

УДК 504.064.4:658.567.3

І.В. КОВАЛЕЦЬ*

МОДЕЛЮВАННЯ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ УМОВ НАД ЧОРНИМ МОРЕМ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ WRF: ВЕРИФІКАЦІЯ НА ПРИКЛАДІ ШТОРМУ У ЛЮТОМУ 2023 РОКУ

*Інститут проблем математичних машин і систем НАН України, м. Київ, Україна

Анотація. У роботі виконані налаштування та іспити метеорологічної моделі WRF для прогнозування метеорологічних умов, які супроводжують шторми на Чорному морі. Вперше проведено моделювання метеорологічних умов над поверхнею Чорного та Азовського морів для максимально потужного шторму 4–11 лютого 2023 року. Проаналізовано синоптичні умови виникнення шторму. Моделювання проводилось на обчислювальних сітках розділової здатності 0,15, 0,05 та 0,025 град. Результати розрахунків стосовно впливу розділової здатності на результати моделювання показують, що при зменшенні кроку сітки утричі — від 0,15 град до 0,05 град, абсолютна похибка метеопараметрів зменшуються на 8,4 % (тиск), 5,3% (напрямок вітру), 6 % (швидкість вітру), 16 % (температура). Подальше зменшення розділової здатності від 0,05 град до 0,025 град призводить лише до незначного зменшення похибок. Найкращі значення середніх абсолютних похибок метеопараметрів для розглянутого сценарію були отримані на сітці з просторовим дозволом 0,025 град і склали: 1,17 С (температура), 2,37 м/с (швидкість вітру), 31,79 град (напрямок вітру), 79,19 Па (приземний тиск). Найкраще узгодження результатів моделювання з вимірами отримане для метеостанцій у північно-західній, західній та південній частинах Чорного моря. Ступінь впливу просторового дозволу на результати моделювання полів вітру була неоднаковою у різні моменти часу та у різних частинах обчислювальної області. Вплив просторового дозволу сітки значніший поблизу північного та східного узбережжя Чорного моря, що найімовірніше пов'язано з більш складною топографією місцевості у східній частині узбережжя Чорного моря. У підсумку налаштована модель WRF може бути в подальшому використана для оперативного прогнозування метеорологічних умов, які супроводжують сильні шторми у Чорному морі, у тому числі у взаємодії з моделями океанографічних умов.

Ключові слова: прогноз погоди, шторм, Чорне море, WRF, верифікація моделі.

Abstract. The work presents the adjustment and evaluation of the WRF meteorological model for forecasting meteorological conditions accompanying storms over the Black Sea (BS). For the first time, modeling of meteorological conditions over the surfaces of the Black and Azov Seas has been carried out for the most powerful storm that occurred between February 4 and February 11, 2023. The synoptic conditions of the storm occurrence have been analyzed. The modeling has been carried out using computational grids with resolutions of 0.15, 0.05, and 0.025 degrees. The results of calculations regarding the impact of resolution on the modeling results show that when the grid step is reduced threefold (from 0.15 to 0.05 degrees), the absolute errors of meteorological parameters are reduced by 8.4% for pressure, 5.3 % for wind direction, 6 % for wind speed, and 16 % for temperature. Further reduction of resolution from 0.05 to 0.025 degrees only led to a slight reduction in errors. The best values of the average absolute errors of meteorological parameters for the considered scenario have been obtained using a grid with a spatial resolution of 0.025 degrees: 1.17°C (temperature), 2.37 m/s (wind speed), 31.79 degrees (wind direction), and 79.19 Pa (surface pressure). The best agreement between the simulation results and measurements has been obtained for weather stations located in the northwestern, western, and southern parts of the BS. The degree of influence of the spatial resolution on the results of the simulated wind fields varied depending on time and location within the computational domain. The impact of the grid spatial resolution is more significant near the northern and eastern coasts of the BS, which is most likely associated with the

more complex topography of the terrain in the eastern part of the BS coast. In conclusion, the adjusted WRF model can be further used for operational forecasting of meteorological conditions accompanying severe storms in the Black Sea, including its interaction with the models of oceanographic conditions.

Keywords: weather forecasting, storm, the Black Sea, WRF, model verification.

DOI: 10.34121/1028-9763-2025-3-4-77-89

1. Вступ

В останні роки в Україні розроблені системи оперативного прогнозування погоди на основі використання мезомасштабних метеорологічних моделей, як-от WRF [1, 2]. Мезомасштабні метеорологічні моделі можна використовувати для прогнозування процесів як синоптичного, так і мезомасштабів, зокрема, конвективних систем, фронтів, морських бризів, циркуляцій у полонинах тощо. Система прогнозування погоди WRF-Україна, перший варіант якої був розроблений у середині 2000-х, та її подальші версії, як-от [1, 3], наразі використовуються для розв'язання низки актуальних практичних завдань. Зокрема, в Українському гідрометцентрі WRF-Україна використовується для забезпечення даними оперативного прогнозування метеорологічних полів системи Євросоюзу з ядерного аварійного реагування РОДОС [4], а також для прогнозування стихійних гідрометеорологічних явищ в Українських Карпатах [3]. Програмний код WRF-Україна також впроваджено у метеорологічному модулі системи РОДОС разом із методами асиміляції даних метеорологічних вимірювань, що дозволяють коригувати метеорологічні поля, розраховані за даними чисельного прогнозу погоди [5].

Однією з практично значущих сфер застосування метеорологічних моделей є прогнозування метеорологічних полів над морською поверхнею та наступна передача цих даних гідродинамічним моделям та моделям хвиль, які прогнозують стан морської поверхні [6–8]. На підставі таких ланцюгів моделей створюються системи оперативного прогнозування океанографічних умов [6, 9]. Подібне застосування моделі WRF для прогнозування штормів у Чорному морі потребує її верифікації для умов сильних штормів у даному регіоні.

Отже, метою даної роботи є адаптація моделі WRF для умов Чорного моря та її верифікація з використанням даних вимірів, зібраних під час одного з сильних штормів у лютому 2023 р.

2. Метеорологічні умови шторму 4–11 лютого 2023 р.

