

УДК 551.58.001.57;551.58.001.18+551.509.3

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

ВЕРИФІКАЦІЯ ДАНИХ СВІТОВОГО КЛІМАТИЧНОГО ЦЕНТРУ (CRU) ТА РЕГІОНАЛЬНОЇ МОДЕЛІ КЛІМАТУ (РЕМО) ЩОДО ПРОГНОЗУ ПРИЗЕМНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ ЗА КОНТРОЛЬНИЙ ПЕРІОД 1961-1990 рр.

Наведено перші результати верифікації чисельної кліматичної моделі REMO та даних світового центру кліматичних досліджень CRU для території України за контрольний період 1961-90 рр. Підтверджено можливість використання даних CRU для верифікації результатів моделювань сучасного регіонального клімату України та отримано систематичні похибки регіональної моделі REMO щодо приземної температури повітря.

Вступ

Одним з основних інструментів вивчення кліматичних змін у сучасній кліматології є чисельні кліматичні моделі. Вони дозволяють уточнити напрям і швидкість змін кліматичних характеристик, а отримані дані можуть стати одними з вирішальних у процесі планування стратегії розвитку різних сфер господарської діяльності на найближчі роки та десятиліття.

Суть моделювання регіонального клімату зводиться до інтегрування енергетично збалансованих регіональних моделей атмосфери з високим просторовим розділенням за тривалі часові періоди. При цьому на бічних границях області моделювання здійснюється безперервне оновлення та узгодження даних, які отримують з глобальних кліматичних моделей. У зв'язку з цим існують певні проблеми під час порівняння даних спостережень з модельними. Якщо часовий інтервал інтегрування під час безперервного оновлення даних на бічних границях становить декілька днів чи навіть місяців, то результати чисельного експерименту всередині області моделювання можуть істотно відрізнятись від фактичних даних у конкретні моменти часу. Але, зважаючи на те, що моделі достатньо точно враховують

різномасштабні кліматоутворюючі ефекти, результати моделювання, усереднені за досить тривалий (багаторічний) період, є співставними з аналогічними даними, що отримані з метеорологічних спостережень. Такий підхід у моделюванні регіонального клімату є загально визнаним і рекомендованим для застосування ведучими світовими центрами з вивчення кліматичних змін [6, 8-11, 13, 14, 17].

Значна частина сучасних досліджень змін регіонального клімату за допомогою чисельних моделей виконана для Північної Америки та Західної Європи, але в останні роки робляться спроби моделювання клімату й для інших районів. Як приклад, можна навести моделювання регіонального клімату європейської території Росії (ЄТР) з використанням моделей регіонального клімату (розділення 50 км), створених у ГГО. У роботі [6] вказано, що чисельний експеримент загалом був успішним, але й виявив окремі проблеми. Зокрема, тестування моделі показало деякі просторові та часові невідповідності фактичних і модельних даних у розподілі опадів та температури. Наприклад, систематичні помилки розрахунку температури в окремі місяці становили 2-6°C. На думку авторів [6], зменшення кроку сітки моделі до 16 км, врахування адвекції на східній та північній межі області моделювання, а також потоків довгохвильової радіації, відбитої хмарами та водяною парою, суттєво покращать модельні розрахунки просторово-часового розподілу температури та опадів у регіоні.

Вибір регіональних кліматичних моделей для аналізу сучасного стану та прогнозу регіонального клімату України на XXI століття

Відомо, що чисельних моделей клімату, як і наукових методик прогнозу клімату, існує досить багато. Кожна з них має свої переваги та недоліки. Тому, насамперед, необхідно визначити: які зі створених методик і моделей доцільно з наукового та технічного погляду використовувати для аналізу та прогнозу регіональних особливостей кліматичних змін в Україні. 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 Україні, оскільки на її територію припадає приблизно 15 вузлів координатної сітки. Тому моделі повинні мати роздільну здатність на порядок вищу, тобто задовільні горизонтальні кроки сітки мають бути 20-50 км. Таку задовільну

роздільну здатність мають сучасні гідростатичні моделі 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.

Проведений аналіз літературних та інших джерел (ресурси Інтернету, провідні наукові видання, особисті контакти зі співробітниками наукових центрів тощо) для оцінки можливості застосування наявних чисельних кліматичних моделей для прогнозу можливих змін регіонального клімату України в ХХІ столітті, на думку авторів, показав, що оптимальними для застосування з наукового та технічного погляду є регіональні моделі REMO (Інститут метеорології Макса-Планка, м. Гамбург, Німеччина) та RegCM3 (Міжнародний центр теоретичної фізики, м. Трієст, Італія). Вирішальним у виборі цих моделей стало таке. Ці моделі були багаторазово успішно перевірені в моделюванні сучасного клімату практично всіх європейських країн [10, 11, 16, 17], більше того, обидві моделі є базовими у двох Європейських проектах FP-6 CECILIA (Central and Eastern Europe Climate Change Impact and Vulnerability Assessment) [19] та CLAVIER (Climate Change and Variability: Impact on Central and Eastern Europe) [20] щодо прогнозованих змін клімату в центральній та східній Європі. Крім того, автори мають попередній досить успішний досвід використання моделі REMO для вивчення сильних опадів і повеней на Ельбі та в Карпатах [5, 12, 15]. До того ж, код моделі RegCM3, початкові та граничні дані для її розрахунку, інструкції з запуску, форум і підтримка користувачів моделі знаходяться в мережі Інтернет у вільному доступі для всіх бажаючих [14]. Дана робота присвячена аналізу результатів тільки однієї з вибраних моделей – REMO. Результати моделювання з використанням моделі RegCM3 буде представлено в подальших публікаціях.

