

ОЦІНКА СПРАВДЖУВАНOSTІ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ ДЛЯ ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Проаналізована справджуваність прогнозу режиму температури повітря в Україні у 2001-2009 роках. Зіставлені дані, отримані на основі розрахунків за моделлю GFDL по сценаріях A2, A1B, B1, та дані спостережень за ці роки. Показано, що за всіма сценаріями модель дає найкращі результати у порівнянні з фактично спостереженою температурою для півдня України.

Ключові слова: температурний режим, моделювання клімату, статистична оцінка, сценарії викидів парникових газів.

Вступ. Процес збільшення середньої глобальної температури, який мав місце протягом останніх приблизно тридцяти років, коли вона виросла на 0,46 °C з 1979 по 2005 роки [1], спричинив небувалу активність наукової спільноти у кліматичній галузі, кульмінацією якої можна вважати безпрецедентний за своїми масштабами та кількістю учасників модельний проект – виконання чисельних інтегрувань з 23 складними фізико-математичними моделями загальної циркуляції атмосфери та океану, які представляють 16 провідних дослідницьких груп з 11 країн світу. Однією з таких моделей була глобальна кліматична модель Лабораторії геофізичної гідродинаміки (GFDL) Національної адміністрації по океану та атмосфері (NOAA) США версії 2.1 [2].

Зазвичай моделювання клімату здійснюється за наявності якогось фактора, який змушує глобальний кліматичний режим змінюватись; у випадку згаданих моделей таким фактором були викиди парникових газів, радіаційний вплив яких, як припускається, може збільшити середню глобальну температуру. Спеціально для подібних моделей розроблені сценарії викидів [3], один з яких (A2) вважається жорстким, другий (A1B) – помірним, а третій (B1) – м'яким. Зазначена термінологія прийнята внаслідок того, що за першим сценарієм глобальні викиди парникових газів у 2100 р. у порівнянні з 2000 р. збільшаться майже у 3,5 разу, за другим – тільки у півтора разу, а за третім – взагалі зменшаться майже на 40 відсотків [1].

Результати такого моделювання для температурного режиму вже досліджувалися у попередній роботі [4], і було показано, що стосовно України має місце неоднорідний за територією відгук на глобальні зміни і істотне збільшення аномальних різноманітних проявів, наприклад, аномально жарких років, літ чи зим. Але залишається нерозв'язаним дуже важливе питання про справджуваність результатів інтегрування за глобальними кліматичними моделями. Інакше кажучи, чи можемо ми довіряти цим результатам? Саме тому метою цієї статті є порівняння фактично спостережених даних про температуру з модельними, що може розглядатися як чи не єдиний спосіб визначення якості модельних прогнозів.

Вихідні дані та методологія дослідження. Модельні експерименти, результати яких увійшли до Четвертого звіту [1], за початкову дату брали 1 січня 2001 р. Таким чином, на сьогодні можливо використати дані тільки для періоду 2001-2009 років, тобто за умови використання середньомісячних величин загальна кількість значень про температуру для певного вузла сітки становить 108 спрогнозованих та фактичних величин. Як вже відзначалося вище, перші бралися з результатів інтегрування за моделлю CM2 GCM GFDL [2], а другі, – з реаналізу NCEP/NCAR. Дані представлені у вузлах широтно-довготної сітки з кроком 2 °широти × 2,5 °довготи, обмеженої 43,5° та 53,5° півн.ш. і 21,25° та 41,25° сх.д.

Для аналізу справджуваності модельних прогнозів використовувалися такі статистичні характеристики [5].

Коефіцієнт кореляції r визначає наскільки, добре прогностичні значення відповідають спостереженим, і розраховується за формулою:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^K (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^K (F_i - \bar{F})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^K (O_i - \bar{O})^2}}, \quad (1)$$

де K – загальна кількість спостережень, яка для нашого випадку дорівнює 108;

F_i і \bar{F} – модельні дані та їх середнє значення;

O_i і \bar{O} – спостережені дані та їх середнє значення.

