

КОМП'ЮТЕРНІ ЗАСОБИ, МЕРЕЖІ ТА СИСТЕМИ

V.V. Khramov, O.O. Sudakov,
M.V. Kononov, V.M. Ustimenko,
M.M. Budnyk

MODELLING FOREST FIRES ON GRID-CLUSTERS

It is suggested that grid-systems are effective to optimize simulation of forest fires. Examples of fire simulations under differ initial conditions and ways for improvement are provided.

Key words: grid, cluster, forest fire, field model.

Доказано, что Grid-системы перспективны для оптимизации моделирования лесных пожаров. Приведены примеры моделирования пожаров при разных начальных условиях и пути их развития.

Ключевые слова: Grid, кластер, лесной пожар, полевая модель.

Доведено, що Grid-системи перспективні для оптимізації моделювання лісових пожеж. Наведено приклади моделювання пожеж за різних початкових умов та шляхи їх розвитку.

Ключові слова: Grid, кластер, лісова пожежа, польова модель.

© В.В. Храмов, О.О. Судаков,
М.В. Кононов, В.М. Устименко,
М.М. Будник, 2012

УДК 681.3:504.75:004.75

В.В. ХРАМОВ, О.О. СУДАКОВ, М.В. КОНОНОВ,
В.М. УСТИМЕНКО, М.М. БУДНИК

МОДЕЛЮВАННЯ ЛІСОВИХ ПОЖЕЖ НА GRID-КЛАСТЕРАХ

Вступ. Лісові пожежі – одна із значних загроз світового масштабу. Щороку на Землі виникає близько 200 тисяч лісових пожеж, вони призводять до величезних збитків і навіть людських жертв. За останні роки тисячі гектарів лісу було знищено внаслідок стихійного вогню. Втрата лісових ділянок порушує баланс світових екосистем і сприяє глобальному потеплінню. Причинами пожежі стають як природні, так і антропогенні чинники; нерідко також мають місце й акти самозаймання. Однак 90 % лісових пожеж трапляються з вини людини. Статистика свідчить, що за останні 17 років (з 1993 року по 2009 рік включно) в лісах Криму з вини людини сталося 2120 лісових пожеж площею 2170 га, у тому числі верхових – 258 га. Слід зазначити, що кількість лісових пожеж змінюється з року в рік і залежить переважно від погодних умов, а також від інтенсивності відвідування лісів туристами.

Найбільші, які охопили величезну територію, пожежі виникали в Ялтинському гірничо-лісовому природному заповіднику. Типовим прикладом є пожежа 1993 р., коли площа пожежі склала 460 га, чи пожежа 1998 р. на площі 107 га. Гасіння лісових пожеж у гірській місцевості пов'язане з величезними матеріальними та людськими ресурсами, до того ж це є нелегким завданням з огляду на ускладнену прохідність місцевості. Діаграму кількості лісових пожеж [1] показано на рис. 1.

З наведених фактів можна зробити висновки, що одним з найголовніших екологіч-

них завдань постає прогнозування лісових пожеж та розробка програми відповідних запобіжних засобів.

