

УДК 551.58.001.57;551.58.001.18+551.509.3

С.В. Краковська

## **ЧИСЕЛЬНІ ПРОЕКЦІЇ КЛІМАТИЧНИХ ЗМІН В ЛУГАНСЬКІЙ ОБЛАСТІ ДО 2050 РОКУ**

Проведено верифікацію трьох регіональних кліматичних моделей (РКМ) на контрольному періоді 1991-2010 рр. і визначено дві найуспішніші в області за середніми місячними даними про температуру повітря та кількість опадів, з яких сформовано ансамбль РКМ. Розраховано кількісні сценарії щодо можливих змін температури повітря та режиму зволоження відносно сучасного контрольного періоду в Луганській області на два 20-річчя: близьке (2011-2030 рр.) та віддалене майбутнє (2031-2050 рр.). Разом з багаторічними середніми річними та місячними значеннями наведено їх стандартні відхилення та коефіцієнти варіації (для опадів), а також амплітуди річного ходу зазначених характеристик і їх прогнозовані зміни.

**Ключові слова:** зміни клімату, Луганська область, регіональна кліматична модель, проекція кліматичних змін до 2050 р.

### **Вступ**

Одним із визнаних сучасних інструментів вивчення кліматичних змін є чисельні гідродинамічні моделі. Їх застосування має вже досить довгу історію: нещодавно в 2007 р. був виданий вже IV звіт Міжурядової групи експертів зі змін клімату (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC), автори якого, до речі, стали лауреатами Нобелівської премії миру 2007 р. Звіт має близько 1000 сторінок тексту, і переважна більшість викладених положень відноситься до аналізу результатів моделювань більше ніж двох десятків глобальних та регіональних чисельних моделей клімату на XX та XXI століття. Зауважимо, що за висновками цього звіту, Україна не входить до переліку найбільш вразливих до глобального потепління в XXI столітті регіонів нашої планети. Узагалі, для приблизної оцінки змін регіонального клімату України можна використати результати моделювання, отримані для Європи [7], які зараз активно аналізуються кліматологами в різних країнах. Але результати моделювання для України необхідно сприймати з певною обережністю, оскільки в звіті IPCC-2007 територія України виявилась розділеною між двома регіонами (північна та

південна Європа) і взагалі знаходиться на східній межі обох областей моделювань, тобто результати моделей в [7] для центральних та східних областей України мають найбільші похибки.

Відомо, що чисельних моделей клімату, як і наукових методик прогнозу клімату, існує досить багато. Кожна з них має свої переваги і недоліки. Тому передусім необхідно визначити, які з наявних методик та моделей доцільно та можливо з наукового та технічного погляду використовувати для аналізу та прогнозу регіональних особливостей кліматичних змін у Луганській області. Очевидно, що моделі загальної циркуляції атмосфери та океану (МЗЦАО), які в більшості своїх реалізацій мають роздільну здатність  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ , не придатні для досліджень регіональних особливостей кліматичних змін в області, оскільки на її території знаходяться тільки приблизно 1-4 вузли координатної сітки. Тому моделі повинні мати роздільну здатність на порядок вищу, тобто, задовільні горизонтальні кроки сітки мають бути 20-50 км. Таку роздільну здатність мають більшість сучасних гідродинамічних моделей прогнозу погоди та клімату. Ще однією вимогою до моделей є можливість розрахунків з різними початковими та граничними даними, а також наявність відносно вільного доступу до цих даних, бажано в мережі Інтернет.

### **Регіональні кліматичні моделі, що застосовувалися**

Проведений аналіз літературних та інших джерел (ресурси Інтернету, провідні наукові видання, особисті контакти з співробітниками наукових центрів та ін.) для оцінки можливості застосування сучасних чисельних кліматичних моделей для прогнозу можливих змін регіонального клімату Луганської області в XXI столітті показав, що оптимальними для застосування з наукового та технічного погляду є регіональні моделі REMO (Інститут метеорології Макса-Планка, м. Гамбург, Німеччина), RegCM3 (Міжнародний центр теоретичної фізики, м. Трієст, Італія) та RCA-E (Шведський метеорологічний інститут, Норкепінг, Швеція). Вирішальним у виборі цих моделей стало наступне: 1) дані моделі були багаторазово успішно перевірені в моделюванні сучасного клімату практично всіх європейських країн [4, 9, 11, 15, 18, 19], більше того, дані моделі отримали досить високі оцінки в європейському проекті FP-6 ENSEMBLES [23] та на сьогодні застосовуються в іншому широкомасштабному проекті з моделювання кліматичних змін CORDEX

[24]; 2) автор має попередній досить успішний досвід використання даних моделей для вивчення сильних опадів та повеней на Ельбі та в Карпатах [1, 2, 6, 12] та побудови проєкцій для Українського Полісся та басейну Дністра.

Регіональну модель (РЕМО) було розроблено в Інституті метеорології Макса-Планка (м. Гамбург) [9, 17]. РЕМО об'єднує колишню чисельну модель прогнозу погоди EUROPA-MODELL для розрахунків термодинамічних характеристик та блока глобальної кліматичної моделі ЕСНАМ4 [17], в якому розраховуються процеси хмаро та опадоутворення, проходження потоків сонячної радіації в атмосфері, вплив підстильної поверхні на теплові потоки з урахуванням альbedo і типу поверхні. У цій моделі використовується повернута сферична система координат, коли екватор проходить через центр області моделювання для зменшення впливу кривизни Землі на прямокутність координатної сітки, і, так звана, гібридна вертикальна координата, яка є комбінацією ізобаричної та  $\sigma$  вертикальної координати, тобто вертикальні рівні розташовані вздовж підстильної поверхні поблизу землі і з висотою перетворюються в паралельні ізобаричним за спеціальним співвідношенням. В останні роки РЕМО досить успішно застосовувалась для моделювання минулого і майбутнього регіонального клімату не тільки Німеччини, але й інших країн Європи, а також Індії, Аргентини та інших країн світу. РЕМО була однією з провідних в проєкті оцінки водного балансу басейну Балтійського моря [9] та в звіті IPCC-2007 [7].

