

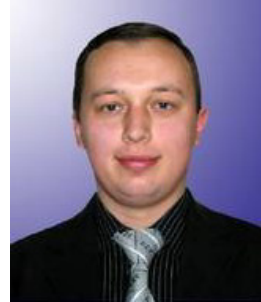
## УДК 621.37



**А.М. Шеремєєв,**  
балакавр,  
Херсонський політехнічний  
коледж Одеського  
національного  
політехнічного університету  
tolan.sheremeev@gmail.com



**О.В. Нарожний,**  
к.т.н., доцент  
Херсонський політехнічний  
коледж Одеського  
національного  
політехнічного університету  
spawns7650@ukr.net



**П.С. Носов,**  
к.т.н., доцент  
Херсонський політехнічний  
коледж Одеського  
національного  
політехнічного університету  
nopas@bk.ru

### АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОГОДНИХ УМОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МЕТЕОСТАНЦІЄЮ

*А.М. Шеремєєв, О.В. Нарожний, П.С. Носов. Аналіз моделей прогнозування погодних умов для автоматизованої системи управління метеостанцією.* Проаналізовано сучасні моделі прогнозу погоди. Розраховано показники середньоквадратичних похибок для кожної моделі та вибрано найоптимальнішу модель для подальшої роботи.

*A.M. Sheremeev, O.V. Narozhnyi, P.S. Nosov Analysis of weather forecasting models for automated management of meteorological stations.* Analysis of current models of weather. Was made calculation of a mean-square error for each model and select the most optimal model for further work.

**Вступ.** На теперішній час запропоновано ряд математичних задач побудови прогнозу погоди і загальної циркуляції атмосферних процесів, чисельних алгоритмів для їх вирішення. Зазначу, що рівняння гідротермодинаміки атмосферних процесів є досить складними, тому існує необхідність розробки більш ефективних алгоритмів, здатних з високою точністю описати широкий спектр завдань динамічної метеорології та прогнозу погоди. Побудова алгоритмів розв'язання таких завдань тісно пов'язана з проблемою апроксимації рівнянь і стійкості отриманих різницевих схем, які взагалі є основними проблемами при конструкції нових чисельних алгоритмів.

З наукової точки зору, передбачення погоди - одна з найскладніших завдань фізики атмосфери. Удосконалення комп'ютерного обладнання дозволяє реалізовувати математичні підходи і методи дослідження атмосфери. Кожен з них дає змогу в тій чи іншій мірі прогнозувати метео явища.

**Матеріал і результати дослідження.** На даний час існує всього декілька поширених математичних моделей, які описують процеси, що відбуваються в атмосфері та визначають прогноз погоди [3].

Для отримання достовірного прогнозу погоди, у міжнародних кліматичних центрах збирається інформація про поточну погоду на планеті. Вона отримується з тисяч метеостанцій, метеопостів, зондів, радіобуїв по всій планеті: наземних, літальних, плаваючих, які покривають планету досить густою сіткою. Для того, щоб модель справила розрахунок прогнозу погоди їй необхідно зібрати якомога більше даних про поточну погоду. Чим густіше на території розміщені метеостанції, тим точніше буде розрахований прогноз погоди. В Україні мережа метеостанцій досить мала. Для порівняння: в Європі максимальна відстань між станціями близько 25км, у нас - 80-100 км [3]. Тому, як би ми не хотіли, а точність прогнозу погоди в Україні не буде високою до тих пір, поки в країні не з'явиться розвинена мережа метеостанцій.

Основу чисельних методів прогнозу погоди займають гідродинамічні моделі атмосфери, складання котрих включає такі етапи:

- визначення і опис фізичних процесів;
- вибір диференціальних рівнянь, які описують дані процеси;
- оптимізація параметрів середовища в напрямку винайдення найбільш значущих факторів впливу на моделювання прогнозу;
- чисельне рішення рівнянь і розрахунок метеорологічних величин для фіксованих точок простору та моментів часу [4].

