

АЛГОРИТМЫ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ НА СУПЕРКОМПЬЮТЕРАХ И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ПРОГРАММ

Аннотация. Разработаны алгоритмы параллельной реализации математической модели лесных пожаров для моделирования процессов их возникновения, развития и распространения с учетом физико-химических процессов. Рассмотрены подходы параллельной реализации и схемы декомпозиции области решения для двумерных случаев. Предложено использовать крупнозернистые методы распараллеливания в SPMD-модели вычислений. Приведены формулы, позволяющие провести теоретические оценки эффективности параллельных программ.

Ключевые слова: параллельная реализация, принципы, математическая модель, лесной пожар, суперкомпьютер.

ВВЕДЕНИЕ

Лесной пожар — сложное нестационарное физико-химическое явление [1–3], всестороннее теоретико-экспериментальное исследование которого очень актуально. Отметим, что экспериментальное изучение лесных пожаров в природных условиях сопряжено с большими трудностями, поэтому предпочтительно математическое моделирование данного явления [1–4].

В работе [5] предложен новый алгоритм моделирования катастроф, оценивающий их вероятность, время индукции t^* и время прогноза t_{pr} на ЭВМ. В случае, если $t_{pr} > t^*$, математическую модель следует заменять экспертной системой [5], однако проводить математическое моделирование лесных пожаров все же необходимо, так как в базе знаний конкретной экспертной системы должна содержаться информация [6], которую можно получить в результате многовариантных по входным данным и параметрам задачи численных расчетов. Для прогноза времени опасного воздействия лесного пожара на объект (например, населенный пункт) надо оценить период индукции катастрофы t^* — время распространения фронта лесного пожара от очага возгорания до интересующего объекта, которое, в свою очередь, можно определить в результате численного решения задачи о распространении лесного пожара t_{pr} . При этом необходимо, чтобы t_{pr} было значительно меньше t^* [5]. При решении этих задач возникают проблемы большой вычислительной нагрузки и значительного объема обрабатываемых данных, что обуславливает необходимость применения многопроцессорных вычислительных систем (МВС) и разработки соответствующих принципов распараллеливания общей математической модели лесных пожаров, оценки времени выполнения, ускорения и эффективности работы параллельных программ.

КРАТКИЙ ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ И ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Существуют различные типы МВС [7]. Кластерные вычислительные системы представляют собой недорогой аналог массивно параллельных систем. В случае неоднородности (вычислительной системы, параллельного алгоритма или структуры данных) возникает проблема неравномерного распределения данных по процессорным узлам вычислительной системы (балансировка вычисли-

тельной нагрузки) [8]. Существует мелкозернистый и крупнозернистый параллелизм [9]. Последний, как правило, применяется при решении задач теории лесных пожаров. В настоящее время МВС (в том числе и кластерные вычислительные системы) широко используются в различных областях науки [10–13].

Модель распространения лесного пожара предназначена для описания его развития заданным начальным сценарием и входными параметрами. Отметим, что данные, описывающие реальный сценарий лесного пожара, обычно характеризуются высоким уровнем неопределенности [14]. Кроме того, существуют входные параметры, которые имеют пространственно-временные зависимости, что приводит к менее точным прогнозным оценкам. В [14] предлагается для преодоления неопределенности и увеличения точности объединять модель распространения лесного пожара со стохастической моделью ветра. При этом используются поля ветра, предсказанные метеорологическими моделями, для учета влияния направления и скорости ветра в зависимости от топографии ландшафта. В работе [14] в качестве симулятора ветра применяется комплекс WindNinja [15, 16]. Для решения проблемы ресурсоемкости в [14] предложено разбивать области решения и проводить расчет независимо для каждой подобласти. Однако это приводит к определенным проблемам, связанным с граничными эффектами, которые являются дополнительной причиной неопределенности. Поэтому рекомендуется применять разделение на подобласти с их частичным пересечением. Для моделирования распространения лесного пожара используется симулятор FARSITE [17].

Методология, основанная на парадигме DDDAS [18], разработана в целях калибровки (с помощью генетического алгоритма) входных параметров согласно реальным наблюдениям за развитием лесных пожаров. Такие калиброванные параметры используются, чтобы обеспечить качественное прогнозирование для следующего временного интервала. Несколько методов искусственного интеллекта применяется в целях поиска оптимального подхода [18] для оценки такого параметра, как ветер, а также используется симулятор распространения лесного пожара FARSITE [17], основанный на модели Ротермела [19].