Регіональна модель REMO

Регіональну модель (REMO) було розроблено в Інституті метеорології Макса-Планка (м. Гамбург) [11, 16, 17]. REMO об'єднує колишню чисельну модель прогнозу погоди EUROPA-MODELL для розрахунків термодинамічних характеристик і блоку глобальної кліматичної моделі ECHAM4 [17], в якому розраховуються процеси хмаро- та опадоутворення, проходження потоків сонячної радіації в атмосфері, вплив підстильної

поверхні на теплові потоки з врахуванням альбедо й 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 звану, гібридну вертикальну координату, яка є комбінацією ізобаричної та σ вертикальної координати, тобто вертикальні рівні розміщені вздовж підстильної поверхні поблизу землі і з висотою перетворюються в паралельні до ізобаричних за спеціальним співвідношенням. В останні роки REMO досить успішно застосовувалася для моделювання минулого й майбутнього регіонального клімату не тільки Німеччини, але й інших країн Європи, а також Індії, Аргентини тощо. REMO була однією з провідних у проекті оцінки водного балансу басейну Балтійського моря [11] та у звіті IPCC-2007 [8].

Прогностичними змінними в моделі є тиск, температура, горизонтальні проекції швидкості вітру, абсолютна вологість і водність хмар [11, 12, 16, 17]. Початковими та граничними даними для моделі можуть бути дані аналізу, наприклад Європейського центру середньострокового прогнозу погоди (ECMWF), реаналізу, наприклад ERA40 [18], або більшої частини глобальних кліматичних моделей з IPCC-2007. У моделі враховані такі важливі фактори впливу на стан атмосфери, як радіаційні та теплові потоки, орографія, шорсткість, а також річний хід альбедо, рослинності та снігового покриву підстильної поверхні. Зауважимо, що модель REMO має додаткові переваги перед деякими іншими моделями, що також було враховано під час її відбору – в останній версії REMO враховані процеси формування опадів завдяки замерзанню крапель у хмарах, що є досить критичним для адекватного відтворення процесів хмаро- та опадоутворення в кліматичних умовах холодного періоду року в Україні [16].

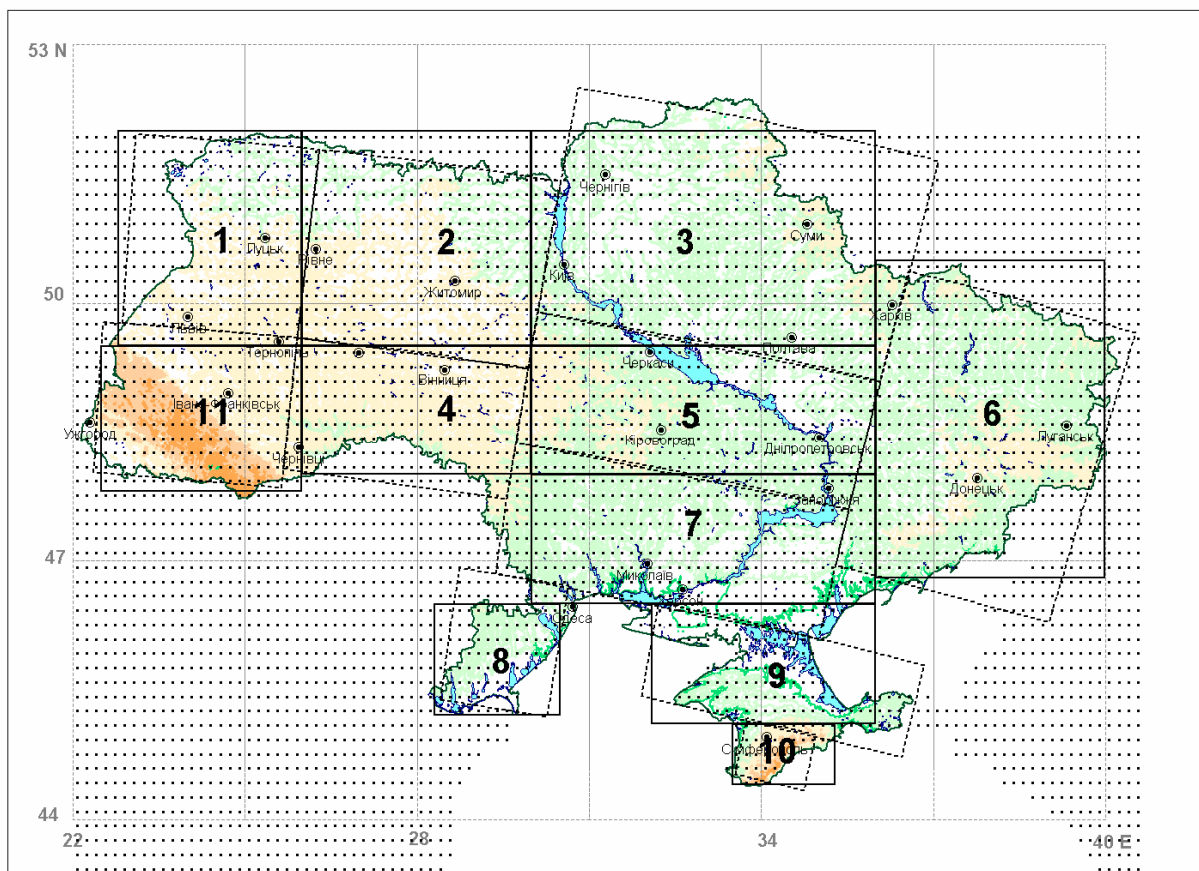
Поділ території України на райони для оцінки результатів моделювання