Регіональна кліматична модель RegCM3 є гідростатичним варіантом 5-ї версії мезомасштабної моделі MM5, яка базується на вирішенні рівнянь для атмосфери, що може стискатися, в  $\sigma$ -системі координат. Як і в MM5, в RegCM3 використовується чисельна схема з координатною сіткою **B** згідно до класифікації Аракави-Мезінгера. Але в цілому модель RegCM3 суттєво відрізняється від свого прогностичного прототипу, оскільки використовує більш економічні та енергетично збалансовані алгоритми для параметризації фізичних процесів. Зокрема, в RegCM3 використано фізичні схеми з кліматичної моделі Community Climate Model version 3 (CCM3) [10]. Модель може враховувати ефекти парникових газів, атмосферних аерозолів, піднятих з поверхні пустель мінеральних часток, а також вплив підсіткових процесів під час розрахунків взаємодії атмосфери з підстильною поверхнею. Модель RegCM3 досить успішно використовується для моделювання клімату різних регіонів земної кулі [4,

15, 19]. Користувачі моделі мають можливість працювати з різними наборами початкових та граничних умов. В мережі Інтернет створено спеціальний сайт RegCNET для користувачів моделі, де всі зацікавлені мають вільний доступ до постійно оновлених версій моделі, її опису та інструкцій з використання, архіву даних, а також можуть спілкуватися з досвідченішими користувачами та безпосередньо з розробниками коду моделі [15], що безперечно є великою перевагою перед іншими моделями, для використання яких потрібні спеціальні дозволи розробників, а нерідко й грошові внески.

Регіональна модель RCA розробляється в Центрі Росбі (Швеція) з 1997 року. Базовою моделлю для неї була модель прогнозу погодиHIRLAM. У новій версії моделі RCA3 було значно поліпшено представлення підстильної поверхні, коли в межах однієї координатної комірки розрізняються декілька можливих типів, наприклад, море або озеро з/без покриття кригою та суша, яка теж може поділятися на ліс чи відкриту ділянку з/без снігового покриву. І для кожної такої підсіткової фракції розраховуються свої балансові рівняння та визначається температура поверхні. Також у новій версії моделі було поліпшено схеми переносу сонячної радіації, турбулентності й параметризації хмаро та опадоутворення. Модель має 24 гібридні вертикальні рівні, горизонтальний розмір координатної сітки 278x170 вузлів. Крок розрахунків – 30 хвилин [11, 18].

Прогностичними змінними в усіх моделях є тиск, температура, горизонтальні проекції швидкості вітру, абсолютна вологість і водність хмар. Початковими та граничними даними для моделей можуть бути дані аналізу, наприклад, Європейського центру середнь-строкового прогнозу погоди (ECMWF), реаналізу, наприклад, ERA40 [21], або більшості глобальних кліматичних моделей, наприклад, з IPCC-2007 [13, 16]. У цьому дослідженні всі РКМ були ініційовані глобальною моделлю ECHAM5, що була розрахована за сценарієм A1B [14] для періоду 1950-2100 рр. Зауважимо, що нещодавно проведені дослідження показали, що саме ця модель загальної циркуляції атмосфери та океанів найадекватніше відтворює кліматичні умови в Україні [3, 5].

### **Верифікація регіональних кліматичних моделей**

Верифікація регіональних кліматичних моделей (РКМ) проводилась за набором певних статистичних параметрів окремо для температури та опадів для двох періодів, а саме 1971-1990 рр., що будемо вважати за

недавнє минуле, та період 1991-2010 рр., який будемо називати «сучасним кліматом» і по відношенню до якого будуть розраховуватися проєкції на майбутнє. Характеристики усереднювалися за всією територією області, що в РКМ так, як і в E-Obs [8], представлена 54 вузлами розміром 25x25 км. Аналізувалися багаторічні середні річні та місячні характеристики, їх стандартні відхилення як міжрічна мінливість та амплітуда річного ходу, коефіцієнт варіації (для опадів), абсолютні й середньоквадратичні помилки, а також розраховувалися коефіцієнти кореляції. Результати проведеного аналізу представлено на рис. 1-3.

Очевидно, що верифікація моделей передбачає введення певних критеріїв, за якими будуть оцінюватися РКМ і на їх основі буде сформовано ансамбль [2, 6]. Очевидно також, що ці критерії головним чином мають залежати від тих цілей, для яких передбачається використовувати дані ансамблю РКМ. Далі детальніше буде представлено методики відбору моделей в ансамблі для температури й опадів для цілей цього дослідження.

#### *Формування ансамблю РКМ для оцінки проєкцій зміни температури*

Насамперед зауважимо, що, як вже відмічалось вище, для цілей цього дослідження не достатньо аналізувати тільки річні значення. Але проведення такого аналізу необхідно для того, щоб в цілому оцінити наскільки адекватно моделі можуть відтворювати клімат даного регіону і вже на першому етапі, можливо, відбракувати ті з них, що дуже далекі від реального стану кліматичної системи. На рис.1а представлено бульбашкову діаграму для середньої річної температури, яка дозволяє порівняти результати моделювань РКМ та їх ансамблів з даними спостережень, у цьому випадку з даними E-Obs, за основними характеристиками. А саме: багаторічними середніми (вісь X), стандартними відхиленнями (амплітуда річного ходу) (вісь Y) та середньоквадратичними помилками (розмір бульбашок).

Декілька висновків можна зробити з діаграми рис. 1а. По-перше, практично у всіх РКМ та їх ансамблів, за винятком REMO у другому періоді, річна амплітуда (стандартне відхилення) менша за E-Obs. По-друге, найкраще відтворює як самі річні температури, так і їх амплітуди, REMO, найгірше – RegCM3, відповідно і помилки найменші у першій, а найбільші в останній РКМ. По-третє, очевидно, що всі РКМ правильно представили тенденцію до потепління від недавнього минулого до сучасності, але в E-Obs це потепління навіть більше за всі РКМ, тобто в

природі ріст температури відбувався інтенсивніше, ніж передбачено в сценарії А1В. І по-четверте, в обидва періоди найменшими були помилки REMO та ансамблю В.

Як вже було відмічено, в цьому аналізі виявлено, що найкращою РКМ є REMO, а серед ансамблів – В, який складається з REMO та RCA3-E.

