

ЗАГАЛЬНА ХМАРНІСТЬ В УКРАЇНІ ДО СЕРЕДИНИ ХХІ ст. ЗА ДАНИМИ АНСАМБЛЮ РЕГІОНАЛЬНИХ КЛІМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

С.В. Краковська¹, Л.В. Паламарчук², А.К. Білозерова³, Т.М. Шпиталь¹

¹Український гідрометеорологічний інститут, проспект Науки, 37, м. Київ, 03028, Україна,
e-mail: krasvit@ua.fm, shpital@bigmir.net

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

³Український гідрометеорологічний центр, вул. Золотоворітська, 6-В, м. Київ-30, 01601, Україна,
e-mail: alla.bilozero@gmail.com

Проведено аналіз особливостей просторово-часового розподілу загальної хмарності в Україні за даними Кліматичного кадастру України для періоду 1961—1990 рр., за даними спостережень метеорологічної мережі для періоду 1981—2000 рр. і до середини ХХІ ст. за даними верифікованого ансамблю регіональних кліматичних моделей. Наведено методичні підходи до вибору оптимального ансамблю моделей для створення прогностичних полів загальної хмарності у майбутні кліматичні періоди на підставі даних спостережень і статистичного аналізу.

Ключові слова: загальна хмарність, регіональна кліматична модель, ансамбль моделей, верифікація модельних даних.

Поле хмарності та його динаміка — одні з важливих характеристик клімату. Розподіл хмарності пов'язаний переважно з особливостями циркуляції атмосфери і впливає на режим зволоження, зумовлює величину ефективного випромінювання, визначає планетарне альbedo. Стан кліматичної системи суттєво залежить від поля хмарності, оскільки воно формує як позитивні, так і негативні зворотні зв'язки, внаслідок яких змінюються температурний режим і режим зволоження як в окремих регіонах, так і в кліматичній системі у цілому. Як відомо, водяна пара є основою для утворення хмар і водночас основним парниковим газом в атмосфері, який формує природний парниковий ефект. Разом з тим хмарність зменшує потоки сонячної радіації, які надходять до земної поверхні, та, відповідно, знижує приземну температуру повітря. Наявність зазначених та інших існуючих зв'язків у формуванні атмосферних процесів підтверджує актуальність і необхідність вивчення умов формування та динаміки поля хмарності. Вирішення цього важливого завдання дасть змогу уточнити оцінки та встановити тенденції сучасних і майбутніх змін клімату. Саме через визнання ключової ролі хмарності у формуванні погоди, клімату та водних ресурсів планети Всесвітня метеорологічна організація (ВМО) оголосила "Розуміння хмар" темою 2017 р. і видала оновлений Міжнародний атлас хмар [14].

У сучасних дослідженнях поля хмарності переважно використовують дані наземних спостережень та метеорологічних супутників [13] і для аналізу застосовують статистичні методи [4], синоптичний аналіз [2, 3], чисельні моделі хмарності різних рівнів складності [8]. Наприклад, аномалії планетарного поля загальної хмарності протягом 1971—1996 рр.

визначали за даними 5400 станцій над усіма континентами й островами [13]. Отриманий результат вказує на значне зменшення загальної хмарності над Південною Америкою, невелике — над Євразією, відсутність тренду над Північною Америкою, проте встановлено позитивний тренд зимою та весною в Арктиці (60—80° пн. ш.). Найбільші амплітуди річного ходу загальної хмарності спостерігали над Австралією. Поле хмарності над суходолом має негативний тренд 0,7 % / 10 років, що деякою мірою компенсується позитивним трендом над океаном 0,4 % / 10 років [13]. В Українському гідрометеорологічному інституті кількісні зміни хмарності як індикатор глобального потепління і зміни похмурого і ясного неба за загальною та нижньою хмарністю в Україні досліджували Т.М. Заблоцька і співавт. [2, 3].

У запропонованому дослідженні просторово-часові розподіли поля хмарності оцінено з використанням даних наземних спостережень метеорологічної мережі та результатів розрахунків, отриманих за допомогою регіональних кліматичних моделей (РКМ).

Мета дослідження — аналіз і оцінювання поля загальної хмарності в Україні та окремих регіонах, встановлення закономірностей його просторово-часової динаміки у сучасні та майбутні кліматичні періоди. У статті викладено аналіз сучасного поля хмарності, методичні підходи до вибору ансамблю РКМ та верифікації даних моделювання з метою формування достовірних масивів даних прогностичних полів загальної хмарності. На основі сформованого ансамблю з 9 РКМ, що пройшов процедури верифікації та корекції абсолютних помилок у контрольний та базовий періоди, побудовано поля

загальної хмарності для двох прогнозних періодів 2011–2030 і 2031–2050 рр. та оцінено зміни хмарності до середини ХХІ ст.

Матеріали та методика дослідження. Вивчення поля хмарності у сучасний кліматичний період та формування прогностичних полів у майбутні періоди виконано у такій самій методичній послідовності, як і вивчення та прогнозування полів температури й опадів [6, 7, 9, 10]. Для цього було проведено:

- оцінювання поля хмарності для стандартного кліматичного періоду 1961–1990 рр. за даними Кліматичного кадастру України (ККУ) [4] та даними 9 метеорологічних станцій, які рівномірно розташовані на всій території України: захід (Ковель, Львів), північ (Семенівка, Київ), центр (Кропивницький – колиш. Кіровоград), південь (Любашівка, Сімферополь) та схід (Харків, Луганськ), для періоду 1961–2000 рр.;

- верифікацію даних 12 РКМ, отриманих у розрахунках з граничними умовами реаналізу ERA40 за період 1961–2000 рр., і формування оптимального ансамблю РКМ для загальної хмарності, подібно до викладеної методики для температури і опадів [6, 7, 9];

- розрахунок проєкцій полів загальної хмарності за визначеним оптимальним ансамблем з 9 відібраних РКМ за сценарієм A1B на періоди 2011–2030 та 2031–2050 рр.

Оцінювання поля хмарності в Україні за стандартний кліматичний період 1961–1990 рр. за даними ККУ [4] показало, що у зимовий сезон просторові відмінності у балах загальної хмарності невеликі. Для всієї території у грудні загальна хмарність становить близько 8 балів, тільки на південному заході і Південному узбережжі Криму – 7,5 бала, а в гірських районах Українських Карпат – 7 балів; у січні та лютому – 7,0–7,5 бала. Весною кількість хмар зменшується у середньому за місяць на 0,7 бала. У літні місяці кількість хмар теж зменшується, але починають проявлятися регіональні відмінності. Так, на Закарпатській низовині, на заході і півночі країни зменшення хмарності становить, бали: у червні та липні 0,1–1,2; серпні 0,5; центральних та східних районах 0,3–0,5 щомісячно; південних 0,6–0,7 у червні, липні; 0,4 – у серпні; у Криму 0,9–1,0 у червні та липні; 0,2 – у серпні. Восени повсюди починається збільшення хмарності, у вересні воно найменше (0,4 бала), проте у наступні місяці значно підвищується: у жовтні приблизно на 0,9, листопаді – на 2 бали. Амплітуда річного ходу загальної хмарності у західних та північних районах становить 2,9 бала, у центральних – 3,6, східних і південних – 4,2, а в Криму – 4,7 бала.