Для налаштування та перевірки здатності мезомасштабної моделі WRF прогнозувати метеорологічні умови, що супроводжують сильні шторми у Чорному морі, був обраний сценарій шторму 4–11 лютого 2023 року. Згідно з інформацією, озвученою керівницею прес-центру Оперативного командування «Південь» Наталією Гуменюк в ефірі національного марафону, для Чорного моря [10] цей шторм був «максимально потужний ... 5–7 балів», і завдяки цьому «станом на ранок 7 лютого російські окупанти забрали всі ракетносії з Чорного моря».

Згідно з картами Німецької служби погоди DWD (<https://www.wetter3.de>), синоптична ситуація поблизу західного узбережжя Чорного моря визначалась утворенням двох вторинних циклонів, які виникли у процесі розпаду циклону, що потрапив із північного заходу. При цьому один із вторинних циклонів стаціонував над західною частиною Чорного моря, а інший, рухаючись на південь, інтенсифікувався під впливом висотного гребня тиску. Інтенсифікація південного циклону протягом 4–5 лютого була викликана присутністю висотної улоговини тиску та адвекцією завихреності термічним вітром (рис. 1), що приводило до підсилення вітру вздовж західного узбережжя Чорного моря та тильної частини меншого циклону, розташованого над західною частиною Чорного моря. Взаємодія обох циклонів привела до їх об'єднання в один південний циклон вдень 5 лютого. Рухаю-

чись у північно-східному напрямку південний циклон проходив через східну частину Чорного моря, що призвело до значного підсилення вітру у східній частині Чорного моря 7 лютого 2023 р.

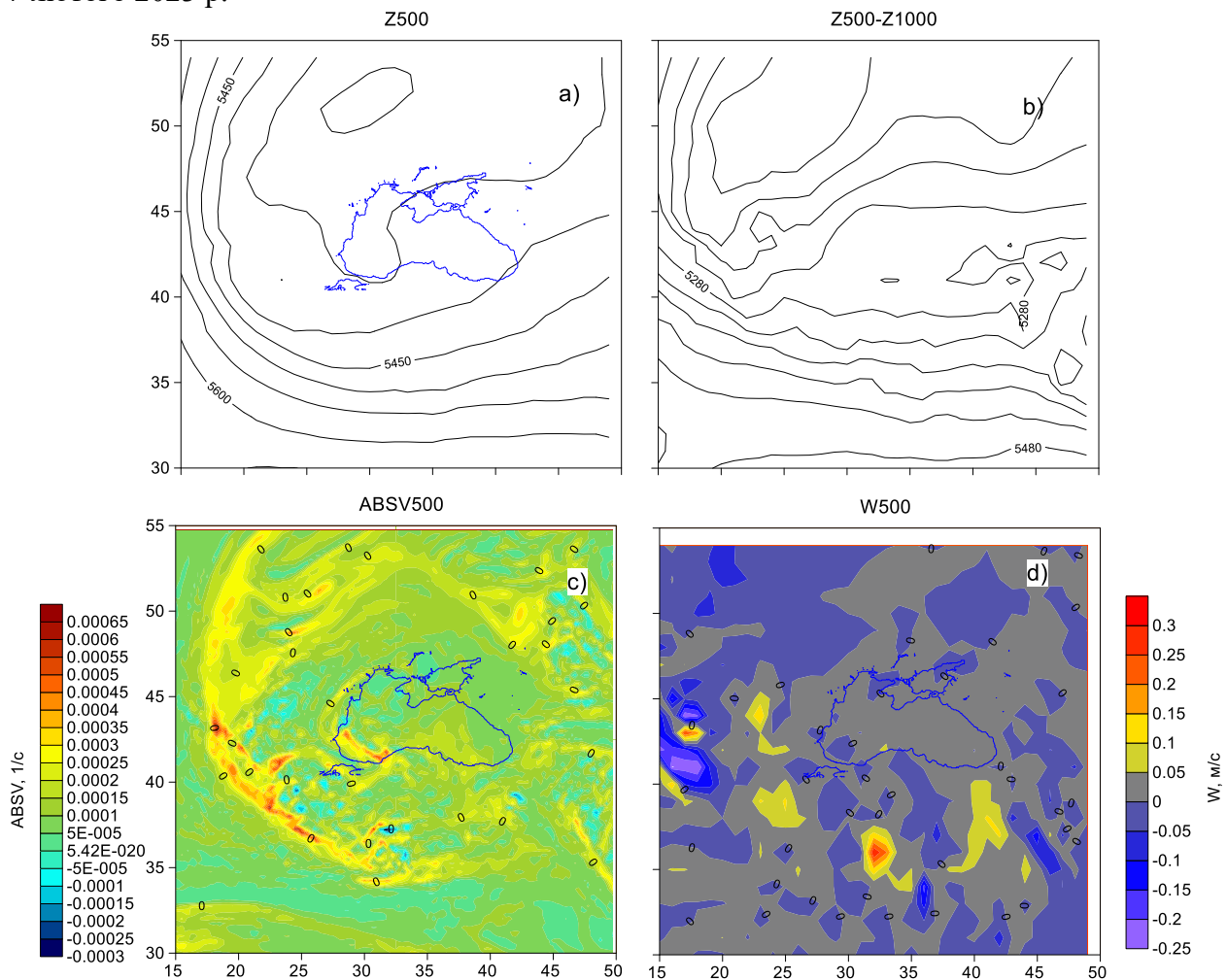


Рисунок 1 — Карти метеорологічних полів за даними фінального аналізу NCEP GFS на 05.03.2023 р., 0 год UTC: Z500 — геопотенціальна висота тиску 500 мб (інтервал між ізолініями 50 м); Z500-Z1000 — різниця висот рівнів тиску 500 та 1000 мб (інтервал між ізолініями 40 м); ABSV — абсолютна завихреність (1/с); W500 — вертикальна швидкість (м/с) на рівні 500 мб

На рис. 2 показані наземні метеостанції поблизу узбережжя Чорного моря, дані яких були отримані для дослідження з вебсайту Метеопост (meteorpost.com) та бази даних Wolfgang [11]. Максимальна швидкість вітру на західному узбережжі Чорного моря досягала 4–5 лютого, а на східному — 6–7 лютого, що узгоджується з синоптичним аналізом, проведеним вище. Найбільші значення швидкості вітру спостерігались у південно-західній частині Чорного моря (Бальчик та Стамбул, де вітер сягав 19 м/с) та у північно-східній частині Чорного моря (Новоросійськ, до 20 м/с). В українській частині узбережжя Чорного моря швидкість вітру була максимальною у Севастополі (15 м/с), а серед станцій північно-західної частині Чорного моря не перевищувала 10 м/с (Очаків).