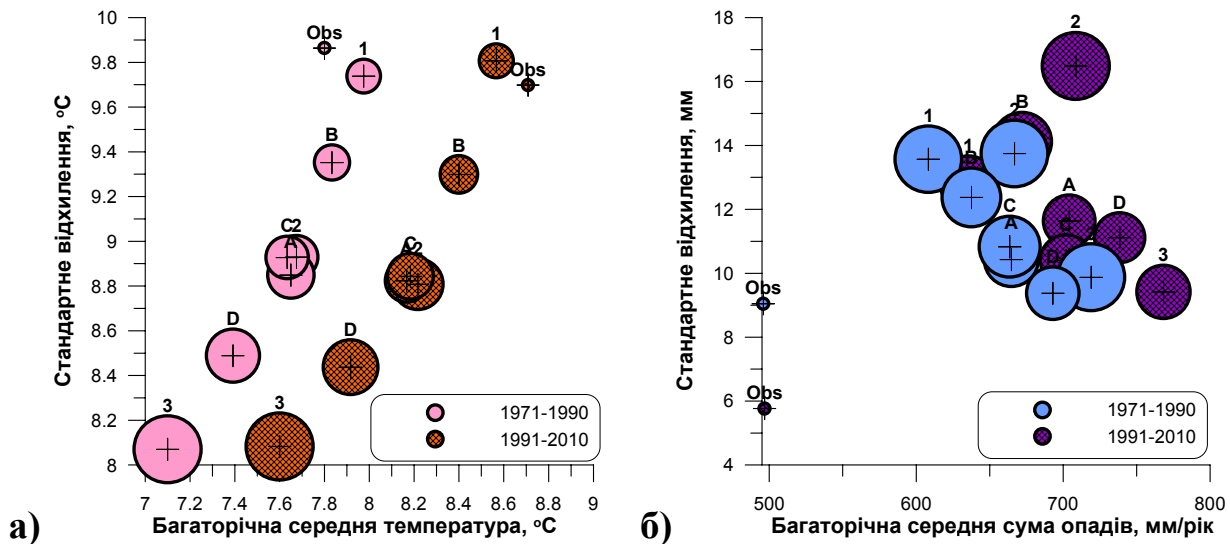


Рис. 1. Діаграми для оцінки результатів РКМ (1 – REMO, 2 – RCA3-E, 3 – RegCM3) та їх ансамблів (А – 1-2-3, В – 1-2, С – 1-3, D – 2-3) щодо багаторічних середніх значень температури повітря (а) та кількості опадів (б), їх стандартних відхилень та середньоквадратичних помилок (розмір бульбашок) порівняно з E-Obs для двох періодів

Щомісячні абсолютні помилки відтворення багаторічних середніх температур повітря в РКМ разом із річними значеннями та коефіцієнтами кореляції для обох періодів, що аналізуються, наведено на рис. 2 разом із таблицею значень. З цієї гістограми зокрема очевидно, що в основному в холодну пору року в моделях температура повітря вища, а в теплу – нижча за дані E-Obs. Також ще очевидніше, що модель RegCM3 бажано не включати до ансамблю, оскільки її помилки не тільки найбільші, а й в більшість місяців перевищують 2 °C, що є межею у прогнозі по населеному пункту.

Зауважимо, що самі по собі отримані помилки є систематичними, які можна застосовувати для корекції результатів моделей. Але в цьому дослідженні, коли ми маємо «еталонні» значення з E-Obs і хочемо отримати не абсолютні величини, що РКМ змодельовала для майбутніх періодів, а

відносні зміни кліматичних характеристик, ці помилки враховуватися не будуть. Відмітимо також, що в REMO діапазон помилок у недавньому минулому більший і складає  $-1,2 \div 1,4$  °C проти  $-0,9 \div 1,0$  °C, хоча ці діапазони найменші порівняно з іншими РКМ. У RCA3-E ці величини відповідно  $-1,9 \div 2,3$  °C проти  $-2,5 \div 1,5$  °C і у RegCM3 –  $-3,1 \div 3,6$  °C та  $-3,5 \div 1,4$  °C. Порівняння двох періодів на рис. 2 демонструє те, що в сучасний час помилки РКМ все ж менші, особливо в листопаді.

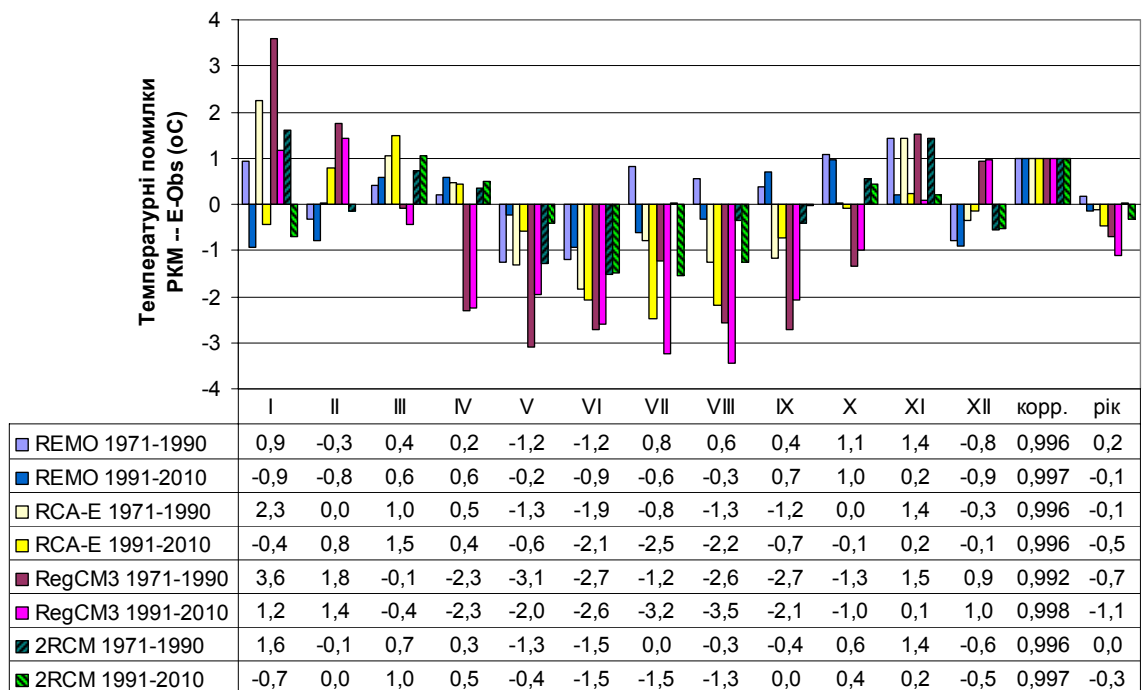


Рис. 2. Абсолютні щомісячні та річні помилки температури повітря РКМ для двох періодів та коефіцієнти кореляції річних розподілів відносно E-Obs

Аналіз коефіцієнтів кореляції, що характеризує синхронність змін у часових розподілах, показує, що для всіх РКМ вони вищі за 0,99, тобто сам річний хід температури в РКМ моделюється відмінно. Але очевидно, що ця характеристика не може бути вирішальною у відборі РКМ у певному регіоні, оскільки, наприклад, найбільший коефіцієнт кореляції отримано для RegCM3 у сучасний період (0,998), і в той же час для тієї ж моделі виявлено найбільшу абсолютну помилку річної температури ( $-1,1$  °C). Тобто, наголосимо, що для річних розподілів температури коефіцієнти кореляції не є інформативними і не повинні братися до уваги.