Фізико-географічне положення та розміри території України зумовлюють певну відмінність прояву тут сучасних кліматоутворюючих процесів – розподілу й кількісних значень радіаційних потоків, впливу різнорівневих циркуляційних процесів, відмінностей у характері рельєфу та типах підстильної поверхні. Як наслідок, фактичний просторовий розподіл кліматичних характеристик відрізняється неоднорідністю, ступінь й напрям

якої для основних із них наведено в [2-4]. У сучасних прогнозах змін клімату багато авторів указують також і на неоднозначність прояву кліматичних змін у різних географічних регіонах, наразі, обмежуючись крупними широтними смугами (тропіки, субтропіки, помірні, полярні широти). В окремих дослідженнях змін клімату в Україні [4] вказано на невідповідності в тенденціях змін кліматичних характеристик для різних районів її території.

Враховуючи вищенаведені обставини, та, щоб виявити і врахувати можливі територіальні відмінності у змінах клімату в межах України, а також для того, щоб адекватно тестувати чисельні моделі не тільки для всієї території в цілому, але і в окремих регіонах, здійснено поділ території України на райони. Зауважимо, що регіональним кліматом далі називатимемо клімат усієї території України. Під час районування враховувались такі чинники: *подібність* фізико-географічних умов у межах запропонованих районів; *однотипність* прояву кліматоутворюючих чинників; відносна *однорідність* кліматичних полів температури та опадів. Крім цього, розміри районів мали б дати можливість виділити подібні прямокутні за географічними координатами райони за даними Світового центру кліматичних досліджень (Climate Research Unit – CRU) [13], та максимально наближені до виділених районів за CRU прямокутні підобласті за координатними сітками чисельних регіональних моделей клімату, які зазвичай не відповідають географічній сітці.

Тому, врахувавши вищезазначені умови, на території України було виділено 9 рівнинних (I-IX, серед них і два приморські: VIII – південний захід Одеської обл. та IX – степовий Крим) та два гірські (X, XI) райони, які представлено на рис. 1. На карті-схемі рис.1 зображено два варіанти меж районів, оскільки розрахункові сітки моделі REMO і дані CRU побудовано в різних картографічних проекціях і розгорнено один відносно одного під кутом. Межі районів по сітці REMO максимально наближені до меж районів для CRU та метеомережі. Застосування особливих меж районів для REMO спричинено, крім того, специфікою форматів вихідних даних моделі та запрограмованим вибором розрахованих значень кліматичних характеристик тільки з прямокутних блоків розрахункової сітки. Загальні відомості по районах (координати, середня висота над рівнем моря, кількість у районі метеорологічних станцій або вузлів моделей) на основі трьох джерел даних наведено в табл. 1.



- ... Вузли сітки CRU
- Межі районів для метеомережі і CRU
- Межі районів для REMO

Рис. 1. Райони України для тестування чисельних моделей, аналізу регіональних кліматичних характеристик та їхніх прогнозованих змін

Після визначення координат районів, для яких проводитиметься тестування даних чисельного моделювання, вважаємо, що є доцільним доведення подібності просторово-часового розподілу основних кліматичних характеристик у кожному з них як критерію однорідності району. Подібність розподілу кліматичних характеристик у кожному регіоні оцінювали двома способами:

1) визначенням типу розподілу рядів метеорологічних величин для кожного пункту спостережень за багаторічний період у межах району, розрахунком основних статистичних показників (\bar{x} , M_e , M_o , A , E , σ) кожного ряду у всіх точках спостережень (метеостанціях) та порівняння їх шляхом графічної інтерпретації результатів (програма STATISTIKA 6.0);

2) проводили також однофакторний дисперсійний аналіз для визначення внутрішньої однорідності виділених районів.

Обидва підходи підтвердили однорідність розподілу температури та опадів у 9 рівнинних районах, відносно – у Криму та в Карпатах. Неоднорідність гірських районів потребує спеціального врахування висоти станції над рівнем моря або більш детальнішого дрібного поділу на райони.

Далі представлено аналіз результатів моделювання моделі REMO, даних CRU та вимірів метеомережі як для всієї території України, так і для окремо виділених районів.

Верифікація результатів чисельного моделювання клімату України. Методика та дані, що використовуються

Оскільки результати розрахунків регіональних кліматичних моделей дають можливість отримати характеристики клімату з високою роздільністю в просторі та часі, що робить чисельні кліматичні моделі практично незаміним інструментом у сучасній кліматології для прогнозу майбутніх регіональних кліматичних змін, то, насамперед, треба довести, що застосовані моделі достовірно представляють минулий та сучасний клімат обраної території, тобто провести верифікацію чисельних кліматичних моделей. Під *«верифікацією моделі»* в цьому випадку слід розуміти встановлення точної реалізації комп'ютерною програмою тих наближень і параметризацій різнорівневих кліматоутворюючих фізичних процесів, що закладені в алгоритмі моделі.

