

УДК 004.9:504:519.6

**ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ПАРАЛЕЛЬНИХ ОБЧИСЛЕНЬ  
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОГОДИ  
MM5- ТА ВРФ-УКРАЇНА**

О.М. Гузій, І.В. Ковалець, А.А. Кушан, М.Й. Железняк  
Інститут проблем математичних машин і систем НАН України  
e-mail: guziy@env.com.ua

**Вступ**

В сучасних методах чисельного прогнозу погоди (ЧПП) розв'язуються тривимірні рівняння гідротермодинаміки атмосфери. В роботах [1]-[2] були розроблені пілотні версії оперативної системи чисельного прогнозування погоди для території України з використанням моделей MM5 [3] та WRF [4]. Метеорологічні прогнози цих систем використовувались в системах підтримки прийняття рішень з ядерного аварійного реагування, реагування на повені у Закарпатті, [6], реагування на нафтові розливи [7] та інших. В дійсний час результати оперативних розрахунків системи MM5-Україна представляються на веб сайті МЕТЕОПРОГ ([www.meteorprog.com.ua](http://www.meteorprog.com.ua)). Слід зазначити, що залежність часу прогнозу від горизонтального кроку сітки кубічна. Тобто, при зменшенні горизонтального кроку сітки втричі час обчислень збільшується в 27 разів. Очевидно, що така залежність значно ускладнює розрахунки на деталізованих сітках, навіть в цілях досліджень, і робить абсолютно неможливими такі розрахунки в оперативному режимі без використання засобів паралельних обчислень. Тому в ІПММС проводилась робота з розпаралелювання оперативних систем MM5 та ВРФ з метою підвищення їх обчислювальної ефективності.

**Конфігурації систем MM5- та ВРФ-Україна**

Оперативні розрахунки системи MM5-Україна здійснюються на -2х процесорному сервері Athlon 4600+, (1 Гб пам'яті). При цьому середній час прогнозу на 7 діб складає 110 хв. Розпаралелена версія системи MM5-Україна в пілотному режимі впроваджена на розроблена обчислювальному кластері СКІТ-3 Інституту кібернетики НАН України [8]. Оскільки чисельні схеми як в MM5, так і в ВРФ є явними по горизонталі, в обох моделях використовувався метод розпаралелювання обчислень по областям, в якому область обчислень розбивається по горизонталі на приблизно рівні обчислювальні підобласті у напрямку північ-південь, захід-схід, або одночасно в обох напрямках.

Для тестування використовувались наступні конфігурації моделі MM5-Україна:

а) базова конфігурація з двома областями з горизонтальними просторовими дозволами 81 та 27 км та кількістю вузлів 37x37x29 та 73x73x29;

б) конфігурація з третьою вкладеною областю, границі якої максимально наближені до границь другої області, з горизонтальним просторовим дозволом 9x9 км, 181x181 вузлів.

Для розпаралелювання використовувалась безкоштовна реалізація MPI OpenMPI версії 1.2.4 (див. <http://www.open-mpi.org>), зібрана за допомогою компілятора Intel Fortran 10.1.015 для 64-бітної ОС Linux на платформі EM64T (x86-64). Цей компілятор також використовувався для компіляції паралельної MM5. Обидва засоби входять по ПЗ кластера СКІТ-3

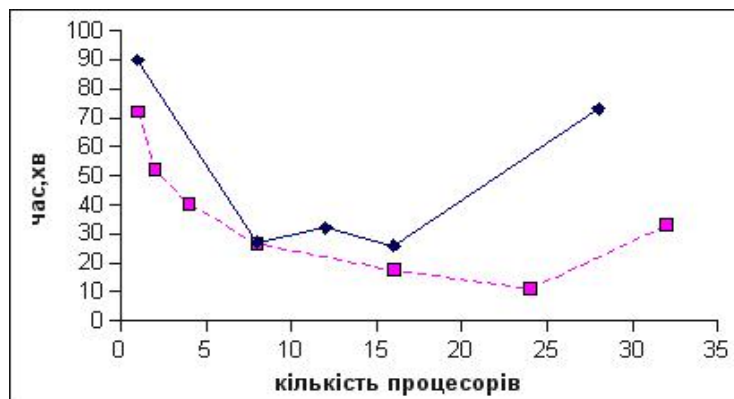
Особливості запуску моделі, тобто кількість обчислювальних підобластей, що визначає кількість необхідних процесорів, обсяг стеку для кожного процесу, реалізація інтерфейсів у режимі MPI і деякі інші деталі визначаються як під час компіляції у файлі `configure.user`, і в `Makefile` різних рівнів, так і під час запуску моделі - в змінних оточення і додаткових параметрах програми, що запускає модель на декількох процесорах.

