

ВЕРИФІКАЦІЯ ПРОГНОЗІВ СЕРЕДНЬОМІСЯЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ АНСАМБЛЕМ МОДЕЛЕЙ ПРОЕКТУ ENSEMBLES

*Верифікація прогнозів регіональних кліматичних моделей зі спостереженими середньомісячними температурами зроблена для станцій України (Одеса, Полтава, Вінниця та Сімферополь за період 1961–2010 рр.; Запоріжжя, Суми та Рівне за період 1973–2010 рр.). Визначена якість цих прогностичних моделей; наприклад, для Одеси показано, що найкращий прогноз дає модель RASMO ECHAM5-r3 (KNMI, Нідерланди). На результат моделювання впливає не тільки спроможність регіональної моделі відтворювати ті чи інші атмосферні процеси, а й вихідні дані. **Ключові слова:** верифікація прогнозів, оцінка справджуваності, прогностична модель, графік розсіяння.*

Вступ. Сучасні моделі загальної циркуляції атмосфери і океану дозволяють розглянути не тільки зміни глобального клімату, а й, певною мірою, оцінити його регіональні аспекти. Саме тому для аналізу майбутніх змін доцільно використовувати результати моделювання. Для визначення причин змін клімату, що мають місце, а також оцінки майбутніх змін, було реалізовано безпрецедентний за своїми масштабами та кількістю учасників модельний проект – дослідниками з 11 країн було виконано чисельні інтегрування з 23 складними фізико-математичними моделями загальної циркуляції атмосфери і океану [1]. Під час експерименту розраховувався клімат 20 століття при заданих, відповідних до спостережень, концентраціях парникових газів, а також клімат для різних сценаріїв [2]. Все це дозволило просунути в уточненні та підвищенні достовірності оцінок майбутніх змін клімату, а також оцінити імовірнісні розподіли характеристик клімату для кожного зі сценаріїв.

Наступним кроком у дослідженні змін клімату було застосування результатів глобальних моделей [1], в яких крок сітки, як правило, не буває меншим за 2° вздовж широтного кола або меридіана, як вхідної інформації для регіональних кліматичних моделей з кроком сітки приблизно 25 км. Такий підхід було використано під час виконання проекту EMSEMBLES для території Європи, включаючи й Україну [3]. Але перед тим, як застосовувати результати регіональних кліматичних моделей для аналізу поточних та майбутніх змін клімату над певним невеликим регіоном або, навіть, пунктом, треба визначитися з тим, наскільки якісним було моделювання, тобто зробити верифікацію прогнозів.

За своєю суттю, верифікація прогнозів має на меті оцінювання існуючого рівня прогнозування і останніх тенденцій якості прогнозів, покращення методик прогнозування і, врешті решт, самих прогнозів, та забезпечення користувачів інформацією, потрібною для ефективного використання прогнозів. Верифікація може бути якісною чи кількісною, але, в будь-якому разі, вона має надавати інформацію про природу помилок прогнозів. Для того, щоб використовувати будь-яку кліматичну модель для обраної станції України, потрібно бути впевненим в якості прогностичної інформації, наданої цією моделлю для пункту. Отже потрібно порівняти модельні дані із фактично спостереженими на певній станції за один проміжок часу. Саме тому метою цієї статті є порівняння, або верифікація, прогнозу середньомісячної температури з фактичними даними, що мали місце насправді.

Вихідні дані та методологія дослідження. Верифікація прогнозів безперервних величин визначає, наскільки величини прогнозів відрізняються від спостережених величин і передбачає використання діаграм, наприклад, графіків розсіяння, а також різноманітних сумарних оцінок [4-8]. В даній роботі проводилась верифікація

середньомісячної температури повітря для станцій Одеса, Полтава, Вінниця та Сімферополь за період 1961 – 2010 рр., а також для станцій Запоріжжя, Суми та Рівне за період 1973 – 2010 рр. Різниця в періодах визначається наявністю безперервного часового ряду.

Для перевірки бралися результати чотирнадцяти регіональних прогностичних моделей з десяти прогностичних центрів з проекту ENSEMBLES (табл. 1).

Таблиця 1 – Регіональні кліматичні моделі, результати яких використовувались для верифікації прогнозу середньомісячної температури.

