

13. Kirik E., Yurgel'yan T., Krouglov D. On time scaling and validation of a stochastic CA pedestrian dynamics model // Pedestrian and Evacuation Dynamics. 2010. 2011. P. 819-822.
14. Витова Т.Б. Об исследовании пересечения и слияния потоков в модели движения людей SIGMA.CA // Моделирование неравновесных систем. – Красноярск, 2013. С. 19-24.
15. Kirik E., Vitova T. On validation of the SIGMA.CA pedestrian dynamics model with bottleneck flow // Lecture Notes in Computer Science. 2012. V. 7495. P. 719-727.
16. Юргельян Т.Б., Кирик Е.С., Круглов Д.В. О валидации модели движения людей SIGMA.CA по данным фундаментальных диаграмм // Вестник СибГАУ имени академика М.Ф. Решетнева. 2010. №5. С. 162-166.
17. Кирик Е.С., Витова Т.Б., Круглов Д.В. Об исследовании модели движения людей SIGMA.CA с помощью фундаментальных диаграмм в пространствах типа «коридор» // Моделирование неравновесных систем. – Красноярск, 2011. С. 120-126.

On testing the discrete stochastic pedestrian dynamics model SIGMA.CA in different spatial situations

Tat'yana Bronislavovna Vitova, Junior Researcher

Institute of Computational Modeling SB RAS

This paper deals with investigation of discrete stochastic pedestrian dynamics model SIGMA.CA. Variety of case studies when basic people movement phenomena realize were considered. Fundamental diagrams (specific flow versus people density) for some cases are presented.

Keywords: people movement, mathematical model, fundamental diagram.

УДК 630.43

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КЛАСТЕРНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ И ДАННЫХ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Георгий Алексеевич Доррер, д.т.н., профессор

Тел.: 8 913 534 1066, e-mail: g_a_dorrer@mail.ru

Павел Сергеевич Шаталов, аспирант

Тел.: 8 913 594 0584, e-mail: shatalovp@gmail.com

Сибирский Государственный Технологический Университет

<http://www.sibstu.kts.ru>

Обсуждается проблема создания математических моделей лесных пожаров на основе решения уравнений Навье-Стокса с использованием высокопроизводительных кластерных вычислительных систем. Исследуется эффективность алгоритмов моделирования. Приводятся примеры расчёта динамики пожаров.

Ключевые слова: лесные пожары, математическое моделирование, кластерные вычислительные системы

Благодарность. Авторы выражают признательность г-ну Вильяму Меллу (William Mell) из Национального Института Стандартов и Технологий (NIST) США за консультации по системе WFDS.

Введение

В настоящее время в нашей стране остро стоит вопрос о создании информационной системы для прогнозирования лесных пожаров. Такая система должна базироваться на физической модели горения, как наиболее эффективной и точной, и при этом должна позволять моделировать пожары как на основе заранее созданных ГИС-ориентированных баз данных, так и на основе данных, оперативно создаваемых самими пользователями в рамках существующих систем пожарного мониторинга лесов. Система также должна быть способна моделировать лесные пожары вблизи объектов инфраструктуры, учитывая возможность перехода огня на эти объекты. Последнее условие является дополнительным аргументом за применение именно физической модели пожара. В последние годы происходит бурное развитие систем моделирования, основанных на физических моделях горения (physics-based), производящих достаточно подробное вычисление теплофизических параметров, как правило, одного крупного пожара на основе уравнений тепло- и массообмена при горении растительных материалов в пологе леса [1-6, 9-11].



П.С. Шаталов



Г.А. Дорнер

Подготовка исходных данных также является одним из важных этапов моделирования. Если обратиться к системе FARSITE, успешно применяющейся в США, то в качестве исходных данных там выступают растровые карты с несколькими слоями (elevation, slope, aspect), а также растровые карты растительных горючих материалов, где каждому пикселю соответствует определенный тип горючего. Эти данные получены для всей лесной территории США в рамках проекта LANDFIRE.