Середньоквадратична помилка ($RMSE$) визначає, якою є середня величина помилок прогнозу, а формула для її розрахунку має вигляд

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K (F_i - O_i)^2}. \quad (2)$$

Також, застосуємо так званий графік розсіяння, який показує прогностичні величини у порівнянні з фактично спостереженими, а його аналіз відповідає на запитання: наскільки добре прогностичні дані збігаються зі спостереженими? У випадку точного прогнозу усі точки будуть зосереджені на або поблизу діагоналі.

Результати дослідження. Спочатку розглянемо розподіл коефіцієнтів кореляції для території України (табл. 1 і рис. 1). Отже, загальні результати можуть вважатися цілком задовільними, тому що коефіцієнт кореляції, як правило, перевищує 0,9 за винятком західних областей для сценарію А1В та Волині для сценарію В1. Найбільших значень ця характеристика набуває на півдні України, сягаючи значення 0,94. Як правило, розподіл ізокорелят такий, що мінімум r має місце на північному заході, а максимум – на півдні та південному сході.

Проаналізуємо докладніше часовий хід середньомісячної температури в окремих вузлах сітки, які розташовані на заході, півночі, сході та півні України (табл. 1). Але спочатку відзначимо, що середньоквадратична помилка прогнозу також відзначається мінімумом на півдні України, де вона становить 0,3 °С незалежно від сценарію викидів.

Строго кажучи, пояснення факту, що температура «найгірше» прогнозується для Західної України, не є предметом цієї статті та й зробити якійсь висновок, аналізуючи тільки характеристики верифікації прогнозу дуже важко. Проте можна припустити, що істотний внесок у такий просторовий розподіл справджуваності прогнозу роблять

Таблиця 1 – Коефіцієнти кореляції (r) та середньоквадратичні помилки ($RMSE$, °С) між спостереженими та модельними середньомісячними температурами за період з січня 2001 р. по грудень 2009 р. для сценаріїв А2, А1В та В1 для різних регіонів України

Регіон України	Координати		Сценарії викидів					
	широта північна	довгота східна	А2		А1В		В1	
			r	$RMSE$	r	$RMSE$	r	$RMSE$
захід	49,5°	23,75°	0,92	0,3	0,90	0,4	0,91	0,4
північ	51,5°	33,75°	0,93	0,4	0,91	0,4	0,92	0,4
схід	49,5°	38,75°	0,94	0,4	0,90	0,5	0,93	0,4
південь	45,5°	33,75°	0,94	0,3	0,94	0,3	0,94	0,3