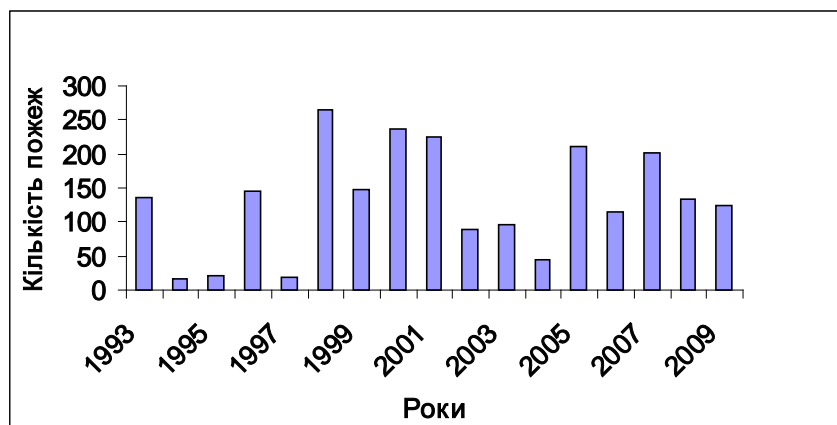


РИС. 1. Кількість пожеж з 1993 року по 2009 рік

Сучасні методи моделювання пожежі дозволяють спрогнозувати хід її поширення, наслідки, тривалість і ситуативну поведінку. Реалізація таких методів передбачає обробку великої кількості даних, що вимагає значних ресурсів і є неможливим без використання сучасних багатопроесорних систем та розподілених обчислень. Мета роботи – розробка та застосування нових методів обчислень на кластерах і в Grid для обробки складних екологічних моделей лісових пожеж, які є перспективними для вирішення як наукових так і практичних задач.

Перший кримський Grid-ресурс для екологічного моделювання. Однією з обчислювальних систем, спеціально розроблених для вказаних задач є перший Кримський експериментальний Grid-ресурс, який було створено в Таврійському гуманітарно-екологічному інституті в місті Сімферополі [1]. Він також застосовується для інших задач моделювання в області гуманітарно-екологічних досліджень (моніторингу залежності стану людини від геліометеофакторів [2], очищення водних ресурсів, спостереження за погодними умовами тощо). Grid-ресурс являє собою багатопроесорний кластер. Для кластера обрано мультикомп'ютерну архітектуру Beowulf. Програмне забезпечення: Scientific Linux-5.4, PBS torque, середовище openMPI, системи моніторингу: ganglia, MRTG+RRD. В якості Grid-комунікатора використовується програмне забезпечення проміжного рівня Nordugrid, що знаходиться на головному вузлі кластера і забезпечує зв'язок з Grid-інфраструктурою Українського Академічного сегменту (<http://uaag.bitp.kiev.ua>) [3]. За допомогою інфраструктури здійснюється завантаження завдань, обмін інформацією, моніторинг. Завдяки цій Grid-інфраструктурі з'явилася можливість скоротити й оптимізувати розрахунки при моделюванні.

Методи прогнозування лісових пожеж. На сьогоднішній день відомий ряд робіт з моделювання горіння рослинних матеріалів під час пожежі. Перші з них,

які стосуються сфери лісових пожеж датуються 1920 – 1950 рр. (роботи Мітчелла, Каррі, Фонса, Амосова, Девіса, Байрама, Вонського, Мелехова, Анцишкіна [4, 5]). Кожна з цих робіт присвячена дослідженню окремих питань, таких як теплофізичні властивості рослинних горючих матеріалів, способи передачі тепла при пожежі тощо. Ці роботи поклали початок теорії лісових пожеж, проте вони не можуть бути використані на практиці через суто теоретичну спрямованість.

У 1960 – 1970 рр. були спроби більш детального вивчення механізмів процесу горіння, а також побудовані відповідні моделі (Ліндермут, Байрам, Ванвагнер, Тепліцин, Томас, Андерсен [6], Ротермель [7], Амосов). Проте й вони не достатньо повно описували процес поширення лісової пожежі. Лише в останні десятиліття з'явилися роботи, які більш широко враховують весь комплекс фізико-хімічних процесів, що протікають в зоні пожежі (роботи Конєва [8], Гришина [9], Біанжіні [10]), а внаслідок розвитку комп'ютерної техніки такі моделі отримали можливість практичного застосування.

Розрахунок у рамках подібних моделей вимагає багато часу та потребує використання складних багатопроекторних систем. Обчислювальні кластери і Grid-середовище дозволяють оперувати величезним набором параметрів опису зони пожежі в реальному часі. Складність моделювання лісових пожеж полягає у тому, що деякі параметри, а саме: температура, відносна вологість повітря та швидкість вітру – можуть змінитися з розвитком займання.