В рамках даного дослідження було розглянуто та проаналізовано роботу найбільш популярних моделей, таких як: модель прогнозу погоди WRF (WeatherResearchandForecast), мезомасштабна модель п'ятого покоління MM5 (MesoscaleModel 5) та мезомасштабна модель ETA.

Розглянемо спочатку модель WRF. Модель для дослідження й прогнозу погоди WRF (WeatherResearchandForecast, Дослідження і прогноз погоди) розроблена в Національному центрі атмосферних досліджень США. WRF може використовуватись при вирішенні широкого кола завдань у масштабах від сотень метрів до тисяч кілометрів, включаючи ідеалізовані течії (наприклад, LES, конвекція); для дослідження можливості застосування різних схем параметризації; для порівняння з даними спостережень; при чисельному прогнозі погоди в реальному часі. Крім того, WRF-модель може використовуватися як динамічне ядро в комп'ютерних моделюючих системах, призначених для дослідження переносу домішки і аналізу якості атмосферного повітря над урбанізованими територіями [5].

WRF-модель містить еластичні негідростатичні рівняння, враховує неоднорідність поверхні. У моделі реалізована технологія організації розрахунків у вкладених областях з одностороннім або двостороннім впливом. Використовується залежна від поверхні система координат, потім згущують до поверхні Землі сітки, консервативні різницеві схеми 2-го і 3-го порядків апроксимації для нестационарних членів і 2-6 порядку - для адвективних. Є паралельна версія для багатопроцесорних систем. Показано, що ця модель має більш високу продуктивність, ніж MM5 модель [5].

Основні прогностичні рівняння WRF-моделі в  $(x, y, z)$ - координатній системі мають вигляд:

$$\frac{d\rho'}{dt} + \nabla \square V = 0, \quad (1)$$

$$\frac{dU}{dt} + \nabla \square (vU) + \frac{dp'}{dx} = F_U, \quad (2)$$

$$\frac{dU}{dt} + \nabla \square (vV) + \frac{dp'}{dy} = F_V, \quad (3)$$

$$\frac{dW}{dt} + \nabla \square (vW) + \frac{dp'}{dz} + g\rho' = F_W, \quad (4)$$

$$\frac{d\Theta}{dt} + \nabla \square (v\Theta) = F_\Theta, \quad (5)$$

де  $u, v, w$  - компоненти вектора швидкості вітру;  $\rho, p, \theta$  - щільність, тиск та потенційна температура повітря, відповідно,  $g$  - прискорення сили тяжіння,  $U = \rho u$ ,  $V = \rho v$ ,  $W = \rho w$ ,  $V = (U, V, W) = \rho(u, v, w) = \rho v$ ;  $F_U, F_V, F_W, F_\Theta$  - джерельні члени в рівняннях (2) – (5).

Тиск визначається з діагностичного рівняння стану:

$$p = p_0 \left( \frac{R\Theta}{P_0} \right)^{\gamma}$$

Збурення основних термодинамічних змінних являють собою відхилення від інваріантного за часом гідростатичного стану:  $p = p_0(z) + p'$ ,  $\rho = \rho_0(z) + \rho'$ , і  $\Theta = \rho_0(z)\theta_0(z) + \Theta'$ ,

Модель WRF пропонує велику кількість схем параметризації, які можна поєднувати в будь-якому вигляді. У цій моделі розглядаються різні схеми представлення процесів сіткового масштабу від простих ефективних схем до складних, що вимагають трудомістких обчислень; від нових, що розвиваються до добре випробуваних, котрі використовуються в сучасних робочих моделях. Для моделювання мікрофізики вологи пропонується вісім схем параметризації, що відрізняються сферою застосування та деталізацією представлення фазових станів атмосферної вологи. Для опису потоків довгохвильової радіації використовуються дві схеми, короткохвильової - три схеми. Температура і вологість підстилаючої поверхні можуть розраховуватися на основі однієї з трьох багат шарових моделей тепло-і вологообміну в ґрунті. Для представлення параметрів планетарного прикордонного шару пропонуються три схеми параметризації. Така ж кількість схем реалізовано в WRF-моделі для параметризації конвективних процесів [5].