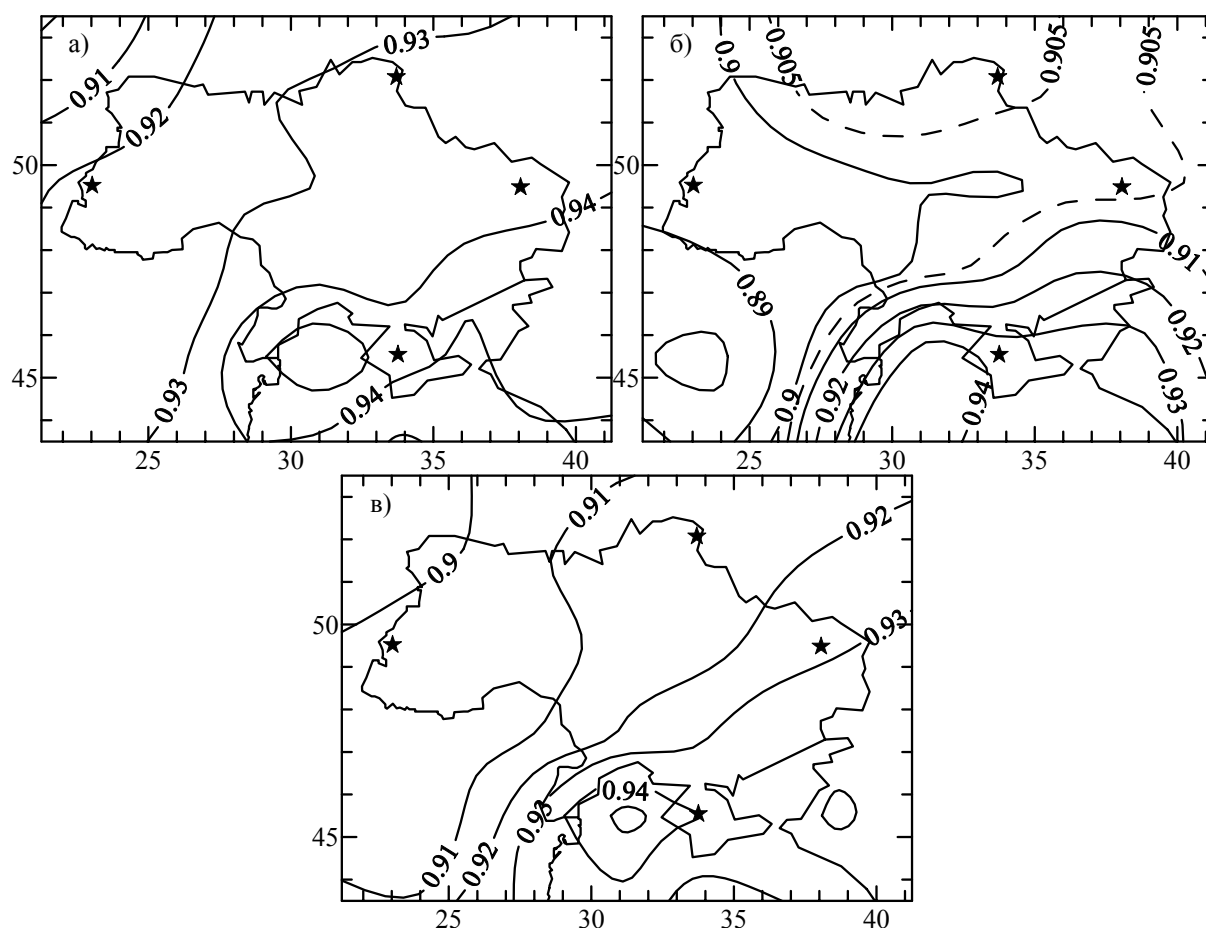


Рис. 1 – Коефіцієнти кореляції між спостереженими та модельними середньомісячними температурами за період з січня 2001 р. по грудень 2009 р. для сценаріїв А2 (а), А1В (б) та В1 (в). Зірочками позначені вузли сітки, для яких у подальшому здійснюватиметься докладніший аналіз.

складні орографічні умови на заході країни. Але, якщо розглядати результати прогнозування у цілому, вони можуть вважатися достатньо успішними: коефіцієнт кореляції є більшим за 0,89, а середньоквадратична помилка не перевищує 0,5.

Аналіз часових змін спостережених середньомісячних температур та змодельованих за різними сценаріями викидів (рис. 2) свідчить про те, що на тлі цілком задовільної якості прогнозу в деякі роки абсолютна різниця між фактичними та прогностичними значеннями була дуже великою. Насамперед, це стосується червня 2004 та 2005 років та січня 2007 року. При цьому, не можна зробити висновок про залежність якості прогнозу від величини «аномальності» температури у певну пору року. Наприклад, зима 2005 року була майже такою ж «аномально» теплою, що й зима 2007 року, але у перших випадках абсолютні різниці між спостереженнями та прогнозами за усіма сценаріями виглядають меншими, ніж у другому випадку. Це ж саме можна казати й про літо 2003 року, температура для якого, на відміну від літ згаданих вище, була спрогнозована цілком задовільно. Візуальний аналіз не дає й якихось істотних відмінностей між різними сценаріями або регіонами України.

Треба також відзначити, що найменші відмінності змодельованих величин від спостережених мають місце у перехідні сезони року, у зв'язку з чим розглянемо далі середні за зиму (рис. 3) та літо (рис. 4) температури.