Характеристики моделей прогнозування лісових пожеж. Всі математичні моделі лісових пожеж, які лежать в основі систем оцінки лісової пожежної небезпеки, згідно Вебера [11], можуть бути розділені на три групи: емпіричні (або статистичні), напівемпіричні (або лабораторні) і фізичні (або аналітичні) (рис. 2). У реальних завданнях прості емпіричні моделі трансформуються в складніші – фізичні моделі.

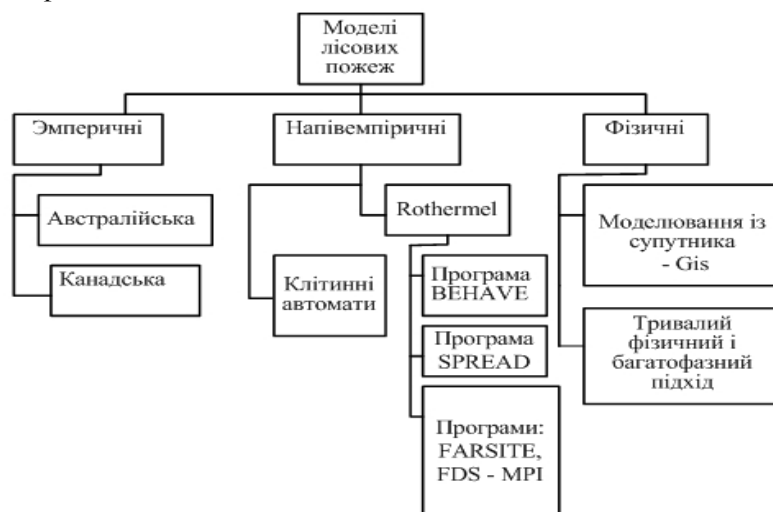


РИС. 2. Класифікація моделей лісових пожеж

Експериментальний комплекс з емпіричною моделлю обмеженої сферою застосовності, для якої модель створена. Повні фізичні моделі позбавлені обмежень, але вони рідше використовуються, оскільки такий детальний підхід вимагає введення точних даних. Обчислення в рамках фізичних моделей зазвичай повільні та, значною мірою, надлишкові. Тому напівемпіричні моделі, як проміжні, частіше обираються для практичного застосування.

Емпіричні моделі бувають статистичні і стохастичні та можуть включати дані статистики пожеж минулих років, усереднюючи параметри прогнозування лісових пожеж, отриманих з експериментальних лабораторій. Дві емпіричні моделі широко використовувалися в Австралії і Канаді. В Австралії – модель Мак Артура [12], що відтворювала територіальні та лісові пожежі. Вона не робила жодної спроби використовувати фізичні механізми при поширенні вогню і була виключно статистичною, описуючи параметри за результатами спостережень. Модель перевірялася в посушливих регіонах південного сходу Австралії. Лісова канадська служба 25 років проводила дослідження реальних сценаріїв поширення пожеж і сформувала Канадську систему прогнозування поведінки лісових пожеж, яка доступна нині у вигляді підручника і в електронному вигляді. Ця система містить 89 формул, отриманих дослідним шляхом і зведених до таблиць, і є однією з альтернативних моделей прогнозування пожеж.

Напівемпіричні моделі ґрунтуються на глобальній енергетичній рівновазі [4] (модель Франденсена 1971) і на припущенні, що енергія, яка отримується ще незгорілим паливом, пропорційна тій енергії, що вивільняється під час горіння палива. Деякі елементи моделі мають бути підібрані з результатів лабораторних експериментів з вогнем. Простота цього підходу дозволяє розробляти оперативні методи.