Кількість хмар у середньому за рік у північно-західній частині країни становить 6,5, у південно-східній – 5,5–6,0 балів. Найбільше хмар спостерігається зимою – 7,0–7,5 бала майже на всій території, а найменше літом – 3,5–4,0 бали у південно-східній

частині, 5,5 – у північно-західній, до 6,5–7,0 балів в Українських Карпатах.

Повторюваність ясного неба найменша зимою, коливання її по території незначні. Літом вона збільшується у 1,5–2 рази, чітко проявляється зональність розподілу: від 30–35 % у північно-західній частині країни до 50–60 % на півдні та в Криму. Повторюваність похмурого неба найбільша зимою (70–75 %), коливання її на території незначні (до 5 %). Літом вона найменша: у північно-західних районах 40–45 %, центральних – 30–35, на півдні та в Криму – 20–25 %.

Такі параметри поля хмарності за стандартний кліматичний період взято як основні з метою верифікації модельних розрахунків та вибору моделей для створення їх оптимального ансамблю.

Для верифікації РКМ зазвичай використовують дані вимірювань, а самі РКМ розраховують з граничними умовами реаналізу. В цьому дослідженні використано дані реаналізу ERA40, початковими даними для яких є добові виміри мережі гідрометеорологічних спостережень, що проходять процедури перевірки на помилки та однорідність. Для порівняння та перевірки результатів розрахунків РКМ також використовували дані з ККУ. Як контрольний для верифікації моделей вибрано рекомендований ВМО стандартний кліматичний період 1961–1990 рр.

Оптимальний ансамбль РКМ формували, перевіривши відповідність моделей критеріям, що забезпечують отримання розрахункової величини (загальна хмарність) із задовільною точністю. Базою для відбору стали розрахунки 12 РКМ з горизонтальним розділенням 25 км, що виконані в рамках Європейського проекту FP-6 ENSEMBLES [12] як з граничними умовами реаналізу ERA40, так і для сценарію SRESA1B[11].

Вибір певного набору моделей для оцінювання використання їх у вигляді ансамблю з усіх РКМ, що задіяні в проєкті, зумовлений декількома причинами: 1) вважали, що для отримання достовірних результатів недостатньо одного розрахунку, необхідно оцінити значення досліджуваної величини як мінімум за трьома РКМ, але оптимальну кількість моделей слід визначати на етапі верифікації моделей на минулому та/або сучасному кліматі; 2) враховували необхідність того, щоб ансамбль складався з моделей, які було б розроблено в різних інституціях, які включали б різні параметризації фізичних процесів та були розраховані з граничними умовами різних глобальних моделей, що мало забезпечити найповніший діапазон усіх можливих станів атмосфери і, відповідно, значення досліджуваної характеристики як у минулому, так і на майбутнє; 3) деякі з вибраних РКМ (REMO, RCA3-E, RegCM) застосовували для розрахунків полів кліматичних характеристик у регіоні. І було отримано задовільні результати [1, 5–7, 9, 10].

З огляду на викладені міркування було вибрано результати тих моделей, параметри яких задовольняли висунуті вимоги. Основні характеристики використаних моделей та їх відповідність даним ККУ наведено у таблиці.

Для визначення достовірності і точності розрахунків параметрів поля загальної хмарності за використання різних моделей виконали статистичне оцінювання результатів моделювання та їх порівняння з даними ККУ, обчисливши коефіцієнт кореляції, середньоквадратичне відхилення (СКВ), абсолютну похибку та ін. (див. таблицю). Згідно з отриманими даними, середньорічні значення загальної хмарності (у частках одиниці) по території України становлять $0,64 \pm 0,11$, а СКВ – $0,12 \pm 0,05$.

Розраховані коефіцієнти кореляції між модельними результатами та даними ККУ майже для всіх РКМ перевищують значення 0,9. Лише для однієї моделі (№ 10) отримано коефіцієнт кореляції, менший за це значення (0,778). Модель № 2 має найбільшу абсолютну похибку ($-0,21$), а модель № 12 – максимальну середньоквадратичну похибку (0,09). Тому їх бажано не використовувати та виключити з ансамблю.

Відповідно до оцінювання на підставі статистичних показників, для розрахунків загальної хмарності можна використовувати моделі № 1, 4 та 8, абсолютна похибка яких є найменшою. Найвищий коефіцієнт кореляції (0,966) з даними ККУ має модель № 11.

Регіональні кліматичні моделі європейського рамкового проекту ENSEMBLES та їх статистичні характеристики для загальної хмарності порівняно з даними Кліматичного кадастру України (1961–1990)
Regional climate models from FP-6 ENSEMBLES and their statistical characteristics for the total cloud cover compared to the CCU (1961–1990)

Номер моделі	Регіональна кліматична модель, граничні умови (МЗЦАО), країна	Середнє річне значення (частка одиниці)	Коефіцієнт кореляції	Стандартне відхилення	Середньо-квадратична похибка	Абсолютна похибка
К	Кадастр	0,64	1,000	0,12	0,00	
1	C4IRCA3, HadCM3Q16 МЕТО -НС, Ірландія	0,58	0,952	0,10	0,03	-0,06
2	CNRM-RM4.5, ARPEGE CNRM, Франція	0,43	0,916	0,13	0,05	-0,21
3	DMI-HIRHAM5, ECHAM5-r3 MPI-M, Данія	0,59	0,938	0,16	0,06	-0,05
4	ETHZ-CLM, HadCM3Q0 МЕТО-НС, Швейцарія	0,65	0,919	0,12	0,05	0,01
5	HadRM3Q3, HadCM3Q0 МЕТО-НС, Велика Британія	0,51	0,940	0,17	0,06	-0,13
6	HadRM3Q16, HadCM3Q0 МЕТО-НС, Велика Британія	0,52	0,962	0,16	0,04	-0,12
7	KNMI-RACMO2, ECHAM5-r3 MPI-M, Нідерланди	0,60	0,964	0,17	0,04	-0,04
8	METNOHIRHAM, BCM BCCR, Норвегія	0,67	0,935	0,13	0,05	0,02
9	MPI-M-REMO, ECHAM5-r3 MPI-M, Німеччина	0,55	0,930	0,19	0,07	-0,09
10	OURANOSMRCC4.2.3, Канада	0,55	0,778	0,10	0,05	-0,09
11	SMHIRCA, ECHAM5-r3 MPI-M, Швеція	0,56	0,966	0,10	0,02	-0,08
12	UCLM-PROMES, HadCM3Q0 МЕТО-НС, Іспанія	0,56	0,922	0,22	0,09	-0,08