В работе [20] проведено сравнение эмпирических моделей распространения фронта лесного пожара. Показано, что модель Ротермела, описывающая скорость распространения прямого фронта, комбинирована с моделью огибающей, которая, в свою очередь, включает уравнение Гамильтона–Якоби.

Веб-ориентированная географическая информационная система Virtual Fire для контроля лесных пожаров описана в [21]. Патрульные самолеты и транспортные средства используют устройства слежения и отправляют координаты пожара непосредственно в систему. Кроме того, применяются камеры, передающие изображения наиболее пожароопасных областей в графический интерфейс системы. Последняя, в свою очередь, отображает на географической карте место вероятного возникновения лесного пожара. Информационная поддержка осуществляется в реальном времени от удаленных автоматических метеостанций и систем численного прогноза погоды.

В системе Virtual Fire используется интерфейс прикладного программирования ArcGIS ESRI (API). Компоненты программного обеспечения ArcCatalog и ArcMap применяются для генерации и управления всеми необходимыми пространственными данными, которые загружены в базу геоданных и изданы как веб-службы посредством сервера ArcGIS. В системе также использован симулятор FARSITE [17]. С помощью протокола FIREMON6, где содержатся основные принципы проведения полевых работ и выборки, подготовлены необходимые входные данные [22].

В работе [23] дана оценка влияния влагосодержания лесного горючего материала (ЛГМ) (трава или кустарник) на поведение низового лесного пожара. Подход, используемый в этом исследовании, основан на численном моделировании, выполненном на подробной физической модели лесного пожара, в результате получены и проанализированы временные и пространственные характеристики лесного пожара, параметры проникновения его фронта, потери массы, а также скорости распространения. Численные результаты сравнивались с опубликованными эмпирическими данными. При численном моделировании рассматривался гомогенный слой растительности (трава).

Новый подход для разработки простой модели распространения установившегося лесного пожара, основанный на классической теории огибающих, представлен в [24]. Исследованная здесь модель базируется на принципе волны Гюйгенса: каждая точка на инициализированном фронте становится источником локального возгорания и распространения пожара в форме эллипса и на следующем временном интервале форма фронта пожара определяется огибающей этих эллипсов.

В работе [25] предложена новая двумерная модель (усовершенствованная модификация модели из [26]) распространения фронта пожара, основанная на клеточных автоматах.

Двухэтапный гибридный алгоритм прогнозирования распространения фронта лесного пожара с использованием библиотеки передачи сообщений Message Passing Interface (MPI) и интерфейса OpenMP представлен в [27]. Разработана параллельная версия симулятора FARSITE [17]. В результате получена значительная экономия машинного времени при прогнозировании распространения фронта лесного пожара.

В статье [28] описано соотношение двух известных алгоритмов моделей распространения фронта лесного пожара с архитектурой графических ускорителей (GPU) и разработан новый вариант. Все модели базируются на клеточных автоматах, запрограммированных в структуре CUDA, развитой NVIDIA. Новый алгоритм, предназначенный для архитектуры GPU, достигает ускорения более чем в 200 раз по сравнению с последовательным выполнением.

Анализ рассмотренных литературных источников позволяет сделать вывод о том, что в настоящее время математические модели лесных пожаров с учетом физико-химических процессов практически не используются. Подавляющее большинство моделей относятся к геометрическим, эмпирическим и клеточным автоматам. Особенно распространена модель Ротермела, реализованная в виде программного решения FARSITE [17]. Поэтому актуальны разработка и реализация физически содержательных математических моделей.

Цель настоящей работы — разработать основные принципы параллельной реализации на МВС комплексной математической модели лесных пожаров (процессов возникновения, развития и распространения) с учетом физико-химических процессов.

ОБЩАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛЕСНОГО ПОЖАРА

В работе [4] представлена общая математическая модель лесных пожаров, отражающая современное состояние в данной области, и уточненная по сравнению с [1–3] схема физико-химических процессов в зоне лесного пожара и в приземном слое атмосферы, а также замкнутая система уравнений для математического моделирования. Лес в данной модели рассматривается как многофазная многоярусная пористо-дисперсная, пространственно-неоднородная среда [4].