Для розпаралелювання використовувалась безкоштовна реалізація MPI OpenMPI версії 1.2.4 (див. <http://www.open-mpi.org>), зібрана за допомогою компілятора Intel Fortran 10.1.015 для 64-бітної ОС Linux на платформі EM64T (x86-64). Цей компілятор також використовувався для компіляції паралельної MM5. Обидва засоби входять по ПЗ кластера СКІТ-3.

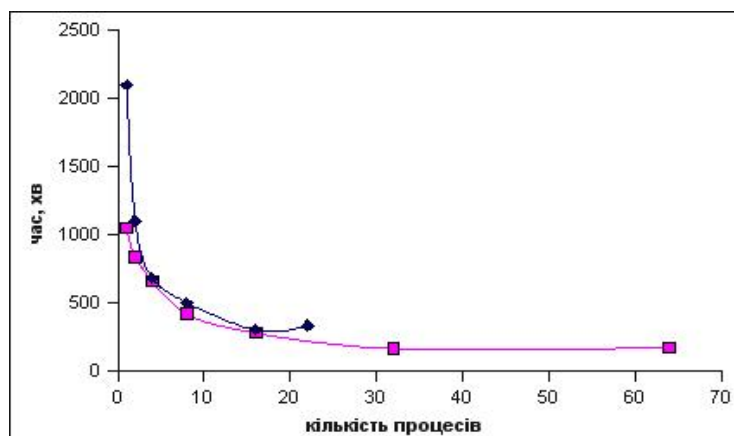
Пілотна версія системи ВРФ-Україна працює на обчислювальному кластері ПММС НАН України. Кластер складається з 4 вузлів, на кожному з яких встановлено два 4 ядерних процесори Intel(R) Xeon(R) CPU E5405, 2.00GHz і 16 Гб оперативної пам'яті. Операційна система Linux Fedora Core 8. Для компіляції використовувались Intel(R) MPI Library 3.2 for Linux, Intel Fortran Compiler 11.0, Intel C++ Compiler 11.0. В системі використовуються конфігурації обчислювальних областей, аналогічні конфігураціям а) і б) в MM5-Україна.

### Результати розрахунків

На Малюнку 1 представлені залежності часу двома розрахунків 168 г. прогнозу для конфігурації а) з двома обчислювальними областями у випадку MM5 та ВРФ-Україна. Як видно з малюнку у випадку MM5 при збільшенні кількості процесорів від 1 до 24 відбувається зменшення часу розрахунків майже 1 8 разів. При подальшому збільшенні кількості процесорів відбувається сповільнення розрахунків (ефект насичення за рахунок збільшення обмінами даними). Як видно з малюнку, у випадку ВРФ насичення відбувається раніше, вже на 8 процесорах. При цьому максимальне досягнуте прискорення розпаралелювання для MM5 – у 5.6 разів, для ВРФ – 3.5 разів.



Малюнок 1. Залежність часу 168 г. прогнозів моделей MM5 та ВРФ-Україна для конфігурації а) з двома обчислювальними областями від кількості процесорів.



Малюнок 2. Залежність часу 168 г. прогнозів моделей MM5 та ВРФ-Україна для конфігурації б) з трьома обчислювальними областями від кількості процесорів.

Як видно з даних на малюнку 2 у випадку конфігурації б) з трьома обчислювальними областями (і відповідно, з більшою кількістю обчислювальних вузлів) насичення відбувається для при більшій кількості процесів - 32 для ММ5, 16 – для ВРФ (у порівнянні з 24 для ММ5 та 8 для ВРФ у конфігурації а). При цьому максимальний коефіцієнт прискорення за рахунок розпаралелювання у конфігурації б) для ММ5 дорівнює 6.3 (у порівнянні з 5.6 для конфігурації а). Для ВРФ максимальний коефіцієнт прискорення у конфігурації б) дорівнює 6.8 (у порівнянні з 3.5 для конфігурації а). Отже, можна припустити, що зі збільшенням загальної кількості вузлів обчислювальної сітки моделі максимальний коефіцієнт прискорення та кількість процесів насичення збільшуються.