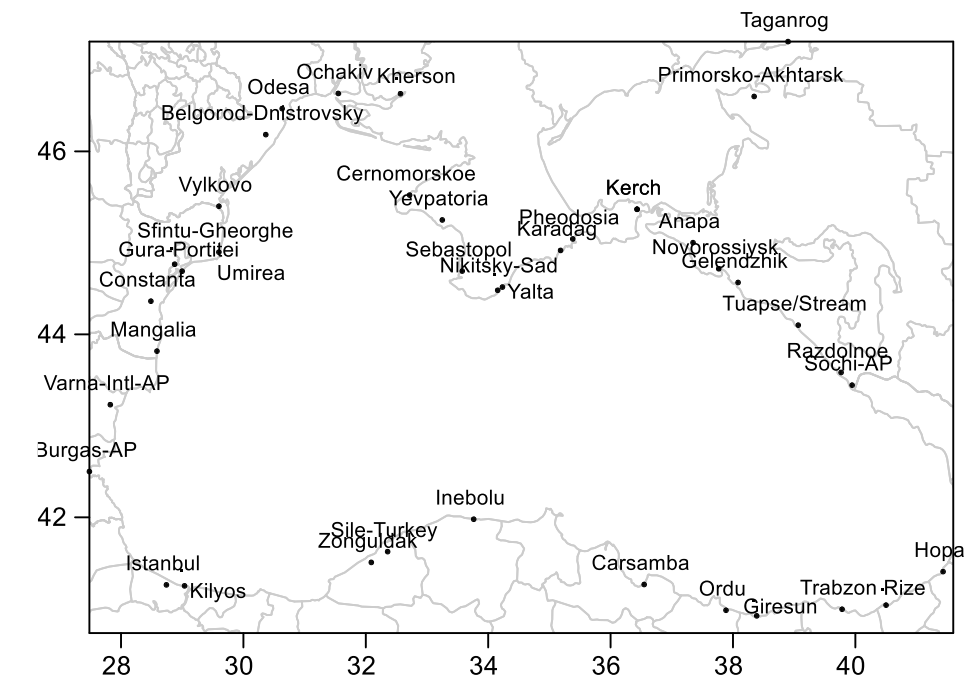


Рисунок 2 — Місця розташування наземних метеостанцій на узбережжі Чорного моря

3. Налаштування WRF

3.1. Основні параметри

Для тестування метеорологічної моделі WRF (версія 3.9) [12] за зазначений період була обрана початкова конфігурація параметрів моделі, аналогічна тим, що використовується в Укргідрометцентрі для оперативного розрахунку метеорологічних полів в Україні [1]. На відміну від [1], у даній роботі обчислювальні області створювались так, щоб їх центр знаходився над територією Чорного моря.

У подальшому дослідженні для аналізу чутливості моделі до роздільної здатності сітки використано декілька варіантів обчислювальних областей і їх конфігурацій, визначених у такий спосіб (рис. 3).

Конфігурація № 1. Обчислювальна область D01, просторовий дозвіл якої 0,15 град, яка, крім Чорного моря, охоплювала значну територію поза його межами.

Конфігурація № 2. Область D02, просторовий крок якої 0,05 град, повністю охоплювала територію ЧМ і була вкладена в область D01. Розрахунки у вкладених областях із поступовим зменшенням роздільної здатності застосовуються для того, щоб запобігти нефізичним збуренням, які виникають при інтерполяції з грубої сітки глобальної моделі на дрібну сітку моделі WRF. Але, як показано у даній роботі, точність розрахунків без зовнішньої області виявилось не гіршою, ніж у вкладеній області. Тому як альтернативне застосовувалось таке налаштування.

Конфігурація № 3. Область D02.1. У цьому налаштуванні обчислювальних областей розрахунки проводились в одній обчислювальній області, розміри і горизонтальна роздільна здатність якої були ідентичними області D02 з Варіанта 1 (роздільна здатність 0,05 град). Щоб відрізнити результати, отримані у такий спосіб, називатимемо визначену тут обчислювальну область D02.1.

Конфігурація № 4. Область D03. Одна обчислювальна область, розміри якої ідентичні області D02, а горизонтальна роздільна здатність складає 0,025 град.