Модель	Регіональна модель	Країна	Глобальна модель
M01	Aladin	Франція	ARPEGE_RM5.1
M02	KNMI RACMO	Нідерланди	ECHAM5-r3
M03	OURANOS CRCM	Канада	CGCM3
M04	SMHI RCA	Швеція	BCM
M05	SMHI RCA	Швеція	ECHAM5-r3
M06	SMHI RCA	Швеція	HadCM3Q3
M07	MPI REMO	Германія	ECHAM5-r3
M08	C4I RCA3	Ірландія	HadCM3Q16
M09	UCLM PROMES	Іспанія	HadCM3Q0
M10	ETHZ CLM	Швейцарія	HadCM3Q0
M11	DMI - HIRHAM	Данія	ARPEGE
M12	DMI - HIRHAM5	Данія	ECHAM5-r3
M13	DMI - HIRHAM5	Данія	BCM
M14	VMGO - RRCM	Росія	HadCM3Q0

Ряди прогностичних даних кожної моделі були зіставленні з фактичними значеннями середньомісячної температури для кожної станції. Знаючи широти та довготи обраних пунктів, обрано найближчі до них координати вузлів сіток кліматичних моделей (табл. 2), із яких було взято прогностичні дані. В таблиці також подані значення середньої кліматичної температури та дисперсії з кліматичного кадастру України, які використовувались при розрахунках оцінок справджуваності прогнозів.

Таблиця 2 – Координати кліматично однорідних районів (КОР) України по температурі та найближчих до них вузлів сітки прогностичних моделей; відповідні їм значення середньої багаторічної температури та дисперсії

Станція	Координати станції		Координати вузлів сітки		Середнє значення	Дисперсія
	Широта	Довгота	Широта	Довгота		
Одеса	46°26'	30°46'	46.375	30.375	10,1	0,8
Вінниця	49°14'	28°28'	49.125	28.375	7,1	0,9
Полтава	49°36'	34°33'	49.375	34.375	7,6	1,1
Сімферополь	44°41'	34°08'	44.375	34.125	10,6	0,8
Запоріжжя	47°48'	35°01'	47.375	35.125	9,4	1,0
Суми	50°53'	34°43'	50.625	34.375	6,6	1,1
Рівне	50°35'	26°08'	50.375	26.125	7,0	0,9

Верифікація прогнозів здійснювалася за допомогою таких характеристик (надалі F_i – спрогнозована температура, а O_i – фактично спостережена).

1. Середня помилка

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i - O_i \quad (1)$$

визначає наскільки у середньому прогноз є хибним. Її величини лежать у діапазоні від $-\infty$ до ∞ , причому 0 – найкраща величина.

2. Мультіплікативне зміщення

$$MB = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N F_i}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N O_i} \quad (2)$$

визначає, наскільки середню величину прогнозів можна порівняти з середньою величиною спостережень. Величини цієї характеристики лежать у діапазоні від $-\infty$ до ∞ , причому 1 – найкраща величина.

3. Середня абсолютна помилка

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |F_i - O_i| \quad (3)$$

визначає, якою є середня величина помилок прогнозу. Величини цієї характеристики лежать у діапазоні від 0 до ∞ , причому 0 – найкраща величина.

4. Середньоквадратична помилка

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2} \quad (4)$$

визначає, якою є середня величина помилок прогнозу. Величини цієї характеристики лежать у діапазоні від 0 до ∞ , причому 0 – найкраща величина.

5. Квадратична помилка

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (F_i - O_i)^2 \quad (5)$$

визначає середню піднесену до квадрату різницю між прогнозами та спостереженнями. Величини цієї характеристики лежать у діапазоні від 0 до ∞ , причому 0 – найкраща величина.

6. Лінійна помилка в імовірнісному просторі визначає помилку за допомогою формули

$$LEPS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |CDF_o(F_i) - CDF_o(O_i)|, \quad (6)$$

де $CDF_o()$ – кумулятивна функція розподілу, яка визначається за допомогою відповідних кліматичних даних.

Величини цієї характеристики лежать у діапазоні від 0 до 1, причому 0 – найкраща величина.