Найбільш важлива напівемпірична модель створена Ротермелем [4], її покладено в основу багатьох систем прогнозу в США та в інших країнах. Модель розроблено для передбачення швидкості вогню у фронті пожежі, залежно від легкозаймистих матеріалів (ЛЗМ), погодних умов та особливостей рельєфу. Модель базується на наступних рівняннях:

$$ROS = \frac{I_R \xi (1 + \varphi_w + \varphi_\sigma)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}}, \quad (1)$$

де ROS – норма вогню (м/хв.); I_R – інтенсивність реакції (кДж/хв*м²); ξ – відстань поширення пожежі; φ_w – коефіцієнт вітру; φ_σ – фактор нахилу; ρ_b – суха масова густина (кг/м³); ε – ефективний індекс нагрівання (безрозмірний); Q_{ig} – тепло попереднього займання (кДж/кг).

$$I_b = hw \frac{R}{60}, \quad (2)$$

де I_b – інтенсивність смуги пожежі, яка описує величину енергії, що випромінюється за одиницю фронту пожежі (кВт/м); h – кількість палива; w – вага па-

лива ($\text{кг}/\text{м}^2$), що згоріло в області пожежі, на одиницю площі; $\frac{R}{60}$ – норма поширення вогню за одиницю часу (м/сек).

Вхідні дані для моделі Ротермель ділять на три типи:

- 1) властивості часток ЛЗМ (легкозаймистих матеріалів) – тепловміст, мінеральний вміст, щільність часток;
- 2) структура масиву часток ЛЗМ (запас ЛЗМ, середній розмір часток, середня висота шару);
- 3) параметри довкілля (швидкість вітру, вологість, наявність ЛЗМ, нахил поверхні).

Модель Ротермеля є основою для багатьох систем прогнозування пожеж і встановлення передумов їх виникнення.

Національна система оцінки лісової пожежної небезпеки NFDRS (1972) і комп'ютерна система прогнозу пожеж VENAVE (1984) [5] обидві засновані на моделі Ротермеля і використовують наступне рівняння:

$$I_b = \frac{I_R * 12.6R}{60 \delta}, \quad (3)$$

де δ – характеристика району пожежі щодо території розповсюдження палива.

Спільно з моделлю Ротермеля часто використовується модель Байрама. Вона дає інтенсивність фронту пожежі ($\text{кВт}/\text{м}$) на основі питомої теплоти згоряння ЛЗМ ($\text{Дж}/\text{г}$), запасу ЛЗМ ($\text{г}/\text{м}^2$) і швидкості поширення вогню ($\text{м}/\text{с}$). Моделі Ротермеля і Байрама були використані в широкому діапазоні екосистем і лісових горючих матеріалів: Північній Америці, Південній Африці, Південній Франції і Австралії. Передбачення за моделлю Ротермеля в простих екосистемах ланів та саван були достовірними в широкому діапазоні параметрів. Водночас значні похибки виникали в складніших за структурою екосистемах.

Фізичні моделі лісової пожежі засновані на законах збереження маси, руху і енергії для всіх елементів системи (грунт, лісові горючі матеріали, повітря) і значно відрізняються за детальністю опису. Основними процесами є перенесення тепла (теплопровідністю, конвекцією та випромінюванням) і турбулентний потік газу. Складні хімічні реакції піролізу дерева і горіння з великим числом проміжних компонентів замінюються, як правило, ефективними процесами утворення твердих і газоподібних продуктів горіння.

На практиці використовуються як двовимірні моделі, так і тривимірні. Двовимірний опис процесів на площині, що відповідає “лінійній” пожежі, може використовуватися для порівняння або розробки моделей, але має обмежену практичну цінність. Двовимірна “горизонтальна” модель [14] базується на наступних припущеннях:

- 1) горючі матеріали зосереджені на поверхні;
- 2) висота шару повітря мала в порівнянні з лінійними масштабами.

Ця модель, очевидно, не описує власне верхову пожежу, але може застосовуватися під час оцінювання її наслідків.