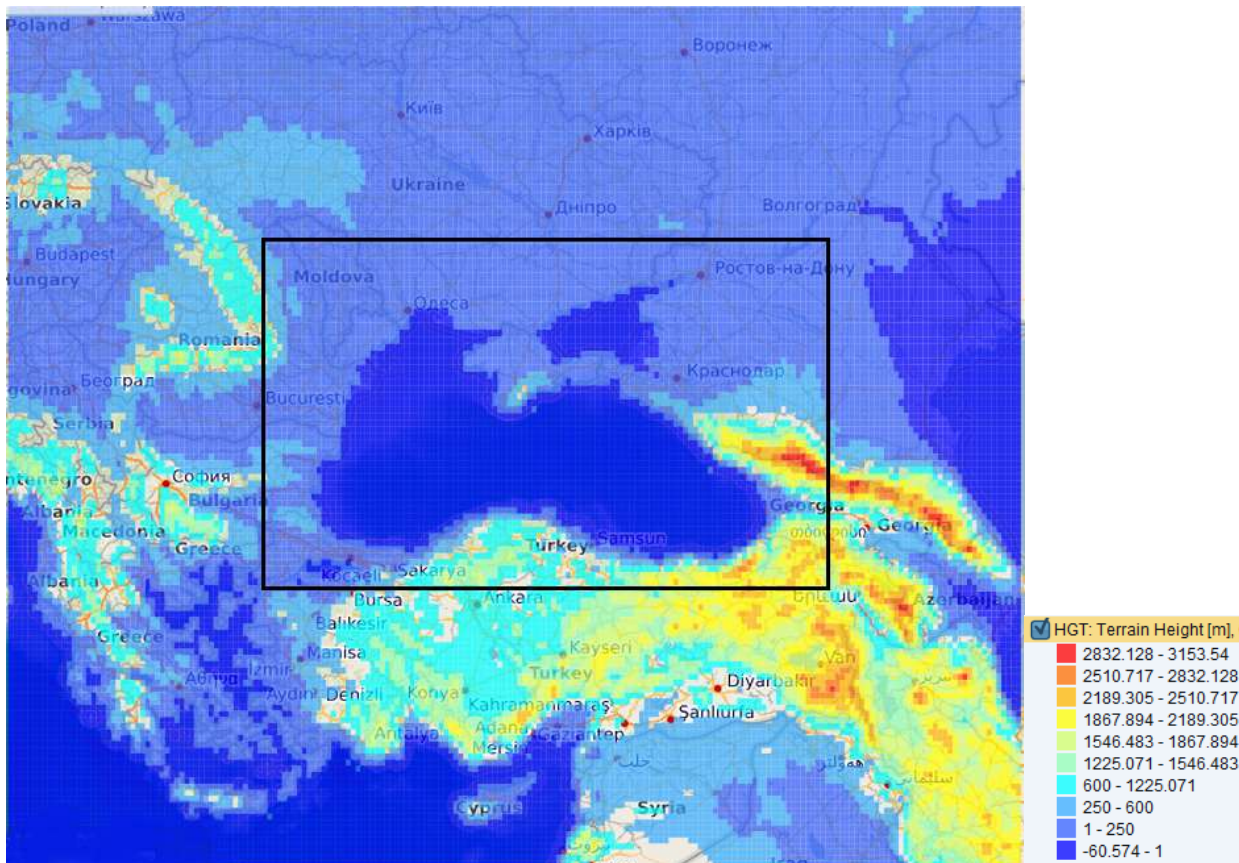


Рисунок 3 — Конфігурація обчислювальних областей WRF: D01, D02 (внутрішня рамка) та карти висоти поверхні Землі; границі D02 співпадають також із границями D02.1, D03

В усіх перелічених базових конфігураціях обчислювальних сіток кількість вертикальних рівнів була сталою і рівна 29. Але в подальших обчислювальних експериментах були здійснені обчислення, у тому числі зі збільшенням кількості вертикальних рівнів. Використовувались такі базові налаштування фізичних параметризацій моделі WRF (назви параметрів — згідно з документацією [12]):

- Параметризація мікрофізики хмароутворення у вкладених областях D02, D03 бралась із WSM6 [12] (mp_physics=6), в якій розглядається 5 типів вологи у повітрі: пара, дощові краплі, сніг, хмарні краплі, хмарна крига.
- Параметризація мікрофізики хмароутворення у зовнішній області D01 — було взято схему WDM6 [12] (mp_physics=16), яка є двоментною модифікацією схеми WSM6.
- Параметризація купчастої хмарності Кейна-Фрітча у зовнішній області D01 (cu_physics=1), тоді як у вкладеній області D03 параметризація купчастої хмарності не використовується.
- Параметризація довгохвильової радіації RRTM [12] (ra_lw_physics=1).
- Параметризація короткохвильової радіації Годарда (ra_sw_physics=2) [12].
- Параметризація планетарного граничного шару атмосфери Мелора-Ямади-Янжича (bl_pbl_physics=2).
- Параметризація моделі Ета для взаємодії приземного шару атмосфери та верхнього шару ґрунту (sf_sfclay_physics=2).
- Параметризація RUC для діючого шару ґрунту (sf_surface_physics=3) з 6-ма розрахунковими шарами у ґрунті.

Зміни базових налаштувань у процесі аналізу чутливості результатів моделі по відношенню до параметризацій будуть описані у тексті нижче.

Для задання граничних і початкових умов використовувались дані фінального аналізу глобальної моделі прогнозу погоди (Global Forecast System — GFS) Національного центру прогнозу навколишнього середовища США (NCEP), наявні на сітці 0.25 град [13].

3.2. Сіткова та спектральна релаксації

У моделі WRF реалізовано функції спектральної та сіткової релаксацій [12], що гарантує мінімальне відхилення великомасштабних характеристик полів, розрахованих WRF від синоптичних полів глобальних моделей (які використовуються для задання граничних і початкових умов). У роботі [14] було показано, що для розрахунків моделі WRF за історичний період використання методів спектральної та сіткової релаксацій дає кращі результати, ніж старий метод із регулярною реініціалізацією розрахунку (наприклад, щодоби), який раніше використовувався для запобігання занадто сильного відхилення розрахованих полів від даних глобальної моделі.

Розглянемо детальніше відповідні методи. У методі сіткової релаксації у процесі розв’язання рівнянь метеорологічної моделі у правій частині рівнянь, що описують перенесення горизонтальних компонентів вітру, температури та вологості, додаються релаксаційні члени, так що еволюційні рівняння моделі виглядають так:

$$\frac{f_{ijk}^{n+1} - f_{ijk}^n}{\tau} + A f_{ijk}^{n+1} + B f_{ijk}^n = F(n\tau) - w_f (f_{ijk}^{n+1} - f_{a,ijk}(n\tau)), \quad (1)$$

де i, j, k — номер вузла розрахункової сітки;

n — часовий рівень;

τ — крок за часом;

$f = \{u, v, T, \Phi\}$ — один із метеоелементів (компоненти швидкості, температура, геопотенціал) матриці A ;

B — оператори адвекції, дифузії та ін., що входять до рівнянь моделі;

функція F — права частина.

Останній член у рівнянні — релаксаційний. Він складається з вагового коефіцієнта w_f і різниці значень сіткового поля глобальної моделі, інтерпольованого у даний вузол сітки, та розрахованого поля у даному вузлі. Релаксаційний член прагне наблизити значення величини f у цьому вузлі до відповідного значення поля об’єктивного аналізу.