Таким чином, верифікація регіональних кліматичних моделей щодо температури повітря в Луганській області показала, що найкращою РКМ у цьому регіоні є REMO. Модель RCA3-E також є цілком прийнятною, і для прогнозу місячних температур можна рекомендувати використовувати ансамбль з цих двох РКМ, щоб отримати не тільки середнє, а й можливі відхилення від нього за цими двома моделями. Для досліджень, які потребують застосування добових температур, можна рекомендувати використовувати дані REMO.

#### *Формування ансамблю РКМ для оцінки проєкцій зміни сум опадів*

Аналіз кількості опадів, що розраховані в РКМ, також розпочнемо з річних характеристик (рис. 1б). Перш за все очевидно, що в усіх РКМ опадів принаймні на 20% більше за E-Obs. Найближча до еталону за річним значенням знову виявилась РКМ REMO, найбільша ж абсолютна помилка знову в RegCM3, а РКМ RCA3-E – все ж ближча до REMO, за винятком стандартного відхилення в сучасний період. Взагалі, стандартні відхилення в РКМ також виявилися більшими за еталон, причому в сучасний період, коли в E-Obs значно зменшилася амплітуда з 9 до 5,8 мм/міс., в моделях відхилення залишилися практично ті ж самі і тому, наприклад, для другої моделі RCA3-E перевищують більше ніж у три рази відхилення еталону.

Оскільки було виявлено значні перевищення річної кількості опадів у РКМ порівняно з еталоном, то очевидно, що й місячні значення будуть в основному більшими. Але, як вже було вище зазначено, якщо такі помилки є систематичними, то їх можна позбутися шляхом визначення і порівняння не абсолютних значень, а їх змін. Тому не будемо наводити і аналізувати щомісячні абсолютні помилки, натомість будемо визначати «успішність» РКМ та їх ансамблів за допомогою діаграм Тейлора [22], що наведені на рис. 3 для двох періодів. На цих діаграмах разом зі стандартним відхиленням, про яке вже було згадано вище, наведено середні квадратичні помилки (RMSD) та коефіцієнти кореляції, які саме для річного ходу опадів є набагато вагомішими характеристиками, оскільки розрахунки опадів у різних РКМ параметризуються по-різному.



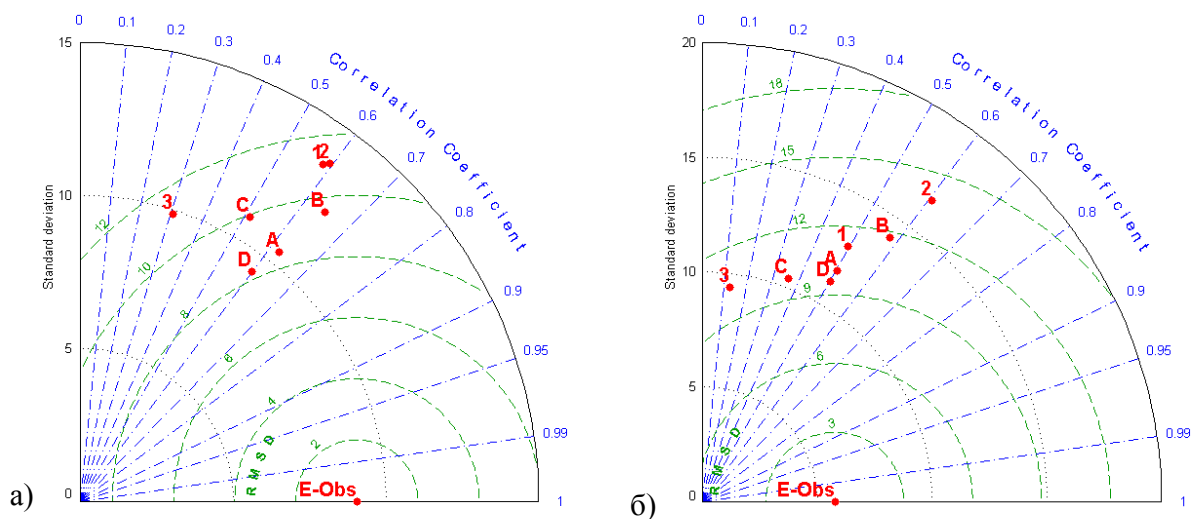


Рис.3. Діаграми Тейлора для кількості опадів для (а) 1971-1990 рр. та (б) 1991-2010 рр. На діаграмах 1 – REMO, 2 – RCA3-E, 3 – RegCM3 та їх ансамблі А – 1-2-3, В – 1-2, С – 1-3, D – 2-3

Як видно з рис. 3, так як і на рис. 1б, найближче значення стандартного відхилення (радіальні лінії чорних точок) для періоду недавнього минулого в ансамблі D, а в сучасному періоді - у моделі RegCM3. Але в цієї ж РКМ найнижчі, хоч і позитивні, коефіцієнти кореляції (з центру координат сині лінії крапок з точками) в обох періодах. Вони найвищі (близько 0,6) – в ансамблі В, а в сучасному періоді - у другій РКМ. Стосовно ж середньоквадратичної помилки (зелені пунктирні лінії навколо E-Obs), то, як не дивно, найнижча вона в ансамблях D і А, а найбільша – у індивідуальних моделях. Зауважимо також, що якщо в недавньому минулому моделі 1 і 2 мали практично однакові характеристики на діаграмі Тейлора, то в сучасний період кращий коефіцієнт кореляції у РКМ RCA3-E, а найменші помилки – у REMO. Тому ансамбль для оцінки можливих майбутніх змін опадів, так само як і температури, буде складатися з цих двох моделей.

### **Кількісний сценарій кліматичних змін у Луганській області до 2050 року**

Для отримання кількісних оцінок щодо проєкції кліматичних змін до 2050 р. у Луганській області було застосовано ансамбль із двох регіональних кліматичних моделей, які виявили найкращі результати за проведеною верифікацією на минулому та сучасному періодах. А саме це моделі REMO та RCA3-E. Як було зазначено вище, визначалися зміни кліматичних характеристик двох майбутніх 20-річних періодів 2011-2030

та 2031-2050 рр. відносно сучасного – 1991-2010 рр. Для цього спочатку усереднювалися щомісячні дані про температуру повітря та кількість опадів цих двох моделей (ансамблеве усереднення) для всіх вищезазначених періодів і отримували абсолютні для температури та відносні для опадів різниці відповідних значень. Для отримання абсолютних величин як базові використовували дані E-Obs за 1991-2010 рр.