В основной системе уравнений представлены законы: сохранения массы газодисперсной фазы, сохранения количества движения газодисперсной фазы в проек-

циях на оси декартовой системы координат, сохранения энергии в газодисперсном потоке, сохранения и изменения массы отдельных компонент в газодисперсном потоке, сохранения энергии в конденсированной фазе, а также уравнения кинетики пиролиза и сушки ЛГМ, уравнения баланса массы коксика и пепла и ряд других соотношений [4]. Например, закон сохранения энергии для газовой фазы в лесном массиве представлен уравнением теплопроводности с учетом конвективного теплопереноса и химического реагирования [1]

$$\rho_g c_g \left(\frac{\partial T_g}{\partial t} + U \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) = \lambda_g \frac{\partial^2 T_g}{\partial x^2} + q_5 R_5 (1 - v_5) - \frac{\alpha}{\Delta h} (T - T_e) - \alpha_v (T - T_s),$$

где T, ρ, c, λ — температура, плотность, теплоемкость и теплопроводность соответственно; U — скорость ветра (горизонтальная компонента); q_5 — тепловой эффект реакции окисления газообразных продуктов пиролиза; v_5 — доля теплоты, поглощенная костяком лесного массива; R_5 — массовая скорость реакции окисления газообразных продуктов пиролиза; α — коэффициент теплоотдачи; α_v — объемный коэффициент теплоотдачи; Δh — высота лесного массива; x — пространственная координата; t — временная координата. Индексы g, e, s — параметры газовой фазы в лесном массиве, воздухе и почве соответственно. Данное уравнение справедливо для одномерного случая и используется при геометрической декомпозиции области решения по полосам.

Общая математическая модель лесных пожаров [4] позволяет разработать согласованные с ней частные модели расчета сушки слоя ЛГМ для прогноза его пожарного созревания [29] и вероятности возникновения очагов и распространения лесных пожаров, расчетов возгорания слоя ЛГМ [30] и выбросов поллютантов для оценки экологических последствий лесных пожаров. Поскольку модель сложна и численная реализация требует больших затрат машинного времени, объема оперативной памяти и мощности вычислителя, целесообразно разработать принципы ее параллельной реализации.

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ОБЩЕЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НА МВС

Общие замечания. Рассматриваемые задачи теории лесных пожаров в настоящее время нецелесообразно распараллеливать средствами мелкозернистого распараллеливания, так как в этом случае в работе параллельной программы время межпроцессорных обменов будет сравнимо, а может быть, и превысит время расчетов, что повлечет за собой крайне низкую эффективность. Более того, применение в качестве вычислителя кластерных систем станет невозможным, поскольку потребуются вычислительная система с очень высокими показателями работы коммуникационной подсистемы. Поэтому в настоящей работе рассмотрено крупнозернистое распараллеливание.

Проблемы численной реализации рассматриваемых задач теории лесных пожаров связаны с обеспечением точности и устойчивости решений систем нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных. С одной стороны, это предполагает уменьшение размеров шагов дискретизации и увеличение разрядности, что усложняет алгоритм и требует больших вычислительных ресурсов и, как следствие, распараллеливания вычислительных операций. С другой стороны, применяются неявные численные методы (например, итерационно-интерполяционный [31]), что, в свою очередь, затрудняет распараллеливание.

Физико-математическая декомпозиция задачи по составляющим подпроцессам. Одним из подходов к организации распараллеливания задач теории лесных пожаров является декомпозиция исследуемого сложного физического

явления лесного пожара по составляющим его подпроцессам. Физическую декомпозицию можно применять для решения в сопряженной постановке задачи моделирования сложного лесного пожара. Примером такой задачи является сложный верховой пожар, когда снизу он усиливается низовым лесным пожаром, а сверху осуществляется сопряженный тепло- и массообмен с приземным слоем атмосферы [1].

В каждом блоке можно использовать более глубокий уровень распараллеливания любого отдельно взятого подпроцесса какого-либо физико-математического процесса. Отметим, что очень важна попытка отыскать в самой задаче так называемый «естественный параллелизм» и результат этого поиска во многом зависит от того, какие стороны физического процесса (лесного пожара) выделяет исследователь.

Геометрическая декомпозиция области решения. Другим подходом к организации распараллеливания задач теории лесных пожаров является метод геометрической декомпозиции области решения задачи, который позволяет существенно снизить временные затраты на получение результата, а также решить проблему разделения всего объема данных и рассылки на различные узлы МВС. Таким образом, область интегрирования разбивается на подобласти с одновременным вычислением в каждой из них с последующей «сшивкой» решений [32]. Важно, что геометрическая декомпозиция существенно зависит от математической постановки задачи, вида систем уравнений, используемых численных методов. Наиболее полный перечень требований представлен в [33, 34]. Отметим, что ключевым моментом являются однородности математической модели, постановки задачи, алгоритма и информационной среды.