У методі спектральної релаксації притягування відбувається у Фур’є-просторі [15]:

$$\frac{\mathbf{f}^{n+1} - \mathbf{f}^n}{\tau} + \mathbf{A} \mathbf{f}^{n+1} + \mathbf{B} \mathbf{f}^n = \mathbf{F}(n\tau) + \sum_{|l| \leq N} \sum_{|m| \leq M} w_{ml} (\hat{f}_{ml} - \hat{f}_{a,ml}) e^{ik_m x} e^{ik_l y}. \quad (2)$$

Тут $\mathbf{f} = (f_{ijk})$;

$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{F}$ — оператори і права частина рівнянь моделі;

$\hat{f}_{ml}, \hat{f}_{a,ml}$ — спектральні коефіцієнти m -ї та l -ї компонент дискретного перетворення Фур’є розрахункового поля мезомасштабної моделі й поля глобальної моделі, інтерпольованого на сітку моделі;

w_{ml} — коефіцієнти релаксації для відповідних спектральних компонент.

Перевагою методу (2) у порівнянні з методом (1) є можливість обрати масштаби Фур’є компонент сіткового поля, які підлягають релаксації. Ця перевага є суттєвою, оскільки корисну інформацію в полях глобальної моделі, інтерпольованих на дрібнішу сітку WRF, містять лише великомасштабні компоненти сіткового поля, які відповідають просторовому дозволу глобальної моделі. Тому у даній роботі використовувався метод сіткової

релаксації (2), якому відповідає опція WRF grid_fdda=2. Детальніше параметри спектральної релаксації, які використовувались у розрахунках, описані у наступному розділі.

4. Результати розрахунків

4.1. Результати розрахунків в області D01

У даному розділі роботи були обрані такі основні параметри спектральної релаксації:

- Релаксація тільки у зовнішній обчислювальній області D01.
- Максимальні номери гармонік, для яких здійснювалось притягування, $xwavenum=3$, $uwavenum=3$.
- Значення коефіцієнта притягування однакові для усіх метеоелементів і рівні 0,0003 1/с.

Було проведено два варіанти розрахунків:

а) релаксація здійснювалась тільки у висотних шарах атмосфери і не здійснювалась у межах планетарного граничного шару (ПГШ);

б) релаксація здійснювалась як у висотних шарах, так і у ПГШ.

У табл. 1 представлені статистичні характеристики похибки розрахунків із релаксацією. Як видно з даних, представлених у таблиці, релаксація у ПГШ покращує всі показники похибки, тому в наступних розрахунках використовувалась релаксація у ПГШ.

Таблиця 1 — Статистичні характеристики похибок вітру на сітці D01 (0,15 град) у розрахунках з сітковою релаксацією

Змінна (один. вимір.)	MAE	ME	Corr
Релаксація за межами ПГШ			
T2(°C)	1,69	-1,09	0,92
Ws (м/с)	2,73	1,59	0,64
Wd (град)	35,47	-10,03	-
Ps (Па)	96,45	-26,97	0,99
З релаксацією у ПГШ			
T2(°C)	1,42	-0,46	0,91
Ws (м/с)	2,63	1,33	0,64
Wd (град)	34,72	-9,22	-
Ps (Па)	88,27	-7,59	0,99

4.2. Вплив конфігурації та просторового дозволу сітки на результати моделювання

Для дослідження впливу просторового дозволу сітки на результати моделювання спочатку було виконано серію розрахунків на сітці з роздільною здатністю 0,05 град, утричі меншою у порівнянні з сіткою області D01, розглянутої вище. Порівнювались два варіанти розрахунків: 1) розрахунок у вкладеній області (D02), в якому використовувались такі саме параметри релаксації, як у попередньому розділі; 2) розрахунок в окремій (не вкладеній) області з просторовим дозволом 0,05 град (D02.1, згідно з інформацією у розділі 3). В останньому випадку максимальний номер гармоніки, для якого проводиться релаксація, збільшено у 2 рази ($xwavenum=uwavenum=6$) внаслідок зменшення горизонтального дозволу сітки.

У табл. 2 наведено статистичні характеристики похибки, отримані на сітці з дозволом 0,05 град як при розрахунках у вкладеній області (D02), так і при розрахунках у конфігурації без вкладення (D02.1). Як видно з представлених результатів, усі середні абсолютні похибки (MAE) зменшуються при розрахунку на більш детальній сітці у порівнянні з більш грубою сіткою (табл. 1).

Як видно з даних у табл. 2, відбувається покращення результату розрахунків на окремій сітці (D02.1) у порівнянні з аналогічним результатом, отриманим при розрахунку на вкладеній сітці (D02). При розрахунку на сітці D02.1 абсолютна похибка поля тиску зменшується на 8,4 % у порівнянні з найкращим показником, отриманим на сітці D01. Абсолютна похибка напрямку вітру зменшується на 5,3 %, похибка швидкості вітру зменшується на 6 %, похибка приземної температури зменшується на 16 %.

Покращення статистичних характеристик похибки на сітці без вкладення потребує в майбутньому додаткової перевірки, оскільки історично вважається, що вкладення сіток із високою роздільною здатністю сприяє більш швидкому затуханню збурень, викликаних горизонтальною інтерполяцією великомасштабних метеорологічних полів і, отже, мало б сприяти зменшенню похибки. Але, оскільки наразі були отримані найкращі результати на сітці без вкладення, подальше зменшення горизонтальної здатності здійснювалось також у не вкладених обчислювальних областях.

Таблиця 2 — Статистичні характеристики похибок вітру на сітках D02, D02.1 (0,05 град) у розрахунках

Змінна (один. вимір.)	MAE	ME	Corr
3 релаксацією у ПГШ, D02, $xwavenum=ywavenum=3$			
T2(°C)	1,18	-0,1	0,94
Ws (м/с)	2,54	0,94	0,63
Wd (град)	33,92	-6,7	-
Ps (Па)	87,3	-18,0	0,99
3 релаксацією у ПГШ, D02.1, $xwavenum=ywavenum=6$			
T2(°C)	1,19	-0,17	0,93
Ws (м/с)	2,47	0,87	0,63
Wd (град)	32,87	-7,29	-
Ps (Па)	80,8	4,92	0,99

У табл. 3 представлені статистичні характеристики похибки, отримані на сітці D03 (роздільна здатність 0,025 град). Усі розрахунки на цій сітці проводились із сітковою релаксацією, при цьому максимальний номер гармоніки, для якого здійснюється релаксація, був надалі збільшений до $xwavenum=ywavenum=10$.