*Прогнозовані зміни середніх річних та місячних температур повітря*

Основні результати проведеного дослідження щодо очікуваних змін температурного режиму в Луганській області представлено на рис. 4, 5а та в табл.1. Деякою мірою на наведених рисунках та в таблиці значення повторюються, але дають більше можливості для їх різнопланових аналізів та застосувань фахівцями різних галузей. Кількісні значення, що наведено на рис. 4 у вигляді гістограми та таблиці, отримано з розрахунку двох найуспішніших в цьому регіоні РКМ REMO та RCA3-E, що розраховувалися з граничними умовами з глобальної моделі ECHAM5 за сценарієм A1B. Також наведено усереднені за їх ансамблем значення, які можна вважати остаточним результатом дослідження.

З рис. 4 очевидно, що обидві моделі в основному прогнозують схожі зміни не тільки за напрямом, а й за значеннями. Винятком є лютий близького майбутнього, коли знаки в обох моделях протилежні, а їх ансамблеве середнє значення – нуль. Також для цього періоду характерні мінімальні зміни температур повітря не тільки в лютому, а й в квітні та з липня до вересня. Але ці зміни в обох моделях мають близькі значення, тому далі перейдемо до аналізу їх ансамблевого середнього за рис. 5а та табл.1.

Аналіз отриманих кількісних проєкцій зміни температурного режиму в Луганській області для двох 20-річних періодів до 2050 р. дозволяє зробити декілька основних висновків. Зокрема:

- у період близького майбутнього, тобто 2011-2030 рр., практично у всі місяці очікується підвищення температури за винятком лютого, березня та квітня, коли прогнозується навіть деяке похолодання порівняно з сучасним періодом, а з липня до вересня температура повітря практично лишатиметься без змін на відміну від наступних 20 років, тобто в період 2031-2050 рр.;
- у період 2011-2030 рр. максимальне потепління очікується в червні (+1,3 °C), листопаді (+1,8 °C) та грудні (+2,3 °C);

- до середини ХХІ ст. потепління практично у всі місяці буде збільшуватися, за винятком травня та листопада, коли воно залишатиметься на тому самому рівні, і червня, коли очікується зменшення потепління порівняно з періодом 2011-2030 рр.;
- максимальні підвищення температури повітря у період 2031-2050 рр. очікуються в холодну половину року з жовтня до березня з абсолютним максимумом у грудні (+3,3 °С), також досить значне потепління близько +1,5 °С прогнозується для теплого періоду з липня до вересня, знову ж таки на відміну від попередніх 20 років;
- на тлі загального потепління і збільшення середніх річних температур відмічається зменшення амплітуди річного ходу на -0,2 °С та -0,5 °С для двох майбутніх періодів відповідно, що свідчить про очікуване зменшення континентальності клімату;
- також зменшуватимуться стандартні відхилення як для річних, так і для більшості місячних температур, що свідчить про деяку стабілізацію температурного режиму в ці місяці, винятками є січень та жовтень і квітень у близькому майбутньому, для яких це твердження протилежне.

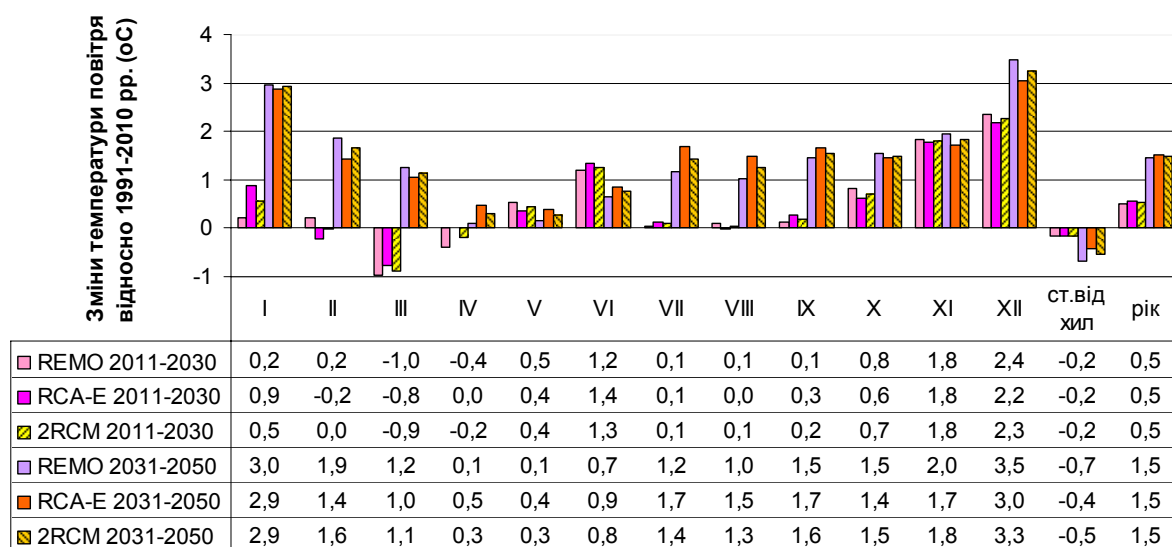


Рис. 4. Очікувані зміни багаторічних середніх місячних та річних температур повітря (°С) та їх річних амплітуд (ст. відхил) за даними двох РКМ та їх ансамблю для двох майбутніх 20-річних періодів відносно контрольного 1991-2010 рр. у Луганській області

Таблиця 1

Багаторічні середні температури повітря (°C), їх стандартні відхилення (СВ) та проєкції змін за даними E-Obs та ансамблю РКМ за вказані періоди