Что касается России, то подобная работа у нас в массовых масштабах не проводилась, поэтому в качестве исходных данных при решении задач прогнозирования возможно использовать спутниковые данные, а также таксационные описания лесов. При этом немаловажной проблемой является доступность данных. Так, например, спутниковые данные низкого и среднего разрешения находятся в свободном доступе, однако электронные карты более высокого разрешения практически недоступны [8].

В настоящее время доступны данные трех систем мониторинга состояния лесов: ИСДМ-Рослесхоз (Рослесхоз), Космоснимки (фирма СКАНЭКС), Космоплан (МЧС России).

Во всех этих системах используются одни и те же данные дистанционного зондирования Земли низкого разрешения, полученные с одних и тех же спутников – в основном серии NOAA, Terra и LANDSAT.

При этом необходимо учитывать, что затраты на компьютерное моделирование оправданы только при мониторинге и прогнозировании динамики крупных пожаров. В этом случае требования к точности пространственного прогнозирования пожара определяются пространственным разрешением спутниковой аппаратуры. Это позволяет при моделировании использовать усреднённые данные о характеристиках леса и структуре местности [7]. В частности, лес можно рассматривать как однородный по глубине слой с усреднёнными характеристиками лесных горючих материалов.

О системе WFDS

В качестве основы информационной моделирующей системы в данной работе была выбрана свободно распространяемая система WFDS (Wildland Fire Dynamics Simulator), как наиболее перспективная и динамично развивающаяся [6]. Система WFDS

реализует вычислительную гидродинамическую модель (CFD) тепломассопереноса при горении. Данная система базируется на продукте FDS (Fire Dynamics Simulator), разработанном Национальным Институтом Стандартов и Технологий (NIST, США). Авторы данного проекта в процессе работы активно взаимодействовали с сотрудниками NIST во главе с г-ном Вильямом Меллом (William Mell), которые оказали методическую помощь в адаптации данной системы к требованиям отечественных систем охраны лесов.

В WFDS численно решаются уравнения Навье-Стокса для низкоскоростных температурно-зависимых потоков, рассчитываются процессы тепло- и массопереноса, а также распространения дыма при пожаре. Математическая модель WFDS использует дифференциальные уравнения в частных производных, описывающие пространственно-временное распределение температуры и скоростей газовой среды, концентраций компонентов газовой среды (кислорода, продуктов горения и т.д.), давлений и плотностей.

Ниже приводятся основные уравнения системы [6].

Закон сохранения массы:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} = \dot{m}_b^m. \quad (1)$$

Закон сохранения момента импульса:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \mathbf{u}) + \nabla \cdot \rho \mathbf{u} \mathbf{u} + \nabla \cdot \rho = \rho g + f_b + \nabla \cdot \tau_{ij}, \quad (2)$$

где тензор вязких напряжений:

$$\tau_{ij} = \mu \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \delta_{ij} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \right); \quad \delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0 & i \neq j \end{cases}; \quad S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), i, j = 1, 2, 3. \quad (3)$$

Закон сохранения энергии:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho h_s) + \nabla \cdot \rho h_s \mathbf{u} = \frac{Dp}{Dt} + \dot{q}''' - \dot{q}_b''' - \nabla \cdot \dot{q}'' + \varepsilon, \quad (4)$$

где уравнение теплопереноса:

$$\dot{q}'' = -k \nabla T - \sum_{\alpha} h_{s,\alpha} \rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha} + \dot{q}_r'', \quad (5)$$

энергия рассеяния:

$$\varepsilon \equiv \tau_{ij} \cdot \nabla \mathbf{u} = \mu \left(2S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u})^2 \right). \quad (6)$$

Уравнение состояния газа

$$p = \frac{\rho RT}{W}, \quad (7)$$

D - коэффициент диффузии, D_m - дымообразующая способность, f_b - внешняя сила, g - ускорение свободного падения, H_f - удельная массовая теплота сгорания горючего, h_s - энтальпия смеси газов, k - коэффициент теплопроводности, p - давление, q - тепловой поток, t - время, T - температура, $\mathbf{u} = [u; v; w]^T$ - три компоненты скорости,

$\dot{m}_b^m = \sum_{\alpha} \dot{m}_{b,\alpha}^m$ - скорость испарения капель или частиц,

v - скорость распространения фронта горения,

w - молярная масса,

Y - доля компонента, μ - динамическая вязкость, ρ - плотность.