Наступною розглянемо модель прогнозу погоди MM5. Мезомасштабна модель п'ятого покоління MM5 - розроблена в Національному центрі атмосферних досліджень в кооперації з університетом штату Пенсільванія. Метеорологічна моделююча система п'ятого покоління MM5

(MesoscaleModel 5) призначена для дослідження локальних і регіональних атмосферних процесів. ММ5 може застосовуватися для вирішення широкого спектру теоретичних проблем атмосферного прикордонного шару, а також при прогнозі метеорологічних ситуацій для обраного регіону. На мезо-бета-і мезо-гамма-масштабах (2-220 км) ММ5 може використовуватися для дослідження атмосферних процесів, зокрема, розвитку мезомасштабних конвективних систем, проходження фронтів, динаміки берегових бризів, гірничо-долинною циркуляції, впливу міського острова тепла. ММ5 в даний час є метеорологічною компонентою інформаційно-прогностичної системи Model-3, призначеної для вирішення задач прогнозування якості атмосферного повітря і його оптичних властивостей [6].

Є негідростатична і гідростатична версії моделі, в яких застосовується слідкуюча за поверхнею координатна система. Негідростатична модель дозволяє варіювати горизонтальним дозволом від сотень метрів до десятків кілометрів. Модель ММ5 включає можливість організації проведення розрахунків у вкладених областях з одностороннім або двостороннім впливом (до 9 послідовно вкладених сіток). Також існують версії моделі для багато процесорної обчислювальної техніки. Передбачена можливість чотиривимірного засвоєння даних спостережень. В результаті розрахунків ММ5 генерує метеорологічні поля (горизонтальні й вертикальні компоненти вектора швидкості вітру, тиск, температуру, вологість повітря, характеристики хмарності та опадів, потоки тепла, вологи й кількості руху, потоків короткохвильової й довгохвильової радіації й т.п.). Система рівнянь моделі в  $x, y, \sigma$ - координатній системі включає рівняння для тиску  $p'$ , рівняння руху для компонентів швидкості  $u, v, w$ , рівняння припливу тепла [6]:

$$\frac{dp'}{dt} - \rho_0 g w + \gamma p \nabla \cdot v = -v \cdot \nabla p' + \frac{\gamma p}{T} \left( \frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta \right),$$

$$\frac{du}{dt} + \frac{m}{p} \left( \frac{dp'}{dx} - \frac{\sigma}{p^\square} \frac{dp'}{dy} \frac{dp'}{d\sigma} \right) = -v \cdot \nabla u + v \left( f + u \frac{dm}{dy} - v \frac{dm}{dx} \right) - e w \cos \alpha - \frac{uw}{r_{earth}} + D_u,$$

$$\frac{dv}{dt} + \frac{m}{p} \left( \frac{dp'}{dy} - \frac{\sigma}{p^\square} \frac{dp'}{dy} \frac{dp'}{d\sigma} \right) = -v \cdot \nabla v - u \left( f + u \frac{dm}{dy} - v \frac{dm}{dx} \right) + e w \sin \alpha - \frac{vw}{r_{earth}} + D_v,$$

$$\frac{dw}{dt} - \frac{\rho_0}{\rho} \frac{g}{p^\square} \frac{dp'}{d\sigma} + \frac{g p'}{\gamma p} = -v \cdot \nabla w + g \frac{p_0}{p} \frac{T}{T_0} - \frac{g R_d}{c_p} \frac{p'}{p} + e (u \cos \alpha - v \sin \alpha) + \frac{u^2 + v^2}{r_{earth}} + D_w,$$

$$\frac{dT}{dt} = -v \cdot \nabla T + \frac{1}{\rho c_p} \left( \frac{dp'}{dt} + v \cdot \nabla p' - \rho_0 g w \right) + \frac{\dot{Q}}{c_p} + \frac{T_0}{\theta_0} D_\theta.$$