Для проведення якісної верифікації результатів чисельного моделювання клімату України, окрім власне результатів інтегрування чисельних моделей, необхідно також мати фактичні дані спостережень і вимірів метеорологічних величин. Як уже зазначалося вище, порівняння значень вимірів на окремих метеостанціях у конкретні моменти часу з результатами кліматичних моделей не має сенсу. Тому треба було відібрати такі фактичні кліматичні характеристики та способи їх отримання, які будуть адекватні до результатів моделювань. За досвідом багатьох попередніх досліджень [6, 8-11, 14, 17, 19, 20 та ін.], методика первісної верифікації чисельних моделей клімату для конкретної території полягає в наступному:

Таблиця 1

Райони України для тестування чисельних моделей та середні річні температури (1961-90 рр.)

Район	Координати районів метеомережі і CRU		Кількість у районі			Середня абсолютна висота (м)			Температура, °C/рік		
	пн. ш. (град.)	сх. д. (град.)	Метео- мережа (станції)	CRU (вузли)	REMO (вузли)	Метео- мережа	CRU	REMO	Метео- мережа	CRU	REMO
I	49,5 – 52,0	22,8 - 26,0	13	300	110	209	216	212	7,4	7,4	8,3
II	49,5 – 52,0	26,0 - 30,0	11	360	110	203	191	195	7,0	7,3	8,0
III	49,5 – 52,0	30,0 - 36,0	24	540	228	151	147	155	6,8	7,2	7,5
IV	48,0 – 49,5	26,0 - 30,0	10	240	88	243	248	242	7,6	8,3	8,9
V	48,0 – 49,5	30,0 - 36,0	28	360	133	143	139	140	8,0	8,3	9,4
VI	46,8 – 50,5	36,0 - 40,0	22	507	204	157	138	125	8,1	8,3	9,3
VII	46,5 – 48,0	30,0 - 36,0	18	322	152	76	72	77	9,3	9,6	11,1
VIII	45,2 – 46,5	28,3 - 30,5	6	98	49	30	66	56	10,5	11,4	12,2
IX	45,0 – 46,5	31,6 - 36,6	20	154	75	28	39	34	10,5	10,4	12,9
X	44,4 – 45,0	33,5 - 35,3	10	27	15	366	375	213	10,3	9,8	12,8
XI	47,8 – 49,5	22,5 - 26,0	25	189	88	448	494	498	6,9	7,2	8,0
Сума або середнє	44.4 - 52.0	22,5 - 40,0	187	3097	1252	187	193	177	8,4	8,7	9.9

- проводиться аналіз середніх багаторічних температур повітря та кількості опадів – двох основних кліматичних характеристик, власне за якими і визначається тип клімату обраної території;
- вивчається просторовий розподіл названих характеристик, визначаються проблемні райони і похибки моделювання в них, для чого й використовується поділ території на окремі райони;
- аналізуються сезонні значення або характеристики за середні місяці сезонів, оцінюється річний хід кліматичних характеристик;
- доцільним є також порівняння просторово-часового розподілу інших модельних та фактичних кліматичних характеристик (поля середнього тиску, вітру, вологості та ін.), а також середніх максимальних і мінімальних значень, добового ходу тощо.

Як довідкові фактичні дані в дослідженні використали середні багаторічні значення температури повітря, отримані на 187 метеорологічних станціях України з Кліматичного Кадастру України за 1961-90 рр. [1]. Враховуючи нерівномірність та недостатню щільність мережі метеорологічних станцій на території України (відстані між станціями в деяких районах перевищують 50 км – максимальний крок розрахунку моделі), а також те, що в деяких районах результати спостережень не повністю відтворюють просторову мінливість метеорологічних величин, було доцільно залучити також дані Світового кліматичного центру CRU (Climate Research Unit, University of East Anglia, Norwich), які доступні у вузлах регулярної координатної сітки з високою роздільністю в $10'$ (≈ 12 км) [13] і, зазвичай, використовуються для верифікації кліматичних моделей. Ці дані отримані в результаті інтерполяції даних наземних вимірювань кліматичних станцій. Тобто і дані CRU, і дані метеомережі в основі мають практично одні й ті самі фактичні виміри на метеостанціях, але дані CRU зручніші у використанні для верифікації результатів моделювання. Таким чином, якщо довести, що дані CRU коректно представляють кліматичні характеристики території України, зникає потреба в інтерполяції даних Кліматичного Кадастру України [1] у вузли регулярної сітки. Але можливість у подальшому заміни даних вимірів метеомережі на дані CRU для верифікації результатів моделювання все ж таки потрібно довести, що і буде представлено далі разом з аналізом даних моделювання. Зауважимо, що середня висота районів над рівнем моря (табл. 1) за даними метеостанцій та

CRU практично збігається (середня різниця складає 6 м). Винятком є : VIII район (південний захід Одеської області), де всього 6 метеостанцій і практично всі вони розміщені поблизу моря, тому за даними CRU, район вищий на 36 м; і XI район (Карпати), де, навпаки, відносно багато станцій, і вони переважно розміщені у високогір'ї, тому, за даними CRU, район нижчий на 46 м.

Початковими та граничними умовами в моделюванні були дані реаналізу ERA40 [18]. Ці дані було отримано в результаті стандартної глобальної асиміляції даних спостережень та прогнозу, тобто всієї доступної метеорологічної інформації. Система засвоєння даних має 28-рівневу глобальну спектральну модель атмосфери з горизонтальним розділенням 210 км (T62). Результати інтегрування цієї моделі доступні для використання у вигляді наборів даних (вертикальні розподіли температури, вологості, трьох проекцій швидкості вітру, тиску тощо) у вузлах координатної сітки з горизонтальним розділенням $2,5^{\circ} \times 2,5^{\circ}$ та представлені з 1948 р. і дотепер з часовим інтервалом 6 год.