Отже річний хід зимових температур (рис. 3) для заходу, півночі та півдня України найкраще відповідає жорсткому сценарію А2, принаймні майже всі тенденції

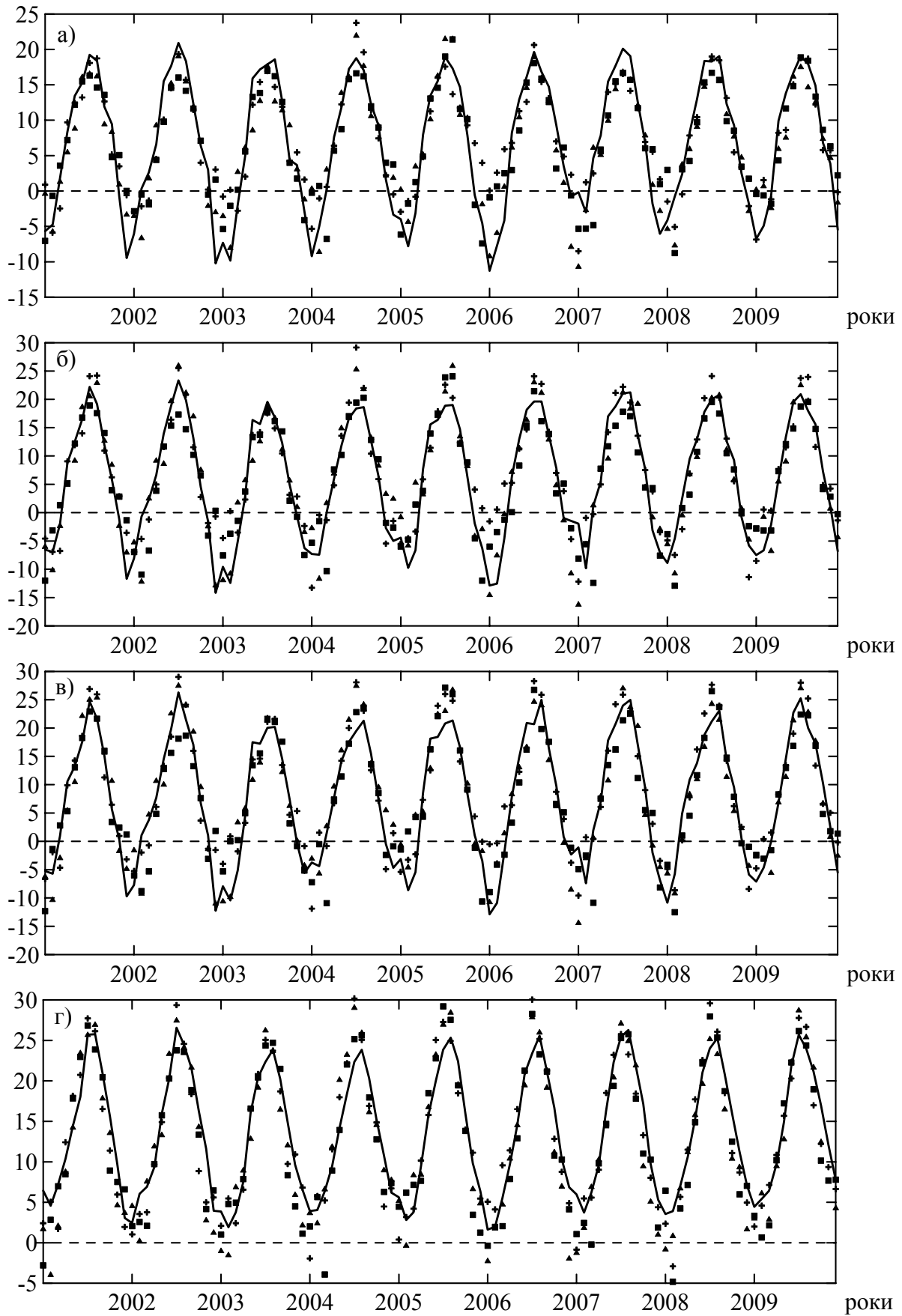


Рис. 2 – Середньомісячні температури (вісь Y, °C) для заходу (а), півночі (б), сходу (в) та півдня (г) України: фактичні (лінія) та за сценаріями А2 (▲), А1В (■) і В1(+).