В общем случае лесной пожар представляет собой трехмерный объект, однако для понимания сути физического явления, а также принятия конкретных решений по результатам математического моделирования достаточно иметь представления о его распространении, рассмотрев два частных 2D-случая: распространение в пространственно однородном по координате y лесном массиве в плоскости Oxz , а также в плоскости Oxy , когда по координате z проводится осреднение.

Рассмотрим 2D-случай в плоскости Oxz . Предполагается, что ось x представляет направление ветра, а значит, распространение фронта лесного пожара, тогда можно применить следующую геометрическую декомпозицию: в плоскости Oxz параллельно направлению ветра разрежем лесной массив по высоте древостоя на одинаковые по толщине полосы и в каждой из них организуем свой вычислительный процесс [35, 36] (в общем случае толщина полос может быть неодинаковой, так как разные ярусы леса могут иметь различные толщины [1–3]). Схема декомпозиции области решения представлена на рис. 1.

Конвейерный алгоритм распараллеливания. В случае преобладания распространения фронта лесного пожара в каком-либо направлении возможен также способ геометрической декомпозиции, при котором область решения разбивается на несколько крупных подобластей — полос, перпендикулярных направлению движения фронта лесного пожара. Например,

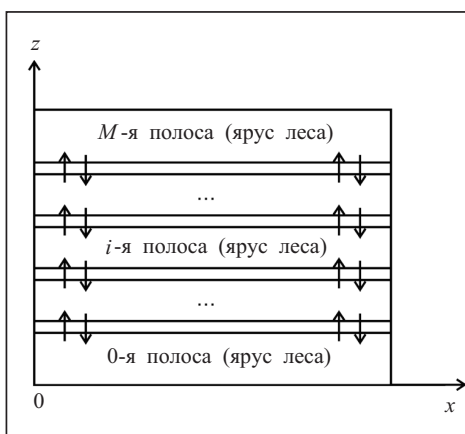


Рис. 1. Схема декомпозиции области решения и межпроцессорных обменов при параллельной реализации: 2D-случай в плоскости Oxz

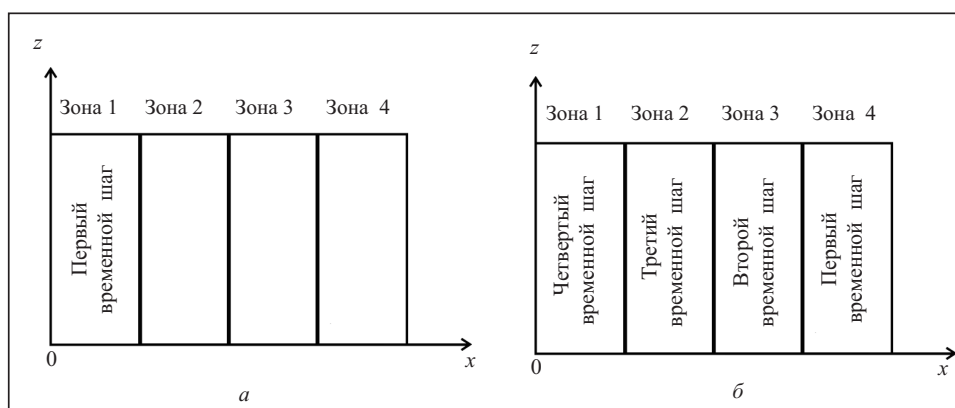


Рис. 2. Конвейерный алгоритм распараллеливания на первом (а) и на четвертом (б) этапах

в рассматриваемой области решения можно выделить участки, соответствующие различным типам леса, дорогам, просекам, зонам лесного массива, по которым фронт лесного пожара еще не прошел. В этом случае на первом этапе вычислений рассчитывается решение на первом временном шаге в зоне 1, на втором этапе рассчитывается решение на втором временном шаге в зоне 1 и на первом в зоне 2 и т.д., т.е. выполняется конвейерный вариант расчета. На заключительных этапах процесс идет как бы в обратном направлении — сначала вычисления выполняются на всех процессорах, а на последнем этапе один процессор обрабатывает последний временной шаг в последней зоне. На рис. 2 представлена декомпозиция области решения при конвейерной параллельной реализации для области Oxz , на первом (рис. 2, а) и четвертом (рис. 2, б) этапах для случая, когда МВС содержит (либо задействовано в расчетах) только четыре процессора.