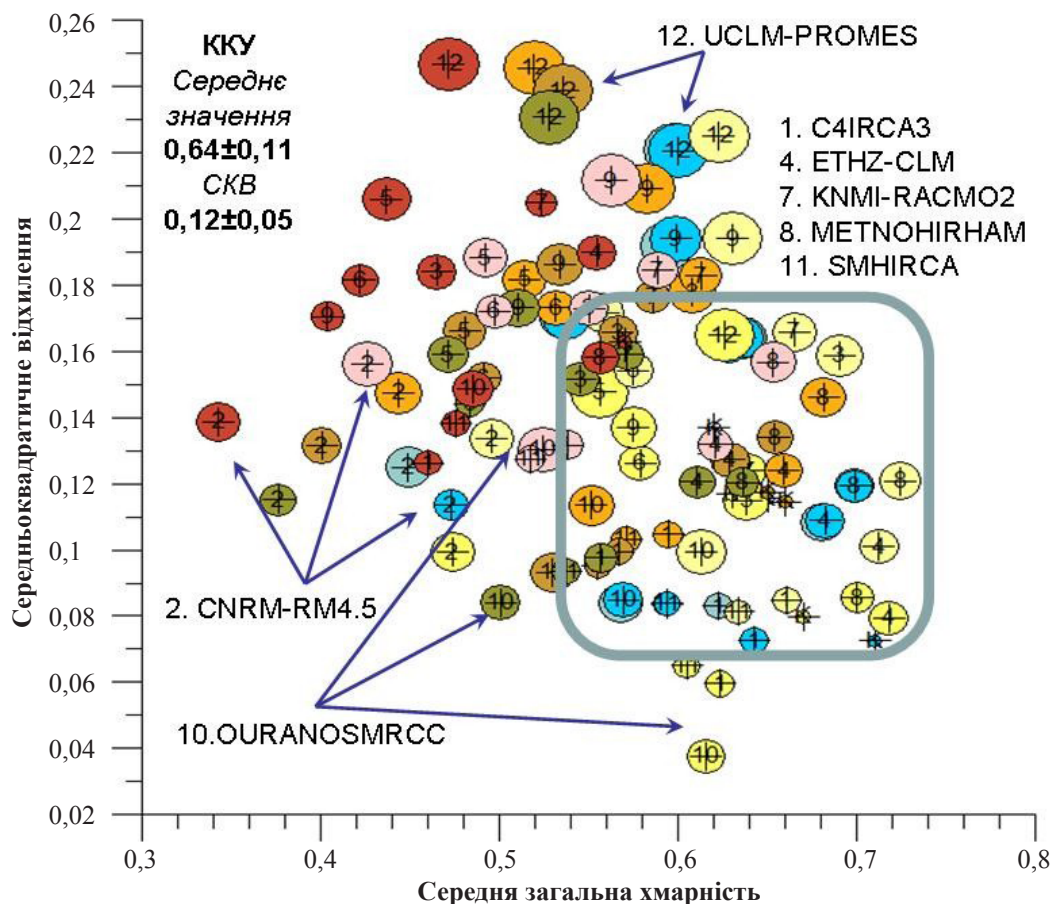


Рис. 1. Бульбашкова діаграма для оцінки результатів РКМ щодо значень загальної хмарності (вісь X), їх середньоквадратичних відхилень (вісь Y) та абсолютних помилок (розмір бульбашок) порівняно з даними ККУ (точка К) для періоду 1961–1990 рр. Набори бульбашок різних кольорів відповідають різним станціям, числа всередині – номер моделі в таблиці

Fig. 1. Bubble diagram for RCM verification with data from CCU (point K) for the period 1961-1990, where X is annual total cloud cover in parts of unit, Y is its standard deviation and bubble size corresponds to MSE. Different colors correspond to different stations, numbers inside bubbles – number of RCM from Table

Рівень достовірності та точності модельних результатів оцінювали за побудованою так званою бульбашковою діаграмою (рис. 1). На діаграмі показано статистичні характеристики усіх задіяних у відборі моделей. Таке зображення результатів моделювання дає змогу порівняти розрахунки РКМ з даними спостережень (ККУ). За критерій оцінювання було взято середнє річне значення загальної хмарності в межах України та СКВ, установлене за середньомісячними даними.

Центральна точка виділеної прямокутної ділянки на рис. 1 має координати: $x = 0,64$; $y = 0,12$, що є основними статистичними параметрами даних ККУ (див. таблицю). Усі результати моделювання, які мають високу повторюваність у межах виділеної ділянки, близькі до оптимальних, а відповідні їм моделі можна використовувати для створення ансамблю. Очевидно, що розрахунки, які значно виходять за межі ділянки, мають велику похибку, і в цьому разі істотно занижують значення загальної хмарності або перевищують СКВ щодо реальних даних.

Таким чином, за результатами верифікації модельних даних найвищу достовірність і зв'язок з

даними спостережень мають моделі № 1, 4, 8 і 11 (див. таблицю), а показники моделей № 2, 10 та 12 (рис. 1) є незадовільними.

Досліджено і відповідність річного розподілу значень загальної хмарності, наведених у ККУ та отриманих з використанням окремих моделей чи різних варіантів їх ансамблів (рис. 2). Усі варіанти модельних даних достовірно відображають річний хід хмарності з максимумом у грудні та мінімумом у серпні, але дещо занижують абсолютні значення величин. Дані окремих моделей показують абсолютні похибки у визначенні середніх місячних значень практично впродовж усього року, що ще раз підтверджує необхідність використання ансамблю моделей для створення прогностичних полів. Якщо кожна окрема модель має певні систематичні помилки з їх випадковим розподілом щодо істинного значення, то в разі усереднення за більшою кількістю моделей, які пройшли верифікацію, отримуємо вищу ймовірність нівелювання індивідуальних похибок і точніші результати. Так, ансамблі з 10 РКМ для температури і 4 РКМ для опадів мають вищі коефіцієнти кореляції та менші похибки порівняно з переважною більшістю моделей, з яких складається ансамбль [1, 6, 9].

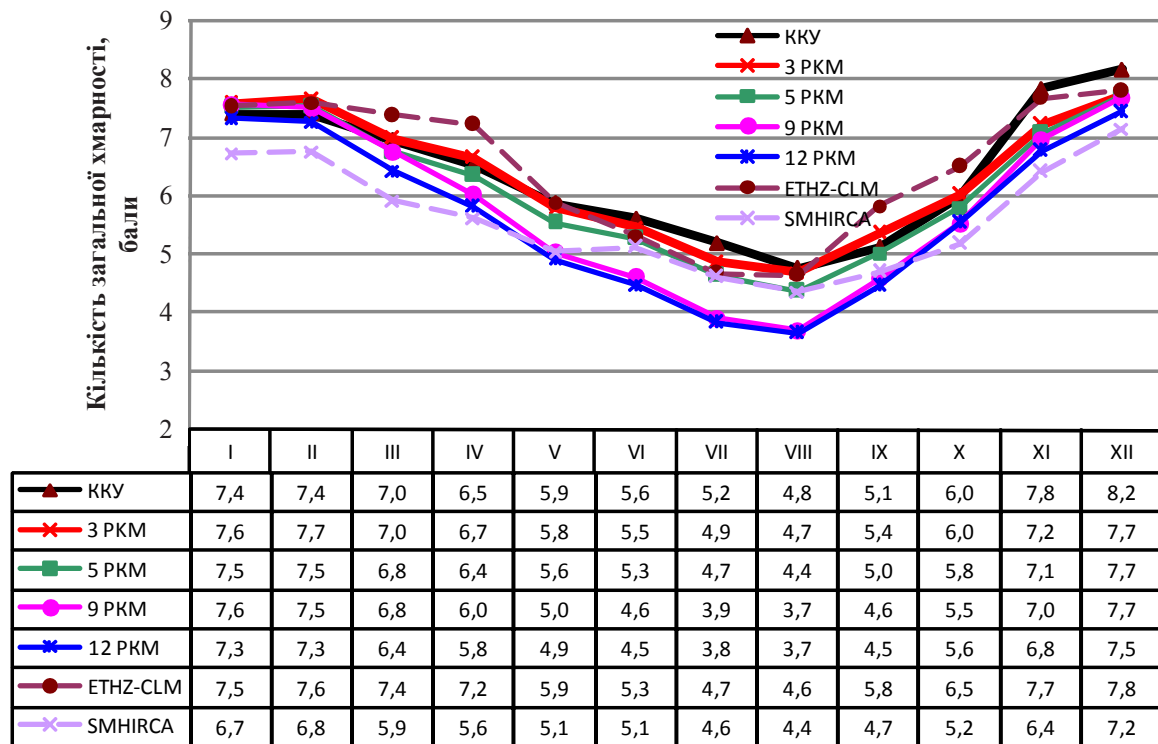


Рис. 2. Місячні значення загальної хмарності за даними ККУ, окремих моделей та їх ансамблів (1961–1990)

