

Моделі загальної циркуляції атмосфери та океанів у прогнозуванні змін регіонального клімату України в ХХІ ст.

© С. В. Краковська¹, Л. В. Паламарчук^{1,2}, І. П. Шедеменко^{1,3},
Г. О. Дюкель¹, Н. В. Гнатюк^{1,2}, 2011

¹Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут МНС та НАН України,
Київ, Україна

²Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна

³Інститут проблем безпеки атомних електростанцій НАН України, Київ, Україна

Надійшла 29 квітня 2011 р.

Представлено членом редколегії В. Г. Бахмутовим

С целью получения прогностических значений климатических характеристик для территории Украины в ХХІ в. впервые использован ансамбль из 10 моделей общей циркуляции атмосферы и океанов (МОЦАО) и дан анализ результатам их расчетов (всего 84 расчета) для 3 сценариев (B1, A1B, A2). Согласно результатам обработки данных, на конец ХХІ в. МОЦАО прогнозируют увеличение среднегодовой температуры воздуха, осредненное для всей территории Украины относительно периода 2001—2010 гг. Прогнозы отобранных МОЦАО изменений средних годовых сумм осадков в Украине в ХХІ в. для указанного периода имеют достаточно большой диапазон изменений — от –23,4 до +11,6 %. Поэтому прогноз изменений режима увлажнения в Украине требует более детального анализа с применением региональных моделей. Самые высокие скорости изменений приземной температуры воздуха и сумм осадков получены в моделях для сценария А2, самые низкие — для сценария В1. Определено, что модель ECHAM5/MPI-OM оптимальна для моделирования климата Украины, поскольку разности ее значений с ансамблевыми средними — минимальные.

For the first time quantitative characteristics of probable climate changes in Ukraine during the 21st century for three SRES emission scenarios B1, A1B and A2 have been obtained from an analysis of 84 runs of 10 Atmosphere-Ocean General Circulation Models (AOGCM) used for AR4 IPCC-2007. The analysis of AOGCM's results has shown that projected differences of the averaged over the territory of Ukraine surface temperatures of the ending and the first decades of the 21st century will be in limits: B1 – from 0,7 to 3,0 °C with ensemble mean 2,0±0,8 °C; A1B — from 2,4 to 4,2 °C with mean 3,1±0,7 °C; and A2 — from 2,6 to 4,6 °C with mean 3,8±0,8 °C. There is not such an agreement for precipitation variations during the 21st century between AOGCMs, and precipitation changes vary from –23,4 to +11,6 % up to the end of the 21st century comparing to 2001-2010. Therefore, more detailed precipitation change projections for the territory of Ukraine could be made only with regional climate models. The most rapid changes of surface temperature and precipitation have been obtained in AOGCMs for A2 scenario, the slowest — for B1 respectively. The model ECHAM5/MPI-OM has been determined as the most successful AOGCM in simulation of climate of Ukraine because statistical analysis has shown that differences of its results with ensemble mean were minimal. Results of this model could be recommended as initial and boundary conditions for simulation of climate of Ukraine with regional climate models.

Вступ. На цей час факт глобального потепління не викликає сумнівів і вважається експериментально доведеним: зростання глобальної температури повітря та океанів, зменшення площі морського льоду, підвищення рівня Світового океану підтверджено довготривалими інструментальними вимірами [Мелешко и др., 2008б; Meehl et al., 2007; Mitchell et al., 2004]. У

зв'язку з цим інтенсивніше розвиваються методи прогнозування глобальних змін клімату та їх можливих наслідків, серед яких на передній план виступають математичні методи моделювання атмосферних процесів [Говоркова и др., 2008; Кричак, 2008; Randall et al., 2007]. У 1988 р. дві спеціалізовані організації ООН — ВМО та ЮНЕП, створили Міжурядову групу

експертів зі змін клімату (МГЕЗК) — Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), яка на сьогодні є найавторитетнішою міжнародною організацією, що займається оцінкою: а) змін глобального та регіонального клімату минулого, сучасного та майбутнього; б) впливу кліматичних змін на глобальному й регіональному рівнях та можливостей адаптації до них; в) ефективності заходів щодо зменшення антропогенного впливу на клімат. Кожні 5—6 років МГЕЗК видає оцінювальну доповідь, в якій відображено результати всебічного аналізу даних спостережень за кліматом і прогнозу його майбутніх змін.

У лютому 2007 р. відбулося загальне засідання провідних авторів Четвертої оцінювальної доповіді (ОД4) МГЕЗК, де було повідомлено причини глобального потепління та роль антропогенного впливу на клімат для різних сценаріїв економічного, технологічного й соціального розвитку світового суспільства. У межах підготовки ОД4 Всесвітньою програмою досліджень клімату був організований безпрецедентний за масштабами і кількістю учасників проект з аналізу прогнозів клімату за допомогою моделей загальної циркуляції атмосфери та океану — СМІРЗ (Coupled Model Intercomparison Project, phase 3). В основі цього проекту — розрахунки клімату ХХ ст. (20С3М) за заданих концентрацій парникових газів та аерозолів, отриманих у результаті спостережень і вимірів, а також розрахунки змін клімату в ХХІ ст. для різних сценаріїв зміни цих концентрацій. Всього у проекті задіяно понад 20 моделей загальної циркуляції атмосфери та океанів (МЗЦАО), розроблених у відомих дослідницьких центрах світу, багато з яких представили результати ансамблевих розрахунків (від різних початкових умов) для кожного типу чисельного експерименту. Зауважимо, що автори ОД4 здобули Нобелівську премію миру 2007 р., що є загальносвітовим визнанням їхніх наукових досягнень.

Оцінки стану кліматичної системи та прогноз її змін у ХХІ ст., які відображені в ОД4, переважно зроблені на основі аналізу та порівняння результатів моделювань із середніми значеннями кліматичних показників сучасного клімату (1980—1999), зокрема, для трьох з шести найвірогідніших сценаріїв розвитку суспільства та економіки за номенклатурою МГЕЗК (SRES-2000) [Nakićenović, Swart, 2000]:

- сценарій А2 — постійний і швидкий ріст населення планети протягом ХХІ ст. і найбільша прогнозована кількість антропо-

генних викидів парникових газів та аерозолів;

- сценарій В1 — зростання чисельності населення до середини ХХІ ст. з подальшим її зменшенням і найнижча прогнозована кількість антропогенних викидів;
- сценарій А1В — зростання чисельності населення, як і в сценарії В1, кількість викидів — середня між сценаріями В1 та А2.

Всі залучені в СМІРЗ моделі прогнозують до кінця ХХІ ст. підвищення глобальної температури повітря та збільшення кількості опадів. За сценарієм А2, підвищення цих кліматичних характеристик становитиме відповідно 2,5—4,4 °С і 2,0—7,5 %; за сценарієм А1В — 2,0—4,5 °С та 1,5—7,0 %; за сценарієм В1 — 1,2—3,2 °С і 2,0—5,0 %. Найбільших кліматичних змін, згідно з прогнозом, зазнаватимуть полярні та субполярні регіони, тропічні та субтропічні пустелі. Найбільші швидкості зростання температури прогнозують на середину ХХІ ст., що відповідає моменту найбільшої прогнозованої чисельності населення планети [Meehl et al., 2007].

За висновками ОД4, Україна не входить до переліку найвразливіших до глобального потепління регіонів планети. У публікації [Christensen et al., 2007] наведено результати моделювань, які отримані для Європи до кінця ХХІ ст. за сценарієм А1В з використанням моделей з СМІРЗ тільки високої складності та їхнього ансамблю. Зауважимо, що одні моделі прогнозують для південних регіонів України зменшення кількості опадів, інші — її збільшення. Всі моделі прогнозують підвищення температури повітря для території України, проте ступінь такого підвищення різний.