Тут  $v = (u, v, w)$  - вектор швидкості вітру;  $\rho, p, T, \theta$  - щільність, тиск, абсолютна температура і потенційна температура повітря (з індексом «0» базові значення для «стандартної» атмосфери);  $p' = p - p_0$ ;  $\sigma = (p - p_r) / (p_s - p_r)$ ;  $p^\square = p_s - p_r$ ;  $p_s, p_r$  - тиск на поверхні і на

верхній межі області;  $g$  - прискорення сили тяжіння;  $\gamma$  - показник адіабати;  $c_p$  - теплоємність повітря при постійному тиску;  $R_d$  - газова постійна для сухо-го повітря;  $\dot{Q}$  - приплив тепла;  $m$  - масштабний коефіцієнт, що враховує неоднорідність рельєфу підстилаючої поверхні;  $e = 2\Omega \cos \lambda$ ,  $\lambda$  - широта;  $\Omega$  - кутова швидкість обертання Землі;  $f$  - параметр Коріоліса;  $\alpha = \varphi - \varphi_c$ ;  $\varphi, \varphi_c$  - поточна і центральна довгота в області дослідження;  $D_u, D_v, D_w, D_\theta$  - джерельні члени у відповідних рівняннях.

Також в моделі використовуються прогностичні рівняння для водяної пари й змінних параметризації мікрофізики, таких як хмарність та опади. Ці рівняння включають в себе адвективно-дифузійні й джерельні члени.

Система MM5 має велику кількість схем параметризації підсіткових фізичних процесів, котрі можуть обиратися користувачем виходячи з вимог поставленого завдання й просторового масштабу модельованих процесів. Для конвективних процесів передбачено вісім схем параметризації. Якщо горизонтальний масштаб менше 5 км, то хмарні процеси моделюються явно.

Для представлення процесів, що протікають в прикордонному шарі, розглядали шість схем параметризації, застосованість яких визначається кількістю вертикальних шарів, використовуваних при моделюванні. Розрахунок температури та вологості ґрунту здійснюється на основі однієї з чотирьох пропонованих схем параметризації. Для моделювання переносу випромінювання в атмосфері є п'ять схем параметризації. Мікрофізика вологи представляється вісьмома схемами, що мають різну ступінь деталізації й область застосування [6].

Проаналізувавши роботу моделі ETA (регіональна мезомасштабна модель з розширеними даними про рельєф і поліпшеною параметризацією поверхні та процесу прогнозу) було визначено, що ця модель атмосфери для дослідницьких і операційних цілей. Вона являється нащадком раніше відомої моделі HIBU (Hydrometeorological Institute and Belgrade University, Гідрометеорологічний інститут і Белградський університет) [1], розроблена в сімдесятих роках у колишній Югославії. У 2005 році була перейменована в NAM (North America Mesoscale, Північно-Американська Мезошкала) [2].

Назва моделі походить від грецької літери  $\eta$  (ETA) [1], якою позначає вертикальна координата. Однією з особливостей моделі є:

$$\eta = \left[ \frac{(p - p_t)}{p_s - p_t} \right] * \left[ \frac{p_{ref}(z_s) - p_t}{p_{ref}(0) - p_t} \right]_t$$

де  $p$  - атмосферний тиск. Індокси  $s$  і  $t$  відносяться до поверхні та верхньої частини моделі атмосфери, відповідно. Індекс  $ref$  відноситься до заданої ділянки атмосфери,  $z$  - висота поверхні.