7. Коефіцієнт кореляції

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (F_i - \bar{F})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad (7)$$

визначає наскільки добре прогностичні значення відповідають спостереженням. Величини цієї характеристики лежать у діапазоні від 1 до -1, причому 1 – найкраща величина.

8. Коефіцієнт кореляції аномальності визначає, наскільки добре прогностичні аномалії відповідають спостереженням. Величини цієї характеристики лежать у діапазоні від 1 до -1, причому 1 – найкраща величина. Формула для нецентрованого коефіцієнта кореляції аномальності (*AC*) має вигляд

$$AC = \frac{\sum_{i=1}^N (F_i - \mu)(O_i - \mu)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (F_i - \mu)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \mu)^2}} \quad (8)$$

Докладніше міри справджуваності прогнозів (1)–(8) описані у монографії [4]. Також проаналізуємо графіки розсіяння, які показують прогностичні величини у порівнянні з фактично спостереженими і застосовуються для визначення того, наскільки добре прогностичні дані відповідають спостереженням; у випадку точного прогнозу усі точки будуть зосереджені на або поблизу діагоналі [4].

Результати дослідження. Характеристики справджуваності для кожного з пунктів занесені до таблиць. Із чотирнадцяти регіональних моделей до таблиць занесені лише ті, результати яких справджуються найкраще (табл. 3) або найгірше (табл. 4).

Таким чином, з усіх чотирнадцяти моделей лише одна для Одеси виявилася найкращою (табл. 3); це модель RACMO ECHAM5-r3 (KNMI, Нідерланди). За п'ятьма характеристиками справджуваності результати для них були найкращими (у табл. 3 вони показані напівжирним курсивом), а саме, середня абсолютна помилка, середньоквадратична помилка, квадратична помилка, коефіцієнт кореляції та коефіцієнт кореляції аномальності. Останні тринадцять моделей показали середні або гірші результати. Найкращою прогностичною системою для Вінниці виявилась VMGO-RRCM (Росія); для Полтави, Сімферополя, Запоріжжя та Сум можна відмітити шведську модель SMHI HadCM3Q3, а для Рівного – модель SMHI ECHAM5-r3.

Взагалі, коефіцієнти кореляції *r* для усіх відзначених випадків перевищували 0,9, тобто результати можна вважати цілком задовільними. Але якщо розглядати, наприклад, середню абсолютну помилку *MAE*, то можна побачити, що вона є достатньо великою – приблизно від 2,2 до 2,7 °С.

У випадку найгірших моделей (табл. 4) *MAE* є ще більшою – від 4 до 5 °С, що для середньомісячної температури можна вважати несприйнятливою величиною. З іншого боку, коефіцієнти кореляції навіть у випадку найгірших моделей залишаються дуже великими.

Інакше кажучи, часовий хід середньомісячної температури з максимумом влітку та мінімумом взимку відтворювався дуже добре, але аномальність у цьому ході проявлялася вже не дуже добре (порівняйте величини *AC* і *LEPS* у табл. 3 і 4).

Цікавим є також і те, що результати однієї моделі SMHI RCA (Швеція) виявилися одночасно й найкращими й найгіршими. Різницею було те, що як вихідна до цієї моделі використовувалася інформація з різних глобальних моделей. Тобто, на результат моделювання впливає не тільки спроможність регіональної моделі відтворювати ті чи інші атмосферні процеси, а й вихідні дані.

Таблиця 3 – Найкращі прогностичні моделі та їх сумарні оцінки справджуваності моделювання середньомісячної температури для станцій Одеса, Полтава, Вінниця та Сімферополь за період 1961–2010 рр., та Запоріжжя, Суми та Рівне за період 1973–2010 рр.