Вибір і методика застосування МЗЦАО та сценаріїв для прогнозу на ХХІ ст. регіонального клімату України. Для оцінки можливих змін регіонального клімату України можна використати результати моделювання, які отримані для Європи. Для детальнішого аналізу прогнозованих змін кліматичних умов на території України з поміж 23 МЗЦАО, використаних у проекті СМІРЗ, було відібрано 10 глобальних моделей (табл. 1). У результаті всебічного аналізу ці моделі були визнані найпридатнішими для моделювання майбутнього клімату на території нашої держави: вони є найбільш сучасними, розробленими науковцями провідних країн світу, що викликає до них певний ступінь довіри; крім того, під час відбору особливу увагу приділяли величині просторового кроку моделі (<2,8°) та кількості вертикальних рівнів (>20).

Таблиця 1. Чисельні моделі, використані для оцінки кліматичних змін в Україні в ХХІ ст.

Номер і назва моделі	Рік версії	Країна	Наукова установа-розробник	Горизонтальні кроки та кількість вертикальних рівнів	Розрахунки В1—А1В—А2	Кількість вузлів розрахункової сітки: Україна
1. BCCR-BCM2.0	2005	Норвегія	Bjerknes Centre for Climate Research	T63 (1,9°×1,9°) L31	1—1—1	7×3
2. NCAR-CCSM3	2005	США	National Center for Atmospheric Research	T85 (1,4°×1,4°) L26	9—7—4	13×5
3. CGCM3.1 (T47)	2005	Канада	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	T47 (~2,8°×2,8°) L31	5—5—5	5×2
4. CGCM3.1 (T63)	2005	»	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	T63 (~1,9°×1,9°) L31	1—1—0	7×3
5. ECHAM5/MPI-OM	2005	Німеччина	Max Planck Institute for Meteorology	T63 (1,9°×1,9°) L31	5—4—3	10×4
6. GFDL-CM2.1	2005	США	U.S. Department of Commerce / National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) / Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL)	2,0°×2,5° L24	1—1—1	7×4
7. MIROC3.2-hires	2004	Японія	Center for Climate System Research (University of Tokyo), National Institute for Environmental Studies, and Frontier Research Center for Global Change (JAMSTEC)	T106 (~1,1°×1,1°) L56	1—1—0	16×7
8. MIROC3.2-medres	2004	»	JAMSTEC	T42 (~2,8°×2,8°) L20	3—3—3	7×3
9. MRI-CGCM2.3.2	2003	»	Meteorological Research Institute	T42 (~2,8°×2,8°) L30	5—5—5	7×3
10. UKMO-HadGEM1	2004	Велика Британія	Hadley Centre for Climate Prediction and Research / Met Office	~1,3°×1,9° L38	1—1—1	10×6

Серед усіх вибраних моделей найбільше просторове розділення має МЗЦАО Японського наукового центру кліматичних систем (крок горизонтальної сітки 1,1°, 56 вертикальних рівнів). Проаналізовано також результати моделювання МЗЦАО наукових кліматичних центрів Норвегії, США, Канади, Німеччини, Великої Британії та Японії [Randall et al., 2007].

Деякі з вибраних моделей для кожного сценарію мають кілька розрахунків і, отже, в аналізі було використано результати 32 розрахунків для сценарію В1, 29 — для А1В і 23 розрахунки — для А2 (для цього сценарію немає розрахунків моделей CGCM3.1-T63 і MIROC3.2-hires). Загалом (табл. 1) для прогнозу на ХХІ ст. кліматичних змін в Україні використано 84 розра-

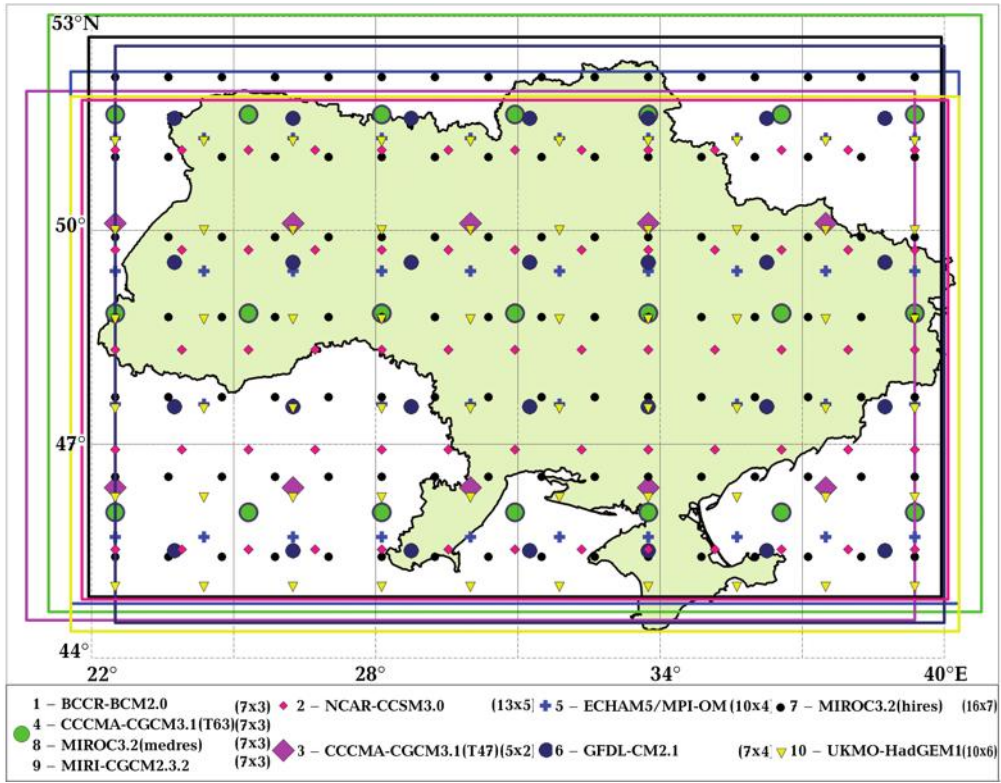


Рис. 1. Розрахункові сітки МЗЦАО за даними табл. 1 і відповідні їм області прогнозування клімату (рамки) для території України.

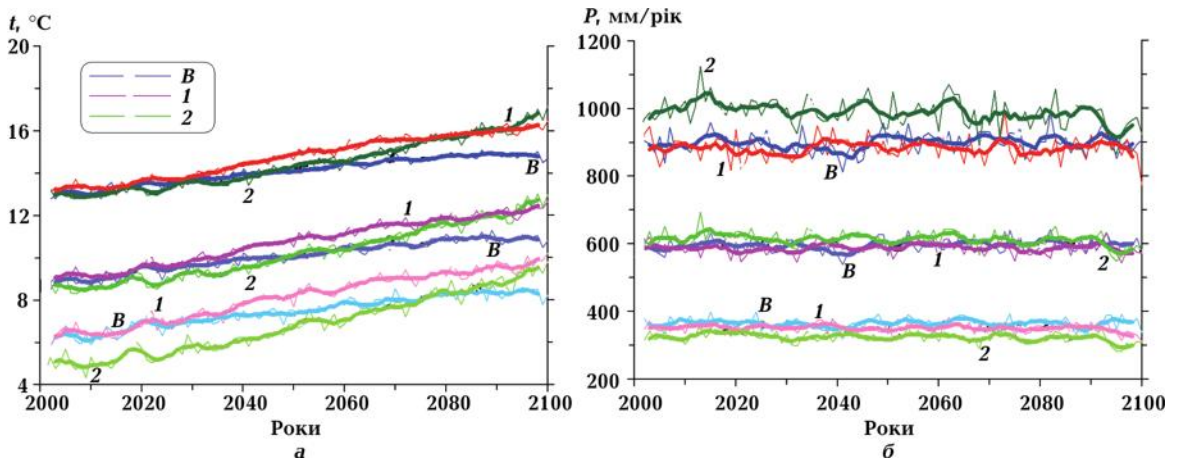


Рис. 2. Прогноз ансамблю з 10 МЗЦАО на XXI ст. для мінімальних, середніх і максимальних середньорічних температур повітря (а) та кількості опадів (б), усереднених для території України за різними сценаріями: 1 — сценарій А1В, 2 — сценарій А2, В — сценарій В1. Потовщені лінії — п'ятирічні ковзні середні.

хунки кліматичних характеристик, одержаних з 10 МЗЦАО за трьома ймовірними сценаріями розвитку суспільства.