Для верхової пожежі потрібна повна тривимірна модель, пов'язана (в разі сильної пожежі) з регіональною моделлю атмосферної динаміки [15]. Складність створення адекватної моделі цього процесу визначається рядом чинників: необхідністю розробити модель тривимірного розподілу лісових горючих матеріалів, що включає ряд параметрів, описує міру нерівномірності розподілу, який має хаотичний характер як самого горіння, так і атмосферних течій; а також – широким масштабом завдання.

Очевидно, що модель має бути системою ієрархічних субмоделей для різних масштабів. Найпростіший зв'язок між моделями – використання параметризації, що дозволяє зменшити масштаби (апроксимація за допомогою нейронних мереж, багатопараметрична регресія тощо). Перспективним видається адаптивне використання моделей, тобто процеси догорання вогнища пожежі можуть описуватись простішими ніж фронт вогню засобами. Хаотичний характер динаміки пожежі вимагає розгляду безлічі варіантів розрахунку для оцінки вірогідності прогнозу. Нарешті, для математичної моделі реальної лісової пожежі як способу підтримки ухвалення рішень необхідне коригування результатів розрахунків на основі поточних даних дистанційного зондування [6], тому важливим елементом запропонованої системи має стати процедура асиміляції експериментальних даних у розрахункову модель.

Верифікація моделі включає два етапи: перевірку точності чисельного вирішення рівнянь і оцінку відповідності моделі реальності. Останнє у разі лісових пожеж викликає серйозні труднощі. Лабораторні експерименти щодо горіння лісових матеріалів, [16, 17] безумовно, необхідні і дозволяють, наприклад, визначити необхідні параметри моделі горіння однорідного шару палива за відсутності вітру на горизонтальній поверхні [18].

Використання моделі необхідне, по-перше, для дослідження ефективності заходів запобігання і гасіння лісових пожеж, по-друге, для ухвалення оперативних рішень. В останньому випадку, очевидно, необхідне моделювання в реальному часі з використанням багатопроцесорних обчислювальних комплексів і Grid-кластерних систем.

Модель і параметри лісових пожеж для обчислень на кластері та в Grid. Для моделювання лісової пожежі запропоновано використовувати програмне забезпечення FDS [19] і додаткові прикладні програми, такі як Farsite [20], Smokview [21] і Biheve, оскільки на сьогоднішній день не існує єдиного відкритого програмного комплексу для розрахунку лісових пожеж у тривимірному просторі, який враховував би рельєф місцевості та навколишній клімат разом з класифікацією об'єктів лісового масиву.

Модель коригувалася, використовуючи специфіку лісів Криму за допомогою вищезгаданих додаткових програм. Програма FDS використовується для перевірки пожежної безпеки і дозволяє у повній мірі реалізувати чисельну польову модель. Польова модель – математична модель розрахунку перенесення тепла та маси під час пожежі, в основі якої лежить система рівнянь з частинними похідними, у якій чисельно вирішуються рівняння Нав'є – Стокса для темпера-

турно-залежних низькошвидкісних потоків, особлива увага приділяється поширенню диму і теплопередачі при пожежі. Так само були враховані модельні кліматичні параметри лісового середовища. Модель є системою рівнянь, що включає рівняння збереження маси, моменту імпульсу та енергії. Вона вирішується на тривимірній регулярній сітці. Теплове випромінювання розраховується методом кінцевих об'ємів на тій самій сітці.

Основні рівняння запропонованої моделі.

Закон збереження маси:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = \dot{m}_b''' , \tag{4}$$

де ρ – густина; v – швидкість; \dot{m}_b''' – коефіцієнт збільшення маси речовини типу b за одиницю часу.

Закон збереження моменту імпульсу:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla(\rho v^2) + \nabla \rho = \rho g + f_b + \nabla \tau_{ij} , \tag{5}$$

де f_b – зовнішні сили притягання (за винятком сили тяжіння); τ_{ij} – тензор в'язких напруг.

