

УДК 004.75: 504.75: 681.3

Д.Ю. Воронин, ст. преподаватель, канд. техн. наук;

О.О. Судаков, доцент, канд. физ.-мат. наук;

В.В. Храмов, аспирант

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская 33, СевНТУ, Севастополь, 99053

E-mail: dima@voronins.com

Киевский национальный университет им. Т. Шевченко

ул. Владимирская, 60, Киев, Украина, 01601

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ РАСПРЕДЕЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГРИД-ТЕХНОЛОГИЙ

Рассмотрены информационные технологии, ориентированные на организацию распределенного моделирования техногенных ситуаций на примере лесных пожаров в Крымском регионе. Построен комплекс альтернативных моделей прогнозирования пожаров, предложены процедуры адаптивной организации вычислительного эксперимента в среде Грид, учитывающие специфику применения имитационного моделирования в экологических и гуманитарных исследованиях.

Ключевые слова: *Грид, кластер, адаптация, прогнозирование пожаров, распределенное моделирование.*

В мире ежегодно происходит более 500 миллионов техногенных чрезвычайных ситуаций (ТЧС), причиняющих экологический и материальный ущерб, способствующий нарушению условий жизнедеятельности и приводящий, в некоторых случаях, к летальным исходам [1]. Большинство ТЧС в Крымском регионе обусловлены лесными пожарами. Статистика свидетельствует, что за последние 17 лет (начиная с 1993 года по 2009 год включительно) в лесах Крыма по вине человека произошло 2120 лесных пожаров на общей площади 2170 га, в том числе верховых — 258 га. От точности прогнозов по распространению, продолжительности и последствиям пожаров зависит качество предотвращения возгораний и поддержание экологического баланса в данном регионе [2, 3].

Для исследования эффективности мер предупреждения и тушения лесных пожаров в ходе моделирования имеется возможность визуализировать периметр горения лесного участка, определить температуру в контрольных точках, а также воссоздать ситуацию от момента возгорания до затухания. Однако, вследствие хаотического характера эволюции пожара, возникает необходимость рассмотрения целого ансамбля вариантов развития событий, что приводит к тому, что задача прогнозирования техногенных ситуаций с вычислительной точки зрения становится достаточно трудоемкой. Например, при моделировании типового лесного пожара только для решения дифференциальных уравнений Навье-Стокса необходимо выполнить порядка $2 \cdot 10^{13}$ арифметических операций, так как сложность модели в процессорных операциях оценивается как $O(mn^3)$, где n — число пространственных точек по одной координате, а m — глубина прогноза. При использовании современных персональных компьютеров (Core i3-2100 3.1GHz/ Intel H61 rev3.0 ASUS P8H61/ DDR3 2Gb Hynix) для расчета только одного эксперимента с данной моделью требуется несколько часов машинного времени.

Необходимо отметить, что для принятия оперативных решений результирующие данные (оценка ущерба, скорость распространения пожара, его яркость и тип) должны быть получены в режиме реального времени. В связи с тем, что имитационные эксперименты поддаются распараллеливанию, появляется возможность преодолевать это существенное ограничение за счет организации распределенного моделирования с использованием Грид-технологий [2–4]. Например, при использовании OpenMP версии симулятора пожаров FDS — сформировав и запустив на выполнение каскад задач (300–700 экземпляров модели), расчетное время сократилось в более чем 8 раз, а в случае MPI режима — в 17 раз. Кроме того, использование Грид-сервисов AMGA, LFC расширяет функциональные возможности системы прогнозирования ТЧС при хранении и поиске результатов моделирования, позволяющих для воссоздания участка горения лесного массива оперировать огромным набором нестационарных параметров (температурой, относительной влажностью воздуха, скоростью ветра и т.д.). Таким образом, задача организации решения задач прогнозирования лесных пожаров при использовании многопроцессорных вычислительных комплексов Grid-систем является актуальной.

Целью данной статьи является рассмотрение вопросов, связанных с организацией прогнозирования лесных пожаров при использовании распределенного моделирования на базе Крымского экспериментального Grid-ресурса.