Первые шесть уравнений написанной системы содержат шесть независимых переменных: три компоненты скорости, плотность, температура и давление.

Закон сохранения компонент:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_{\alpha}) + \rho Y_{\alpha} \mathbf{u} = \nabla \cdot \rho D_{\alpha} \nabla Y_{\alpha} + \dot{m}_{\alpha}^m \quad (8)$$

К уравнениям (1) – (8) добавляются соответствующие начальные и граничные условия, описывающие структуру местности, свойства горючего и источник огня.

Для решения краевых задач в указанной системе дифференциальных уравнений в частных производных в WFDS используются метод конечных разностей, метод конечных объемов и метод конечных элементов.

Отображение выходных данных WFDS осуществляется с помощью сопутствующего продукта Smokeview.

Моделирование лесных пожаров вблизи объектов инфраструктуры

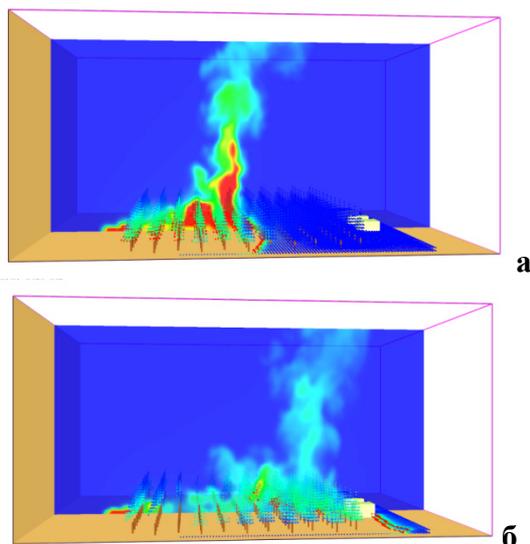


Рис. 1. (а. – моделирование лесного пожара, приближающегося к жилым домам, б – переход пожара на жилые дома)

Моделирование лесных пожаров вблизи объектов инфраструктуры представляет собой важную, но довольно сложную задачу в силу того, что в качестве объектов горения выступают как различные типы растительных горючих материалов, так и материалы, из которых состоят объекты инфраструктуры [3, 6]. В WFDS моделирование таких ситуаций возможно, однако для того, чтобы результаты вычислений были достаточно точными, необходимо задать свойства всех типов горючих материалов, погодные условия, а так же правильно воспроизвести моделируемую территорию.

На рисунке 1 приведены результаты моделирования лесного пожара вблизи объектов, имитирующих жилые дома, полностью сделанные из дуба (690 кг/м^3).

Использование ГИС - ориентированных баз данных для задач моделирования лесных пожаров на основе спутниковых данных

При моделировании лесных пожаров наибольший практический интерес представляет создание трёхмерных моделей участков возгорания на основе спутниковых данных. В силу того, что специальные лесопожарные карты для территории нашей страны практически отсутствуют, в качестве исходных данных могут быть использованы электронные карты высот (DEM), которые, например, могут быть получены в сети Интернет изданных SRTM или ASTER [6,8]. Сложность здесь заключается в том, что свободно распространяемые данные SRTM или ASTER имеют довольно низкое разрешение для территории нашей страны.

В результате приходится проводить интерполяцию пространственных данных, программно увеличивать разрешение, тем самым, уменьшая размер клетки растрового DEM-слоя. В отчёте приводится участок DEM в оригинальном разрешении (размер клетки 71x71 метр) и этот же участок после обработки (размер клетки 4x4 метра).

Такой подход является достаточно грубым, однако, это пока что единственный способ решения проблемы с качеством разрешения исходных данных.