Результати моделювання REMO порівняно з даними спостережень

Для тестування моделі REMO щодо адекватності моделювання кліматичних умов на території України було залучено результати чисельного експерименту, який проводився в Інституті метеорології Макса-Планка, для періоду з 1 січня 1958 р. до 31 грудня 2000 р. з початковими та граничними умовами архіву реаналізу ERA-40 [18]. Моделювання проводили на сітці 170×190 вузлів з горизонтальним кроком 25 км, кількість вертикальних рівнів ($Z-\sigma$) – 21; верхня межа області моделювання – 10 гПа; топографія, вегетація, тип ґрунту та землекористування визначалися з архіву даних з розділенням $10'$; крок розрахунків за часом – 100 с [16]. Даний чисельний експеримент є частиною Європейського рамкового проекту FP-6 ENSEMBLES (Ensemble-based Predictions of Climate Changes and their Impacts). Тому область моделювання включає повністю західну, центральну та східну Європу, Середземне море й частину північної Африки, а її центр розміщений над Німеччиною.

Для верифікації моделі щодо території України використано щодобові результати розрахунку моделі тільки за 30 років, з 1961 до 1990 рр., як і в [1], та було вибрано частину загальної області моделювання розміром 54×37

вузлів у центрі її східної частини, яка повністю включає територію України. Як було вказано вище, обрану область було також поділено на 11 районів, які представлено на рис. 1, і було проведено порівняння трьох пар наборів даних: «дані метеомережі»-«дані CRU», «дані метеомережі»-«дані REMO», «дані REMO»-«дані CRU». Для кожного з 11 районів і всієї України за трьома джерелами даних було розраховано значення середніх місячних і річних температур повітря, які представлено на рис. 2 та в табл. 2. Кількість значень, за якими розраховувалися середні за площею характеристики для всієї території України та для виділених районів, наведено в табл. 1.

З рис. 2 видно, що в цілому дані CRU і дані REMO адекватно репрезентують відповідні кліматичні умови різних районів на території України, і ці набори даних дають подібні до метеомережі розподілення за площею представлених кліматичних характеристик. Так, наприклад, і дані CRU, і дані REMO аналогічно до даних метеомережі показали мінімальні річні температури в районі гірського хребта Карпат. У той самий час очевидно, що значення середньорічної температури повітря з REMO перевищують аналогічні значення метеомережі та CRU практично для всієї території України.

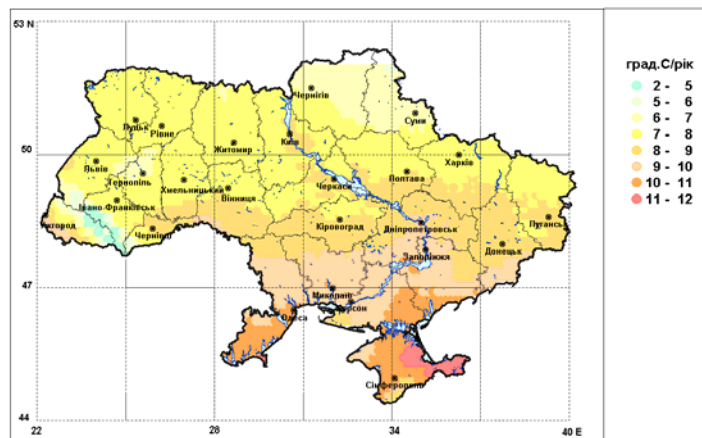
З табл. 1-3 можливо кількісно оцінити значення середніх та екстремальних кліматичних характеристик, отриманих із різних джерел даних і усереднених за площею.

Таблиця 2

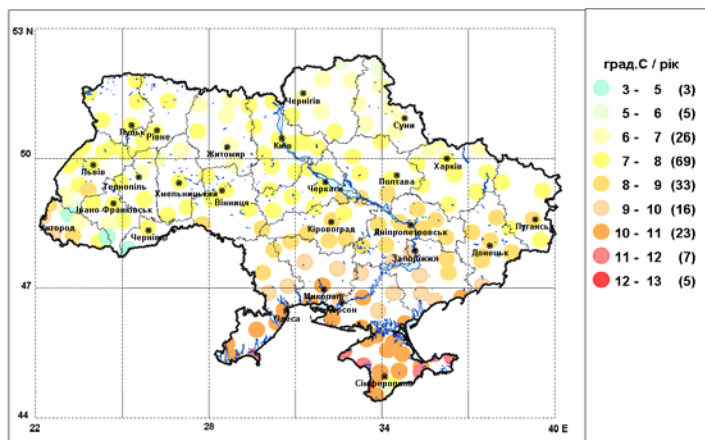
Приземна температура повітря (Т, °С) в Україні
(усереднена за 1961-1990 рр.)