Вертикальна координата (ETA) визначається за формулою:

$$\eta = \frac{p - p_T}{p_s - p_T} \eta_s; \quad \eta_s = \frac{p_{ref}(z_s) - p_T}{p_{ref}(0) - p_T}; \quad (11)$$

Горизонтальне рівняння руху в системі  $\eta$  виражається:

$$\frac{d\mathbf{v}}{dt} = -\nabla_{\eta} \Phi - \frac{RT_v}{p} \nabla_{\eta} p - f\mathbf{k} \cdot \mathbf{v} + F \quad (12)$$

Термодинамічне рівняння енергії (перший закон термодинаміки):

$$\frac{dT}{dt} = \frac{w\alpha}{c_p} + Q; \quad w = \frac{dp}{dt}; \quad (13)$$

Формула наслідування маси в системі  $\eta$ :

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left( \frac{\partial p}{\partial t} \right) + \nabla_{\eta} \cdot \left( \mathbf{v} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) + \frac{\partial}{\partial \eta} \left( \dot{\eta} \frac{\partial p}{\partial \eta} \right) = 0; \quad (14)$$

Треба відзначити, що всі моделі містять досить досконалу підсистему обліку різноманітних притоків тепла й неадиабатичних факторів, що дозволяє досить успішно давати прогноз таких складних метеоелементів, як приземна температура повітря й опади [7].

Таблиця 1. Розрахунок середньоквадратичних помилок прогнозів приземної температури (С), абсолютної величини швидкості вітру (м/с), інтенсивності опадів (мм/год) для різних термінів прогнозу

	Сумарна дисперсія		
	WRF	MM5	ETA
	Прогноз від 2 Листопада 2012 г. 00 ч.		
Швидкість вітру	2,204	2,233	2,22
Температура	2,582	2,884	2,797
Інтенсивність опадів	0,032	0,036	0,048
	Прогноз від 2 Грудня 2012 г. 00 ч.		
Швидкість вітру	3,125	3,273	3,178
Температура	1,789	1,797	1,802
Інтенсивність опадів	0,342	0,345	0,356
	Прогноз від 3 Січня 2013 г. 00ч.		
Швидкість вітру	2,574	2,603	2,765
Температура	2,378	2,493	2,608
Інтенсивність опадів	0,579	0,644	0,722

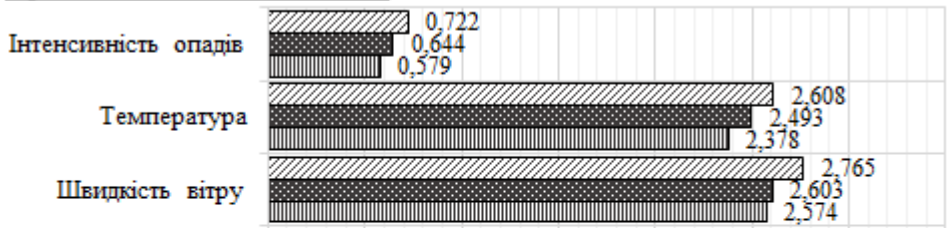
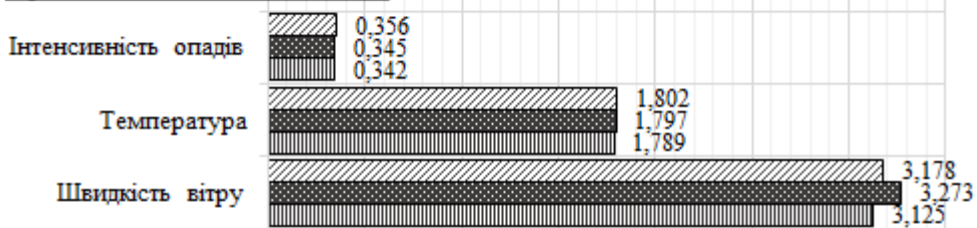
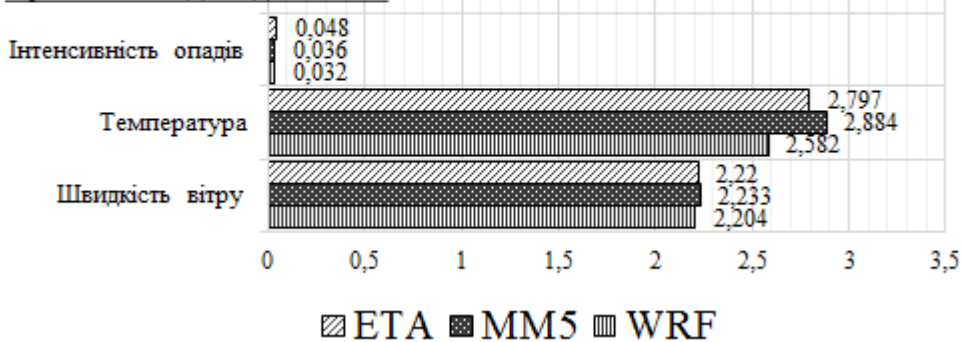
Прогноз погоди від 03.01.13Прогноз погоди від 02.12.12Прогноз погоди від 02.11.12