После того, как определён рельеф местности, необходимо указать характеристики горючего. Вся информация о растительности можно взять из таксационных описаний интересующего нас лесного участка. В WFDS существует два подхода к представлению горючего: с помощью отдельных элементов (например, деревьев) или в виде слоя (fuel element model, boundary fuel model). В элементной модели горючее занимает определённый объём в расчётной области (например, кроны деревьев). Для достижения реалистичных результатов моделирования огня необходимо, чтобы размер сетки был достаточно мал.

Граничная модель горючего (boundary fuel model) в основном предназначена для моделирования процесса горения наземной растительности [6]. Однако, если правильно задать характеристики растительности слоя, то с помощью граничной модели можно смоделировать пожар в лесу, представляя лесной массив в виде однородного по глубине слоя. Для описания лесного горючего автоматически подбирается сетка (отдельная от газовой фазы), вдоль нижней границы расчётной области. Пользователь должен указать физические свойства горючего и его размеры в нижней части расчётной области.

В результате пользователю необходимо выбрать определённый участок на DEM-слое, где будет моделироваться лесной пожар, затем на основании данных этого участ-

ка получить входной файл для WFDS, в котором необходимо разместить характеристики слоя лесных горючих материалов, а также объекты инфраструктуры, предварительно решив, какую из описанных выше моделей он будет использовать

Учитывая сказанное выше о привязке моделей пожара к спутниковым снимкам, граничная модель лесных горючих материалов, в которой лесной массив представляется в виде однородного слоя, является в настоящее время единственным реальным способом задания свойств лесного горючего в отечественных системах мониторинга и прогнозирования лесных пожаров. Пример такого расчёта приведён на рисунке 2.



Рис. 2. Наложение модели лесного пожара на спутниковый снимок лесной территории при использовании граничной модели горючего

Использование параллельных вычислений при моделировании лесных пожаров

Процесс компьютерного моделирования лесного пожара на основе физической модели горения является очень требовательным к вычислительным ресурсам системы [4,6,10]. Так, при моделировании лесного пожара на небольшом ровном участке размером 70x70 метров современному персональному компьютеру требуется около 2,5 часов.

буется около 2,5 часов.

Если же речь идёт о моделировании пожаров на основании реальных спутниковых данных, где размеры моделируемых участков измеряются сотнями метров, то вычислительных ресурсов персонального компьютера уже будет катастрофически не хватать. Очевидным решением этой проблемы является применение высокопроизводительных кластерных систем. WFDS поддерживает библиотеки MPI и OpenMP, что позволяет производить расчёты на нескольких узлах суперкомпьютера. Результаты тестирования показали, что наиболее эффективной методикой, по крайней мере, при использовании от 4 до 16 процессоров, является двумерное разбиение исходной расчётной области.

Экспериментальные расчёты проводились на 6 узлах суперкомпьютера Сибирского федерального университета.

Характеристика вычислительного узла:

- 16 Gb оперативной памяти и два четырёхядерных процессора Xeon quad core E5345@2.33 GHz.
- дисковая подсистема IBM DS3400 объемом 20 Тб;
- интерфейс обмена данными- Infini Band 20 Гбит/с.

В ходе вычислений было проведено несколько экспериментов для проверки эффективности использования нескольких расчётных узлов при моделировании лесного пожара с помощью элементной модели. Размеры модельного участка составляли 2000x600 метров. Результаты эксперимента приведены в Таблице 1.

Таблица 1

Количество узлов n	Время выполнения одной итерации, (с)	Ускорение S	Эффективность E=S/p, (%)
1	22,36	1	100
2	11,75	1,90	95
3	9,27	2,41	81
4	7,12	3,12	78,5
5	5,63	3,90	79
6	4,81	4,63	77,1

Как видно из рисунка 3, время выполнения шага итерации с ростом количества узлов заметно уменьшается, тем самым, ускоряя процесс общего моделирования. Од-

нако наблюдается также эффект снижения прироста эффективности с ростом числа узлов, что соответствует известному закону Амдала.