Статистична характеристика	за місяць			за рік		
	Метео-мережа	CRU	REMO	Метео-мережа	CRU	REMO
Кількість значень	132	132	132	11	11	11
Т сер.	8,4	8,7	9,9	8,4	8,7	9,9
Т сер., мінімальна	-7,1	-6,9	-7,2	6,8	7,2	7,5
Т сер., максимальна	22,5	22,1	23,9	10,5	11,4	12,9
Довірчий інтервал середнього, Р=95%	1,5	1,5	1,6	0,9	0,9	1,2
Стандартне відхилення	8,7	8,8	9,2	1,5	1,4	2,0

Дані CRU



Дані метеомережі (у дужках – кількість станцій у градації)



Дані REMO

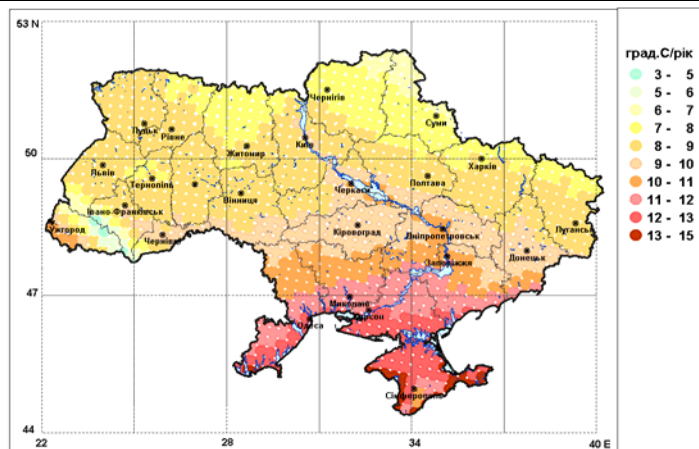


Рис. 2. Середня річна температура повітря (за даними 1961-1990 рр.)

Так, середня річна температура повітря в Україні, усереднена за всією площею, становить, за даними мережі, $8,4^{\circ}\text{C}$, CRU – $8,7^{\circ}\text{C}$, REMO – $9,9^{\circ}\text{C}$. Тобто розрахункові джерела даних CRU і REMO в середньому для всієї території України завищують у порівнянні з даними спостережень на станціях значення температури повітря на $0,3^{\circ}\text{C}$ та $1,5^{\circ}\text{C}$ відповідно. З табл. 2 очевидно, що це завищення в основному формується внаслідок перевищення максимальних температур. У той самий час зауважимо, що довірчі інтервали середнього для температури повітря, за даними метеомережі та CRU, однакові.

Більш комплексне порівняння значень температури повітря, отриманих із різних наборів даних, наведено в табл. 3, де представлено порівняння усереднених місячних значень за 1961-90 рр.. За таблицею 3, середня арифметична помилка (δ) для пари даних «Метеомережа – CRU» дорівнює $0,3^{\circ}\text{C}$ (в окремих районах до $+2^{\circ}\text{C}/\text{міс.}$ і від $-0,5$ до $1,0^{\circ}\text{C}/\text{рік}$). Для пари «Метеомережа – REMO» δ дорівнює $1,5^{\circ}\text{C}$ (в окремих районах від $-1,0$ до $4,0^{\circ}\text{C}/\text{міс.}$ і від $0,7$ до $2,5^{\circ}\text{C}/\text{рік}$). Від'ємні помилки розрахунку температури повітря, тобто нижчі значення в порівнянні з даними метеомережі, CRU дає для території Криму (район IX і X) незалежно від пори року, REMO – для північних районів (I-III) і Карпат (район XI) у холодне півріччя. У порівнянні з CRU модель REMO, як правило, завищує значення температури повітря: $\delta = 1,2^{\circ}\text{C}$. Для середньомісячних значень величина помилки можлива від $\delta_{\min} = -1,4^{\circ}\text{C}/\text{міс.}$ до $\delta_{\max} = 4,4^{\circ}\text{C}/\text{міс.}$, для середньорічних значень – від $0,3$ до $3,0^{\circ}\text{C}/\text{рік}$. У річному ході середня арифметична помилка для температури повітря найбільша з липня до жовтня, коли результати моделювання REMO мають найбільші похибки для всіх районів. Середня квадратична помилка для температури повітря найменша для пари даних «Метеомережа – CRU» і дорівнює $0,4^{\circ}\text{C}/\text{рік}$ і $0,6^{\circ}\text{C}/\text{міс.}$

Для оцінки ступеня зв'язку між даними трьох джерел розраховано коефіцієнти кореляції (табл. 3) й побудовано рівняння регресії (рис. 3). Коефіцієнти кореляції для пар даних температури повітря трьох джерел у всіх випадках близькі до 1, що говорить про задовільну узгодженість їхніх змін за площею і в часі. На наведених графіках використовуються лінійні апроксимації, обчислені за методом найменших квадратів, які великою мірою наближаються до представлених на малюнках залежностей.

Таблиця 3

Середня багаторічна(1961-1990 рр.) приземна температура повітря ($^{\circ}\text{C}$) в Україні (порівняння наборів даних різних джерел)

Статистична характеристика	За місяць			за рік		
	CRU, Метео	REMO, Метео	REMO, CRU	CRU, Метео	REMO, Метео	REMO, CRU
Кількість пар	132 (11 районів x 12 міс.)			11 районів		
Сер. абсолютна помилка	0,4	1,5	1,3	0,4	1,5	1,2
- " - мінімальна	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,3
- " - максимальна	2,0	4,3	4,4	0,9	2,5	3,0
Сер. арифмет. помилка	0,3	1,5	1,2	0,3	1,5	1,2
- " - мінімальна	-1,8	-1,0	-1,4	-0,5	0,7	0,3
- " - максимальна	2,0	4,3	4,4	0,9	2,5	3,0
Сер. квадрат. помилка	0,6	1,8	1,6	0,4	1,6	1,4
Коефіцієнт кореляції	0,998	0,995	0,993	0,969	0,992	0,942
Помилка коеф. кореляції	0,000	0,001	0,001	0,019	0,005	0,036
Коефіцієнти рівняння лінійної регресії $y = A + Bx$	x - CRU y - Метео	X - REMO y - Метео	x - REMO y - CRU	X - CRU y - Метео	x - REMO y - Метео	x - REMO y - CRU
A	-0,193	-0,933	-0,711	-0,222	1,190	2,000
B	0,992	0,946	0,950	0,996	0,731	0,675
Стандартна помилка рівняння	0,534	0,853	1,007	0,389	0,195	0,512

Наведені лінійні залежності для пар використаних даних дозволять у подальшому коректувати результати розрахунків. Стандартні помилки рівнянь регресії для температури повітря не перевищують 1°C.