Методика аналізу результатів моделювання МЗЦАО для України подібна до методики, викладеної у статті [Мелешко и др., 2008а]. По-перше, було надіслано запит до архіву СМІРЗ

та отримано середньомісячні дані температури повітря та кількості опадів на XXI ст. для 10 МЗЦАО (всього 84 наборів даних для двох кліматичних характеристик). По-друге, було виділено територію України за її географічними координатами з глобальних даних. Кількість вузлів розрахункової сітки МЗЦАО, що потра-

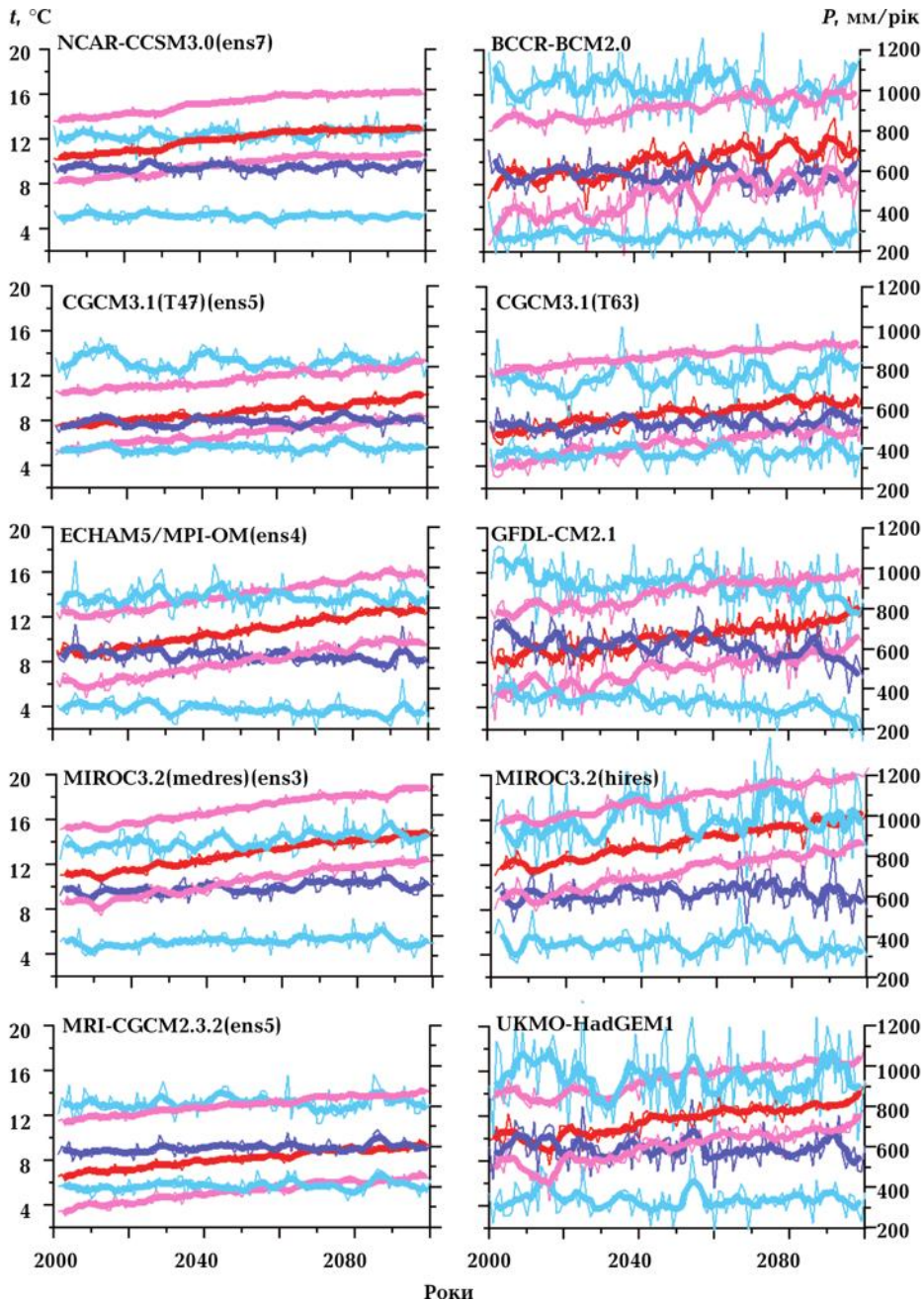


Рис. 3. Сценарій А1В. Прогноз 10 МЗЦАО на XXI ст. для мінімальних, середніх і максимальних середньорічних температур повітря (червоні та рожеві лінії) та кількості опадів (сині та блакитні лінії), усереднених для території України. Потовщені лінії — п'ятирічні ковзні середні.

пили 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 показано на рис. 1.

З'ясувалося, що тільки 4 моделі мають для території України однакові розрахункові сітки і відповідні їм області прогнозування, у решти моделей вони різні. Тому порівняння результатів прогнозування змін клімату різних МЗЦАО по території потребує спеціальних методів інтерполяції. Було проведено первісний аналіз

моделних даних і визначено загальні тенденції зміни клімату за усередненими, мінімальними та максимальними кліматичними характеристиками для всієї території України (виділеної прямокутної області на рис. 1). Для цього в першу чергу було отримано ансамблеві середні значення для тих моделей, що мали більше одного розрахунку, а потім для кожної з 10 МЗЦАО за середньомісячними даними розраховано температуру повітря та кількість опадів,

середні за сезони, роки та десятиріччя XXI ст.

Прогнозовані на XXI ст. зміни середньорічних кліматичних характеристик: приземної температури повітря та кількості опадів в Україні. Визначено усереднені, мінімальні та максимальні значення приземної температури повітря та кількості опадів для всієї території України (виділеної прямокутної області). Отримані дані у вигляді часових серій (залежність від часу) ансамблевих осереднених значень для кожного з трьох сценаріїв показано на рис. 2.

Як видно з рис. 2, а, усі моделі прогнозують стаке підвищення температури повітря протягом XXI ст. для всіх сценаріїв. Ансамблевий коефіцієнт лінійного тренду середньорічних температур для сценарію B1 — $0,023$ °C/рік, A1B — $0,037$ та сценарію A2 — $0,044$ °C/рік. Очевидно також, що для всіх сценаріїв швидкість зростання середніх мінімальних температур більша як за середньорічні, так і за максимальні значення, для яких ансамблевий коефіцієнт лінійного тренду відповідно для сценарію B1 дорівнює $0,021$ °C/рік, A1B — $0,035$, A2 — $0,040$ °C/рік. Максимальну прогнозовану швидкість зростання середніх мінімальних температур визначено для сценарію A2, для якого ансамблевий коефіцієнт лінійного тренду помітно більший, ніж для інших сценаріїв, і дорівнює $0,048$ °C/рік. Для інших сценаріїв цей коефіцієнт також більший порівняно з середньорічними та максимальними температурами: для B1 — $0,025$, для A1B — $0,040$ °C/рік.

За динамікою річних сум опадів (рис. 2, б) відзначається суттєва дисперсія у часі, більша порівняно з динамікою температури, навіть для п'ятирічних ковзних середніх, що є цілком природно. Втім за такого коливального характеру зміни величини не встановлюється чіткий тренд середньорічної кількості опадів у XXI ст. для всіх сценаріїв.

Усереднені ансамблеві значення середньорічних сум опадів змінюються мало. За порівнянням прогностичних даних, отриманих для кожного сценарію, найбільші різниці між сценаріями визначаються в прогнозі середніх максимальних сум опадів. Для сценарію A2 вони прогнозуються значно більшими (майже на 100 мм), але їхня кількість до кінця XXI ст. зменшується з коефіцієнтом лінійного тренду $-0,44$ мм/рік. До того ж, у сценарії A2 середні мінімальні суми опадів також менші, ніж в інших сценаріях. Отже, можна зробити висновок, що для України сценарій A2 відрізняється більшою екстремальністю щодо кількості опадів, як максимальних, так і мінімальних.