Численное моделирование катастрофического лесного пожара

В данном разделе приводятся результаты численного моделирования одного из наиболее динамичных и опасных лесных пожаров – пожара в каньоне. Пожар, возникший на дне каньона, с большой скоростью распространяется вверх по склонам, при этом наблюдается эффект положительной обратной связи, поскольку потоки горячих газов прогревают слои горючего, расположенного выше фронта горения и на противоположном склоне каньона, способствуя тем самым увеличению скорости распространения пожара.

Такие пожары сильно повреждают лесную растительность и часто приводят к гибели людей, которые не успевают уклониться от встречи с огнём. Так, в 2012 году в Барун-Хемчинском лесничестве республики Тыва при тушении пожара погибли 8 лесных пожарных. Одним из факторов, приведших к их гибели, стал катастрофический характер развития пожаров в горной местности. По этой причине пожары в каньоне ряд авторов относит к числу катастрофических [9].

При моделировании этого пожара использовалась следующая модель горючих материалов:

- глубина слоя – 1,7 м,
- тип горючих материалов – ветви деревьев хвойных пород [11],
- запас горючего – 2,7 кг/м²,
- влажность горючего – 12%,
- теплота сгорания 18500 кДж/кг.

Вычисления производились на суперкомпьютере Сибирского федерального университета, характеристики которого приведены выше. Было использовано 8 узлов кластера, суммарное время счета составило приблизительно 8 часов. В результате расчетов был получен видеофильм процесса распространения огня по склонам каньона, а также процесса образования дымового облака общим объемом около 300 Мбайт.

На рисунках 2 и 3 приводятся образцы кадров фильма, показывающего динамику распространение фронта горения.

Характеристики модели пожара следующие: средняя скорость продвижения фронта горения – 2,4 м/с., температура кромки – 930 градусов, общее модельное время – 1340 секунд.

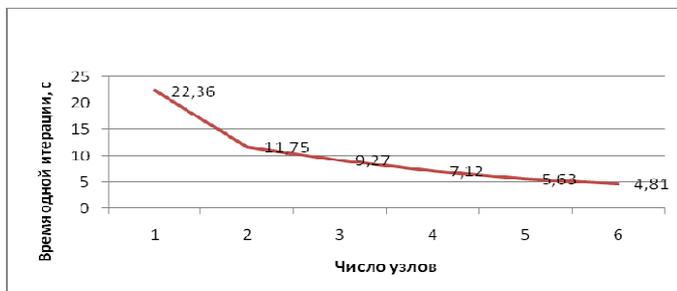


Рис. 3. Зависимость скорости вычислений от числа узлов кластера

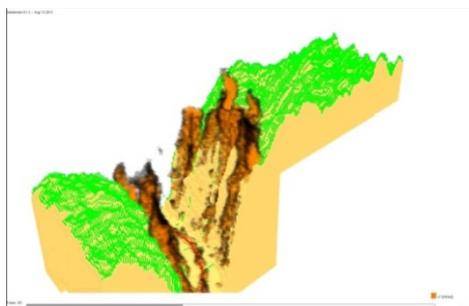


Рис. 4. Фронт горения через 1340 секунд

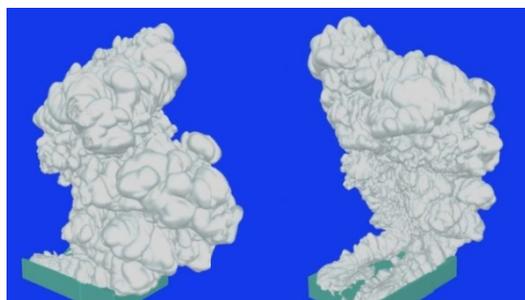


Рис. 5. Дымовое облако через 560 секунд

Заключение

Выводы, которые можно сделать по результатам проделанных расчетов, заключаются в следующем.