Fig. 2. Monthly total cloud cover (in parts of 10) according to the CCU, individual models and their ensembles (1961–1990)

Певні труднощі виникають у разі визначення кількості моделей, що мають увійти до ансамблю. Вибрані ансамблі – 3 PKM (№ 1, 4, 8), 5 PKM (№ 1, 4, 8, 7, 11), 9 PKM (усі моделі, крім № 2, 10, 12) – мають різну величину похибок щодо середньомісячних значень (рис. 2). Найближчими до даних ККУ є усереднені значення ансамблю 3 PKM. Однак вибір ансамблю, що складається тільки з трьох моделей, може погіршити точність визначення найімовірнішого діапазону значень величини для майбутніх кліматичних періодів. Тому оптимальним визначено ансамбль з 9 PKM за умови подальшої корекції абсолютних значень на похибки за стандартний кліматичний період.

Запропоновану методику корекції було застосовано для періоду 1981–2000 рр., отримані результати перевірили фактичними даними, як і для температури повітря і опадів в публікаціях [1, 6, 7, 9]. Для тестування модельних розрахунків у цей період використовували дані спостережень, отримані на 9 метеорологічних станціях, які зазначено вище. На рис. 3 дані спостережень як середні місячні значення за період 1981–2000 рр. показано під назвою “Meteo”.

З рис. 3 видно, що ансамбль 9RCM-ERA40 достовірно відображає річний розподіл середньомісячних значень для періоду 1981–2000 рр., як і для стандартного кліматичного періоду 1961–1990 рр. Розрахунок ансамблю 9RCM-A1B практично повторює річний хід хмарності, отриманий для граничних умов ERA40. Найбільші похибки відносно метеорологічних даних отримано у сценарному розрахунку

(BiasA1B) у літні місяці в діапазоні 1,0–1,5 бала (20–26 %) зменшення хмарності, а мінімальні похибки до 0,3 бала – з жовтня до березня і в травні.

Для корекції сценарних розрахунків запропоновано враховувати похибки, визначені у стандартний період, тобто різницю між значеннями 9 PKM та ККУ (див. рис. 2). На рис. 3 величини похибок показано стовпчиками Bias 1961–1990. Процедура врахування абсолютної похибки ансамблю з 9 PKM щодо значень за стандартний кліматичний період проведено і у визначенні модельних даних за період 1981–2000 рр. (9RCM+bias на рис. 3). Очевидно, що така корекція приводить до суттєвого зменшення абсолютних похибок середньомісячних значень (Bias 1981–2000 на рис. 3) і до практичного збігу кривих річного розподілу хмарності, отриманих за даними спостережень та в сценарному розрахунку. Такий підхід слід використовувати в разі створення прогностичних полів загальної хмарності для майбутніх кліматичних періодів, що встановлюватимуться на підставі модельних ансамблевих значень.

Аналіз полів кількості загальної хмарності. Використання даних ансамблю 9 PKM, що пройшли корекцію, як описано вище, дало змогу побудувати поля загальної хмарності за сезонами та середні за рік для періоду 1981–2000 рр. (рис. 4). У цілому просторово-часовий розподіл загальної хмарності за модельними даними достовірно відображає такі самі закономірності розподілу величини, що отримані за даними спостережень. Так, розподіл річних значень хмарності по території змінюється у межах від 5 до 8 балів, що відповідає середньому річному

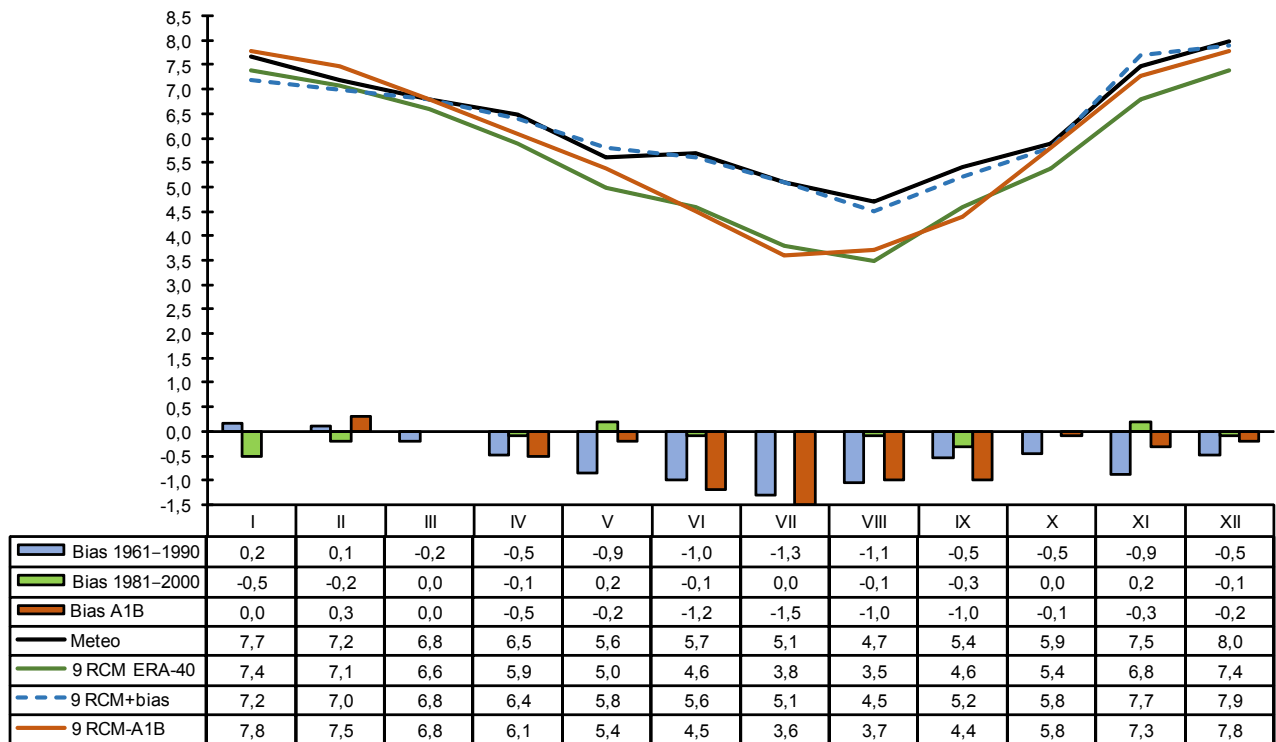


Рис. 3. Середньомісячні значення загальної хмарності (бали) для періоду 1981–2000 рр. за даними метеостанцій (метео) та ансамблю 9РКМ з його абсолютними похибками

Fig. 3. Mean monthly values of total cloud cover (parts of 10) for the period 1981–2000 according to weather stations (meteo) and 9RCM ensemble with its absolute errors

значенню загальної хмарності, згідно з даними метеорологічних спостережень, – 6,3 бала. Модельні результати показують, як і фактичні, близький до зонального розподіл середньорічних значень загальної хмарності по території та незначну мінливість величини.