Рис. 3 ілюструє різниці в коливаннях значень моделей, для яких виконано декілька розрахунків і представлено їх ансамблеве середнє (ліва колонка, в дужках — кількість розрахунків в ансамблі моделі) і тих МЗЦАО, для яких виконано тільки один розрахунок (права колонка). Якщо є один розрахунок, то і температура повітря, і, навіть більшою мірою, кількість річних опадів мають значні коливання значень рік у рік. З одного боку, такий часовий хід середньорічної температури повітря та річної кількості опадів є природним і свідчить про те, що в моделях фізичні процеси, що впливають на значення цих основних характеристик клімату, відтворюються досить правдоподібно. Однак з іншого боку, така мінливість у часі зазначених характеристик маскує тенденції зміни клімату в Україні в XXI ст. Як доведено в багатьох останніх дослідженнях і всебічних аналізах результатів чисельного моделювання минулого та сучасного клімату, найближчі до експериментальних значення кліматичних характеристик отримано саме у разі використання усереднення за декількома розрахунками однієї моделі, наприклад, від різних початкових умов і подальшого усереднення для декількох моделей [Говоркова и др., 2008; Мелешко и др., 2008а; Meehl et al., 2007; Randall et al., 2007]. Тому поданий на рис. 2 прогноз на XXI ст. кліматичних характеристик можна вважати найімовірнішим для кожного з представлених сценаріїв.

Прогнозовані зміни клімату в Україні по десятиріччях XXI ст. з використанням різних моделей і сценаріїв. Наочніше тенденції та значення зміни температури повітря і кількості опадів у наступному, серединному та останньому десятиріччях XXI ст. в Україні відносно першого десятиріччя (сучасний клімат) для всіх залучених моделей та їх ансамблю показано на рис. 4. У табл. 2 і 3 наведено різниці значень середньорічних температур повітря та кількості опадів по десятиріччях XXI ст. порівняно з періодом 2001—2010 рр. у розрахунках, відібраних МЗЦАО для сценаріїв B1, A1B та A2.

Для середньорічної температури повітря (рис. 4, табл. 2) на наступне десятиріччя модельні дані показують як підвищення максимально на $0,7$ °C (B1, CGCM3.1-T47), так і зниження на $-0,8$ °C (A1B, UKMO-HadGEM1). Усереднене значення за ансамблем моделей підвищення температури повітря у наступному десятиріччі відносно сучасного періоду (2001—2010) становить $0,3 \pm 0,3$ (B1), $0,1 \pm 0,4$ (A1B) та $0,2 \pm 0,2$ °C (A2). Істотне підвищення середньорічної температури повітря очікується після 2030 р., коли

всі моделі за всіма сценаріями прогнозують потепління порівняно з першим десятиріччям XXI ст., максимальне ж значення за четверте десятиліття становить $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (сценарій B1, MIROC3.2-hires). На середину XXI ст. прогнозується підвищення температури порівняно із сучасним десятиріччям для сценарію B1 від $0,2$ до $2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ з усередненим значенням $1,1\pm 0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$, A1B — від $1,0$ до $2,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ з усередненим значенням $1,5\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, для сценарію A2 — від $0,8$ до $1,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ з усередненим значенням $1,2\pm 0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. У подальшому до кінця століття переважно зберігається тенденція до підвищення середньорічної температури повітря, усередненої за ансамблем моделей. Втім деякі моделі (BCCR-BCM2.0, CCCMA-CGCM3.1-T47, ECHAM5/MPI-OM), попри загальну тенденцію до потепління, прогнозують несуттєве ($0,1$ — $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) короткочасне (одне десятиріччя) зниження температури, якому передують значне потепління. Інакше кажучи, за даними цих окремих моделей прогнозується, що потепління в Україні в XXI ст., як і в попередньому XX ст., буде не одноманітним, а з певними відносно теплішими та холоднішими періодами, що є цілком природно. Зауважимо, що на середину XXI ст. модель BCCR-BCM2.0 у сценарії B1 показала найменші значення підвищення температури ($0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) після і перед істотнішим потеплінням, що урешті-решт і привело до отримання найнижчого значення серед усіх моделей та сценаріїв для кінця століття ($0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$), якому передувало значно більший показник ($1,9\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Цікаво, що швидкість потепління за сценарієм A2 на початку XXI ст. найменша, але починає суттєво збільшуватися, порівняно з двома іншими сценаріями, після середини століття, коли за сценаріями A1B і B1 чисельність населення почне зменшуватися, натомість за сценарієм A2 — стрімко зростати. За сценарієм B1 максимум підвищення температури повітря у в XXI ст. відносно сучасного періоду (2001—2010) моделі прогнозують на період 2081—2090 рр. ($3,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, модель 10 UKMO-HadGEM1), а за сценаріями A1B і A2 — на період 2091—2100 рр.; значення підвищення температури дорівнюють відповідно $4,2$ (MIROC3.2(hires)) і $4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ECHAM5/MPI-OM).

Отже, наприкінці XXI ст. ансамбль МЗЦАО прогнозує підвищення температури, усереднене для всієї території України відносно періоду 2001—2010 рр., для сценарію B1 — від $0,7$ до $3,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ з усередненим значенням $2,0\pm 0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, сценарію A1B — від $2,4$ до $4,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ з усередненим значенням $3,1\pm 0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, сценарію A2 — від $2,6$ до

$4,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ з усередненим значенням $3,8\pm 0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зазначимо, що отримані межі прогнозованого потепління дещо менші наведених вище значень для Європи, що і зрозуміло, адже проаналізовано дані відносно періоду до 2001—2010 рр., а не 1980—1999 рр., як в ОД4 [Christensen et al., 2007], і тільки для виділеної області — території України.

Прогнози відібраних МЗЦАО щодо зміни середніх річних сум опадів на XXI ст. відносно періоду 2001—2010 рр. (табл. 3, рис. 4) суттєво розрізняються. Найменші зміни в режимі опадів прогнозовано для сценарію B1: крім середини століття, коли має бути зменшення на $-0,3\%$, в усі інші десятиріччя несуттєво збільшиться кількість опадів до $2,3\%$ з прикінцевим значенням $1,8\pm 5,1\%$.

Для сценарію A1B усереднені значення за модельним ансамблем практично знаходяться в межах 1% (виняток — наступне десятиріччя, коли прогнозується зменшення кількості опадів на $1,4\%$), але в окремі десятиріччя значення як збільшення, так і зменшення річної суми опадів у кожній моделі набагато більші. Всі моделі прогнозують періоди збільшення кількості опадів за їхнім зменшенням. Навіть модель GFDL-CM2.1, яка в кожне десятиріччя XXI ст. прогнозує набагато менше опадів, ніж у період 2001—2010 рр., чим вирізняється із загальної картини всіх моделей, на четверте, шосте і дев'яте десятиріччя прогнозує більше кількості опадів, ніж в попереднє. Тим не менш ця модель прогнозує зменшення кількості опадів практично на чверть до кінця сторіччя, що і відобразилося на усередненому ансамблевому значенні ($-0,8\%$). Виключення моделі GFDL-CM2.1 із ансамблевого усереднення (практично, це один розрахунок) дає збільшення кількості опадів у наступне, серединне та останнє десятиріччя: на $0,7$; $1,4$ і $2,2\%$ відповідно.

В сценарії A2 усереднена кількість опадів в усіх, крім останнього, десятиріччях більша, ніж у першому. Проте для кінця століття отримано зменшення кількості опадів на $-2,9\pm 8,9\%$. Навіть за виключення проблемної моделі GFDL-CM2.1 із ансамблевого усереднення, прогнозують зменшення кількості опадів в останнє десятиріччя на $-0,6\pm 6,6\%$, хоча для попереднього — отримано збільшення на $3,8\%$.