Ступени вычислительного конвейера можно построить таким образом, что каждая из них будет иметь свою вычислительную нагрузку либо нагрузка распределится одинаково [37]. Заметим, что не следует в таком случае выделять много геометрических зон, так как увеличится время простаивания процессоров МВС, которые не используются на первых и заключительных этапах вычислительного процесса. Данный алгоритм распараллеливания более эффективен на МВС с малым числом процессоров. Кроме того, этот алгоритм актуален для распараллеливания при использовании многоядерных и графических процессоров [38].

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ MPI-ПРОГРАММ

Параллельная реализация в системе MPI. В Российской Федерации существует суперкомпьютерный консорциум университетов и развивается Национальная суперкомпьютерная технологическая платформа. Так, в Томске два университета располагают вычислительными ресурсами параллельной архитектуры: в Томском государственном университете установлен суперкомпьютер СКИФ Cyberia со средствами распараллеливания Message Passing Interface (MPI) [38], в Кибернетическом институте Томского политехнического университета установлен вычислительный кластер СКИФ-2, включающий 39 двухпроцессорных узлов с общим количеством вычислительных ядер порядка 320 (2,9 ГГц).

Система MPI предполагает две модели вычислений: MPMD (Multiple Program — Multiple Data) и SPMD (Single Program — Multiple Data) [38]. На практике чаще применяется SPMD-модель программирования. Для оптимального отображения структуры задачи на топологию МВС следует воспользоваться механизмом виртуальных топологий [38], который обеспечивает система MPI.

Применяя подпрограммы библиотеки передачи сообщений MPI, для построения алгоритмов на языке программирования C используем следующие основные процедуры: MPI_Scatter() для рассылки данных; MPI_Sendrecv() для приема-передачи данных (объединенный вариант); MPI_Gather() для сбора данных. Базовый алгоритм параллельной программы включает рассылку и сбор данных корневым процессом и практически независимую обработку данных в каждой ветви параллельной программы.

Оценки времени выполнения, ускорения и эффективности параллельных программ. Оценку общего времени, необходимого для реализации комплексного математического вычислительного эксперимента, можно определить

$$T_M^{CE} \approx n_i n_e n_p n_l n_t n_0 T_M + T'_M.$$

Здесь T_M — время реализации базового элемента вычислительного алгоритма на МВС, содержащей M процессоров, T'_M — время, необходимое на выполнение рассылки исходных данных и сбор результатов, а остальные множители соответствуют следующим операциям [39]:

- проведение n_i внутренних итераций для решения линейных подсистем в сеточных подобластях (полосах);
- проведение n_e внешних итераций между подобластями (ярусы либо полосы лесного массива) для решения полной алгебраической системы в сеточной области решения;
- проведение n_p итераций по различным физическим процессам (например, когда рассматривается распространение верхового лесного пожара по нескольким ярусам лесного массива либо по однородным полосам лесного массива);
- проведение n_l нелинейных итераций, так как свойства коэффициентов уравнений зависят от искомым функций процесса;
- расчет n_t временных шагов;
- реализация n_0 вариантов расчетов, которые соответствуют различным сценариям распространения верхового пожара (многовариантный расчет по входным данным и параметрам задачи).

Если при распределении данных по узлам использована некоторая эвристика, то на часть узлов попадут так называемые лишние данные [40], время обработки которых добавим к T'_M . Ускорение определяется по формуле [41]

$$S_M^{CE} = \frac{T_0^{CE}}{T_M^{CE}} = \frac{M}{1 + \alpha_M^{CE}},$$

где T_0^{CE} — время последовательной реализации комплексного математического вычислительного эксперимента на однопроцессорной вычислительной технике, α_M^{CE} — потери на коммуникации и дополнительные итерации. Эффективность определится как [41]

$$E_M^{CE} = \frac{T_0^{CE}}{MT_M^{CE}}.$$

ОПИСАНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Характеристика лесного пожара. Фронт лесного пожара имеет сложную структуру, в которой можно выделить зоны нагрева, сушки, высокотемпературного испарения терпеновых соединений (в хвойных лесах), пиролиза ЛГМ, горения газообразных горючих продуктов пиролиза, а также догорания коксового остатка [1–3]. Схема фронта лесного пожара представлена на рис. 3. Меха-