Також були проведені розрахунки зі збільшенням вертикальної розділової здатності сітки у понад 4 рази (кількість вертикальних шарів $Evert=29$ та $Evert=121$ відповідно). Як видно з представлених результатів, у порівнянні з сіткою D02.1 в найкращому випадку показники похибки покращились на 2 % (приземний тиск), 4 % (швидкість вітру), 3% (напрям вітру), 1,7 % (температура).

Таблиця 3 — Статистичні характеристики похибок вітру на сітці D03 (0,025 град) у розрахунках із сітковою релаксацією

Змінна (один. вимір.)	MAE	ME	Corr
$xwavenum=ywavenum=10$, $Evert=29$			
T2(°C)	1,18	-0,09	0,94
Ws (м/с)	2,4	0,76	0,62
Wd (град)	32,15	-8,03	-
Ps (Па)	79,39	2,04	0,99
$Evert=61$			

Продовж. табл. 3

T2(°C)	1,18	-0,08	0,94
Ws (м/с)	2,39	0,77	0,63
Wd (град)	31,96	-8,1	-
Ps (Па)	79,28	0,72	0,99
Evert=121			
T2(°C)	1,17	-0,06	0,94
Ws (м/с)	2,37	0,76	0,63
Wd (град)	31,79	-8,49	-
Ps (Па)	79,19	0,72	0,99

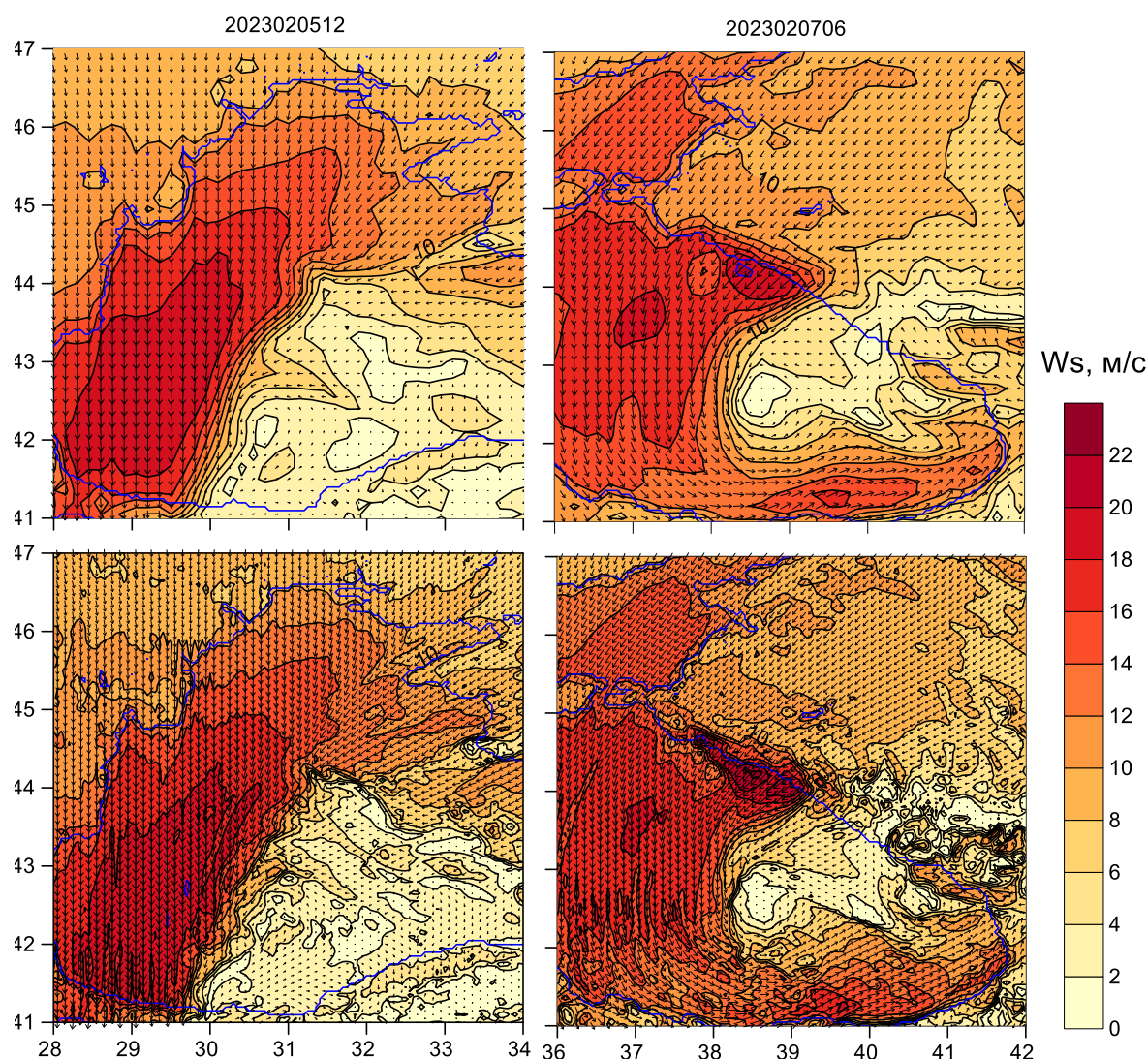


Рисунок 4 — Поле приземного вітру (м/с) за даними моделі WRF на сітці з просторовим дозволом 0,15 град (зверху) і 0,05 град (знизу) у часи максимального підсилення вітру, 05.02.2023:12 год (західна частина Чорного моря, ліворуч) і 07.02.2023:06 год (східна частина Чорного моря, праворуч). На осях — широта та довгота

Отже, подальше використання просторового дозволу сітки менше ніж 0,05 град практично не призводить до подальшого зменшення похибки моделювання. Причин подібної слабкої чутливості моделі до просторового дозволу сітки може бути декілька:

– параметризація і спрощення рівнянь гідротермодинаміки, які обмежують точність моделі навіть при безмежно малих кроках сітки;

- генерація збурень, викликаних інтерполяцією на дрібну сітку і створенням відповідних дисбалансів у рівняннях, причому на дрібній сітці ці збурення можуть існувати довше, ніж на грубій сітці;
- обмеження точності вхідних даних (категорії землекористування тощо).