до збільшення або зменшення з року в рік зимових температур відображаються на графіках, але абсолютні помилки можуть сягати великих значень. Наприклад, різниця між фактично спостереженою температурою та змодельованою за помірним сценарієм В1 для заходу та сходу України у 2006 році становила майже 11 °С (рис. 3а і 3б). Візуальний аналіз також показує, що, за винятком півдня України, у більшості випадків спостережена температура була менша за модельні результати, тобто модель передбачала більше потепління за усіма сценаріями. Найбільше же перевищення фактичної температури над спрогнозованими мало місце взимку 2001 року на сході України (рис. 3г).

Аналіз змін літніх температур (рис. 4) показує, що за всіма моделями після жаркого початку століття у 2003 році мало б відбутися відносно похолодання, яке б нарешті змінилося достатньо різким підвищенням літньої температури у 2004 році. Цікавим є те, що єдиним випадком з розглянутих на рис. 3 і 4, коли збігалися фактичні та спрогнозовані температури, був 2003 рік на сході України, причому 2 модельні сценарії відбили й тенденцію до різкого зменшення температури. Взагалі ж, за винятком заходу України, модельні температури були у цілому вище за фактичну, тобто модель передбачала більше потепління.

Нарешті, на графіках розсіяння (рис. 5) можна побачити, що для заходу України за всіма сценаріями викидів парникових газів модель недооцінювала як зменшення температури, так і збільшення (рис. 5а-в). Інакше кажучи, модельна температура для випадку низьких температур була вища за спостережену, а для випадку високих температур – нижча. Для сценаріїв А1В та В1 різниця для екстремальних величин