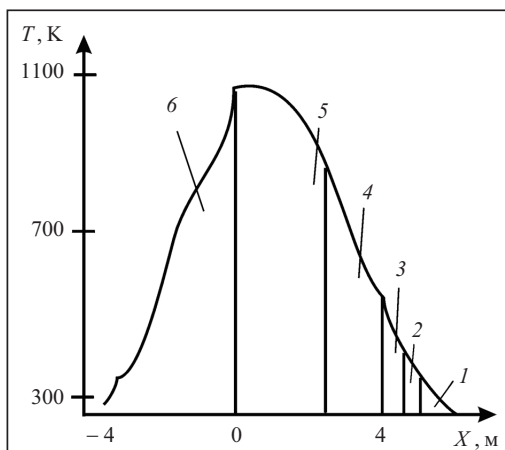


Рис. 3. Структура фронта лесного пожара: 1 — нагрев ЛГМ, 2 — сушка (испарение влаги), 3 — высокотемпературное испарение терпеновых соединений, 4 — пиролиз ЛГМ, 5 — горение газообразных продуктов пиролиза, 6 — догорание коксового остатка ЛГМ

низмы передачи тепла при лесном пожаре — это теплопроводность, излучение и конвекция [4]. Далее приведены результаты вычислительных экспериментов с параллельной программой. Данные расчеты рассмотрены для задачи распараллеливания физических процессов и последующего геометрического распараллеливания на более низком уровне. Описание представлено для ключевых этапов возникновения лесного пожара.

Инертный прогрев слоя ЛГМ.

Распараллеливание вычислительного процесса для определения поля температур на стадии инертного прогрева проводится в соответствии с принципом геометрической декомпозиции области решения (см. рис. 1). На каждой итерации осуще-

ствляется обмен информационными пакетами, содержащими значения температур в приграничных зонах.

На рис. 4 представлено типичное распределение температуры по длине лесного массива (одномерное приближение). Очаг возгорания задан повышенной температурой на левой границе расчетной области.

Алгоритм расчета нестационарного поля температуры, предложенный в двумерном случае, можно применить при разработке трехмерных алгоритмов. В данном случае будет использоваться топология «решетка» или «куб» [38].

Сушка слоя ЛГМ. В процесс лесного пожара огромное значение имеет испарение влаги из слоя ЛГМ. В [1–4] приведено выражение для скорости испарения влаги из хвоинок и тонких веточек во время лесного пожара. Процесс сушки слоя ЛГМ в каждой точке пространства описывается кинетической схемой [1–4]

$$\rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = - \frac{k_2 \rho_2 \varphi_2}{\sqrt{T}} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right),$$

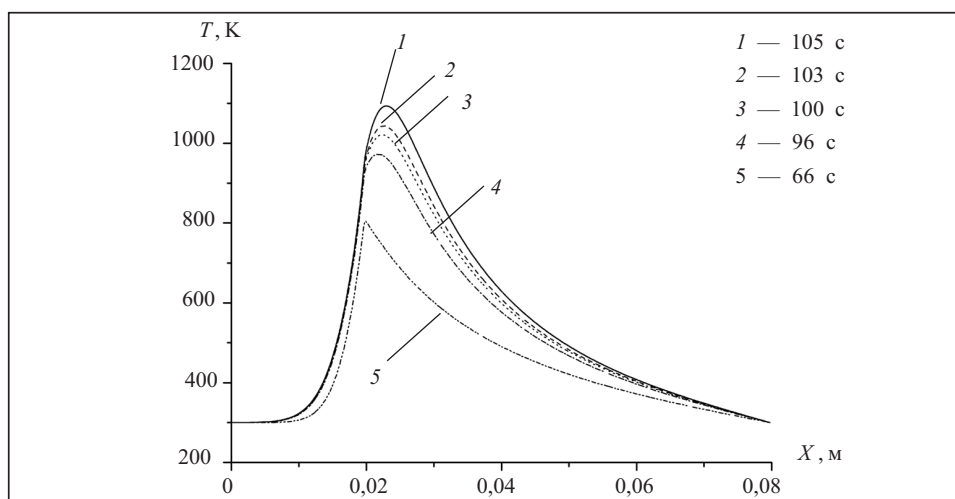


Рис. 4. Типичное температурное распределение в очаге возгорания в лесном массиве (одномерное приближение) на стадиях инертного прогрева и зажигания (рост температуры вследствие тепловыделения от химической реакции)

где ρ_2 — истинная плотность воды, φ_2 — доля объема влаги в ЛГМ, k_2 — предэкспоненциальный множитель для процесса сушки, E_2 — энергия активации, R — универсальная газовая постоянная, T — температура в слое ЛГМ, t — временная координата.