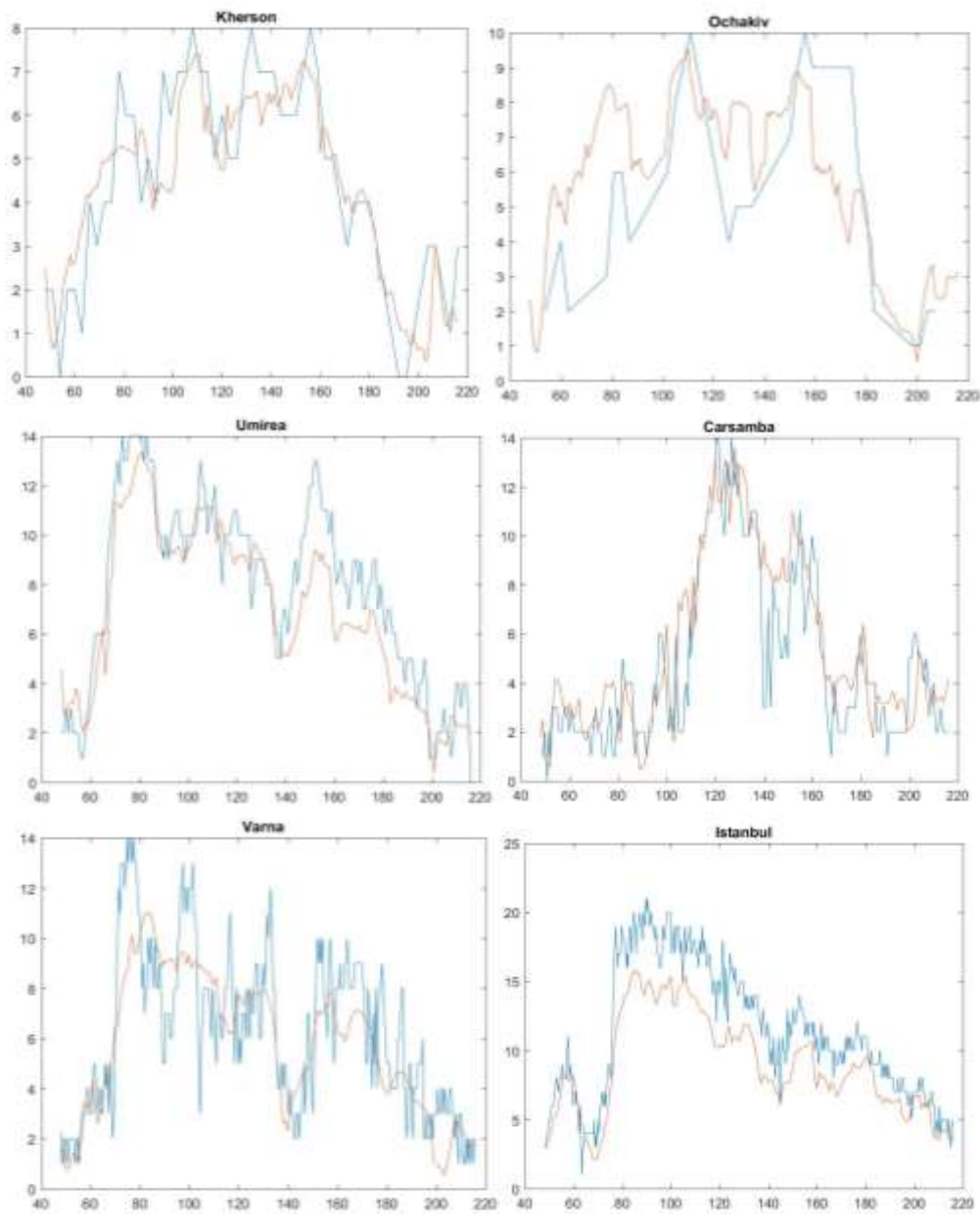


Рисунок 5 — Порівняння розрахованої швидкості вітру (м/с) і вимірів у місцях розташування обраних метеостанцій; на осі x — години від 2.03.2023:00 год UTC

Як показують розрахунки, ступінь впливу просторового дозволу на результати моделювання полів вітру не однакова у різні моменти часу та у різних частинах обчислювальної області. Так, на рис. 4 представлено поле приземного вітру за даними моделі WRF на сітці з просторовим дозволом 0,15 град і 0,05 град за 5 і 7 лютого 2023 р., коли максимуми швидкості вітру спостерігались відповідно у західній і східних частинах Чорного моря. Як видно з представлених на рисунку результатів, просторовий дозвіл сітки мало впливає на розподіли швидкості вітру 5 лютого, коли максимальні швидкості спостерігались у західній частині Чорного моря. Тоді як розрахований розподіл приземної швидкості вітру

7 лютого, коли максимальні швидкості спостерігались у східній частині Чорного моря, суттєво змінюється при зменшенні просторового дозволу сітки. Зокрема, збільшуються максимуми швидкості вітру у північно-східній і південно-східних частинах Чорного моря. Така різниця найімовірніше пов'язана з більш складною топографією місцевості у східній частині узбережжя Чорного моря (рис. 1), тому результати розрахунку метеорологічних полів у цій частині області стають більш чутливими до просторового дозволу сітки.

На рис. 5 представлені приклади порівняння розрахованої швидкості вітру з вимірами окремих метеостанцій. Модель вдало відтворює динаміку швидкості вітру на станціях північно-західного, західного і південного узбережжя. Щоправда, на станції Варна виміри вітру характеризуються суттєво більшою амплітудою коливань, ніж у результатах моделювання. На станції Стамбул (південно-західне узбережжя) модель занижує швидкість вітру, особливо у період максимального його підсилення. Загалом графіки, як і статистичні показники похибок, наведені у табл. 1–3, свідчать про задовільне узгодження результатів моделювання з вимірами.

5. Висновки

У роботі виконані налаштування та випробовування метеорологічної моделі WRF для прогнозування метеорологічних умов, які супроводжують шторми на Чорному морі. Вперше проведено моделювання метеорологічних умов над поверхнею Чорного та Азовського морів для максимально потужного шторму 4–11 лютого 2023 р. на сітках розділової здатності 0,15, 0,05 та 0,025 град. Отримано результати порівняння розрахованих метеорологічних полів, а саме приземного тиску, температури, швидкості та напрямку вітру з даними наземних метеостанцій на узбережжі Чорного моря.