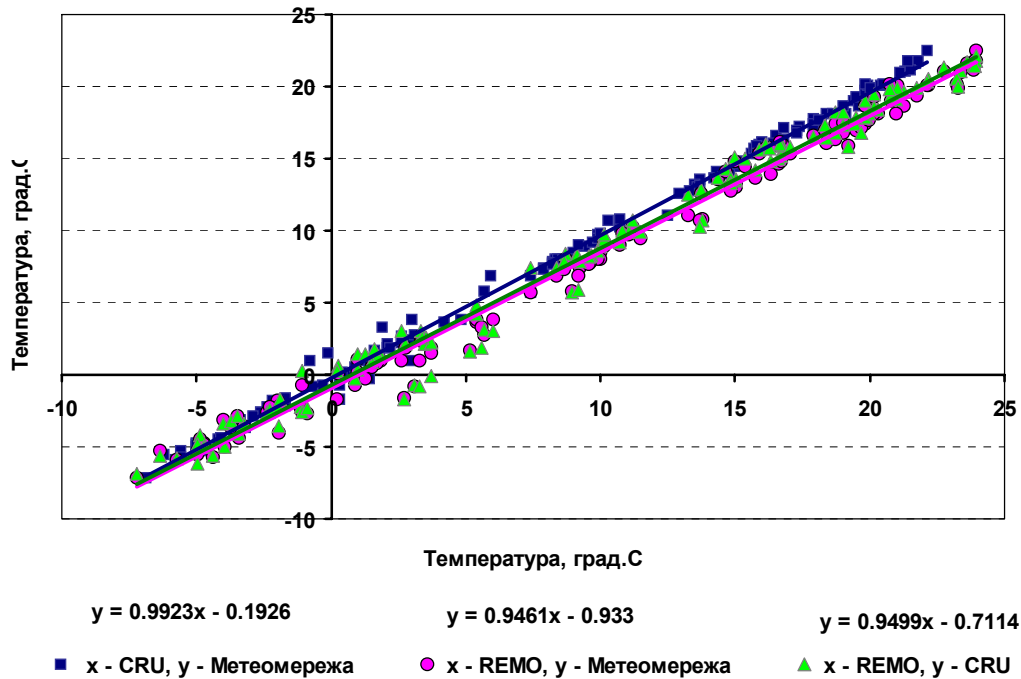


Рис. 3. Середня багаторічна (1961-1990 рр.) температура повітря (°С/місяць) по районах України. Графіки залежності для трьох пар даних

Таким чином, проведене дослідження показало, що модель REMO і дані CRU в цілому адекватно представляють регіональні особливості розподілів у просторі та часі температури повітря (середніх багаторічних, річних та місячних), включаючи закономірності та місцеві особливості річного ходу в різних природних зонах. Помилки розрахунку температури повітря найбільші для південних приморських (VIII–X) районів, що може бути пов'язане з недостатньо точною відповідністю меж районів REMO і метеомережі. Інша можлива причина цих помилок може бути в недостатньо коректних параметризаціях фізичних процесів, що використовуються в моделі. Однак отримані високі коефіцієнти кореляції між трьома парами наборів даних дозволяють: 1) використовувати в подальших дослідженнях для верифікації чисельних кліматичних моделей замість даних метеомережі

дані CRU; 2) стверджувати, що модель REMO може бути використана для аналізу минулих, сучасних та прогнозу можливих майбутніх змін регіонального клімату України з високим ступенем довіри. У той самий час, отримано систематичні похибки моделі в розрахунках температури повітря для гірських, приморських та східних районів, які будуть ураховані в подальших дослідженнях прогнозованих змін клімату в Україні в XXI столітті.

Висновки

Проведено аналіз літературних та інших джерел для оцінки можливості застосування існуючих чисельних кліматичних моделей для прогнозу можливих змін регіонального клімату України в XXI столітті. Визначено оптимальні для застосування в УкрНДГМІ моделі з наукового та технічного погляду: 1) REMO (Інститут метеорології Макса-Планка, м. Гамбург); 2) RegCM3 (Міжнародний центр теоретичної фізики, м. Трієст, Італія).

Для тестування та виявлення відмінностей кліматичних тенденцій на території України виділено 11 районів. При цьому враховано однорідність циркуляційних та фізико-географічних впливів на формування кліматичних умов та зручність розмірів і меж районів для порівнянь з результатами моделювання. Також вирішувалося завдання зменшення площ усереднення даних моделювання і спостережень та оцінки похибок моделей у різних частинах розрахункової сітки.