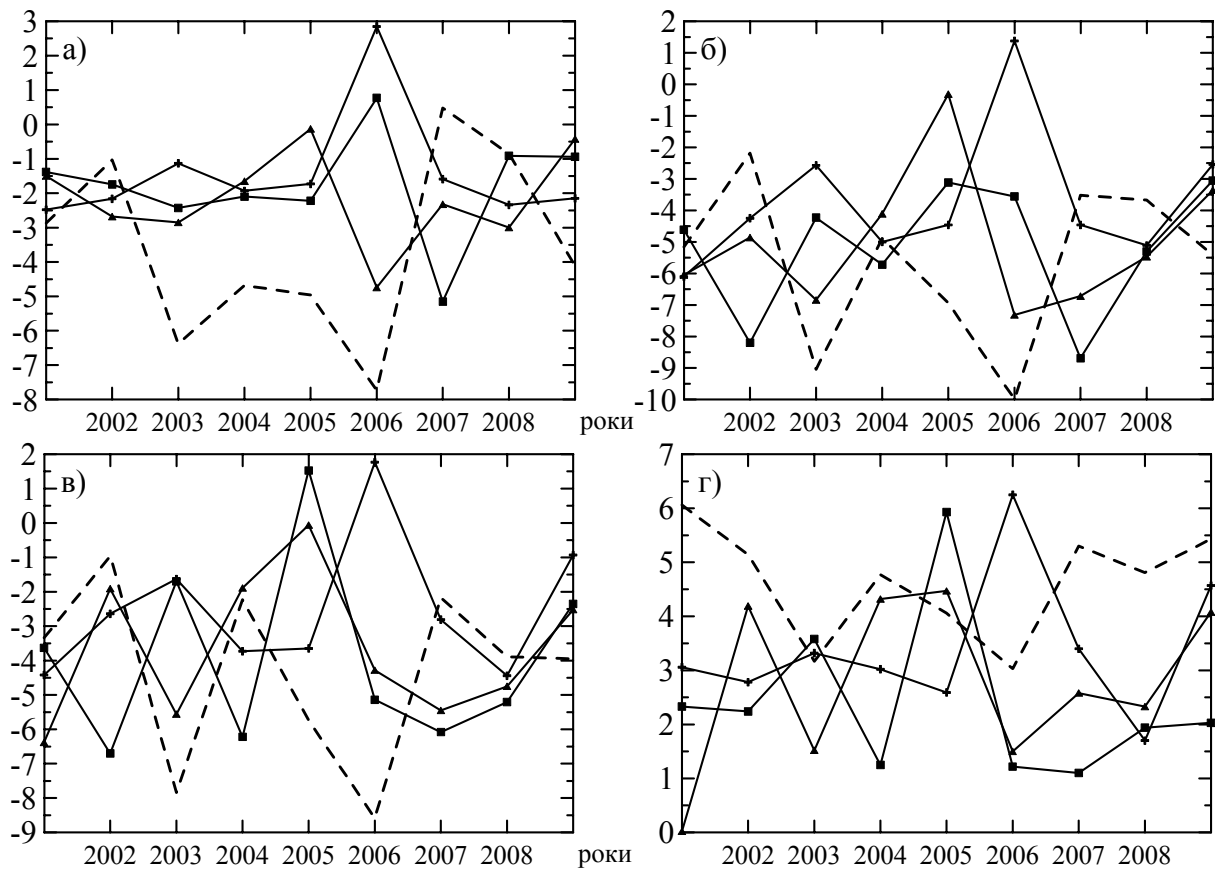


Рис. 3 – Середні зимові температури (вісь Y, °С) для заходу (а), півночі (б), сходу (в) та півдня (г) України: фактичні (пунктирна лінія) та за сценаріями А2 (▲), А1В (■) і В1(+).

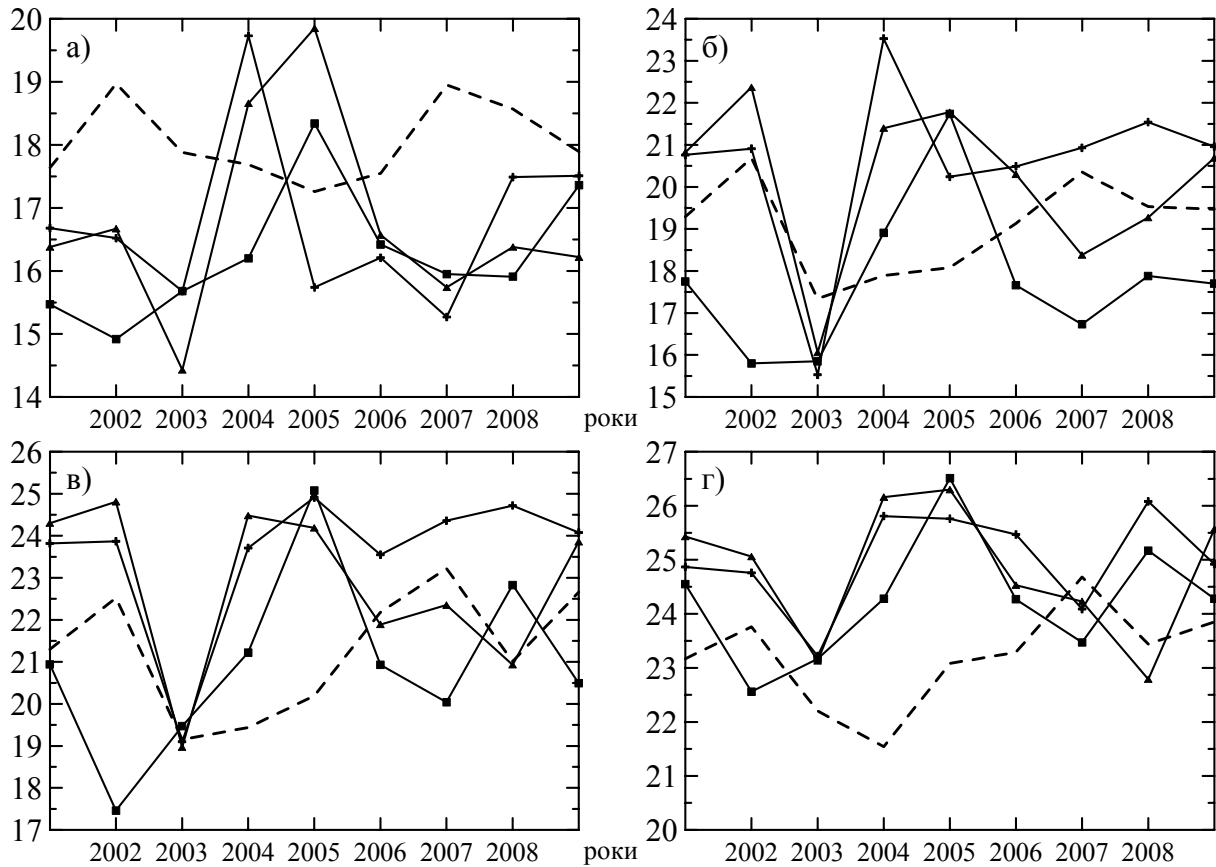


Рис. 4 – Середні літні температури (вісь Y, °C) для заходу (а), півночі (б), сходу (в) та півдня (г) України: фактичні (пунктирна лінія) та за сценаріями А2 (▲), А1В (■) і В1(+).