Відповідно до модельних даних, найбільша хмарність спостерігається в зимові місяці, що пояснюється високою інтенсивністю циркуляційних процесів у цей період, і становить у середньому 7,6 бала. Максимум відмічаємо у північних областях України (8–9 балів), а на більшості території загальна хмарність дорівнює 7–8 балів. Просторовий розподіл хмарності взимку, як і середньорічний, близький до зонального, а поле хмарності відносно однорідне. Зменшення загальної хмарності до 6–7 балів на південному заході (частина Одеської обл.), що порушує зональний розподіл, вочевидь може бути пов'язане із зоною такого самого зменшення хмарності у Передкарпатті, але виявлення причин такого ефекту потребує додаткового дослідження.

Літом відмічається мінімум загальної хмарності, яка для більшості території України за даними розрахунків становить 4–6 балів з найменшими значеннями на крайньому півдні країни і в Криму (3–4 бали), що також узгоджується з даними спостережень (середнє значення 5,1 бала). Отримане поле хмарності для літа відзначається більшою, ніж для інших сезонів, неоднорідністю, величина змінюється від 3 до 7 балів, тоді як зимою – від 6 до 9 балів. Крім того, суттєво порушується зональність

у просторовому розподілі значень загальної хмарності. Зменшення величини відбувається із заходу, північного заходу на південь, південний схід.

У перехідні сезони року більші значення загальної хмарності отримано навесні (6–8 балів), що узгоджується з осередненими даними спостережень (6,3 бала). Поле хмарності весною відносно однорідне і цим подібне до зимового, але зональність розподілу порушується в західних і центральних регіонах країни подібно до літнього. Восени зберігаються значення 5–8 балів, але порівняно з весною суттєво розширюється зона на півдні, де загальна хмарність становить 5–6 балів. Середнє значення, отримане за даними спостережень для осені, – 6,1 бала. Поле хмарності, як і весною, однорідне, але має чіткіший зональний розподіл величини.

В цілому фактичні дані (див. рис. 3) показують, що загальна хмарність збільшується починаючи з листопада (7,5 бала) з максимальними значеннями у грудні (8,0 балів), а зменшується починаючи з березня (6,8 бала). Порівняння усереднених даних спостережень на всіх станціях за цей період з даними ККУ за стандартний період (див. рис. 2, 3) показало незначні зміни середньомісячної загальної хмарності у діапазоні $\pm 0,3$ бала. Збільшення хмарності на 0,3 бала отримано у січні та вересні, зменшення, також на 0,3 бали, – у травні та листопаді, що становить від 2 до 4 %. Річне значення практично не змінилось – зменшення на 0,06 бала (приблизно на 1 %) не є суттєвим. На рис. 4 також показано зміни річної загальної хмарності як

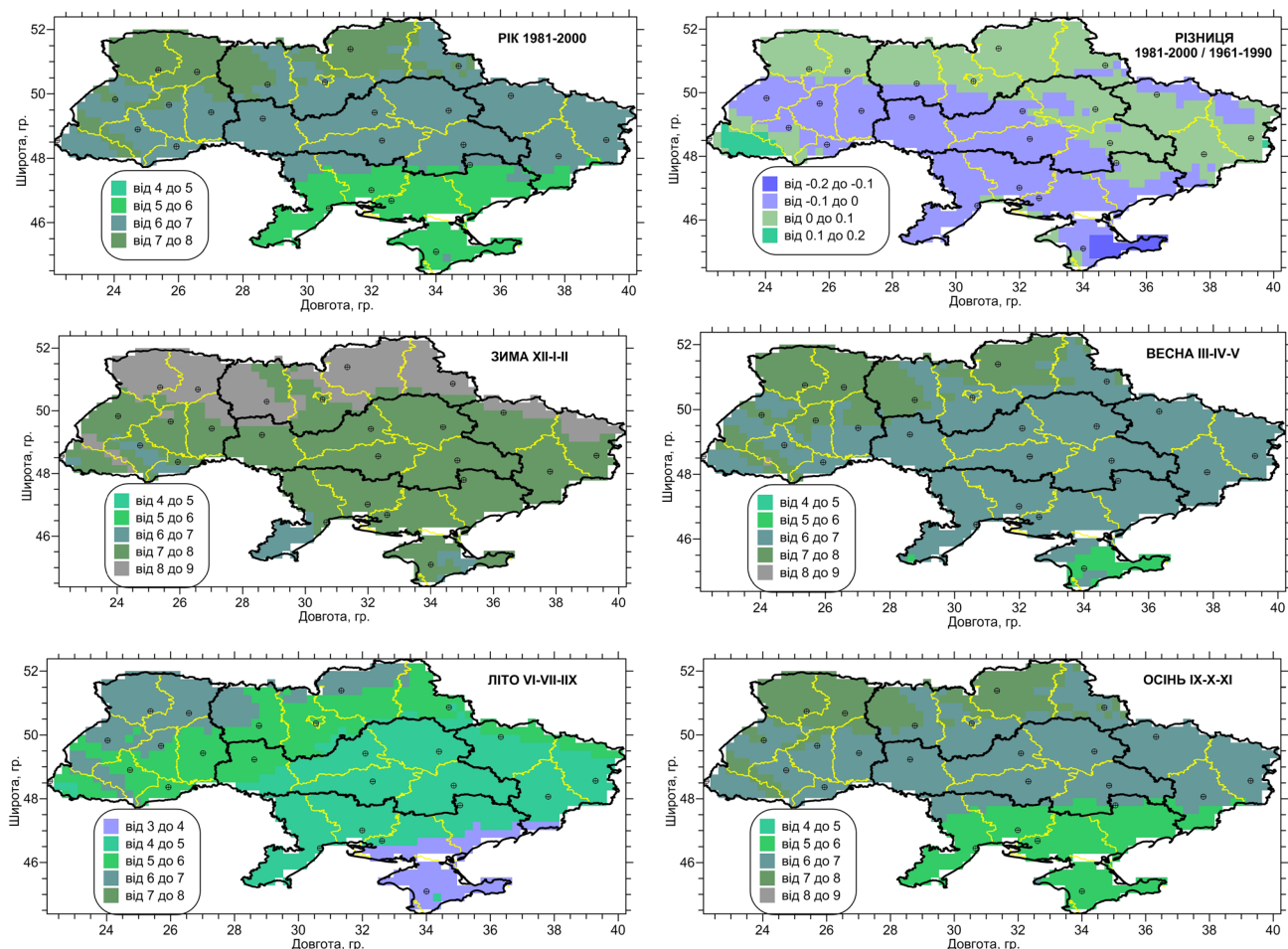


Рис. 4. Середньорічне та сезонні поля хмарності (у балах), отримані за даними ансамблю 9 РКМ для сценарію A1B (період 1981–2000 рр.)