1. Моделирование динамики лесных пожаров с помощью системы WFDS позволяют получить достаточно реалистичные значения параметров горения и картины распространения лесного пожара, а также его взаимодействие с объектами инфраструктуры.
2. Использование данных космического мониторинга лесов дает возможность получить исходную информацию об инфраструктуре местности и свойствах лесных горючих материалов, достаточную для прогнозирования динамики пожара с точностью, определяемой разрешением спутниковой аппаратуры.
3. Однако время счета даже с использованием высокопроизводительных вычислительных систем оказывается неприемлемо большим. Поэтому следует обратить внимание на разработку методов, которые кардинально повышают скорость вычислений, например, путем комбинации физического моделирования с моделированием на основе методов гамильтоновой механики [1, 15].

Литература

1. *Dorrer G.A. Wildfire Dynamics Modeling Based on Hamilton Mechanics Methods / G.A. Dorrrer // Fourth Fire Behave and Fuels Conference. July 1-4 St. Petersburg, 2013. Russia: Conference Feature Speakers. P. 11.*
2. *Доррер Г.А. Параллельные алгоритмы моделирования процессов распространения лесных пожаров / Г.А. Доррер, П.С.Шаталов // Хвойные бореальной зоны. 2012. Т. XXX. № 5-6. С. 107-111.*
3. *Берестенькова М.В. Моделирование взаимодействия природных пожаров и объектов защиты / М.В. Берестенькова, Г.А. Доррер, В.С. Коморовский // Хвойные бореальной зоны. 2012. Т. XXX. № 5-6. С. 103-107.*
4. *Вдовенко М.С. Параллельные алгоритмы моделирования процессов распространения лесных пожаров на основе математических моделей различных типов / М.С. Вдовенко, Г.А. Доррер, П.С. Шаталов // Вычислительные технологии. 2013. Т. 18. № 1. С. 3-14*
5. *Shatalov P. Parallel Computation of Forest Fire and its interaction with Infrastructure Objects / P. Shatalov, G.A. Dorrrer // Fourth Fire Behave and Fuels Conference. July 1-4. St. Petersburg, 2013. Russia: Conference abstracts. P. 3*
6. *Mell W. Computer Modeling of Wildland and Wildland-Urban Interface Fires // W. Mell, Fourth Fire Behave and Fuels Conference. July 1-4. St. Petersburg, 2013, Russia: Conference Feature Speakers. P. 14-15.*
7. *Доррер Г.А. О создании информационной базы для систем моделирования и прогнозирования лесных пожаров / Г.А. Доррер, П.С. Шаталов // Международный конгресс «Лесные пожары и изменение климата. Проблемы управления пожарами в природных и культурных ландшафтах Евразии», – Новосибирск, 11-13 ноября 2013 г.: тезисы докладов. С. 80-81*
8. *Шаталов П.С. Использование системы WFDS в задачах моделирования чрезвычайных ситуаций / П.С. Шаталов // Международный конгресс «Лесные пожары и изменение климата. Проблемы управления пожарами в природных и культурных ландшафтах Евразии». – Новосибирск, 11-13 ноября 2013: тезисы докладов. С. 134-135.*
9. *Viegos D.X. Some AspectsofExtremeFireBehavior // FourthFireBehaveandFuelsConference. July 1-4 St. Petersburg, 2013. Russia: Conference Feature Speakers. P. 15.*
10. *Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров / А.М. Гришин. – Томск: ТГУ, 1981. – 278 с.*
11. *Доррер Г.А. Динамика лесных пожаров / Г.А. Доррер. – Новосибирск: СО РАН, 2008. – 404 с.*

Using the cluster computing systems and space monitoring data for forest fires modeling

*Georgiy Alexeevich Dorrrer, Tech. Dr., professor
Siberian State Technological University, Krasnoyarsk, Russia*

*Pavel Sergeevich Shatalov, sub graduate
Siberian State Technological University, Krasnoyarsk, Russia*

The problem of the forest fires mathematical models creating on basis of Navier-Stokes equations with using the cluster computing systems and space monitoring data is discussed. The efficiency of the modeling algorithms is examines. The samples of the forest fire dynamics calculation are given.

Keywords: forest fires, mathematical modeling, cluster computing systems.