Досліджено вплив параметрів спектральної релаксації на результати моделювання. Показано, що застосування релаксації у межах планетарного граничного шару (ПГШ) покращує результати розрахунків у порівнянні з релаксацією за межами ПГШ. Також з'ясовано, що при зменшенні горизонтального кроку сітки необхідно збільшувати максимальне хвильове число (параметри `xwavenum`, `ywavenum` у моделі WRF) для зменшення похибки розрахунків.

Результати стосовно впливу роздільної здатності на результати моделювання показують таке:

- у дослідженому сценарії конфігурація обчислювальних областей із вкладенням (телескопізація) не має переваг у порівнянні з випадком, коли розрахунки на детальних сітках здійснюються в єдиній (не вкладеній) обчислювальній області;
- при зменшенні кроку сітки утричі — від 0,15 град до 0,05 град — абсолютна похибка усіх метеопараметрів зменшується на 8,4 % (тиск), 5,3 % (напрямок вітру), 6 % (швидкість вітру), 16 % (температура);
- подальше зменшення роздільної здатності від 0,05 град до 0,025 град приводить лише до незначного зменшення похибок;
- найкращі значення середніх абсолютних похибок метеопараметрів для розглянутого сценарію були отримані на сітці з просторовим дозволом 0,025 град і склали 1,17 С (температура), 2,37 м/с (швидкість вітру), 31,79 град (напрямок вітру), 79,19 Па (приземний тиск).

У роботі також показано, що ступінь впливу просторового дозволу на результати моделювання полів вітру не однакова у різні моменти часу та у різних частинах обчислювальної області. Так, результати розрахунку просторового розподілу швидкості приземного вітру 5 лютого у західній частині Чорного моря, де спостерігався максимум швидкості вітру на цю дату, практично не залежали від дозволу сітки. Тоді як розрахований розподіл приземної швидкості вітру 7 лютого у східній частині Чорного моря (де спостерігався максимум швидкості вітру на цю дату) суттєво змінювався при зменшенні просторового до-

зволу сітки. Це, найімовірніше, пов'язане з більш складною топографією місцевості у східній частині узбережжя Чорного моря.

У підсумку налаштована модель WRF може бути в подальшому використана для оперативного прогнозування метеорологічних умов, які супроводжують сильні шторми у Чорному морі, у тому числі у взаємодії з моделями океанографічних умов.

ПОДЯКИ

Дана робота була підтримана Міністерством освіти і науки України, НДР «Діагноз та прогноз океанографічних умов в акваторіях Чорного та Азовського морів для забезпечення гідрометеорологічної безпеки України», номер держреєстрації 0124U000771.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Ковалець І.В., Халченков О.В., Полонський О.О. Використання системи WRF-Україна для прогнозування агрометеорологічних умов. *Математичні машини і системи*. 2019. № 1. С. 36–48.
2. Shpyg V.M., Shcheglov O.A. Influence of land use categories on WRF forecast and its accuracy. *Hydrology, Hydrochemistry and Hydroecology*. 2022. N 3 (65). P. 68–78.
3. Ковалець І.В., Халченков О.В., Ануліч С.М., Удовенко О.І. Оперативне прогнозування метеорологічних полів для систем попередження про паводки у Карпатах. *Математичні машини і системи*. 2015. № 3. С. 118–125.
4. Вчені Академії взяли участь у презентації системи «РОДОС-Україна». Повідомлення Прес-служби НАН України від 04.07.2016. URL: <https://www.old.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=2407>.
5. Andronopoulos S., Ievdin I., Kovalets I., Anulich S., Trybushnyi D. New functionalities developed in the NERIS-TP project regarding meteorological data used by Decision Support Systems. Radioprotection 51 HS1 (2016) S13-S16. DOI: <https://doi.org/10.1051/radiopro/2016004>.
6. Осадчий В.І., Фомін В.В., Льїн Ю.П., Будах І.В., Шпиг В.М. Оперативна система прогнозу морського хвилювання у прибережній смузі Азовського та Чорного морів / В.І. Осадчий, В.В. Гребін, Ю.П. Льїн та ін. (ред.). *Проблеми гідрології, гідрохімії, гідроекології*. Київ: Ніка-Центр, 2019. С. 116–122.
7. Тучковенко Ю.С., Гаврилюк Р.В., Кушнір Д.В. Прогнозування океанографічних характеристик в українській частині Азово-Чорноморського басейну. Одеса: Одеський державний екологічний університет, 2021. 122 с.
8. Brovchenko I., Maderich V., Choi B.H., Kim K.O., Martazinova V. Modelling of short-term variations of currents, temperature, salinity and sea level in the Strait of Dardanelles. *Ocean Engineering*. 2022. Vol. 245. P. 110567. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.110567>.
9. Тучковенко Ю.С., Кушнір Д.В., Гончаренко Р.В., Титюк Т.Г., Щипцов О.А. Автоматизований модельний комплекс для забезпечення діяльності Військово-Морських Сил України оперативними прогнозами океанографічних умов. *Інформатизація Збройних сил*. 2020. № 3 (70). С. 75–83.
10. Росіяни вивели всі ракетносії з Чорного моря через шторм — ОК «Південь». *Українська правда*. 07.02.2023. URL: <https://www.pravda.com.ua/news/2023/02/7/7388233>.
11. WeatherData, Wolfram Language function. URL: <https://reference.wolfram.com/language/ref/WeatherData.html>.
12. User's Guide for the Advanced Research WRF (ARW) Modeling System Version 3.9, Updated. 2017. April 17. URL: https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/user_guide_V3.9/contents.html.
13. NCEP GDAS/FNL 0.25 Degree Global Tropospheric Analyses and Forecast Grids. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. 2015. URL: <https://doi.org/10.5065/D65Q4T4Z>.
14. Халченков О.В., Ковалець І.В. Використання методів релаксації в моделі WRF для аналізу метеорологічних умов в Україні за тривалий період. *Математичні машини і системи*. 2020. № 2. С. 30–42.

15. Miguez-Macho G., Stenchikov G.L., Robock A. Spectral nudging to eliminate the effects of domain position and geometry in regional climate model simulations. *J. Geophys. Res.* 2004. Vol. 109. P. D13104. DOI: <https://doi.org/10.1029/2003JD004495>.

Стаття надійшла до редакції 17.07.2025