Модель	<i>ME</i>	<i>MB</i>	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>	<i>MSE</i>	<i>LEPS</i>	<i>r</i>	<i>AC</i>
Одеса								
M02	0,67	1,06	2,24	2,86	8,20	0,08	0,95	0,94
Вінниця								
M14	0,67	1,06	2,24	2,86	8,20	0,08	0,95	0,94
Полтава								
M06	-0,31	0,96	2,64	3,53	12,46	0,06	0,93	0,93
Сімферополь								
M06	1,41	1,13	2,69	3,52	12,38	0,09	0,93	0,91
Запоріжжя								
M06	-0,08	0,99	2,43	3,15	9,94	0,06	0,95	0,95
Суми								
M06	-0,60	0,91	2,61	3,35	11,25	0,06	0,94	0,94
Рівне								
M05	0,37	1,05	2,40	3,13	9,79	0,06	0,93	0,93

Таблиця 4 – Найгірші прогностичні моделі та їх сумарні оцінки справджуваності моделювання середньомісячної температури для станцій Одеса, Полтава, Вінниця та Сімферополь за період 1961 – 2010 рр., та Запоріжжя, Суми та Рівне за період 1973 – 2010 рр.

Модель	<i>ME</i>	<i>MB</i>	<i>MAE</i>	<i>RMSE</i>	<i>MSE</i>	<i>LEPS</i>	<i>R</i>	<i>AC</i>
Одеса								
M13	3,86	1,37	4,07	4,87	23,71	0,14	0,94	0,84
Вінниця								
M03	-4,38	0,41	4,73	6,10	37,20	0,10	0,93	0,86
Полтава								
M03	-4,17	0,47	4,67	6,01	36,09	0,10	0,93	0,88
Сімферополь								
M04	4,15	1,39	4,95	6,25	39,06	0,29	0,90	0,65
Запоріжжя								
M04	3,33	1,36	4,49	5,84	34,11	0,15	0,92	0,80
Суми								
M03	-4,42	0,36	4,97	6,58	43,27	0,11	0,92	0,86
Рівне								
M03	-4,67	0,38	5,03	6,50	42,28	0,10	0,91	0,83

Розглянемо також графіки розсіяння (рис. 1) для зазначених у табл. 3 і 4 моделей для того, щоб визначити наскільки добре відтворюється середньомісячна температура різних величин. У випадку точного прогнозу усі точки будуть зосереджені на або поблизу діагоналі.

З рис. 1 випливає, що тільки для Рівного (рис. 1м і н) різниця у графіках розсіяння

була незначною. Наприклад, для Одеси (рис. 1а), прогностичні температури у середньому були трохи вищими за спостережені для додатних значень температури і трохи нижчими для від'ємних. Температура близька до нуля по факту майже збігається з прогностичною. Це дає нам право вважати прогноз за голландською моделлю RASMO ECHAM5-r3 найкращим. Датська модель отримала найбільшу похибку в прогнозуванні середньомісячної температури (рис. 1б). Приблизно до значень середньомісячної температури 15°C, тобто в усі пори року за винятком літа, прогностичні дані завищувались, а після 15°C – занижувались порівняно зі спостереженою температурою. Таким чином, ця модель істотно зменшувала річну амплітуду температури в Одесі.