Вибір оптимальної моделі для прогнозування кліматичних змін на території України. Як зазначено у публікаціях [Говоркова и др., 2008; Мелешко и др., 2008а; Meehl et al., 2007; Randall et al., 2007] та вище, усереднення результатів розрахунків декількох моделей

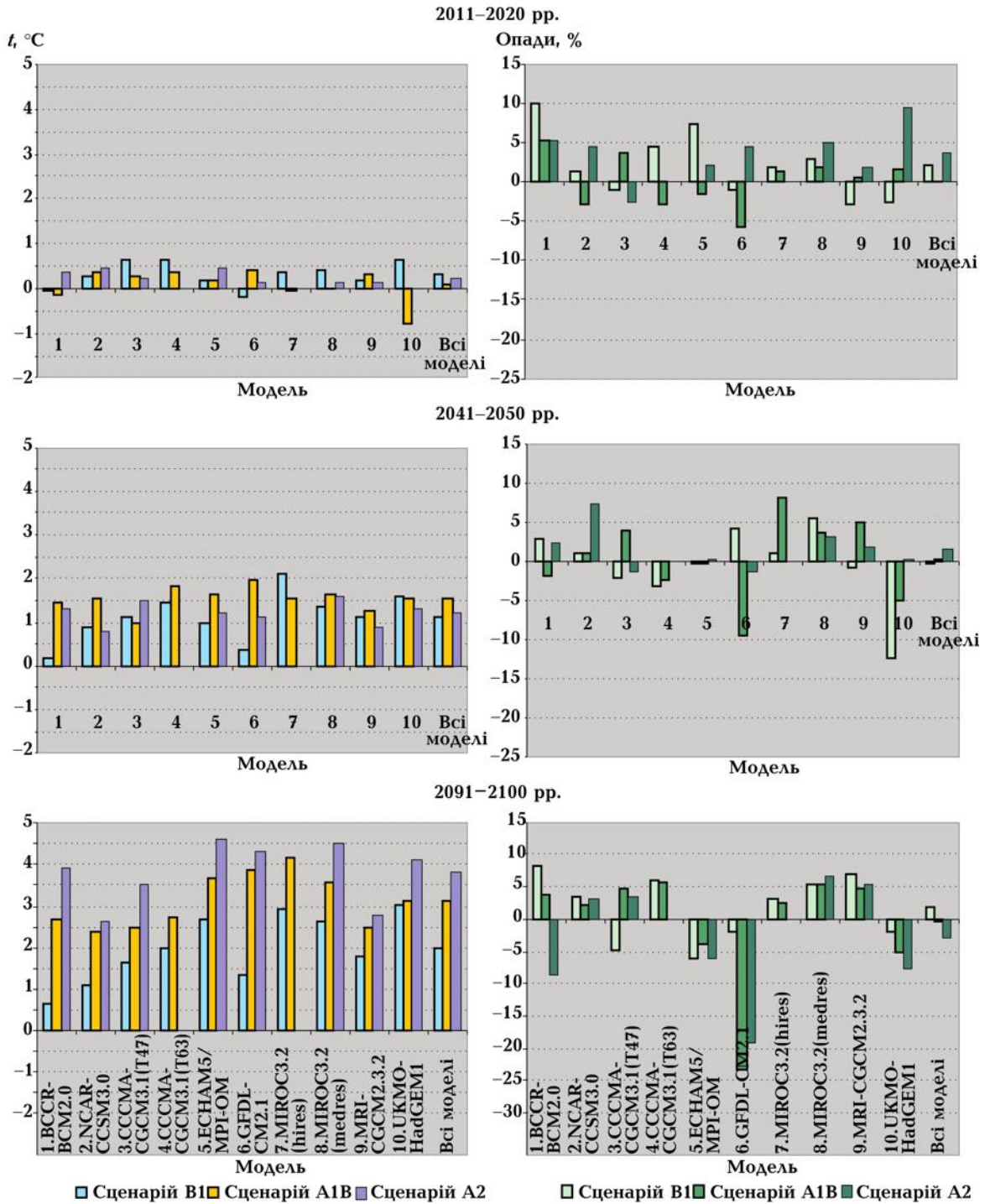
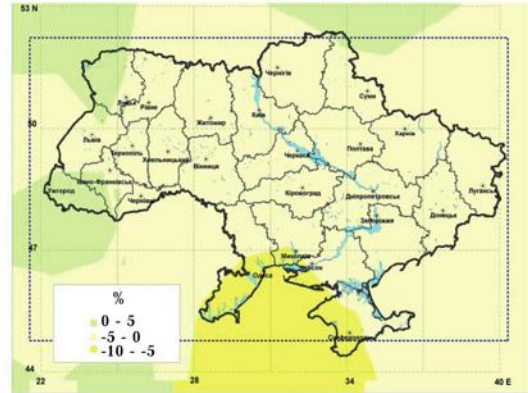
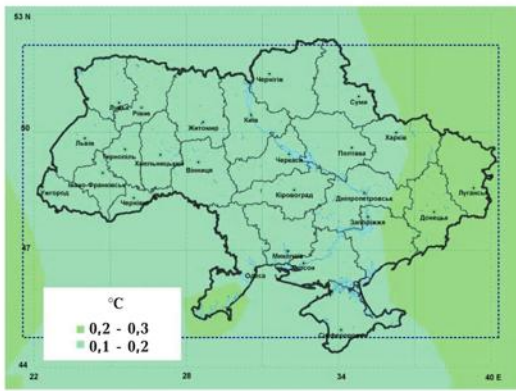


Рис. 4. Зміна середньорічних температур повітря (а) та кількості опадів (б) для різних сценаріїв у наступному, середньому та останньому десятиріччях XXI ст. порівняно з періодом 2001—2010 рр.

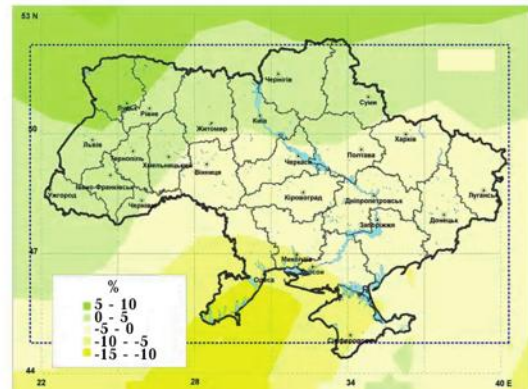
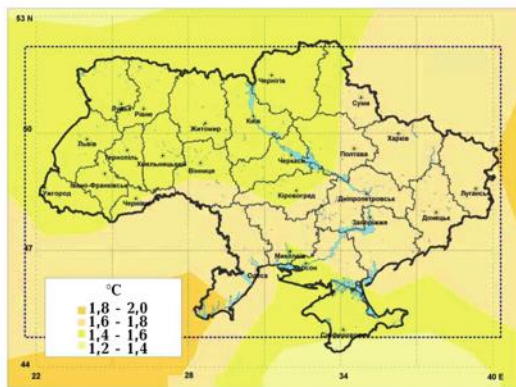
(ансамблеве усереднення) давало найменші похибки в контрольних чисельних експериментах у розрахунках минулого та сучасного клімату. За аналогією, найімовірнішу проекцію кліматичних змін на будь-якій території (прогноз на декілька десятиліть чи століть) можна

отримати саме внаслідок ансамблевого усереднення, як це виконано нами для України і наведено вище. Однак серед такого ансамблю моделей можна вибрати найближчу до ансамблевого середнього модель з найменшими похибками за статистичними оцінками. З метою

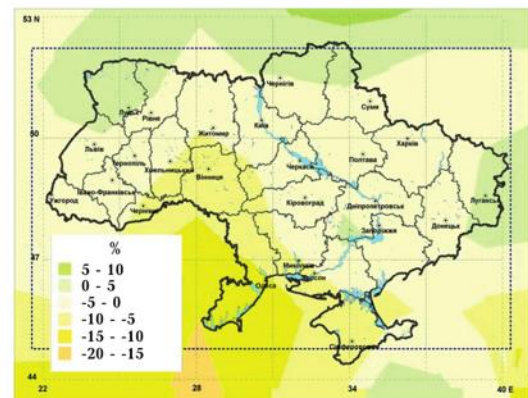
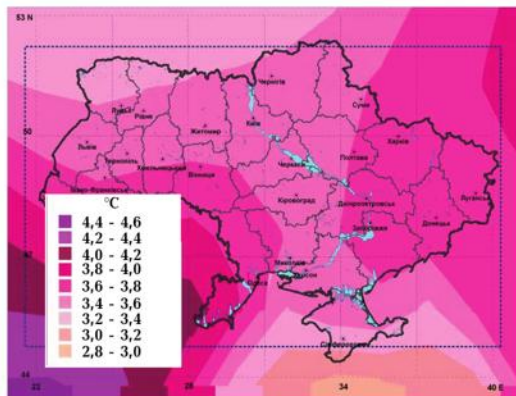
2011 – 2020 рр.