Fig. 4. Mean annual and seasonal fields of total cloud cover (parts of 10) from ensemble 9 RCM scenario A1B (1981–2000): upper row – annual (left) and change of annual in 1981–2000 vs 1961–1990 (right); middle row – winter (left), spring (right); bottom row – summer (left), fall (right)

різниці між значеннями в період 1981–2000 рр. і в стандартний період 1961–1990 рр. Очевидно, що змодельовані зміни, які на більшості території дорівнюють $\pm 0,1$ бала, узгоджуються з фактичними. Відносно більше хмарності стало в Закарпатті, а менше – на сході Кримського півострова.

Таким чином, наведені вище поля загальної хмарності, що побудовані на ансамблевих даних РКМ, достовірно відтворюють фактичні значення та просторові закономірності розподілу величини і підтверджують можливість використання запропонованого ансамблю моделей для створення прогностичних полів майбутніх кліматичних періодів.

Проекції зміни значень загальної хмарності до середини XXI ст. Для побудови проекцій зміни загальної хмарності використано описаний вище ансамбль з 9 РКМ. Зміни визначали для двох майбутніх прогностичних двадцятиріч, 2011–2030 та 2031–2050 рр., щодо базового періоду 1991–2010 рр. Через вимогу уніфікації методики отримання проекцій всіх величин базовий період для визначення змін хмарності у майбутні періоди такий самий, як і для температури, опадів та інших характеристик [1, 5–7, 9, 10],

але відрізняється від періодів, для яких проведено верифікацію щодо загальної хмарності. Вище показано, що запропонований ансамбль правильно відтворює як просторові особливості, так і кількісні значення досліджуваної характеристики впродовж двох минулих періодів, тому проведення верифікації для ще одного періоду минулого 1991–2010 рр. не обов'язкове. Зауважимо тільки, що вибір періодів верифікації залежить від комбінацій наявних даних спостережень та моделювання з граничними умовами реаналізу та за сценаріями.

Отримані результати показано у вигляді полів різниць значень загальної хмарності за сезонами та річних значень для двох прогностичних періодів відносно базового (рис. 5). Часові та просторові розподіли величин різниць свідчать про їх більшу мінливість та неоднорідність за сезонами. Зокрема, на відміну від інших сезонів взимку очікується збільшення загальної хмарності практично на всій території країни на 0,1–0,2 бала, за винятком Закарпаття у найближчий період, узбережжя Чорного моря та півночі Криму до середини XXI ст. Навесні ця тенденція змінюється на протилежну, і незначне зменшення

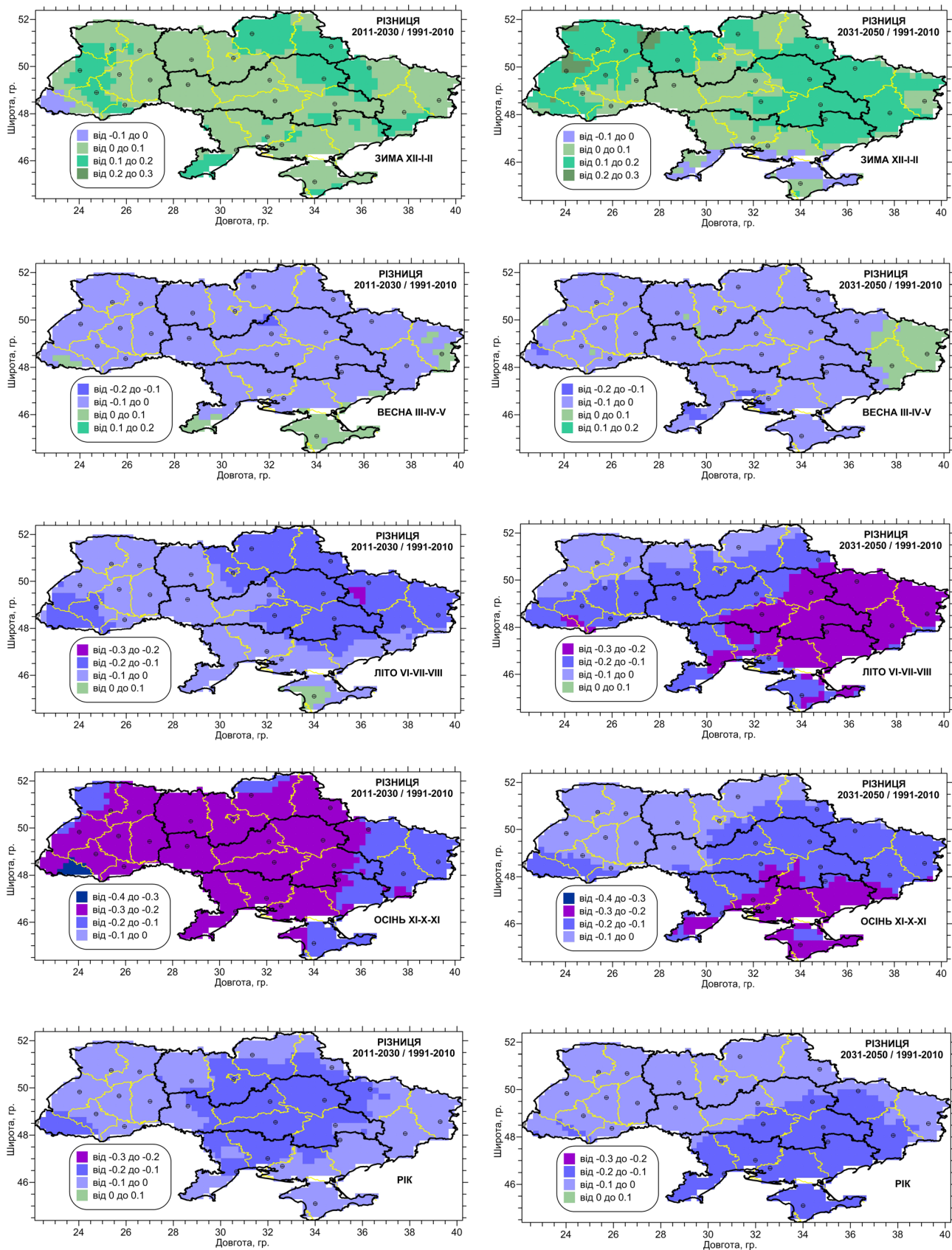


Рис. 5. Зміни кількості загальної хмарності (у балах) за даними ансамблю 9 РКМ для сценарію A1B, усереднені за сезонами, та середні річні значення у прогностичні періоди 2011–2030 рр. (ліворуч) та 2031–2050 рр. (праворуч) стосовно базового періоду 1991–2010 рр.

Fig. 5. Changes in mean seasonal and annual fields of total cloud cover (parts of 10) from ensemble of 9 RCM scenario A1B for two prognostic periods: 2011–2030 (left) and 2031–2050 (right) respectively to 1991–2010

в межах $-0,1 \pm 0$ балів отримано знову майже по всій території, за винятком Криму в період 2011–2030 рр. і сходу країни в період 2031–2050 рр. Влітку тенденція до зменшення значень загальної хмарності посилюватиметься: у найближчий період майже на половині території країни зміни перевищуватимуть $-0,1$ бала, хоча на більшості території Криму очікується незначне збільшення хмарності, а до середини сторіччя практично на 40 % території зменшення хмарності перевищуватиме $-0,2$ бала і тільки на 18 % території зменшення будуть меншими за $-0,1$ бала.