Для оптимізації тестування результатів моделювання та для подальшого використання як базових для верифікації моделей проведено статистичну оцінку подібності рядів приземної температури повітря, отриманих з архіву світового кліматичного центру CRU (масштаб сітки 10') та рядів, що отримані шляхом часового та просторового (по площі) усереднення даних спостережень з Кліматичного Кадастру України (187 станцій метеомережі). Отримані значення коефіцієнтів кореляції для температури повітря при порівнянні середньорічних значень (0,969) та при порівнянні даних за окремі місяці (0,998) підтверджують можливість використання даних CRU як базових, при врахуванні систематичної похибки 0,3 °C (максимальні похибки: 1 °C/рік і 2 °C/місяць).

Проведено верифікацію даних спостережень результатів моделювання регіональної кліматичної моделі REMO для території України в цілому та в

11 визначених районах. З цією метою було проаналізовано багаторічні середньомісячні та річні приземні температури повітря за період 1961-90 рр., визначений Всесвітньою метеорологічною організацією (ВМО) як контрольний кліматичний період. Дослідження результатів чисельного моделювання показали:

- річний хід температури повітря, усереднений для території України за даними спостережень та отриманий у РЕМО, практично збігаються; коефіцієнт кореляції цих рядів становить 0,992. Незначні відхилення в річному ході модельних температур (перевищення) було зафіксовано в I-VI районах, у VII, X – відхилення збільшуються в червні – жовтні, а в IX – у січні – березні;
- *максимальні* перевищення місячних норм температури для всіх районів змінюються в межах від 4,3°C (IX, січень) до 2,0°C (VI, серпень), середнє максимальне відхилення – 2,6°C. Максимальні перевищення модельних температур практично на всій території (виняток – IX район, січень) відмічаються в серпні, що можна розглядати як систематичну похибку моделі;
- *мінімальні* відхилення від норми змінюються від 0,0°C (IV район, лютий) до 1,7°C (IX район, травень), середнє мінімальне відхилення – 0,5°C. У річному ході температури найкращий збіг модельних результатів з місячними нормами температури фіксували у травні (V-X райони), у січні – I, III, XI та в березні й лютому відповідно у II та IV районах;
- середні температури *січня*, отримані в моделюванні, мало відрізняються від норми, і для шести районів відхилення від норми перебувають у межах 0,1-0,2°C, що порівняно з похибкою інструментальних вимірювань температури. В інших районах відхилення від норми – у межах 0,5- 2,3°C, за винятком IX району, де зареєстровано аномальне для всієї області та періоду моделювання відхилення + 4,3°C;
- для *липня* значення відхилень модельних результатів від норми сукупно більші за абсолютним значенням, вони змінюються в межах від 1,4°C (IX район) до 3,0°C (X район), але є більш однорідними в межах усієї області моделювання та мало відрізняються в районах.

* *

Представлены первые результаты верификации численной региональной

климатической модели REMO и данных мирового центра климатических исследований CRU для территории Украины за контрольный период 1961-90 гг. Подтверждена возможность использования данных CRU для верификации результатов моделирования современного регионального климата Украины и получены систематические ошибки региональной модели REMO в расчетах приземной температуры воздуха.

* *

1. Кліматичний Кадастр України (електронна версія) Державна гідрометеорологічна служба УкрНДГМІ. Центральна Геофізична Обсерваторія. – К., 2006.
2. Климат Украины / Под ред. Г.Ф.Прихотько, А.В.Ткаченко, В.Н.Бабиченко. – Л.: Гидрометеоздат, 1967. – 413 с.
3. Климатический атлас Украинской ССР. – Л.: Гидрометеоздат, 1968. – 232 с.
4. Клімат України / За ред. В.М.Ліпінського, В.А.Дячука, В.М.Бабиченко – К.: Вид-во Раєвського, 2003. – 343 с.
5. 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
6. Кричак С.О. Региональное моделирование современного климата европейской территории России с помощью модели RegCM3 // Метеорологія и гідрологія. – №1, 2008. – С. 31-41.
7. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Ч. 1. кн. 1. – Л.: Гидрометеоздат, 1990. – 605 с.
8. Christensen J.H., B. Hewitson A. Busuioc et al. 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, United Kingdom and New York, NY, USA. – 2007. – 94 p.
9. Giorgi F. and Bates G. The climatological skill of a regional model over complex terrain // Monthly Weather Review. – 1989. – 117: 2325-2347.
10. Giorgi F. and Mearns L.O. Introduction to special issue: Regional climate modeling revisited // J.Geophys.Res. – 1999. – Vol. 104: 6335-6352.
11. 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. – С.61-73.
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. *Mitchell T.D., Carter T.R., Jones P.D. et al.* A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: The observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100) // Tyndall Centre Working Paper No.55, Tyndall Centre for Climate Change Research, University of East Anglia, Norwich, UK, 2004.
 14. *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.
 15. *Palamarchuk L., Shpyg V., Krakovskaia S.* Floods in the Carpathians: synoptic analysis and numerical modeling // Geophysical Research Abstracts. – 2005. – Vol. 7, 00967, Sref-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-00967.
 16. *Pfeifer S.* Modeling cold cloud processes with the regional climate model REMO. // Ber. Zur Erdsystemforschung, 2006, – MPI-M, 23. – 120 p.
 17. *Roeckner E., K. Arpe L. Bengtsson M. Cristoph 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. *Uppala S.M., Kellberg P.W., Simmons A.J. et al.* The ERA-40 reanalysis // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc. – 2005. – Vol. 131. – P. 2961-3012.
 19. <http://www.cecilia-eu.org>
 20. <http://www.clavier-eu.org>

*Український науково-дослідний гідрометеорологічний інститут, Київ
Київський національний університет імені Тараса Шевченка*