2041 – 2050 рр.



2091 – 2100 рр.



а

б

Рис. 5. Зміна в Україні річних температур повітря (а) і кількості опадів, % (б), середніх за десятиріччя XXI ст., порівняно з періодом 2001—2010 рр. Дані ансамблю 4 розрахунків моделі ECHAM5/MPI-OM за сценарієм А1В.

виявлення найбільш «успішної» МЗЦАО для прогнозування можливих майбутніх кліматичних змін в Україні та з урахуванням подальшого застосування результатів моделювання МЗЦАО на XXI ст. як початкових і граничних умов для розрахунків регіональних моделей клімату для території України проведено аналіз для середньорічних температур повітря та

річних сум опадів, отриманих з використанням 10 вищезгаданих МЗЦАО (див. табл. 1) за збалансованим сценарієм А1В.

За методикою цього аналізу визначено різниці між значеннями середньорічної температури повітря та річної суми опадів, отриманими усередненням за ансамблем усіх розрахунків усіх моделей, та кожної моделі протягом 100

Таблиця 2. Зміна в Україні середньорічної температури повітря (°C) по десятиріччях ХХІ ст. порівняно з періодом 2001 – 2010 рр.

Модель	Десятиріччя									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<i>Сценарій В1</i>										
1. BCCR-BCM2.0	-0,1	0,6	0,7	0,2	0,7	1,0	1,7	1,9	0,7	
2. NCAR-CCSM3.0	0,3	0,4	0,6	0,9	1,0	1,1	1,2	1,1	1,1	
3. CCCMA-CGCM3.1(T47)	0,7	0,6	0,9	1,1	1,3	1,5	1,6	1,5	1,6	
4. CCCMA-CGCM3.1(T63)	0,6	1,4	1,5	1,5	1,7	2,1	1,8	2,1	2,0	
5. ECHAM5/MPI-OM	0,2	0,4	0,3	1,0	1,0	1,6	2,3	2,1	2,7	
6. GFDL-CM2.1	-0,2	-0,1	0,2	0,4	0,2	0,6	1,2	1,3	1,3	
7. MIROC3.2-hires	0,4	0,9	1,8	2,1	2,4	2,9	2,5	3,0	2,9	
8. MIROC3.2-medres	0,4	0,6	1,0	1,4	1,7	2,2	2,3	2,4	2,6	
9. MRI-CGCM2.3.2	0,2	0,7	0,8	1,1	1,3	1,5	1,6	1,7	1,8	
10. UKMO-HadGEM1	0,6	1,0	1,4	1,6	2,3	2,1	2,2	3,5	3,0	
Середнє, °C	0,3	0,7	0,9	1,1	1,4	1,7	1,8	2,1	2,0	
Стандартне відхилення (σ), °C	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,5	0,7	0,8	
<i>Сценарій А1В</i>										
1. BCCR-BCM2.0	-0,2	-0,2	0,6	1,4	1,5	2,5	2,3	2,2	2,7	
2. NCAR-CCSM3.0	0,4	0,6	1,4	1,6	2,0	2,3	2,3	2,4	2,4	
3. CCCMA-CGCM3.1(T47)	0,3	0,6	0,7	1,0	1,5	1,8	1,6	2,2	2,5	
4. CCCMA-CGCM3.1(T63)	0,4	1,2	1,1	1,8	1,8	2,1	2,6	2,8	2,7	
5. ECHAM5/MPI-OM	0,2	0,7	1,2	1,6	2,1	2,5	3,0	3,9	3,7	
6. GFDL-CM2.1	0,4	0,6	1,0	2,0	1,9	2,5	2,9	3,1	3,9	
7. MIROC3.2-hires	0,0	0,5	1,5	1,5	2,6	2,8	3,3	3,7	4,2	
8. MIROC3.2-medres	0,0	0,6	0,9	1,6	2,1	2,6	2,8	3,1	3,6	
9. MRI-CGCM2.3.2	0,3	0,7	1,0	1,3	1,6	1,8	2,2	2,2	2,5	
10. UKMO-HadGEM1	-0,8	0,1	0,4	1,5	1,7	2,2	2,3	2,5	3,1	
Середнє, °C	0,1	0,5	1,0	1,5	1,9	2,3	2,6	2,8	3,1	
Стандартне відхилення (σ), °C	0,4	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,5	0,6	0,7	
<i>Сценарій А2</i>										
1. BCCR-BCM2.0	0,3	0,4	0,8	1,3	2,2	2,4	3,3	3,8	3,9	
2. NCAR-CCSM3.0	0,5	0,4	0,9	0,8	1,5	1,8	2,3	2,6	2,6	
3. CCCMA-CGCM3.1(T47)	0,2	0,6	1,1	1,5	1,7	2,0	2,5	3,1	3,5	
4. CCCMA-CGCM3.1(T63)										
5. ECHAM5/MPI-OM	0,5	0,4	0,7	1,2	1,9	2,7	3,3	4,3	4,6	
6. GFDL-CM2.1	0,2	0,0	0,3	1,1	1,7	1,5	2,4	3,0	4,3	
7. MIROC3.2-hires										
8. MIROC3.2-medres	0,1	0,7	1,1	1,6	2,0	3,0	3,2	3,7	4,5	
9. MRI-CGCM2.3.2	0,1	0,1	0,6	0,9	1,2	1,6	2,0	2,1	2,8	
10. UKMO-HadGEM1	0,0	0,4	0,4	1,3	1,7	2,2	2,8	3,3	4,1	
Середнє, °C	0,2	0,4	0,7	1,2	1,7	2,2	2,7	3,2	3,8	
Стандартне відхилення (σ), °C	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,5	0,5	0,7	0,8	

років (для моделі 1 — тільки 99 років, оскільки для неї був розрахунок до 2099 р., а не 2100 р., як для інших). Далі було проаналізовано ряди отриманих значень відхилень від ансамблевого середнього (табл. 4, 5).

За даними табл. 4, модель 5 (ECHAM5/MPI-OM) має найменші абсолютні похибки відносно ансамблевих значень щодо середньорічних температур, які знаходяться в межах від -1,0

до 1,2 °C, а в середньому дорівнюють 0,0. Тому ця модель цілком виправдано можна вважати найбільш «успішною» у прогнозуванні можливих майбутніх змін термічного режиму України. Щодо річних сум опадів (табл. 5) найбільш «успішною» є модель 9 — MRI-CGCM2.3.2, яка має найменші значення похибок відносно ансамблевого середнього — $1 \pm 5\%$. Модель 5 (ECHAM5/MPI-OM) має середні значення від-

Таблиця 3. Зміна в Україні середньорічної кількості опадів (%) по десятиріччях XXI ст. порівняно з періодом 2001 – 2010 рр.