Рассматриваемый Grid-ресурс является частью инфраструктуры Украинского Академического сегмента, который построен на основе архитектуры Бевульф и функционирует при использовании следующих компонентов: Scientific Linux, Nordugrid, PBS torque, Maui, openMPI, а также системы мониторинга кластера, задач ganglia+adon_jobmorach и распределенной сетевой файловой системы NFS. Grid-ресурс оснащен эффективным широкопрофильным Web-интерфейсом, что позволяет упростить доступ к существующим вычислительным ресурсам и оптимизировать процесс вычисления и последующий анализ данных.

Согласно Веберу, модели оценки лесной пожарной опасности (рисунок 1), могут быть разделены на три группы: эмпирические (или статистические), полуэмпирические (или лабораторные), физические (или аналитические).

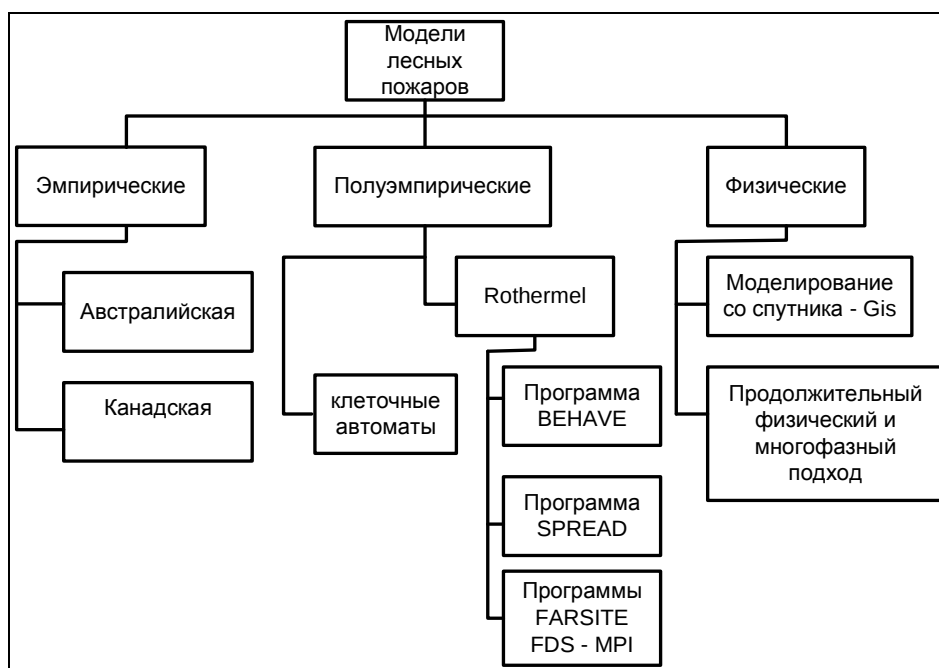


Рисунок 1 — Классификация моделей лесных пожаров

Для реальных задач (в условиях дефицита априорной информации) использование эмпирических моделей существенным образом затруднено и, таким образом, появляется необходимость использования полуэмпирических или физических моделей. Полуэмпирические модели имеют ограниченную точность, однако они весьма эффективны при принятии приближенных решений в сверхоперативном режиме и основываются на глобальном энергетическом равновесии и на предположении, что энергия, получаемая еще несгоревшим топливом, пропорциональна энергии высвобождаемой в результате его горения. Физические модели лесного пожара основаны на законах сохранения массы, движения и энергии для всех элементов системы (почва, лесные горючие материалы, воздух) и значительно различаются по степени детализации. Основными процессами являются перенос тепла (теплопроводность, конвекция и излучение) и турбулентность течения газа. Сложные химические реакции пиролиза дерева и горения с большим числом промежуточных компонентов заменяются, как правило, эффективными процессами образования твердых и газообразных продуктов горения. Таким образом, физические модели лишены упомянутых ограничений, хорошо раскрывают антропогенную и природную сущность факторов распространения и активности пожаров, однако сложны в реализации (с вычислительной точки зрения) и могут быть эффективно использованы в системах поддержки принятия оперативных решений только при отсутствии дефицита вычислительных ресурсов, например, в Grid-среде.