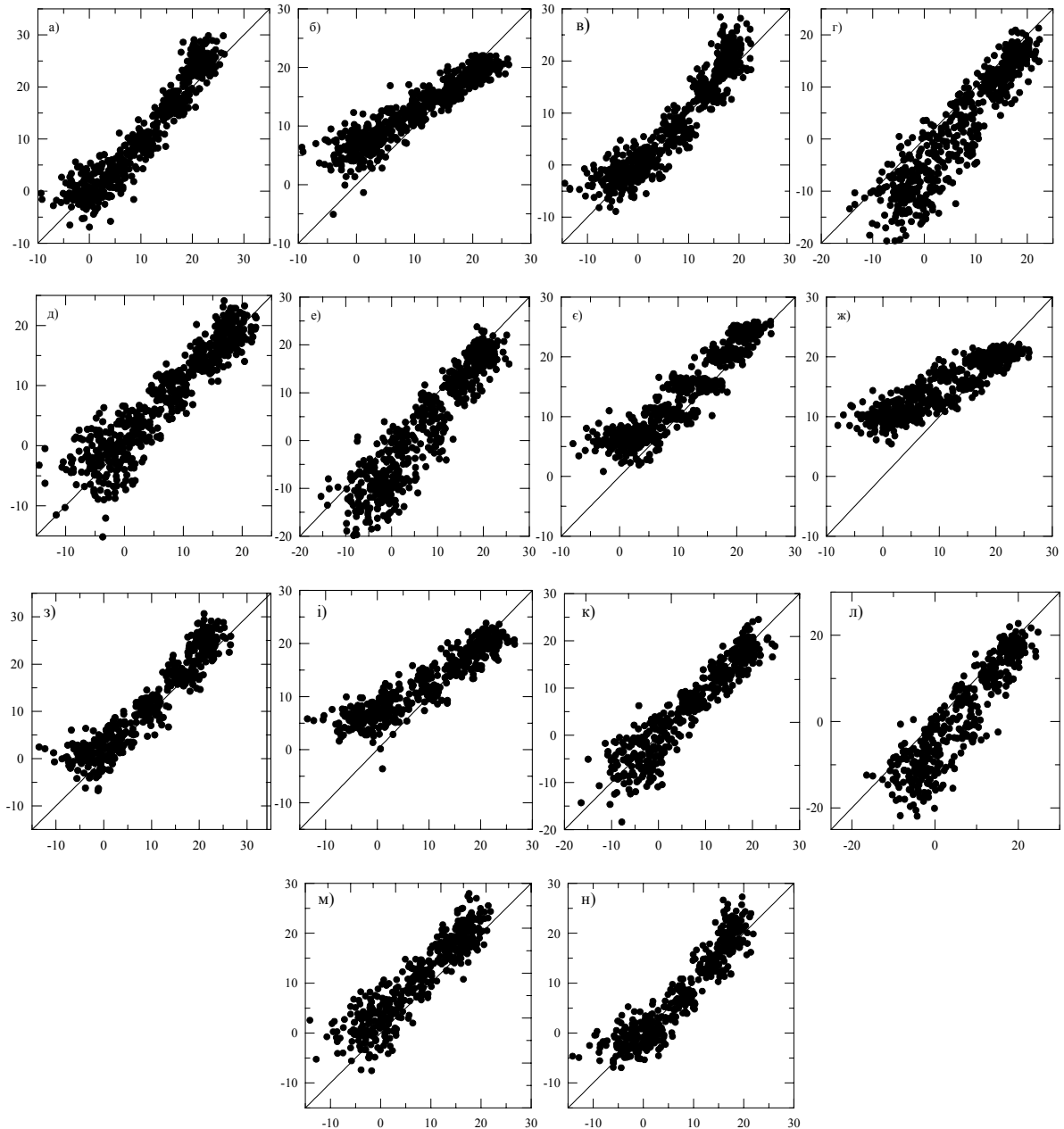


Рис. 1 – Графіки розсіяння середньомісячної температури для Одеси (а, б), Вінниці (в, г), Полтави (д, е), Сімферополя (є, ж) Запоріжжя (з, і), Сум (к, л) та Рівного (м, н) для найкращої (перший графік) та найгіршої (другий графік) моделей. Вісь X – фактичні значення, Y – прогностичні значення.

В більшості інших випадків найкращі моделі достатньо добре відтворювали середньомісячну температуру, хоч в окремих випадках різниця могла сягати й 10°C. Найгірші ж моделі можна розбити на дві групи. Для першої є характерним перевертання річної амплітуди температури у бік її зменшення – підвищення зимніх температур та підвищення літніх (окрім згаданої Одеси, це Сімферополь та Запоріжжя). Для решти випадків (Вінниця, Полтава і Суми) спрогнозована температура була в середньому на декілька градусів нижча за фактичну.

Висновки. В даній роботі розглянута верифікація прогнозів регіональних кліматичних моделей із спостереженими середньомісячними температурами для деяких станцій на території України. Результатом цієї роботи є перелік моделей, якість прогнозів яких для певних пунктів України є найкращою. Якщо ототожнювати, найкращою моделлю взагалі для України виявилася RCA HadCM3Q3 (SMHI, Швеція), а найгіршою – CRCM CGCM3 (OURANOS, Канада).

Цікавим висновком є те, що на результати верифікації істотно впливає вихідна інформація для регіональної кліматичної моделі, а саме результати інтегрування за глобальною моделлю. Наприклад, для Сімферополя і Запоріжжя як найкращі, так і найгірші результати були для шведської моделі RCA, але в першому випадку як вихідна інформація використовувалися дані інтегрування моделі HadCM3Q3, а у другому – BSM.