становила у середньому близько 5 °C. Для півночі та сходу України спостерігався аналогічний розподіл, але значення різниці для екстремальних величин було вже приблизно 2 °C (рис. 5г-і). Причому для сценаріїв А2 та В1 (рис. 5г, є, ж, і) високі температури прогнозувалися у середньому майже без помилок. Нарешті на півдні України (рис. 5к-м) для усіх сценаріїв викидів температури влітку прогнозувалися у середньому із задовільною точністю, а взимку – були трошки занижені.

Якщо розглядати якийсь сценарій викидів як найкращий з точки зору справджуваності прогнозу, то можна зупинитися на жорсткому сценарію А2 (рис. 5а, г, ж, к), який у порівнянні з іншими дає найбільш задовільні результати. Відзначимо, що хоч за цим сценарієм глобальна температура має збільшитися до 2100 року майже на 3 °C, над Україною він не викликає протягом найближчих 15 років істотних змін температурного режиму в бік значного потепління. Навіть навпаки, над півднем України спостерігатиметься незначне зниження температури (див., наприклад, [4]).

Висновки. Підсумовуючи отримані результати, можна сказати, що прогностичні дані за всіма сценаріями є найближчими до фактичних для півдня України, особливо за сценарієм А2. Найгіршими з точки зору справджуваності прогнозу є результати за помірним сценарієм А1В для сходу України, де середньоквадратична помилка становить 0,5 °C, а коефіцієнт кореляції – 0,9. Також, для більшості регіонів України є характерним завищення температури моделлю взимку та заниження – влітку.