Рис 1. – Діаграма середньоквадратичних помилок прогнозів

Особливістю таких метеорологічних моделей є точність прогнозування, котра залежить від багатьох факторів. Серед них найважливішими є:

- різноманітність фізичних процесів, які описуються рівняннями моделі, відповідні фізичні параметризації;
- точність і детальність вхідних даних;
- можливість засвоєння (асиміляції) даних вимірювань у розрахунках моделі.

У рамках даного дослідження було виконано розрахунки прогнозів погоди із датами початку досліджень: 2 листопада 2012 р., 00 г., 2 грудня 2012 р., 00 г., 3 січня 2013 р.; прогнозування відбувалось протягом 48 г. Результати розрахунків середньоквадратичних помилок для розглянутих моделей та різних метеорологічних елементів і періодів наведено в таблиці 1.

Аналіз даних параметрів метеомоделей та діаграма наведена на рис 1. показує, що параметри показників приземної температури (С), абсолютної величини швидкості вітру (м/с) та інтенсивності опадів (мм/год)

для різних термінів прогнозу в моделі WRF мають найменший показник середньоквадратичних помилок прогнозу.

**Висновки.** На основі отриманих аналітичних даних, можна визначити, що для подальшої роботи потрібно використовувати модель WRF. Такий підхід надасть перевагу для швидкого розрахунку параметрів прогнозу погоди з використанням автоматизованої системи управління метеорологічною станцією.

### Література

1. EtaModel. [Електронний ресурс] // URL:<http://etamodel.cptec.inpe.br/index.shtml>
2. Модели погоды используемые на WindGURU. [Електронний ресурс] // URL:[http://www.windguru.cz/ru/help\\_index.php?sec=models](http://www.windguru.cz/ru/help_index.php?sec=models)
3. Метеопост. О прогнозах погоды. [Електронний ресурс] // URL:<http://meteorpost.com/info/Forecasting>
4. Белов П.Н., Борисенков Е.П., Панин Б.Д. Численные методы прогноза погоды – Ленинград: «Гидрометеоздат», 1989. – 376 с. [Електронний ресурс] // URL:[http://lib.oceanographers.ru/?option=com\\_booklibrary&task=view&id=145&Itemid=33](http://lib.oceanographers.ru/?option=com_booklibrary&task=view&id=145&Itemid=33) (дата: 26.03.2013).
5. Модель для исследования и прогноза погоды WRF [Електронний ресурс] // URL:[http://www.math.tsu.ru/EEResources/IWS/text/1\\_2.html](http://www.math.tsu.ru/EEResources/IWS/text/1_2.html)
6. Мезомасштабная модель пятого поколения MM5 [Електронний ресурс] // URL:[http://www.math.tsu.ru/EEResources/IWS/text/1\\_1.html](http://www.math.tsu.ru/EEResources/IWS/text/1_1.html)
7. А.М. Гузий, И.В. Ковалец, А.А. Кушан, М.И. Железняк «Система численного прогноза погоды WRF-Украина» [Електронний ресурс] // URL:[http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/mms/2008\\_4/04\\_2008\\_Guziy.pdf](http://www.nbu.gov.ua/portal/natural/mms/2008_4/04_2008_Guziy.pdf)