Проанализируем специфику Крымского региона с точки зрения синтеза физических моделей лесного пожара. Целесообразно выделить логические сегменты, учитывающие характер распространения ТЧС, например, при возгорании возможен следующий сценарий распространения огня “Ущелье” — “Нижний ярус” — Верхний ярус”. Построенный комплекс прогнозирования пожаров (таблица 1) состоит из следующих альтернативных моделей: 1) нижний ярус — низовой пожар распространяется по нижнему ярусу леса: горит надпочвенный покров, валежник, подлесок, охватывая нижние части стволов; 2) верхний ярус — сильный верховой пожар может иметь скорость распространения; 3) средний ярус — смешанные и лиственные леса; 4) северный склон — ветер раздувает траву, костры, свалки по направлению ветра; 5) межгорная — пожар в котловине между горами, рельефный ландшафт; 6) ущелье

— геологічний разлом в горах, стінки дуже тесно смыкаються, закрите простір, очаги;
7) малолісистою — одиночні дерева, ділянки рослинності, на пологому схилі гори, яла швидкість поширення.

Ввиду розглянутих вище обмежень і суттєвої нестационарності характеру поширення пожежі цілесообразно до проведення імітаційних експериментів здійснювати адаптивний вибір відповідної моделі на основі інформаційної технології

$$I_{\text{выб}} : I_{\text{выб}} = \left[A \left(K_M, \Pi_{t_k}, P_0 \left[\theta(Pr, S), TSM \right], \Delta, \kappa, \right), t_k \right],$$

де A — оператор адаптивного вибору моделі лісного пожежі в відповідності з ідентифікованим сценарієм його поширення; K_M — комплекс альтернативних моделей розподілу лісного пожежі; Π_{t_k} — оператор розрахунку втрат, формуваних в результаті вибору поточної моделі з K_M ; P_0 — оператор, розраховує вектор початкових уподобань для чергової фази адаптивного вибору моделі з K_M ; θ — оператор нейросетової ідентифікації сценарію поширення пожежі; Pr — множина параметрів поточної пожежі (швидкість поширення, рослинність і т.д.); S — множина сценаріїв поширення пожежі; TSM — матриця відповідності між $InfS$ і вектором початкових уподобань для чергової фази адаптивного вибору функціональної моделі з K_{FM} ; Δ — поріг чутливості при адаптивному виборі функціональної моделі розподілу обчислювальних ресурсів в вузлах МІС; κ — керуючий параметр частоти контролю якості адаптації; $\Phi_{t_k}^{\Delta}$ — оператор розрахунку сумарного зменшення втрат за κ кроків адаптації; $\Phi_{t_k}^*$ — оператор розрахунку розкиду між експериментальним і прогнозним значенням втрат на кожному 2κ -ом кроці адаптації; t_k — моменти прийняття рішень.

Необхідно відзначити, що застосування адаптивних технологій к вибору моделі пожежі з K_M дозволяє парировать неопределенность, пов'язану з динамічно змінюючимся сценарієм поширення ТЧС. Математичною базою для запропонованого підходу послужили роботи Л.А. Растрігіна, А.В. Назина, А.С. Позняка, однак, оперативний характер рішень потребував підвищеної швидкості збіжності процедур стохастическої апроксимації, реалізованої при використанні наступних інформаційних технологій:

— застосування в внутрішньому контурі адаптації багатоверсійного блоку модулів для отримання прогнозної оцінки функції втрат;

— обнулення вектора ймовірностей вибору моделей з K_M при детектуванні зміни сценарію поширення пожежі.