Модель	Десятиріччя									
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
<i>Сценарій B1</i>										
1. BCCR-BCM2.0	9,9	6,9	4,4	3,0	7,8	8,4	10,7	9,5	8,2	
2. NCAR-CCSM3.0	1,3	1,9	1,8	1,2	1,3	2,3	3,1	2,8	3,3	
3. CCCMA-CGCM3.1(T47)	-0,9	1,6	-3,3	-2,0	-1,6	-6,4	0,8	-2,1	-4,9	
4. CCCMA-CGCM3.1(T63)	4,4	-5,4	-0,9	-3,1	-1,1	7,4	3,5	0,8	5,9	
5. ECHAM5/MPI-OM	7,4	7,2	0,2	-0,2	4,7	-0,6	-2,7	3,3	-6,0	
6. GFDL-CM2.1	-1,0	2,6	5,2	4,2	9,7	7,7	1,0	-2,4	-1,8	
7. MIROC3.2-hires	1,9	-0,9	-9,2	1,0	-3,4	-5,7	3,5	4,2	3,2	
8. MIROC3.2-medres	2,9	6,0	5,2	5,7	5,4	5,1	7,0	8,3	5,5	
9. MRI-CGCM2.3.2	-2,8	-2,0	-1,4	-0,8	1,6	2,8	0,2	0,8	6,9	
10. UKMO-HadGEM1	-2,7	-9,5	-1,6	-12,3	-2,7	2,3	-9,2	-2,4	-1,9	
Середнє, %	2,0	0,8	0,0	-0,3	2,2	2,3	1,8	2,3	1,8	
Стандартне відхилення (σ), %	4,2	5,4	4,4	5,0	4,6	5,3	5,4	4,2	5,1	
<i>Сценарій A1B</i>										
1. BCCR-BCM2.0	5,3	2,8	2,6	-1,9	4,4	0,5	-3,7	2,2	3,9	
2. NCAR-CCSM3.0	-2,8	-0,5	-2,7	1,1	-3,5	-1,1	0,9	-1,6	2,3	
3. CCCMA-CGCM3.1(T47)	3,8	-0,6	1,6	4,0	2,1	0,8	7,3	2,9	4,6	
4. CCCMA-CGCM3.1(T63)	-2,8	-6,9	4,2	-2,4	3,9	1,9	1,5	2,7	5,8	
5. ECHAM5/MPI-OM	-1,6	2,2	-3,9	-0,3	-5,1	-3,4	-4,8	-8,3	-3,8	
6. GFDL-CM2.1	-5,7	-9,5	-5,5	-9,6	-3,1	-9,1	-15,5	-12,5	-23,4	
7. MIROC3.2-hires	1,3	-1,3	4,9	8,1	1,7	9,8	7,5	3,2	2,4	
8. MIROC3.2-medres	1,9	0,9	4,7	3,7	3,3	5,5	9,9	10,6	5,4	
9. MRI-CGCM2.3.2	0,5	2,1	2,2	5,0	3,1	4,6	2,5	7,2	4,8	
10. UKMO-HadGEM1	1,5	-3,3	-3,0	-5,1	-1,9	-4,5	-4,9	-2,9	-5,0	
Середнє, %	0,1	-1,4	0,5	0,3	0,5	0,5	0,1	0,3	-0,3	
Стандартне відхилення (σ), %	3,3	4,1	3,9	5,3	3,5	5,4	7,6	6,9	8,9	
<i>Сценарій A2</i>										
1. BCCR-BCM2.0	5,1	-2,8	0,3	2,5	-0,6	1,0	0,4	-3,2	-8,6	
2. NCAR-CCSM3.0	4,4	7,4	1,5	7,5	7,0	4,2	5,0	11,6	3,0	
3. CCCMA-CGCM3.1(T47)	-2,6	-0,8	-2,3	-1,3	-2,6	0,9	-0,6	0,5	3,3	
4. CCCMA-CGCM3.1(T63)										
5. ECHAM5/MPI-OM	2,2	-0,2	2,3	0,3	-2,5	-3,2	-2,8	-9,7	-6,1	
6. GFDL-CM2.1	4,6	-1,0	-2,8	-1,3	-6,4	0,4	-12,6	-16,3	-19,0	
7. MIROC3.2-hires										
8. MIROC3.2-medres	5,0	2,7	-0,7	3,2	2,3	5,0	7,9	10,4	6,5	
9. MRI-CGCM2.3.2	1,8	1,2	1,8	1,7	4,7	2,5	2,1	10,0	5,3	
10. UKMO-HadGEM1	9,3	3,0	3,5	0,3	7,1	3,8	1,9	7,3	-7,8	
Середнє, %	3,7	1,2	0,5	1,6	1,1	1,8	0,2	1,3	-2,9	
Стандартне відхилення (σ), %	3,4	3,2	2,2	2,9	5,0	2,7	6,1	10,4	8,9	

хилень від ансамблевого середнього -4 ± 8 %, що є також досить прийнятною похибкою і, так би мовити, другим результатом після моделі 9. Зауважимо, що хоча моделі 1 та 10 мають менші абсолютні відхилення від ансамблевого середнього (-1 та 1 % відповідно), але їх стандартні відхилення та дисперсії набагато більші, ніж у моделі 5. І це є ще одним під-

твердженням вищезазначеного положення стосовно того, що осереднення за ансамблем моделювань однієї моделі згладжує часові серії розрахованих характеристик. Так, саме у моделей 1, 4, 6, 7 та 10, які мали лише один розрахунок, значення дисперсії найбільші (табл. 4, 5), що наочно продемонстровано на рис. 3. Інші ж п'ять моделей, в тому числі мо-

дель 5, мають менші значення стандартних відхилень і, відповідно, дисперсії.

Отже, за двома основними досліджуваними кліматичними характеристиками модель 5 (ESNAM5/MPI-OM) слід визнати як найбільш «успішну» та оптимальну в моделюванні клімату України. Результати цієї моделі можна рекомендувати для використання як початкові та граничні умови для регіональних моделей клімату України.

Ще один достатньо очевидний висновок за даними табл. 4, 5 полягає в тому, що вибрані моделі досить рівномірно відображають як температуру повітря, так і кількість опадів відносно ансамблевого середнього. Інакше кажучи, вибір саме цього набору з 10 моделей для аналізу кліматичних змін в Україні можна також вважати коректним і виправданим.

Вище доведено, що модель ESNAM5/MPI-OM є найбільш «успішною» та оптимальною у відображенні клімату XXI ст. в Україні, тому детальніше розглянемо результати моделювання за цією моделлю (рис. 5). За розподілом значень кліматичних характеристик прогнозовані зміни середніх значень температури повітря та сум опадів досить нерівномірні в межах України. Впродовж усього століття найсуттєвіше підвищення температури відбуватиметься у східній частині України та на півдні Одеської обл. Натомість, кількість опадів збільшуватиметься переважно на півночі, а у південній та південно-західній частинах країни прогнозується зменшення середньорічних сум опадів. Очевидно, що детальніший просторовий прогноз змін клімату за допомогою МЗЦАО отримати неможливо внаслідок обмеження розмірами координатної комірки.

Отже, відповідно до результатів моделювання з використанням МЗЦАО на території України протягом XXI ст. слід очікувати підвищення середньорічної температури повітря. Щодо річної кількості опадів однозначної відповіді поки що немає. До того ж, вище наведено результати аналізу тільки середньорічних та усереднених для всієї території України кліматичних характеристик. Однак і територія нашої держави є досить великою і неоднорідною стосовно кліматичних умов [Клімат..., 2003], і зміни за сезонами можуть бути різними [Кричак, 2008; Мелешко и др., 2008а, б; Паламарчук та ін., 2010; Christensen et al., 2007; Meehl et al., 2007]. Прогнозовані зміни клімату в Україні вочевидь матимуть виражений сезонний та регіональний характер, що потребує подальших досліджень, а саме залучення регіональних моделей клімату, в яких можливо зменшити горизонтальні кроки розрахунків до 10 км у гідростатичних

моделях і до кількох кілометрів — у негідростатичних [Краковська та ін., 2008; Кричак, 2008; Паламарчук та ін., 2009; Christensen et al., 2007].

Висновки. Оцінки стану кліматичної системи та прогноз її змін у XXI ст., що відображені у Четвертій оцінювальній доповіді (ОД4), переважно ґрунтуються на порівнянні результатів моделювань сучасних і майбутніх кліматичних умов. Прогноз кліматичних характеристик зроблено для трьох з шести найімовірніших сценаріїв розвитку суспільства та економіки за номенклатурою МГЕЗК (SRES-2000): A2 — постійне і швидке зростання чисельності населення планети протягом XXI ст. та найбільша прогнозована кількість антропогенних викидів парникових газів та аерозолів; B1 — зростання чисельності населення до середини XXI ст. з подальшим її зменшенням і найнижча прогнозована кількість антропогенних викидів; A1B — чисельність населення, як і в сценарії B1, кількість викидів — середня між сценаріями B1 та A2 із збалансованим використанням викопних і відновлюваних джерел енергії.