Покажемо, що зростання кількості процесів насичення з ростом кількості обчислювальних вузлів, яке слідує з малюнків 1-2 носить загальний характер. Для цього введемо параметр ефективності розпаралелювання між розрахунками 1, 2 однієї й тієї ж задачі з різною кількістю процесів:  $O = T_2 \cdot N_2 / (T_1 \cdot N_1)$ , де  $T_1, T_2, N_1, N_2$  – час та кількість процесорів у першому та другому розрахунку. Очевидно, в найкращому випадку  $O = 1$ . При  $O > N_2 / N_1$  означає збільшення часу на розрахунки завдяки розпаралелюванню. Нехай час, необхідний для обміну одиницею інформації –  $T_e$ , а час, необхідний для розрахунку в одному внутрішньому вузлі –  $T_i$ . В ММ5 та ВРФ область розбивається на однакові підобласті, орієнтовані у напрямі північ-південь (NS) та у напрямі схід-захід (EW). Нехай кількість внутрішніх і граничних вузлів в одній підобласті відповідно  $n_i, n_e$ . Тоді загальний час обчислень буде визначатись формулою:  $T = T_e n_e N + T_i n_i$ , де  $N = P_{NS} P_{EW}$  – загальна кількість підобластей, яка рівна добутку кількості поділів області у напрямі північ-південь -  $P_{NS}$  та у напрямі схід-захід -  $P_{EW}$ . Тоді, при збільшенні  $P_{NS}$ , та  $P_{EW}$  у  $P$  разів загальна кількість підобластей збільшується у  $P^2$  разів. Тоді:

$$O = \frac{(T_e n_e^{(2)} N^{(2)} + T_i n_i^{(2)}) N^{(2)}}{(T_e n_e^{(1)} N^{(1)} + T_i n_i^{(1)}) N^{(1)}} = \frac{(T_e n_e^{(1)} N^{(1)} p + T_i n_i^{(1)} / p^2)}{(T_e n_e^{(1)} N^{(1)} + T_i n_i^{(1)})} p^2, \quad (1)$$

де індекси (1) та (2) означають перший і другий розрахунок. При виводі (1) враховувалось, що  $n_e^{(1)} / n_e^{(2)} \square p$ ,  $n_i^{(1)} / n_i^{(2)} \square p^2$ . З формули (1) видно, що  $O \sim 1$  при  $T_e n_e^{(1)} N^{(1)} p^3 \ll T_i n_i^{(1)}$ . Також з (1) слідує, що при зростанні кількості вузлів в обчислювальній області кількість процесів насичення зростає. Щоб строго це довести треба покласти  $N^{(1)} = 1$ , і дослідити при якому  $p^2$ ,  $O = p^2$ . Це приводить до кубічного рівняння відносно  $P$ . Можна отримати простішу якісну оцінку, якщо покласти, що кількість процесів насичення ( $N_{\max} = p_{\max}^2$ ) визначається за приблизним співвідношенням:  $T_e n_e^{(1)} p_{\max} \square T_i n_i^{(1)} / p_{\max}^2$ , і отже,  $N_{\max} \square (n_i^{(1)} / n_e^{(1)})^{2/3}$ . У випадку квадратної області з кількістю вузлів  $M = N_x \cdot N_y$  отримаємо, що:

$$N_{\max} \square (N_x)^{2/3} \square M^{1/3} \quad (2)$$

### Підсистема перерахунку архіву прогнозів

Паралельні обчислення можуть використовуватись не тільки для підвищення обчислювальної ефективності метеорологічних моделей, але й для задач пере розрахунку архіву прогнозів. Як було показано у попередньому розділі, існує потреба у підвищенні якості прогнозів за рахунок нових параметризацій. Але, як відомо, вдалий розрахунок з використанням нової параметризації одного або навіть декількох окремих сценаріїв зовсім не означає, покращення щоденних оперативних прогнозів. Одночасно, використання нейронмереж для статистичного уточнення результатів прогнозів в системах ВРФ та ММ5-

Україна (Гузій, та ін., 2008) потребує статистики прогнозів за декілька років, яка очевидно змінюється при змінах моделі. Ці обставини роблять задачу перерахунку архіву метеорологічних прогнозів надзвичайно актуальною, і водночас, такою, що потребує значних обчислювальних ресурсів.