Таблиця 1 — Моделі лісних пожеж і їх характеристики для розрахунку в Grid

Назва моделі Характеристики	Нижнього	Верхнього яруса	Середнього яруса	Северного схилу	Міжгірська	Ущельє	Малолісистою
Швидкість поширення	0,5 м/хв	5 – 10 м/хв	3 – 5 м/хв	5 – 10 м/хв	0,5 м/хв	0,3 – 0,5 м/хв	5 – 10 м/хв
Приклад регіону	Ялта	Ялта	Севастополь, Ялта	В бік Бахчисарая	В бік Дімерджи до Четвертого	Між бухтою Ласпи і мисом Ая	Між Белогорськом і Симферополем,
Інтенсивність	Висока	Висока	Середня	Висока	Висока	Слабка	Висока
Складність тушення	Висока	Висока	Висока	Висока	Висока	Середня	Висока
Особливості	Лінійний фронт пожежі	Лінійний фронт пожежі	Лінійний фронт пожежі	Важко фактор вітру, Блочний рельєф	Важко фактор вітру	Возникає задымленность, самозатухание	Нелінійне поширення
Рослинність	Листопадні породи, кущики	Хвойні, сосни	Листопадні дерева, туї, кипарис	Кущики, низкорослі рослини	Орешник, дуб, граб	Широколистяні рослини	Барбарис, терн, орешник, кизил

Пример моделирования. Размерность исходных данных для модели представлена в таблице 2, экспериментальные результаты исследования — в таблице 3, а зависимость времени расчёта моделей от используемых методов одиночного и параллельных вычислений в Grid — на рисунке 2. Как видно из графика (рисунок 2), оптимальным вариантом (с точки зрения минимизации времени вычислительного процесса) оказалось использование MPI-среды (в отличие от многопоточного OpenMP-режима), так как число ядер процессора на некоторых узлах Grid-ресурсов может быть ограничено, а процессорные ресурсы для MPI могут запрашиваться через Pbs кластера и набираться параллельно из свободных узлов, что позволяет перегруппировывать и модифицировать параметры модели с учетом опыта, накопленного в ходе предыдущих экспериментов, не ожидая завершения соответствующих прогонов.

Таблица 2 — Размерность входного файла

Название модели	Число объектов	Число ячеек	Число сеток	Объем входного файла
Forest_fire1	250	1 миллион	1	250 кб
Forest_fire2+wind1	500	2 миллиона	1	600 кб
Forest_fire3+wind1	800	3 миллиона	2	950 Мб
Forest_fire4+wind1	1200	4 миллиона	3	1.5 Мб

Таблица 3 — Экспериментальные результаты исследования развиваемой модели

Название модели	Объем оперативной памяти при расчете на 1 CPU	Объем выходных файлов	Длительность вычислительного эксперимента (в часах)		
			в Single режиме 1 CPU	Grid-MPI режим (10 CPU)	Grid режим OpenMP (4 CPU)
Forest_fire1	500 Мб	250 Мб	8	1,5	3
Forest_fire2+wind1	700 Мб	450 Мб	16	2,5	4
Forest_fire3+wind2	900 Мб	600 Мб	24	4,5	7
Forest_fire4+wind3	1 Гб	1.4 Гб	36	5	9

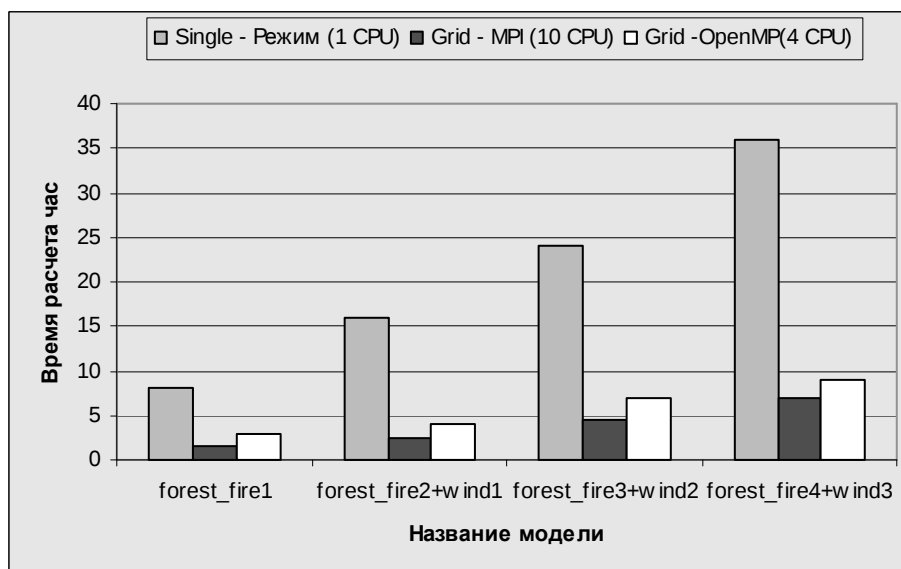


Рисунок 2 — Зависимость времени расчета моделей от используемых методов вычислений

Исходные данные (таблицы 4, 5) описывались в файле с расширением *.fds и передавались на вход FDS симулятора в виде строки: `fds5_mpi_intel_linux forest_fire1.fds`. Сформированные выходные файлы, созданные в результате расчета, обрабатывались визуализатором Smokeview.