При разработке параллельной программы можно использовать допущение о независимости процесса высыхания слоя ЛГМ на различных участках леса. В данном случае применяется SPMD-модель вычислений (распараллеливание по данным), когда в каждой ветви параллельной программы обрабатывается своя «порция» пространственных точек слоя ЛГМ. На рис. 5 и 6 представлены результаты выполнения параллельной программы.

Пиролиз слоя ЛГМ. В [1–4] представлена кинетическая схема термического разложения слоя ЛГМ

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = -k_3 \rho_3 \varphi_3 \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right),$$

где ρ_3 — истинная плотность сухого органического вещества ЛГМ, φ_3 — доля объема сухого органического вещества в ЛГМ, k_3 — предэкспоненциальный множитель для процесса термического разложения, E_3 — энергия активации.

Моделирование проводится аналогично подходу к исследованию высыхания слоя ЛГМ, а результаты работы параллельной программы аналогичны этапу сушки слоя ЛГМ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследования решена важная научно-практическая задача: разработаны основные принципы параллельной реализации общей математической модели лесных пожаров с учетом физико-химических процессов на МВС. Разработка параллельного программного комплекса моделирования лесного пожара на основе представленных в данной работе принципов и подходов к распараллеливанию существенно повысит уровень исследований и создаст условия для решения многих задач теории лесных пожаров, которые ранее не решались ввиду требований огромных затрат вычислительных ресурсов и объемов оперативной памяти.

Разработанные алгоритмы выгодно отличаются от ранее опубликованных результатов. Во-первых, рассмотрена параллельная реализация математической модели, которая описывает все стадии лес-

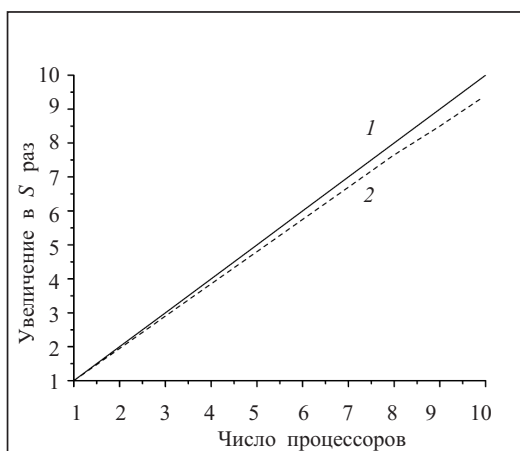


Рис. 5. Результаты выполнения параллельной программы (ускорение): 1 — теоретическая оценка в условиях отсутствия межпроцессорных обменов, 2 — вычислительный эксперимент

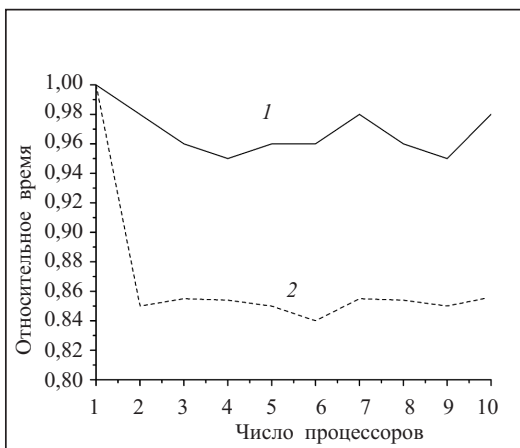


Рис. 6. Относительное время выполнения параллельной программы (ветви 1–10): 1 — процесс высыхания, 2 — все процессы