Місяць	E-Obs 1991-2010 рр.		Проєкція РКМ 2011-2030 рр.				Проєкція РКМ 2031-2050 рр.			
	Середнє	СВ	Середнє		СВ		Середнє		СВ	
			зміна	знач	зміна	знач	зміна	знач	зміна	знач
I	-4,3	3,4	0,5	-3,8	0,2	3,6	2,9	-1,4	0,5	3,9
II	-3,9	3,2	0,0	-3,9	-0,1	3,1	1,6	-2,2	-0,6	2,6
III	1,6	2,5	-0,9	0,7	0,4	3,0	1,1	2,7	-1,1	1,5
IV	9,7	1,8	-0,2	9,5	0,1	1,9	0,3	9,9	-0,1	1,6
V	15,5	1,8	0,4	16,0	-0,4	1,4	0,3	15,8	-0,6	1,2
VI	19,9	1,9	1,3	21,2	0,0	1,8	0,8	20,7	0,0	1,8
VII	22,4	2,0	0,1	22,5	-0,2	1,9	1,4	23,8	-0,3	1,7
VIII	21,2	1,7	0,1	21,3	-0,7	0,9	1,3	22,5	0,0	1,6
IX	15,2	1,9	0,2	15,4	-0,7	1,1	1,6	16,7	0,1	2,0
X	8,7	1,4	0,7	9,4	0,2	1,5	1,5	10,2	0,2	1,5
XI	1,8	3,1	1,8	3,6	-0,8	2,4	1,8	3,7	-0,4	2,7
XII	-3,3	3,0	2,3	-1,0	-0,1	2,9	3,3	-0,1	-1,2	1,7
Ст.відх.- річн ампл	9,7		-0,2	9,5			-0,5	9,2		
Рік	8,7	0,9	0,5	9,2	-0,2	0,7	1,5	10,2	-0,3	0,6

Таблиця 2

Багаторічні середні суми опадів (мм), їх стандартні відхилення (СВ), коефіцієнти варіації (к-т вар) та проєкції змін за даними Е-Obs та ансамблю РКМ за вказані періоди

Міс.	Е-Obs 1991-2010 рр.			Проєкція РКМ 2011-2030 рр.					Проєкція РКМ 2031-2050 рр.				
	Серед	СВ	К-т вар	Середнє		СВ		К-т вар	Середнє		СВ		К-т вар
				Змін	Знач	Змін	Знач		Змін	Знач	Змін	Знач	
I	39	22,9	0,59	0,3	39	-5,0	17,9	0,46	3,9	43	-1,3	21,6	0,51
II	38	19,7	0,52	1,6	40	0,9	20,6	0,52	4,8	43	7,9	27,6	0,64
III	40	21,7	0,54	3,7	44	7,0	28,7	0,65	3,1	43	5,9	27,6	0,64
IV	32	18,3	0,57	10,0	42	11,3	29,7	0,70	10,2	43	8,0	26,3	0,62
V	44	24,5	0,55	-11,2	33	-4,1	20,4	0,62	-2,7	42	-3,6	20,8	0,50
VI	51	27,8	0,54	-0,9	50	5,8	33,6	0,67	5,0	56	12,6	40,3	0,72
VII	49	33,0	0,68	-2,9	46	-6,7	26,3	0,58	-14,1	34	-8,4	24,6	0,71
VIII	32	20,4	0,64	3,9	36	3,3	23,8	0,66	-1,2	31	-1,8	18,7	0,61
IX	46	32,7	0,71	11,6	57	2,4	35,0	0,61	10,2	56	-0,5	32,2	0,57
X	40	18,7	0,47	-8,4	31	0,1	18,9	0,60	-13,5	26	0,2	18,9	0,72
XI	40	23,0	0,58	5,2	45	2,4	25,4	0,56	-3,3	37	0,4	23,4	0,64
XII	46	28,5	0,62	9,1	55	1,3	29,8	0,54	11,7	58	1,3	29,8	0,52
Ст. відх.	5,7			2,1	7,8				3,9	9,6			
Рік	497	117,8	0,24	10,5	507	-16,8	101,0	0,20	2,1	499	-1,4	116,3	0,23

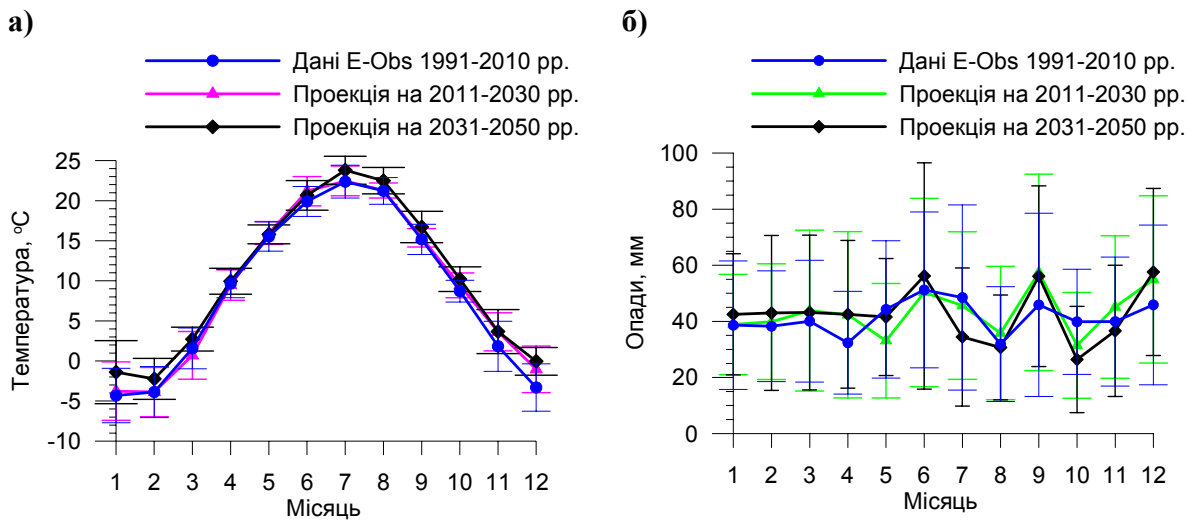


Рис. 5. Багаторічні середні місячні (а) температури повітря (°C) та (б) суми опадів (мм) з стандартними відхиленнями за даними E-Obs та їх проекції на близьке (2011-2030 рр.) та віддалене (2031-2050 рр.) майбутнє за даними сценарного розрахунку A1B ансамблю РКМ

#### *Зміни режиму зволоження*

Аналогічно до аналізу очікуваних змін температурного режиму в Луганській області, що представлено вище, проведемо аналіз отриманих результатів щодо змін режиму зволоження, які наведено на рис. 5б, рис. 6 та в табл. 2. Але перед цим зауважимо, що кількісні значення очікуваних сум опадів було отримано дещо по-іншому, порівняно з температурою повітря, коли до значень контрольного періоду були додані абсолютні зміни температури повітря за даними ансамблю з РКМ. Для опадів застосування такої методики призведе до значних помилок, оскільки, як було показано вище в розділі верифікації моделей, розрахунок опадів в РКМ параметризується, тобто розраховується непрямо, і тому абсолютні значення сум опадів мають значні помилки. Саме для їх виключення методика отримання прогнозованих значень, які вкрай важливі для досліджень фахівців інших галузей, була наступною:

- визначалися відносні зміни місячних сум опадів та їх стандартних відхилень (СВ) у відсотках для обох майбутніх періодів порівняно з сучасним для визначених двох найуспішніших у регіоні РКМ, які представлено на рис. 6 разом з їх ансамблевим середнім у вигляді гістограми та таблиці значень;

- за цими відносними значеннями розраховувалися абсолютні зміни опадів та СВ у мм за даними контрольного періоду E-Obs, які наведено в табл.2;
- отримані абсолютні зміни додавались до значень E-Obs, і саме їх представлено на рис. 5б та у табл.2 як остаточні результати.