Найсуттєвіші зміни загальної хмарності прогнозуємо для осені в найближчий період, коли на майже 77 % території очікується зменшення характеристики, що перевищуватиме $-0,2$ бала, а на решті території (переважно на сході та в Криму) зменшення також суттєві – від $-0,2$ до $-0,1$ бала. До середини сторіччя восени зміни менші, ніж у попередній період, і також менші, ніж улітку, але на півдні (17 % території країни) вони також перевищуватимуть $-0,2$ бала, ще на 46 % території $-0,1$ бала і тільки на півночі та заході – в межах $-0,1 \pm 0$ балів.

Отримані зміни річних значень в обидва періоди виявилися всюди від'ємними, при цьому зберігається відношення площ територій, де зміни становлять від $-0,1$ до 0 та від $-0,2$ до $-0,1$, як 60 до 40 %, але їх локалізація різна: в найближчий період найбільше зменшення середньорічної хмарності прогнозуємо у Закарпатті та в центрі країни, тоді як до середини сторіччя максимально ця характеристика зменшуватиметься від півдня через центр до середини території східного регіону (рис. 5).

Отже, на основі розрахунків ансамблю 9 РКМ побудовано проекції загальної хмарності до середини ХХІ ст., виявлено та проаналізовано просторово-часові особливості їх змін на території України.

Висновки. Встановлено, що для побудови проекцій майбутніх полів хмарності, як й інших кліматичних показників, переваги має ансамбль РКМ, за використання якого можна нівелювати похибки окремих моделей та визначати діапазон можливих змін досліджуваної величини. Показано, що застосування для прогнозу даних розрахунків тільки однієї регіональної кліматичної моделі може давати істотні абсолютні похибки значень досліджуваної величини, що впливатиме на достовірність її полів і часового розподілу. Визнано, що перед формуванням прогностичних полів на підставі даних РКМ обов'язковою є верифікація модельних даних з урахуванням особливостей просторово-часового розподілу досліджуваної метеорологічної величини у регіоні, що дає змогу виявляти та враховувати систематичні похибки моделювання. Запропоновано під час визначення проекцій загальної хмарності для майбутніх кліматичних періодів корегувати значення у межах усієї розрахункової сітки на похибки ансамблю моделей у базовий період щодо стандартного кліматичного періоду.

З метою отримання прогностичних значень кліматичних характеристик поля хмарності для території України у ХХІ ст. сформовано ансамбль з 9 РКМ, що ініційовані різними моделями загальної циркуляції атмосфери та океанів (МЗЦАО), які виконано в рамках європейського проекту FP-6 ENSEMBLES для періоду 1951–2050 рр., для сценарію SRES A1B. Оптимальний ансамбль РКМ було визначено в процесі верифікації з використанням даних спостережень. Корекція ансамблю полягала в урахуванні систематичних похибок, отриманих у контрольний період 1961–1990 рр., і перевірці результатів моделювання у період 1981–2000 рр. Показано, що така методика використання РКМ у вигляді ансамблю, що пройшов верифікацію та корекцію, дає змогу значно зменшити систематичні похибки.

Отриманий прогноз загальної хмарності до середини ХХІ ст. показує незначне зменшення середньорічних значень – на $0,1 \pm 0,2$ бала у центральних областях у період 2011–2030 рр. і на півдні та сході країни у період 2031–2050 рр. На решті території суттєвих змін середньорічних значень не очікується. У річному ході прогнозується неоднозначний характер змін полів загальної хмарності. Так, для обох прогностичних періодів у зимовий сезон очікується збільшення хмарності на $0,1 \pm 0,2$ бала, тоді як в інші сезони характеристики зменшуватимуться: максимально на $-0,3 \pm 0,2$ бала восени на більшій частині території у 2011–2030 рр. і на південному сході влітку 2031–2050 рр.

Результати виконаних робіт можуть слугувати базою для подальших досліджень та оцінювання змін до середини ХХІ ст. інших кліматичних показників, пов'язаних із хмарністю. Ці результати доцільно використовувати у суміжних наукових напрямках і кліматозалежних галузях – агрометеорології, гідрології, біології, екології, енергетиці, будівництві, туризмі, охороні здоров'я, рекреації та ін.

Список бібліографічних посилань

1. Дослідження регіональних особливостей зміни клімату в Україні у ХХІ ст. на основі чисельного моделювання. Звіт про НДР (заключний). Шифр роботи 1/11. К.: УГМІ. 2013. 173 с. № ДР 0111U001571.
2. Заболоцька Т.М., Підгурська В.М., Шпиталь Т.М. Особливості змін хмарного покриву над територією України протягом 1961–2008 рр. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2011. Вип. 260. С. 54–66.
3. Заболоцька Т.М., Шпиг В.М. Кількісні зміни хмарності як індикатор періоду глобального потепління. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2015. Вип. 267. С. 23–27.
4. Кліматичний кадастр України (електронна версія). К.: Державна гідрометеорологічна служба, УкрНДГМІ, Центральна геофізична обсерваторія, 2006.
5. Краковська С.В., Гнатюк Н.В. Зміни поверхневого річкового стоку в Україні до 2050 р. за проекцією регіональної кліматичної моделі РЕМО. *Геоінформатика*. 2013. № 3. С. 76–81.

6. 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. *Наук. праці УкрНДГМІ*. 2016. Вип. 268. С. 33–44.
7. Краковська С.В., Паламарчук Л.В., Шпиталь Т.М. Електронні бази метеорологічних даних та результати чисельних кліматичних моделей у визначенні спеціалізованих кліматичних показників. *Гідрологія, гідрохімія та гідроекологія*: наук. зб. Київ: нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка. 2016. Т. 3, № 42. С. 95–105.
8. Пірнач Г.М. Чисельне моделювання хмар та опадів у системах атмосферних фронтів. К.: Ніка-Центр, 2008. 295 с.
9. Шестое национальное сообщение Украины по вопросам изменения климата, подготовленное на выполнение статей 4 и 12 Рамочной конвенции ООН об изменении климата и статьи 7 Киотского протокола. К., 2013. С. 182–200. URL: [http://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_natcom/submitted_natcom/application/pdf/6nc_v7_final_\[1\].pdf](http://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_natcom/submitted_natcom/application/pdf/6nc_v7_final_[1].pdf) (дата звернення: 29.05.2017).
10. Gnatiuk N., Krakovska S., Palamarchuk L., Bilozero A. Climate change projections for Ukraine in the 21st century based on the best RCM ensembles. *Geophysical Research Abstracts*. 2013. URL: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2013/EGU2013-889-1.pdf> (дата звернення: 30.05.2017).
11. Nakićenović N., Swart R. Special Report on Emissions Scenarios. *A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 599 p.
12. The science research and results of the ENSEMBLES project. URL: <http://ensembles-eu.metoffice.com> (дата звернення: 30.05.2017).
13. Warren S.G., Eastman R.M., Hahn C.J. A survey of Changes in Cloud Cover and Cloud Types over Land from Surface Observations, 1971–96. *Journal of Climate*. 2007. No. 20. pp. 717–738.
14. World Meteorological Day - 23 March 2017. <https://public.wmo.int/en/WorldMetDay2017> (дата звернення: 30.05.2017)

Надійшла до редакції 06.06.2017 р.