Закон збереження енергії:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h_s) + \nabla(\rho h_s u) = \frac{\partial \rho}{\partial t} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' - \nabla(\dot{q}''') + \varepsilon , \tag{6}$$

де h_s – ентальпія суміші газів; \dot{q}''' – швидкість тепловиділення на одиницю об'єму; \dot{q}_b''' – енергія, яка передається краплині, що випаровується; \dot{q}'' – вектор теплового потоку; ε – швидкість дисипації тепла.

Як вхідні дані використовувалася таблиця теплофізичних характеристик рослинності (табл. 1).

ТАБЛИЦЯ 1. Теплофізичні характеристики рослинності

Параметр	Одиниця виміру	Рослинність						
		Дуб	Сосна	Клен	Бук	Кущ	Трава	Камінь /земля
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Щільність	кг/м ³	800	850	670	680	600	550	2800
Питома теплоємність	КДж/(кг*К)	2.4	2.72	2.5	2.6	2.4	2.2	1.04
Провідність	W/(м*К)	0.42	0.4	0.35	0.4	0.25	0.21	0.18

Закінчення табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
Коефіцієнт випромінювання	$\epsilon = 1$	0.91	0.9	0.9	0.9	0.9	0.98	0.85
Коефіцієнт поглинання	1/м	0.86	0.8	0.8	0.8	0.7	0.67	0.5
Теплота згоряння	КДж /кг	9	9	8	8	7	6	-

Земельний ґрунт розглядався як негорюча нейтральна площина, яка не брала участі в процесі горіння. За допомогою різних моделей моделювалось горіння ділянки протягом 5 – 30 хвилин. Процес розрахунку при цьому займав набагато більше часу – від 1.5 години до 36 годин. В результаті моделювання стало можливим візуально оглянути периметр горіння лісової ділянки, оцінити температуру в контрольних точках, а також (при моделюванні 30 хвилин) обрахувати повний цикл: від моменту спалаху до загасання й диму.

З побудованої моделі лісової пожежі можна зробити важливий висновок: швидкість розповсюдження лісової пожежі можна істотно зменшити, задавши більшу відстань між рослинними об'єктами. А цього можна досягти, проводячи санітарне вирубування дерев і кущів та дотримуючись геометричного порядку при висадці лісонасаджень (див. рис. 3). Розмірність файлу моделі подана в табл. 2. Результати моделювання зведено в табл. 3.

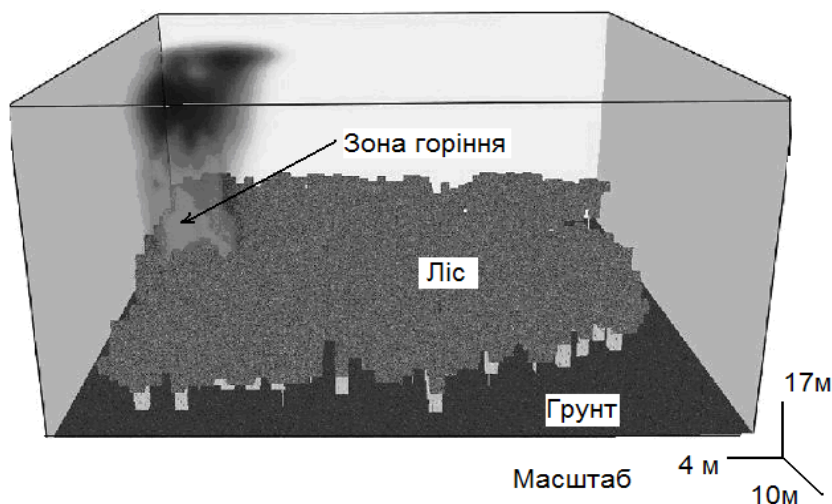


РИС. 3. Кадр з анімації тривимірної модельної лісової пожежі

ТАБЛИЦЯ 2. Розмірність файлу моделі

Назва моделі	Кількість об'єктів	Кількість пікселів	Кількість сіток	Розмір вихідного файлу
Forest-Fire1	250	1 мільйон	1	250 кб
Forest-fire2	500	2 мільйони	1	600 кб
Forest-fire3	800	3 мільйони	2	950 Мб
Forest-fire4	1200	4 мільйони	3	1.5 Мб