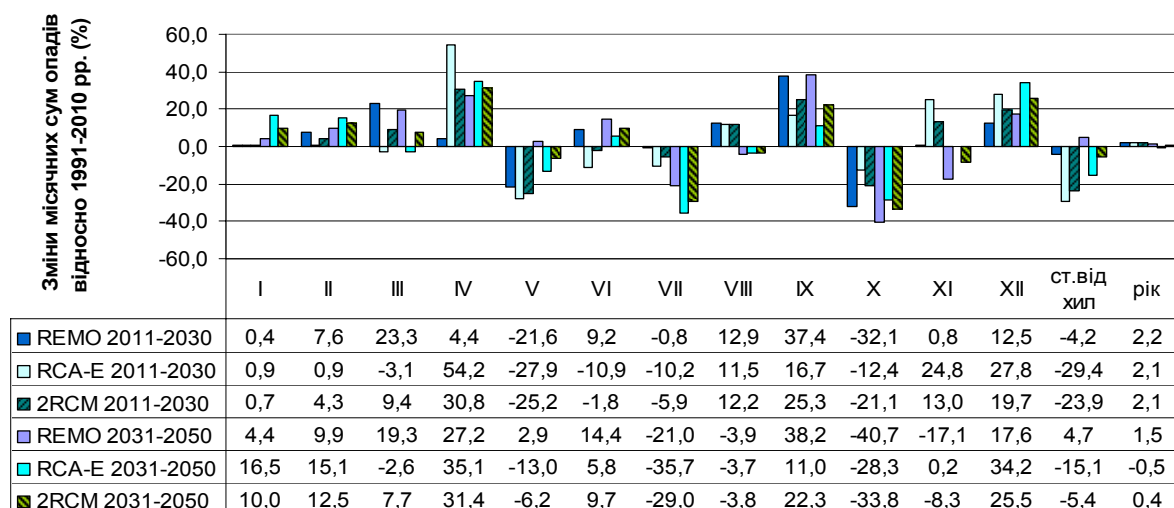


Рис. 6. Очікувані відносні зміни багаторічних середніх місячних та річних сум опадів (%) та їх річних амплітуд (ст.відхил) за даними двох РКМ та їх ансамблю для двох майбутніх 20-річних періодів відносно контрольного 1991-2010 рр. у Луганській області

За наведеними даними можна зробити декілька висновків щодо очікуваних змін у режимі зволоження в Луганській області до середини XXI ст.:

- річні суми опадів практично не зміняться так само, як і їх стандартні відхилення і коефіцієнти варіації в обох майбутніх періодах;
- напрямок змін кількості опадів збігається в обох моделях практично у всі місяці за винятком березня, травня (2 період), червня (1 період) та листопада (2 період);
- по три місяці виходять за межі 20% змін як в бік збільшення кількості опадів (квітень, вересень та грудень), так і зменшення (травень, липень та жовтень);
- у цілому опади скоріше збільшуватимуться в холодну пору року з грудня до квітня і зменшуватимуться в теплу з травня до липня.

Таким чином, проведене та представлене дослідження дозволило отримати кількісний сценарій щодо можливих змін основних кліматичних

характеристик в Луганській області на два 20-річні періоди: близьке (2011-2030 рр.) та віддалене майбутнє (2031-2050 рр.) відносно сучасного контрольного періоду 1991-2010 рр., що має знайти широке практичне застосування в дослідженнях фахівців різних суміжних з кліматологією наукових напрямках, а також для розробки адаптаційних та пом'якшувальних заходів для кліматозалежних галузей економіки та інших сфер діяльності в регіоні. Також проведена верифікація декількох регіональних кліматичних моделей виявила найбільш «успішну» РКМ в Луганській області, а саме REMO, добові дані якої можна рекомендувати для застосування в тих дослідженнях, де це необхідно (наприклад, агрометеорологія, гідрологія, аналіз екстремальних та небезпечних явищ погоди).

Автор висловлює подяку за використання даних з європейського проекту EU-FP6 ENSEMBLES [23] та провайдерам даних E-OBS проекту ECA&D [8, 22]. Представлене дослідження виконано частково за підтримки проекту Європейського Союзу «Посилені економічні й правові інструменти для збереження степового біорізноманіття, адаптації до зміни клімату та її пом'якшення (Степове біорізноманіття)» в рамках тематичної програми для навколишнього середовища й сталого управління природними ресурсами, включаючи енергію.

\* \*

1. Краковская С.В., Паламарчук Л.В., Дюкель Г.А. Региональная модель (РЕМО) в изучении сильных осадков в Карпатах // Метеорологія, кліматологія та гідрологія. - №50, 2008. - С.75-80.
2. Краковська С.В., Паламарчук Л.В., Шедеменко І.П., Дюкель Г.О., Гнатюк Н.В. Верифікація даних світового кліматичного центру (CRU) та регіональної моделі клімату (РЕМО) щодо прогнозу приземної температури повітря за контрольний період 1961-90 рр. // Наук. праці УкрНДГМІ. -№257, 2008. - С. 42-60.
3. Краковська С.В., Паламарчук Л.В., Шедеменко І.П., Дюкель Г.О., Гнатюк Н.В. . Моделі загальної циркуляції атмосфери та океанів у прогнозуванні змін регіонального клімату України в ХХІ ст.// Геофизический журнал. – № 6, Т. 33, 2011. -С.68-81.
4. Кричак С.О. Региональное моделирование современного климата европейской территории России с помощью модели RegCM3 // Метеорологія и гидрологія. – №1, 2008. – С.31-41.