ОБЩАЯ ОБЛАЧНОСТЬ В УКРАИНЕ ДО СЕРЕДИНЫ XXI ст. ПО ДАННЫМ АНСАМБЛЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

С.В. Краковская¹, Л.В. Паламарчук², А.К. Белозерова³, Т.Н. Шпиталь¹

¹Украинский гидрометеорологический институт, просп. Науки, 37, г. Киев, 03028, Украина, e-mail: krasvit@ua.fm, shpital@bigmir.net

²Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко, ул. Владимирская, 64/13, г. Киев, 01601, Украина, e-mail: palamarchuk.l@ukr.net

³Украинский гидрометеорологический центр, ул. Золотоворотская, 6-В, г. Киев-30, 01601, Украина, e-mail: alla.bilozero@gmail.com

Проведен анализ пространственно-временных особенностей распределения общей облачности в Украине по данным Климатического кадастра Украины для периода 1961–1990 гг., по данным наблюдений метеорологической сети для периода 1981–2000 гг. и до середины XXI ст. по данным верифицированного ансамбля региональных климатических моделей. Представлены методические подходы к выбору оптимального ансамбля моделей для создания прогностических полей общей облачности в будущих климатических периодах на основе данных наблюдений и статистического анализа.

Ключевые слова: общая облачность, региональная климатическая модель, ансамбль моделей, верификация модельных данных.

TOTAL CLOUD COVER IN UKRAINE TILL THE MID-21st CENTURY, BASED ON THE DATA OF AN ENSEMBLE OF REGIONAL CLIMATE MODELS

S.V. Krakovska¹, L.V. Palamarchuk², A.K. Bilozero³, T.M. Shpytal¹

¹Ukrainian Hydrometeorological Institute, 37, Prospekt Nauki, Kyiv, 03028, Ukraine, e-mail: svitlanakravovska@gmail.com, shpital@bigmir.net

²Taras Shevchenko National University of Kyiv, 64/13, Volodymyrska Str., Kyiv, 01601, Ukraine, e-mail: palamarchuk.l@ukr.net

³Ukrainian Hydrometeorological Center, 6-B, Zolotovoritska Str., Kyiv-30, 01601, Ukraine, e-mail: alla.bilozero@gmail.com

Purpose. The paper analyzes the features of spatiotemporal distributions of total cloud cover (TCC) in Ukraine for the past and future climatic periods. TCC and the number of clear and overcast days were analyzed based on the data from the Klimatychnyi Kadastr Ukrainy (Inventory of Climate in Ukraine) for the Standard WMO climatic period 1961–1990. The observation data at 9 meteorological stations evenly covering the territory of Ukraine in the period of 1961–2000 serve as a benchmark for verification and bias correction of regional climate models (RCMs) from the FP-6 ENSEMBLES initiated with boundary conditions from ERA-40 for 1961–2000 and IPCC SRES A1B for 1951–2050 (ensembles-eu.metoffice.com).

Design/methodology/approach. Verification of 12 RCMs by statistical analysis has shown the following: while the data of any individual RCM can have significant absolute errors affecting the reliability of projected characteristics, systematic errors of ensembles of RCMs are in general less significant and can be corrected based on the observational data in the past periods. The paper presents an original methodology of RCM verification and bias correction, which permits to identify and form for TCC an optimum ensemble of 9 RCMs initiated with different Atmosphere-Oceans Global Circulation Models that ensure maximum completeness and range of TCC under possible future climatic scenarios.

Findings. Spatiotemporal distributions of TCC in Ukraine for the periods of 2011-2030 and 2031-2050 calculated with the verified and bias-corrected ensemble of 9 RCMs showed an overall decrease of annual TCC by 1-2% in both periods, with maximum values in spring and summer seasons up to 3%, while for winter seasons slight increase of TCC by 1% is projected. The obtained maps of expected annual and seasonal TCC changes show spatial inhomogeneity and allow us to analyze regional features in both future periods.

Practical value/implications. The obtained spatiotemporal distributions of TCC can serve as a basis for further research and evaluation of recent and future changes in other climate indicators associated with TCC and for many scientific fields and economic sectors related to and dependant on climate characteristics till the middle of the 21st century: agrometeorology, hydrology, biology, ecology, agriculture, energy, construction, transport, tourism, health care, recreation and others.

Keywords: total cloud cover, regional climate model, ensemble of models, verification of model data.

References:

1. Research of climate change regional peculiarities in Ukraine for the 21st century based on numerical modeling. Zvitpro NDR (zaklyuchnyi). Shyfrroboty 1/11. Kyiv: Ukrainskyi hydrometeorologichnyi instytut. 2013, 173 p. [in Ukrainian].
2. Zabolotska T.M., Pidhurska V.M., Shpytal T.M. The features of cloud cover changes over Ukrainian territory during 1961-2008. *Nauk. praci UNDHMI*. Kyiv, 2011, iss. 260, pp. 54-66 [in Ukrainian].
3. Zabolotska T.M., Shpyh V.M. Quantitative changes of cloud cover as indicator of global warming period. *Nauk. praci UNDHMI*. Kyiv, 2015, iss. 267, pp. 23-27 [in Ukrainian].
4. Klimatychnyi kadastr Ukrainy (elektronna versiya). Derzhavna hidrometeorologichna sluzhba, UNDHMI, Tsentralna Heofizychna Observatoriia. Kyiv, 2006 [in Ukrainian].
5. Krakovska S.V., Gnatiuk N.V. Changes of Surface River Runoff in Ukraine till 2050 Based on the Projection of Regional Climate Model Remo. *Geoinformatika*. 2013, no. 3, pp. 76-81 [in Ukrainian].
6. 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. *Nauk. praci UNDHMI*. Kyiv, 2016, iss. 268, pp. 33-44 [in Ukrainian].
7. Krakovska S.V., Palamarchuk L.V., Shpytal T.M. Electronic databases and results of numerical simulations in defining specialized climate indices. *Hydrology, hydrochemistry and hydroecology: the scientific collection*. Kyiv, 2016, vol. 3 (42), pp. 95-105 [in Ukrainian].
8. Pirnach H.M. Chyselne modeliuvannia khmar ta opadiv u systemakh atmosfernykh frontiv. Kyiv: Nika-Tsentr, 2008, 295 p. [in Ukrainian].
9. Shestoye natsionalnoye soobshcheniye Ukrainy po voprosam izmeneniya klimata podgotovlenoe na vypolneniye statey 4 i 12 Ramochnoy konventsii OON ob izmenenii klimata i stati 7 Kiotskogo protokola. Kyiv: 2012, 342 p. URL: http://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_natcom/submitted_natcom/application/pdf/6nc_v7_final_11.pdf (Accessed 30.05.2017) [in Russian].
10. Gnatiuk N., Krakovska S., Palamarchuk L., Bilozero A. Climate change projections for Ukraine in the 21st century based on the best RCM ensembles. *Geophysical Research Abstracts*. 2013. URL: <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2013/EGU2013-889-1.pdf> (Accessed 30 May 2017).
11. Nakićenović N., Swart R. Special Report on Emissions Scenarios. *A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000, 599 p.
12. The science research and results of the ENSEMBLES project. URL: <http://ensembles-eu.metoffice.com> (Accessed 30 May 2017).
13. Warren S.G., Eastman R.M., Hahn C.J. A survey of Changes in Cloud Cover and Cloud Types over Land from Surface Observations, 1971-96. *rnal of Climate*. 2007, no. 20, pp. 717-738.
14. World Meteorological Day - 23 March 2017. <https://public.wmo.int/en/WorldMetDay2017> (Accessed 30 May 2017).

Received 06/06/2017