Усі залучені в СМІР3 (Coupled Model Intercomparison Project, phase 3) моделі прогнозують підвищення глобальної температури повітря та збільшення кількості опадів до кінця XXI ст. за сценарієм A2 на 2,5—4,4 °C та 2,0—7,5 % за сценарієм A1B — на 2,0—4,5 °C та 1,5—7,0 %; за сценарієм B1 — на 1,2—3,2 °C та 2,0—5,0 % відповідно. Згідно з прогнозом, найбільших кліматичних змін зазнаватимуть полярні та субполярні регіони, тропічні та субтропічні пустелі. Найбільшу швидкість зростання температури прогнозують на середину XXI ст., що відповідає періоду найбільшої прогнозованої чисельності населення планети.

Для отримання прогностичних значень кліматичних характеристик для території України у XXI ст. сформовано ансамбль з 10 МЗЦАО і проаналізовано результати їх розрахунків (загалом 84 розрахунки) для 3 сценаріїв (B1, A1B, A2).

За результатами обробки даних, на кінець XXI ст. МЗЦАО прогнозують підвищення середньорічної температури повітря, усереднене для всієї території України відносно періоду —2001—2010 рр., для сценарію B1 від 0,7 до 3,0 °C з усередненим значенням 2,0±0,8 °C, A1B — від 2,4 до 4,2 °C з усередненим значенням 3,1±0,7 °C, для сценарію A2 — від 2,6 до 4,6 °C з усередненим значенням 3,8±0,8 °C.

Прогнози відібраних МЗЦАО щодо зміни середніх річних сум опадів в Україні в XXI ст. відносно періоду 2001—2010 рр. суттєво розрізняються і мають великий діапазон відносних до сучасних значень: від -23,4 до 11,6 % в окремі десятиліття. Прогнози усереднених

Таблиця 4. Статистичні характеристики відхилень середньорічних температур повітря (°С), отриманих у різних МЗЦАО, від їх ансамблевого середнього

Статистичні характеристики	Модель (див. табл.1)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Кількість років	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Середнє	-0,7	1,3	-1,9	-2,1	0,0	-0,5	3,3	2,2	-2,6	0,9
Мінімум	-3,6	-0,5	-3,4	-3,4	-1,0	-2,7	1,9	1,3	-3,7	-1,7
Максимум	1,6	2,2	-0,7	-0,6	1,2	1,2	4,8	3,1	-1,5	2,9
Середньоквадратична помилка	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,1
Довірчий інтервал, P=95 %	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Стандартне відхилення	1,0	0,4	0,5	0,6	0,5	0,9	0,6	0,4	0,4	0,7
Дисперсія	1,1	0,2	0,3	0,4	0,2	0,7	0,4	0,2	0,2	0,5
Перший кватиль	-1,4	1,0	-2,3	-2,5	-0,3	-1,1	2,9	2,0	-2,9	0,6
Медіана	-0,6	1,3	-1,9	-2,1	0,0	-0,5	3,3	2,3	-2,6	0,9
Третій кватиль	0,1	1,6	-1,6	-1,6	0,3	0,1	3,8	2,5	-2,2	1,3

Таблиця 5. Статистичні характеристики відхилень середньорічної кількості опадів (%), отриманих у різних МЗЦАО, від їх ансамблевого середнього

Статистичні характеристики	Модель (див. табл. 1)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Кількість років	99	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Середнє	-1	5	-10	-11	-4	5	5	9	1	1
Мінімум	-23	-11	-23	-29	-18	-31	-21	-5	-9	-29
Максимум	23	20	5	11	21	32	43	29	21	41
Середньоквадратична помилка	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Довірний інтервал, P=95 %	2	1	1	2	2	3	2	1	1	2
Стандартне відхилення	11	6	5	9	8	13	11	7	5	12
Дисперсія	112	35	28	73	59	170	129	49	24	152
Перший кватиль	-9	1	-13	-18	-10	-5	-3	4	-2	-8
Медіана	1	5	-10	-12	-5	4	4	8	0	1
Третій кватиль	8	10	-7	-4	1	15	12	14	4	8

за модельним ансамблем річних сум опадів на ХХІ ст. також різняться для кожного з розглянутих сценаріїв: для сценарію В1 — збільшення опадів до 2,3 % з прикінцевим значенням $1,8 \pm 5,1$ %, за винятком середини століття, коли прогнозується зменшення сум опадів на -0,3 %; для сценарію А1В — середні значення сум опадів збільшаться на 0,3—0,5 %, виняток — наступне десятиріччя, коли прогнозується зменшення опадів на -1,4 %; для сценарію А2 — опади в усі десятиріччя перевищують на 0,3—2,7 % значення першого десятиріччя, за винятком останнього десятиліття, коли опади зменшаться на -2,9 %.

Визначено, що модель ECHAM5/MPI-OM — оптимальна для моделювання клімату України, оскільки різниці її значень з ансамблевими середніми мінімальні. Результати цієї моделі можна рекомендувати як початкові та граничні умови для проведення чисельного моделювання клімату України з використанням регіональних моделей.

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; учасникам Програми діагнозу

та порівняння кліматичних моделей (PCMDI) за зберігання модельних даних проекту СМІРЗ. Ар-

хів даних WCRP СМІРЗ підтримується Управлінням з науки Міністерства енергетики США.

Список літератури

- 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 циркуляции атмосферы и океана СМІРЗ для расчетов будущих изменений климата России // Метеорология и гидрология. — 2008. — № 8. — С. 5—19.
- Клімат України / За ред. В. М. Ліпінського, В. А. Дячука, В. М. Бабіченко. — Київ: Вид-во Раєвського, 2003. — 343 с.
- Краковська С. В., Паламарчук Л. В., Шегеменко 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—1990 рр. // Наук. праці УкрНДГМІ. — 2008. — № 257. — С. 42—60.
- Кричак С. О. Региональное моделирование современного климата европейской территории России с помощью модели RegCM3 // Метеорология и гидрология. — 2008. — № 1. — С. 31—41.
- Мелешко В. П., Катцов В. М., Говоркова В. А., Спирьшев 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 // Метеорология и гидрология. — 2008а. — № 9. — С. 5—21.
- Мелешко В. П., Катцов В. М., Мирвис В. М., Говоркова В. А., Павлова Т. В. Климат России в XXI веке. Ч. 1. Новые свидетельства антропогенного изменения климата и современные возможности его расчета // Метеорология и гидрология. — 2008б. — № 6. — С. 5—19.
- Паламарчук Л. В., Гнатюк Н. В., Краковська С. В., Шегеменко І. П., Дюкель Г. О. Сезонні зміни клімату в Україні в XXI столітті // Наук. пр. НДГМІ. — 2010. — № 259. — С. 104—120.
- Паламарчук Л. В., Краковська С. В., Шегеменко 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. праці УкрНДГМІ. — 2009. — № 258. — С. 69—84.
- Christensen J. H., Hewitson B., Busuioc A., Chen A., Gao X., Held I., Jones R., Kolli R. K., Kwon W.-T., Laprise R., Magana Rueda V., Mearns L., Menendez C. G., Raisanen J., Rinke A., Sarr A., Whetton P. Regional Climate Projections // Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller. — Cambridge; New York: Cambr. Univ. Press, United Kingdom, 2007. — 94 p.
- Meehl G. A., Stocker T. F., Collins W. D., Friedlingstein P., Gaye A. T., Gregory J. M., Kitoh A., Knutti R., Murphy J. M., Noda A., Raper S. C. B., Watterson I. G., Weaver A. J., Zhao Z.-C. Global Climate Projections // Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller. — Cambridge; New York: Cambr. Univ. Press, Kingdom, 2007. — 100 p.
- Mitchell T. D., Carter T. R., Jones P. D. 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 № 55. — Tyndall Centre for Climate Change Research, Univ. East Anglia, Norwich, UK, 2004.
- Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds N. Nakicenović, R. Swart. — Cambridge; New York: Cambr. Univ. Press, United Kingdom, 2000. — 599 p.
- Randall D. A., Wood R. A., Bony S., Colman R., Fichetef T., Fyfe J., Kattsov V., Pitman A., Shukla J., Srinivasan J., Stouffer R. J., Sumi A., Taylor K. E. Climate Models and Their Evaluation // Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds S. Solomon., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor, H. L. Miller. — Cambridge; New York: Cambr. Univ. Press, United Kingdom, 2007. — 74 p.