Таблиця 4 — Теплофізическіе характеристики растительности

Параметр	Единица измерения	Растительность						
		Дуб	Сосна	Клен	Бук	Куст	Трава	Камень /земля
Плотность	кг /м ³	800	850	670	680	600	550	2800
Удельная теплоемкость	КДж / (кг*К)	2.4	2.72	2.5	2.6	2.4	2.2	1.04
Проводимость	W/(м *К)	0.42	0.4	0.35	0.4	0.25	0.21	0.18
Коэффициент излучения	$\varepsilon = 1$	0.91	0.9	0.9	0.9	0.9	0.98	0.85
Коэффициент поглощения	1/м	0.86	0.8	0.8	0.8	0.7	0.67	0.5
Теплота сгорания	МДж /кг	9	9	8	8	7	6	—

Таблиця 5 — Параметры модели лесной климатической среды

Параметр	Единица измерения	Значение
Ветер	м/сек	5
Атмосферное давление	мм рт.ст	760
Температура воздуха	°C	35
Относительная влажность	%	20

Пример файла исходной модели:

```
&HEAD CHID='forest_3'/
&TIME T_END=180.00/
&DUMP RENDER_FILE='forest_3.ge1', COLUMN_DUMP_LIMIT=.FALSE., DT_RESTART=300.00/
&MISC TMPA=40.00, V0=10.00/
&MESH ID='сетка', IJK=100,100,18, XB=0.00,50.00,0.00,50.00,-1.10,7.50/
&MATL ID='SPRUCE_CHAR',
    SPECIFIC_HEAT_RAMP='SPRUCE_CHAR_SPECIFIC_HEAT_RAMP',
    CONDUCTIVITY_RAMP='SPRUCE_CHAR_CONDUCTIVITY_RAMP',
    DENSITY=120.00,
    EMISSIVITY=1.00/
&RAMP ID='SPRUCE_CHAR_CONDUCTIVITY_RAMP', T=20.00, F=0.0770/
&RAMP ID='SPRUCE_CHAR_CONDUCTIVITY_RAMP', T=900.00, F=0.1600/
&MATL ID='SPRUCE_VIRGIN',
    SPECIFIC_HEAT_RAMP='SPRUCE_VIRGIN_SPECIFIC_HEAT_RAMP',
    DENSITY=450.00,
    EMISSIVITY=1.00,
    N_REACTIONS=1,
    HEAT_OF_REACTION=500.00,
    NU_FUEL=0.50,
    NU_RESIDUE=0.50,
    RESIDUE='SPRUCE_CHAR',
    N_T=1.00,
    THRESHOLD_TEMPERATURE=360.00,
    N_S=1.00,
    REFERENCE_TEMPERATURE=100.00/
&RAMP ID='SPRUCE_VIRGIN_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=20.00, F=1.20/
&RAMP ID='SPRUCE_VIRGIN_SPECIFIC_HEAT_RAMP', T=500.00, F=3.00/
```

Для расчета на кластере и в Grid был создан сценарий на языке xrls — Resource Specification Language for Grid

Пример сценария:

```
& (executable=job.sh)
(executables=fds5_openmp_intel_linux_32)
(inputFiles=("fds5_openmp_intel_linux_32" ""))("forest_3.fds" "")
(* arguments="Forest_fire2_openMP" *)
(stdout="hello.txt")
(stderr="hello.err")
(outputFiles=("hello.txt" ""))("forest_fire.tar" ""))("hello.err" "")
```

```
(gmlog="gridlog")  
(jobname="forest fire2_openMP")  
( cputime=1550 )  
( count=8 )  
(* middleware>="nordugrid-arc-0.8.2" *)
```