ТАБЛИЦЯ 3. Результати моделювання

Назва моделі	RAM (1 CPU) Мб	Розмір вихідних файлів Мб	Тривалість обчислень в режимі		
			Single, (1 CPU)	Grid, MPI (10 CPU)	в Grid OPENMP (4 CPU)
Forest_fire1	500	250	8 годин	1,5 години	3 години
Forest_fire2 +wind1	700	450	16 годин	2,5 години	4 години
Forest_fire3 +wind2	900	600	24 години	4,5 годин	7 годин
Forest_fire4 +wind3	1 000	1400	36 години	5 годин	9 годин

На рис. 4 показана залежність тривалості обчислень моделей від використаних методів паралельних обчислень на кластерах в Grid.

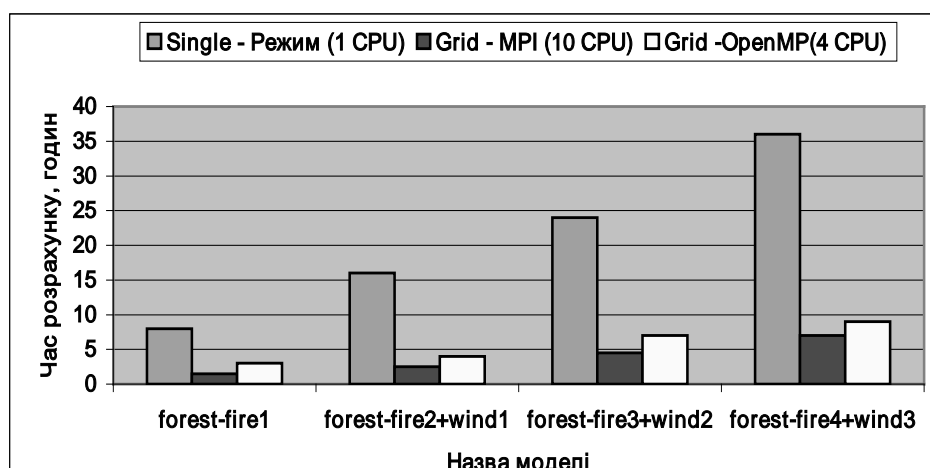


РИС. 4. Залежність тривалості обчислень моделей від використаних типу методу

Як видно з графіка (рис. 4), більш продуктивним для розрахунків у Grid виявилось використання MPI-середовища на 10 процесорах, на відміну від багатопотокового OPENMP-режиму, оскільки кількість ядер процесора на деяких вузлах Grid-ресурсів може бути обмежено, а процесорні ресурси для MPI можуть запитуватися через менеджер ресурсів Grid-кластера і набиратися з вільних вузлів. Цей метод значно скорочує час розрахунку, а використання Grid-ресурсів дозволяє проводити обчислення незалежно на різних Grid-вузлах, використовуючи каскад, який дозволяє перегруповувати параметри моделі та формувати нові, враховуючи досвід і недоліки попередніх моделювань, не чекаючи завершення всього розрахункового циклу.

Висновки. Запропонований у роботі модельний підхід до опису лісових пожеж у Криму, заснований на критеріях станів пожеж в небезпечних зонах щодо чинників їх спалаху за багатолітніми спостереженнями за лісовими пожежами судячи з усього є ефективним для практичного застосування з використанням Grid-обчислень. Виявлена відмінність антропогенного і природного чинників у статистичних показниках активності пожеж.

Створена тривимірна модель лісової ділянки з осередком загоряння на основі відомих рівнянь кінетичного розвитку пожеж, таких як: математична польова модель пожежі, рівняння Нав'є – Стокса, закон збереження маси й імпульсу з використанням 3D-моделювання в програмному забезпеченні FDS і 2D-моделювання в програмах FarSite (модель Ротермеля), Behave реалізована у вигляді ресурсу, який може використаний практично через веб-інтерфейс.