5. Паламарчук Л.В., Гнатюк Н.В., Краковська С.В., Шеддеменко І.П., Дюкель Г.О. Сезонні зміни клімату в Україні в XXI столітті // Наук. праці УкрНДГМІ. -№259, 2010. –С.104-120.
6. Паламарчук Л.В., Краковська С.В., Шеддеменко 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. -№258, 2009. – С. 69-84.
7. Christensen, J.H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R.K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C.G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. Sarr and P. Whetton. Regional Climate Projections. *In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of WG I to the Fourth Assessment Report of the IPCC [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – 2007. – 94 pp.
8. Haylock, M.R., N. Hofstra, A.M.G. Klein Tank, E.J. Klok, P.D. Jones, M. New. A European daily high-resolution gridded dataset of surface temperature and precipitation. *J. Geophys. Res (Atmospheres)*, **113**, D20119, doi:10.1029/2008JD10201. – 2008. – 12 p.
9. Jacob, D., B.J.J.M. Van den Hurk, U. Andre, G. Elgered, C. Fortelius, L.P. Graham, S.D. Jackson, U. Karstens, Chr. Kopken, R. Lindau, R. Podzun, B. Rockel, F. Rubel, B.H. Sass, R.N.B. Smith, X. Yang: A comprehensive model inter-comparison study investigating the water budget during the BALTEX-PIDCAP period. // *Meteor. Atm.*, 2001.- № 77.- C.61-73.
10. Kiel, J.T., J. J. Hack, G. B. Bonan, B. A. Boville, B. P. Briegleb, D. L. Williamson, and P. J. Rasch: Description of the NCAR Community Climate Model (CCM3) // NCAR Tech. Rep. –1996. – TN-420+STR. – 152 pp.
11. Kjellström, E., Bärring, L., Gollvik, S., Hansson, U., Jones, C., Samuelsson, P., Rummukainen, M., Ullerstig, A., Willén U. and Wyser, K. A 140-year simulation of European climate with the new version of the Rossby Centre regional atmospheric climate model (RCA3) // *Reports Meteorology and Climatology* 108. – 2005. – SMHI, SE-60176 Norrköping, Sweden, 54 pp.
12. Krakovska, S., Goettel, H., Jacob, D., Pfeifer, S. Study of the flood events in the Carpathians and along the Elbe river with aid of the numerical models. // *Geophysical Research Abstracts*. – 2006. – Vol. 8, 00060, SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-00060.
13. Meehl, G.A., T.F. Stocker, W.D. Collins, P. Friedlingstein, A.T. Gaye, J.M. Gregory, A. Kitoh, R. Knutti, J.M. Murphy, A. Noda, S.C.B. Raper, I.G. Watterson, A.J. Weaver and Z.-C. Zhao. 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 [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – 2007. -100 pp.
14. 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 pp.
  15. Pal J.S., Giorgi F., Bi X. et al.: Regional Climate Modeling for the Developing World: The ICTP RegCM3 and RegCNET // *Bull.Amer.Meteor.Soc.*– 2007.– Vol.88: 1395–1409.
  16. Randall, D.A., R.A. Wood, S. Bony, R. Colman, T. Fichefet, J. Fyfe, V. Kattsov, A. Pitman, J. Shukla, J. Srinivasan, R.J. Stouffer, A. Sumi and K.E. Taylor. *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 [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – 2007. -74 pp.
  17. Roeckner, E., K. Arpe, L. Bengtsson, M. Christoph, M. Claussen, L. Dumenil, M. Esch, U. Schlese, U. Schulzweida. The atmospheric general circulation model ECHAM4: Model description and simulation of present-day climate // *Max-Planck-Institute fur Meteorologie, Report.*– 1996. – No.218.
  18. Samuelsson, P., Jones, C.G., Willén, U., Ullerstig, A., Gollvik, S. and co-authors. The Rossby centre regional climate model RCA3: Model description and performance // *Tellus.- 2011.- 63A, 4–23.*
  19. Seth, A., S. A. Rauscher, S. J. Carmago, J.-H. Qian, and J. S. Pal: RegCM3 regional climatologies using reanalysis and ECHAM global model driving fields // *Climate Dyn.*– 2006.– Vol.28.– 461–480.
  20. Taylor, K.E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram // *J. Geophys. Res.*- 2001. – Vol.106. - 7183-7192.
  21. Uppala S.M., Kellberg P.W., Simmons A.J., et al. The ERA-40 reanalysis // *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*- 2005.- Vol.131.- pp. 2961-3012.
  22. <http://eca.knmi.nl>
  23. <http://ensembles-eu.metoffice.com>
  24. [http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/SF\\_RCD\\_CORDEX.html](http://wcrp.ipsl.jussieu.fr/SF_RCD_CORDEX.html)

С.В. Краковская

## **ЧИСЛЕННЫЕ ПРОЕКЦИИ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ В ЛУГАНСКОЙ ОБЛАСТИ ДО 2050 ГОДА**

*Проведена верификация трех региональных климатических моделей (РКМ) на контрольном периоде 1991-2010 гг. и определены две наиболее успешные в области по средним месячным данным о температуре воздуха и количеству осадков, из которых сформирован ансамбль РКМ. Рассчитаны количественные сценарии возможных изменений температуры воздуха и режима увлажнения относительно современного контрольного периода в Луганской области на два 20-летия: близкое (2011-2030 гг.) и удаленное (2031-2050 гг.) будущее. Вместе с многолетними средними годовыми и месячными значениями приводятся их стандартные отклонения и коэффициенты вариации (для осадков), а также амплитуды годового хода указанных характеристик и их прогнозируемые изменения.*

**Ключевые слова:** изменение климата, Луганская область, региональная климатическая модель, проекция климатических изменений до 2050 г.

S.V. Krakovska

## **NUMERICAL PROJECTIONS OF CLIMATE CHANGE IN LUHANSK REGION TILL 2050**

*Verification of three Regional Climate Models (RCM) has been performed in the Luhansk region for 1991-2010 control period and two of them were found good enough in representation of mean monthly air temperature and precipitation sums to form an ensemble of RCM. Quantitative scenarios of possible change of air temperature and precipitation regime relatively to current control period in the Luhansk region have been calculated for two 20-years periods of near (2011-2030) and far (2031-2050) future. Multy-year annual and monthly air temperature and precipitation with standard deviations, coefficients of variation (for precipitation) and amplitudes of annual distributions and projected changes of mentioned characteristics are analyzed.*

**Keywords:** climate change, Luhansk region, regional climate model, climate change projections till 2050