанализированы и представлены различия в прогнозах исследуемых величин для трех специально разработанных МГЕИК сценариев: B1, A1B, A2.

Ключевые слова: модель общей циркуляции атмосферы и океанов (МОЦАО), проекция сезонных изменений климата в Украине, скорость изменения климатических характеристик, ансамблевое среднее.

**L.V. Palamarchuk, N.V. Gnatiuk, S.V. Krakovska, I.P. Shedemenko,
G.O. Diukel**

Seasonal climate change in Ukraine in the 21st century

For the first time quantitative estimations of seasonal surface air temperature and precipitation changes for the territory of Ukraine in the 21st century obtained through the ensemble of 10 General Circulation Models of Atmosphere and Oceans (GCMAO) from the project CMIP3 have been received. Differences in the projected characteristics during the 21st century for three specially worked out by IPCC scenarios (B1, A1B and A2) have been analyzed and presented.

Keywords: General Circulation Models of Atmosphere and Oceans (GCMAO), seasonal climate change projections for Ukraine, rate of climate characteristics change, ensemble mean.