В результаті експерименту доведено актуальність подальшого використання обчислень в Grid для прогнозування та керування лісовими пожежами.

1. *Khramov V.V., Sudakov O.O.* The first Crimean experimental computing grid-resource for research and simulation in the humanities // Ninth international young scientists conference on applied physics, june, 17–20, Kyiv. – 2009. – P. 105.
2. *Sudakov O.O., Kononov M.V., Khramov V.V., Grigoryev P.Ye.* Use of distributed computing in the monitoring of dependence of human state from the heliometeofactors // Xth international young scientists conference on applied physics, june, 17 – 20, Kyiv.– 2010. – P. 223.
3. *Бойко Ю.В., Зінов'єв М.Г., Свістунів С.Я. та інші.* Український академічний Грід: досвід створення і перші результати експлуатації // Математичні машини і системи. – № 1. – 2008. – С. 67 – 84.
4. *Доррер Г.А.* Математичні моделі динаміки лісових пожеж. – М.: Лісн. промисловість, 1979. – 161 с.
5. *Амосов Г.А.* Деякі закономірності розвитку лісових низових пожеж // Виникнення лісових пожеж. – М.: Наука, 1964. – С. 152 – 183.
6. *Anderson H.E., Rothermal R.C.* Tenth symposium (international) on combustion // The Combustion Institute, Pittsburgh. – 1965. – P. 1009 – 1019.
7. *Rothermel R.C.* A Mathematical model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels Research Paper INT-115. – Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1972. – P. 215.
8. *Конев Е.В.* Фізичні основи горіння рослинних матеріалів. – Новосибірськ.: Наука, 1977. – 102 с.
9. *Гришин А.М., Грузін А.Д., Зверев В.Г.* Математичне моделювання процесу поширення верхових лісових пожеж. – ДАН СРСР, 1983. – 269, № 4. – С. 822 – 826.
10. *Bianchini G.* S2F2M-Statistical System for Forest Fire Management, 2005. – P. 427 – 434.

11. *Weber R.O.* Modelling spread through fuel beds. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1991. – P. 17 – 67.
12. *McCarter R.J., Broido A.* *Pyrodynamics*, 1965. – № 1. – P. 65 – 85.
13. *BehavePlus* fire modeling system. Version 2.0. User's Guide. USDA Forest Service Gen. Tech.Rep. RMRS-GTR-106 WWW, 2003. – P. 139.
14. *Asensio M.I., Ferragut L., Simon J.*, Modelling of convective phenomena in forest fire 2002. – P. 299 – 313.
15. *Linn R., Reisner J., Colman J.J., Winterkamp J.* *Int. Wildland Fire*, 2002. – V. 11. – P. 233 – 246.
16. *Marcelli T., Santoni P.A., Leoni E., Simeoni A.* In: *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*, Viegas (ed.).– Rotterdam.: Millpress, 2002. – P. 1 – 12.
17. *Dupuy J.L., Marechal J., Morvan D.* *Combust and flame*, 2003. – P. 65 – 76.
18. *Balbi J.H., Santoni P.A., Dupuy J.L.* *Int. Wildlan Fire* 1999. – P. 275 – 284.
19. *McGrattan K.B., Hostikka S., Floyd J.E., Baum H.R. and Rehm R.G.* *Fire Dynamics Simulator [Version 5], Technical Reference Guide*. NIST Special Publication 1018-5 National Institute of Standards and Technology. – Gaithersburg, Maryland, 2007. – P. 234.
20. *FARSITE: Fire Area Simulator – model development and evaluation*. USDA Forest Service Res. Pap. RMRS-RP-4, 2004. – P. 47.
21. *Forney G.P.* User's Guide for Smokeview Version 5-A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data.: National Institute of Standards. – P. 234.

Одержано 08.08.2012