При моделюванні земельний ґрунт сопоставлен негорючої нейтральної площини, яка не бере участю в процесі горіння. Реальне горіння ділянки лісу продовжалося від 5 до 30 хвилин для різних сценаріїв, а процес безпосереднього розрахунку тривав набагато довше: від 1,5 години до 36 годин — в разі використання одиночного і Grid-режиму обчислень відповідно. Результатом моделювання став набір вихідних файлів і витрачені ресурси (таблиця 3). Для моделювання лісного пожежі запропоновано програмне забезпечення FDS, використовуване для перевірки пожежної безпеки, а також додаткові додатки, такі як Farsite (модель Ротермея), Smokview і Biheve, оскільки на сьогоднішній день не існує єдиного відкритого програмного комплексу для розрахунку лісових пожеж в тривимірному просторі, який би враховував рельєф місцевості і оточуючий клімат поряд з класифікацією об'єктів лісового масиву. Модель калібрувалася з урахуванням специфіки лісів Криму з допомогою вказаних вище додаткових програм.

Реалізовані інформаційні технології, орієнтовані на організацію розподіленого моделювання техногенних ситуацій на прикладі лісових пожеж в Кримському регіоні. Побудовано комплекс альтернативних моделей прогнозування пожеж, запропоновано процедури адаптивної організації обчислювального експерименту в середі Грід, враховуючі специфіку застосування імітаційного моделювання в екологічних і гуманітарних дослідженнях.

В якості напрямку подальших досліджень планується впровадити запропонований підхід в програмно-діалоговий комплекс підтримки прийняття рішення по забезпеченню пожежної безпеки Криму.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Безпека життєдіяльності. Учебник для вузів / С.В. Белов, А.В. Ільницька, А.Ф. Козьяков і др., під общ. ред. С.В. Белова. — М.: Виш. шк., 1999. — 448 с.
2. Храмов В.В. Використання нового обчислювального Grid-ресурсу для рішення актуальних завдань екології / В.В. Храмов, А.А. Судаков, В.Н. Устименко // Біосфера ХХІ століття: матер. ІІІ Всеукраїн. конф. молодих учених, аспірантів, магістрантів і студентів, Севастополь, 4–7 квітня 2011 г. — Севастополь: СевНТУ, 2011. — С. 144–146.
3. Особливості моделювання лісових пожеж на кластерах в Grid / М.В. Кононов, О.О. Судаков, В.В. Храмов і др. // Вісн. Київ. нац. ун-ту. Сер. Фіз.-мат. науки: сб. наук. пр. — К., 2011. — Вип. 2. — С. 185–192.
4. Храмов В.В. Перший Кримський експериментальний обчислювальний Grid-ресурс: створення і перші результати випробувань і експлуатації / В.В. Храмов, О.О. Судаков, М.В. Кононов // Математичні машини і системи. — 2011. — № 1. — С. 103–111.

Поступила в редакцію 19.04.2012 г.

Воронін Д.Ю., Судаков О.О., Храмов В.В. Прогнозування техногенних ситуацій на основі розподіленого моделювання з використанням Грід-технологій

Розглянуто інформаційні технології, орієнтовані на організацію розподіленого моделювання техногенних ситуацій на прикладі лісових пожеж у Кримському регіоні. Побудовано комплекс альтернативних моделей прогнозування пожеж, запропоновано процедури адаптивної організації обчислювального експерименту в середовищі Грід, що враховують специфіку застосування імітаційного моделювання в екологічних та гуманітарних дослідженнях.

Ключові слова: Грід, кластер, адаптація, прогнозування пожеж, розподілене моделювання.

Voronin D.Y., Sudakov O.O., Khramov V.V. Technogenic situations prediction based on distributed simulation using grid technology

Technology, focused on organization of the technogenic situations distributed simulation – for example forest fires in the Crimean region. A set of alternative models for the fires prediction was made and the adaptive computer simulation organization procedure was proposed taking into account specificity of the application of simulation modeling in environmental and human studies.

Keywords: grid, cluster, adaptation, fire prediction, distributed simulation.