В ПІММС були створені підсистеми перерахунку архіву прогнозів, які дозволяють в автоматичному режимі одночасно подавати на виконання на кластері довільну кількість задач. Для управління виконанням завдань SLURM ([www.llnl.gov/linux/slurm/](http://www.llnl.gov/linux/slurm/)). На вхід системі подається список дат, для яких треба перерахувати прогноз. При цьому для кожної задачі створюється окрема робоча директорія, в яку пишуться вихідні дані моделі, і в якій містяться посилання на спільні дані для різних задач (географічні дані, exe файли, тощо) які зберігаються в одному екземплярі. Обчислювальні експерименти на кластері СКІТ-3 продемонстрували можливість виконання одночасно 50 і більше задач, що у відповідній пропорційності зменшує час на перерахунок архіву.

### Висновки

Створені паралельні версії систем прогнозу погоди в Україні ММ5- та ВРФ- Україна, в яких використовується метод розщеплення обчислень по областях, а технічна реалізація паралельних обчислень здійснюється засобами OpenMPI, Intel MPI. Тестування систем показало значне зменшення часу обчислень за рахунок розпаралелювання у 5-7 разів. Показано, що максимальне прискорення за рахунок розпаралелювання зростає зі збільшенням кількості вузлів обчислювальної сітки моделі. Наприклад, у випадку ВРФ при збільшенні кількості вузлів обчислювальної сітки у 6 разів (конфігурація обчислювальної області б) у порівнянні з а) максимальне прискорення за рахунок розпаралелювання збільшилось вдвічі. Створена система перерахунку архіву прогнозів, яка, з використанням програмних засобів управління виконанням завдань SLURM дозволяє прискорити перерахунок архівів прогнозів пропорційно кількості наявних обчислювальних ядер.

### Посилання

1. Кушан А.А., Железняк М.И., Мадерич В.С. Програмний комплекс оперативного чисельного прогнозування погоди ММ5-Україна//Зб. Пр. IV Міжнародної конференції "Геоінформатика – теоретичні та прикладні аспекти", Київ. – 2005. – 30 березня-31 червня.
2. Гузій А.М., Ковалець І.В., Кушан А.А., Железняк М.И., 2008. Система чисельного прогноза погоди WRF-Україна. Математические машины и системы. - № 4 - С. 123-131.
3. Grell, G.A., Dudhia J., Stauffer D.R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model (MM5). NCAR Technical Note NCAR/TN-398+STR. –1994. - 117 p.
4. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Wang W., Powers J.C. A description of the advanced research WRF version 2. NCAR Technical Note NCAR/TN-468+STR. National Center for Atmospheric Research. – 2005. - 88p.
5. Богорад В.І., Железняк М.Й., Ковалець І.В., Кушан А.А., Литвинська Т.В., Слепченко А.Ю. Кількісна оцінка випадіння радіонуклідів внаслідок потенційного руйнування Нового Безпечного Конфайнменту під впливом смерчу класу F3. Ядерна та Радіаційна Безпека. -2006. - № 1, с. 28-33.
6. Бойко А., Гузій А., Железняк М., Ковалець І. Моделювання катастрофічного паводку в карпатському регіоні в липні 2008р. каскадом метеорологічних та гідрологічних моделей. Зб. пр. Міжн. Конф. "Математическое и имитационное моделирование систем. МОДС '2009", 22-26 июня 2009 г., Украина, г. Киев.
7. Maderich V.S., and Brovchenko I., 2005. Oil Dispersion By Breaking Waves And Currents: Modeling of Transport of Spilled Oil in Wind and Wave Driven Sea. Sea Technology Vol. 46, no. 4, 17-21.
8. Сергієнко І., Коваль В., СКІТ — український суперкомп'ютерний проект. Вісн. НАН України. — 2005. — N 8. — С. 3-13.