Доцільним вважається також використання не окремої характеристики, наприклад, коефіцієнта кореляції, а комплексу характеристик. Відзначимо, що для найкращих та найгірших моделей коефіцієнт кореляції є дуже високим і завжди перевищує 0,90; середня ж абсолютна помилка для найкращих моделей у два рази менше, за аналогічну величину для найгірших моделей.

Нарешті, цікавим наочним засобом може бути графік розсіяння, який показує прогностичні величини у порівнянні з фактично спостереженими і дозволяє виявити діапазони величин з найкращим та найгіршим прогнозом. У випадку найкращих моделей точки зосереджуються поблизу діагоналі графіків, а для найгірших прогнозів виявлено дві головні причини помилок. По-перше, перевертнулася річна амплітуда температури у бік її зменшення – підвищення зимніх температур та підвищення літніх. По-друге, спрогнозована температура була в середньому на декілька градусів нижча за фактичну.

Наприкінці треба відзначити, що використання будь-яких модельних результатів потребує їх попередню верифікацію за допомогою спостережених даних. Ця процедура дозволяє визначити, наскільки прогнози є якісними. У нашому випадку, верифікація дозволила визначити моделі, які можуть використовуватися для подальшого аналізу сценарних даних для найближчого майбутнього.

Список літератури

1. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis* / S. Solomon et al. (Eds.) Contribution of Working Group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. – Cambridge University Press, 2007. – 996 p.

2. *Special Report on Emission Scenarios*. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change / N. Nakićenović et al. (Eds.). – Cambridge University Press, 2000. – 599 p.

3. *ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of Research and Results from the ENSEMBLES Project* / P. van der Linden and J.F.B. Mitchell (Eds.). – Exeter, ENSEMBLES Project Office, MetOffice Hadley Centre, 2009. – 138 p.

4. *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science* / I.T. Jolliffe, D.B. Stephenson (Eds.). – Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 2003. – 240 p.

5. *Murphy A.H., Winkler R.L.* A general framework for forecast verification // *Monthly Weather Review*. – 1987. – Vol. 115(7). – P. 1330-1338.

6. *Murphy A.H.* What is a good forecast? An essay on the nature of goodness in weather forecasting // *Weather and Forecasting*. – 1993. – Vol. 8(2). – P. 281-293.

7. *Murphy A.H.* The Finley affair: a signal event in the history of forecast verification // *Weather and Forecasting*. – 1996. – Vol. 11(1). – P.3-20.

8. *Potts J.M., Folland C.K., Jolliffe I.T., Sexton D.* Revised "LEPS" scores for assessing climate model simulations and long-range forecasts // *Journal of Climate*. – 1996. – Vol. 9(1). – P. 34-53.

Верификация прогнозов среднемесячной температуры ансамблем моделей ENSEMBLES. Хохлов В.Н., Моспан Н.О.

Проведена верификация прогнозов региональных климатических моделей со среднемесячными температурами, рассчитанными по наблюдениям для станций Украины (Одесса, Полтава, Винница, Симферополь за период 1961-2010 гг.; Запорожье, Сумы и Ровно за период 1973-2010 гг.). Определено качество этих прогностических моделей; например, для Одессы показано, что наилучший прогноз дает модель RACMO ECHAM5-r3 (KNMI, Нидерланды). На результат моделирования влияет не только способность региональной модели воспроизводить те или иные атмосферные процессы, но и исходные данные.

Ключевые слова: верификация прогнозов, оценка оправдываемости, прогностическая модель, график рассеивания.

Forecast verification of monthly temperature from ENSEMBLES models. Khokhlov V.N., Mospan N.O.

The forecasts of regional climatic models results were verified with the monthly mean temperatures observed at the Ukrainian sites (Odessa, Poltava, Vinnytsia, Simferopol for 1961-2010; Zaporizhzhia, Sumy, Rivne for 1973-2010). The skill of the models was determined; e.g. for the Odessa, best result was provided by the RACMO ECHAM5-r3 model (KNMI, Netherlands). The model result is conditioned the ability of regional model to reproduce some atmospheric processes as well as the input data

Keywords: forecast verification, estimation of reliability, prediction model, scatter plot.