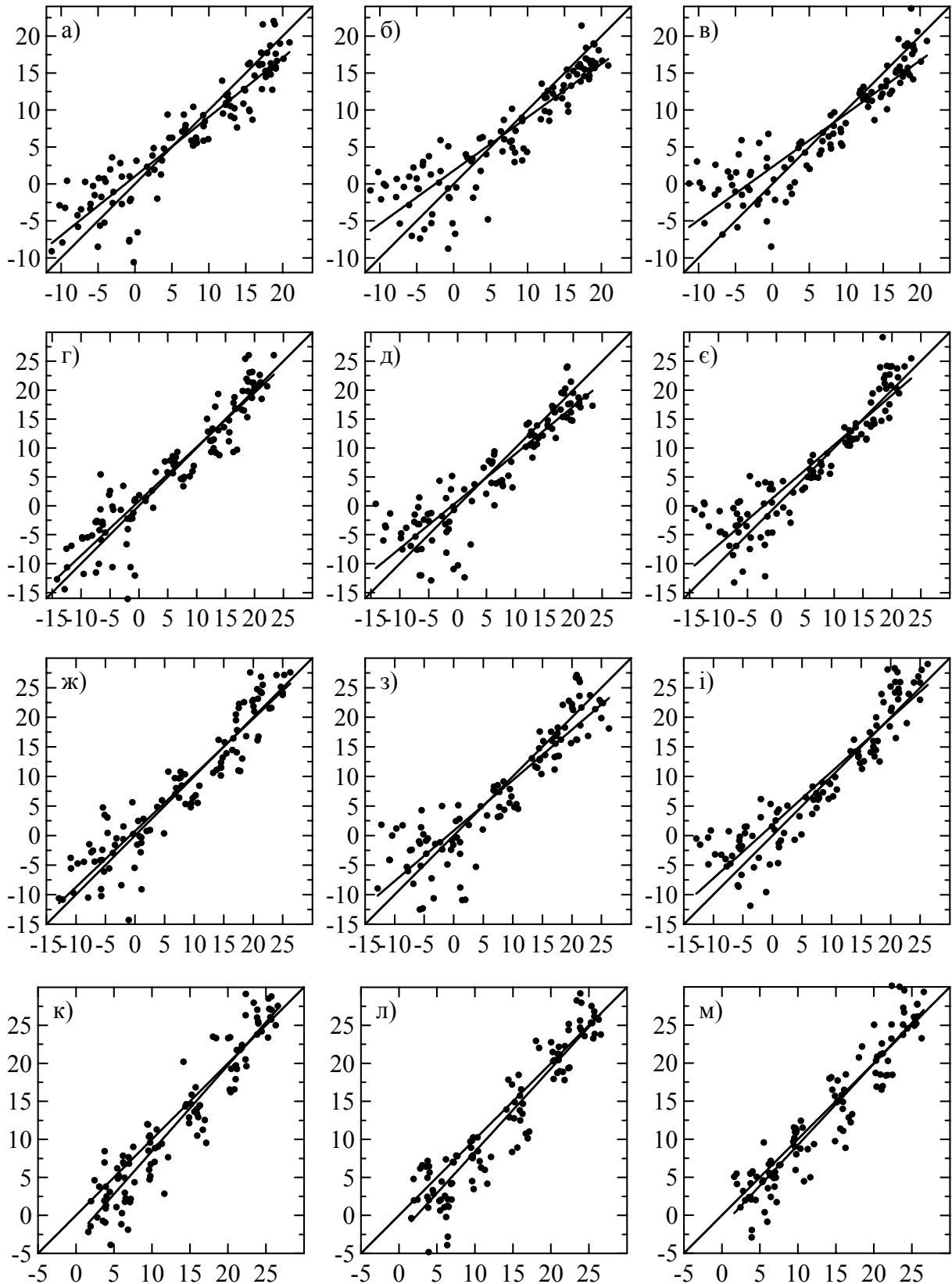


Рис. 5 – Графіки розсіювання для середньомісячної температури на заході (а)-(в), півночі (г)-(е), сході (ж)-(і) та півдні (к)-(м) України для сценаріїв А2 (зліва), А1В (у центрі) та В1 (справа). Вісь X – спостереження, вісь Y – прогноз.

Список літератури

1. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / S. Solomon et al. (eds.). – Cambridge University Press, 2007. – 996 p.
2. *Delworth T.L. et al. GFDL's CM2 Global Climate Model. Part I: Formulation and simulation characteristics* // *Journal of Climate*. – 2006. – V. 19. – P. 643-674.
3. *Special Report on Emission Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / N. Nakicenović et al. (eds.). – Cambridge University Press, 2000. – 599 p.
4. *Хохлов В.М., Латыш Л.Г., Цимбалюк К.С. Возможні зміни температурного режиму в Україні у 2011-2025 роках* // *Вісник Одеського державного екологічного університету*. – 2009. – Вип. 8. – С. 70-78.
5. *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science* / I.T. Jolliffe, D.B. Stephenson (Eds.). – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 240 p.

Оценка оправдываемости моделирования температурного режима для территории Украины. Латыш Л.Г., Хохлов В.Н., Боровская Г.А., Бондаренко В.Н.

Анализируется оправдываемость прогноза режима температуры воздуха на Украине в 2001-2009 годах. Сравниваются данные, полученные на основе расчетов моделью GFDL по сценариям A2, A1B, B1, и данные наблюдений за эти годы. Показано, что по всем сценариям модель дает самые лучшие результаты в сравнении с фактически наблюдаемой температурой для юга Украины.

Ключевые слова: температурный режим, моделирование климата, статистическая оценка, сценарии выбросов парниковых газов.

Verification of temperature condition modelling in Ukraine. Latysh L.G., Khokhlov V.N., Borovskaya G.A., Bondarenko V.N.

Forecast verification of air temperature conditions in Ukraine during 2001-2009 is analysed. The data from outputs of GFDL's model forced by the A2, A1B, and B1 emission scenarios are compared with observed data for these years. It is shown that for all scenarios the model provides most high-quality outcomes in comparison with observed temperature for Southern Ukraine.

Keywords: temperature conditions, climate modelling, statistical measure, greenhouse gases emission scenarios.