ного пожара. Во-вторых, параллельные алгоритмы разработаны таким образом, чтобы обеспечить практически независимую обработку информационных пакетов в каждой ветви программы, что повышает эффективность параллельной программы, которая приближается к теоретическим пределам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. — Новосибирск: Наука, 1992. — 407 с.
2. Гришин А.М. Физика лесных пожаров. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1994. — 218 с.
3. Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them. — Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University, 1997. — 390 p.
4. Гришин А.М. Общая математическая модель лесных пожаров и ее приложения для охраны и защиты лесов // Сопряженные задачи механики и экологии: Избранные докл. Междунар. конф. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2000. — С. 88–137.
5. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. — 122 с.
6. Джарратано Дж., Райли Г. Экспертные системы: принципы разработки и программирование. — 4-е изд. — М.: Вильямс, 2007. — 1152 с.
7. Богданов А.В., Корхов В.В., Мареев В.В., Станкова Е.Н. Архитектура и топологии многопроцессорных вычислительных систем. Учебное пособие. — М.: «ИНТУИТ.РУ Интернет-Университет Информационных Технологий», 2004. — 176 с.
8. Вшивков В.А., Краева М.А., Малышкин В.Э. Параллельные реализации метода частиц // Программирование. — 1997. — № 2. — С. 39–51.
9. Бандман О.Л. Мелкозернистый параллелизм в вычислительной технике // Программирование. — 2001. — № 4. — С. 5–20.
10. Falfushinsky V.V. Parallel processing of multicomponent seismic data // Cybernetics and Systems Analysis. — 2011. — 47, N 2. — P. 330–334.
11. Andon P.I., Doroshenko A. Yu., Zhereb K.A. Programming high-performance parallel computations: Formal models and graphics processing units // Cybernetics and Systems Analysis. — 2011. — 47, N 4. — P. 659–668.
12. Sergienko I.V., Molchanov I.N., Khimich A.N. Intelligent technologies of high-performance computing // Cybernetics and Systems Analysis. — 2010. — 46, N 5. — P. 833–844.
13. Glybovets M.M., Gorohovskiy S.S., Stukalo M.S. Extension of scala language by distributed and parallel computing tools with linda coordination system // Cybernetics and Systems Analysis. — 2010. — 46, N 4. — P. 624–629.
14. Sanjuan G., Brun C., Margalef T., Cortes A. Wind field uncertainty in forest fire propagation prediction // Procedia Computer Science. — 2014. — 29. — P. 1535–1545.
15. Forthofer J.M., Shannon K., Butler B.W. Simulating diurnally driven slope winds with windninja // Proceedings of 8th Symposium on Fire and Forest Meteorological Society (KalisPELL, Montana, 13–15 Oct., 2009). — 2009. — 13 p.
16. Forthofer J.M., Shannon K., Butler B.W. Initialization of high resolution surface wind simulations using nws gridded data // Proceedings of 3rd Fire Behavior and Fuels Conference (Spokane, Washington, 25–29 Oct., 2010). — 2010. — P. 5.
17. Finney M.A. FARSITE, Fire area simulator-model development and evaluation // Res. Pap. RMRS-RP-4, Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 1998. — 47 p.
18. Brun C., Artes T., Margafel T., Cortes A. Coupling wind dynamics into DDDAS forest fire propagation prediction system // Procedia Computer Science. — 2012. — 9. — P. 1110–1118.
19. Rothermel R.C. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels // USDA Forest Service. Researcher Paper INT-115. — 1972 — 40 p.
20. Sero-Guillaume, Ramezani S., Margerit J., Calogine D. On large scale forest fires propagation models // International Journal of Thermal Sciences. — 2008. — 47. — P. 680–694.
21. Kalabokidis K., Athanasios N., Gagliardi F., Karayiannis F., Palaiologou P., Parastatidis S., Vasilakos Ch. Virtual fire: A web-based GIS platform for forest fire control // Ecological Informatics. — 2013. — 16. — P. 62–69.

22. Palaiologou P., Kalabokidis K., Kyriakidis P. Forest mapping by geoinformatics for landscape fire behaviour modelling in coastal forests, Greece // *International Journal of Remote Sensing*. — 2013. — **34**. — P. 4466–4490.
23. Morvan D. Numerical study of the effect of fuel moisture content (FMC) upon the propagation of a surface fire on a flat terrain // *Fire Safety Journal*. — 2013. — **58**. — P. 121–131.
24. Glasa J., Halada L. On elliptic model for forest fire spread modeling and simulation // *Mathematics and Computers in Simulation*. — 2008. — **78**. — P. 76–88.
25. A. Hernández Encinas, L. Hernández Encinas, S. Hoya White, A. Martín del Rey., G. Rodríguez Sánchez. Simulation of forest fire front using cellular automata // *Advances in Engineering Software*. — 2007. — **38**, N 6. — P. 372–378.
26. Karafyllidis I., Thanailakis A. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata // *Ecological Modelling*. — 1997. — **99**. — P. 87–97.
27. Artes T., Cencerrado A., Cortes A., Margafel T. Relieving the effect of uncertainty in forest fire spread prediction by hybrid MPI-OpenMP parallel strategies // *Procedia Computer Science*. — 2013. — **18**. — P. 2278–2287.
28. Sousa F.A., dos Reis R.J.N., Pereira J.C.F. Simulation of surface fire fronts using fireLib and GPUs // *Environmental Modelling & Software*. — 2012. — **38**. — P. 167–177.
29. Grishin A.M., Baranovskiy N.V. Comparative analysis of simple models of drying of the forest combustibles, including the data of experiments and natural observations // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. — 2003. — **76**, N 5. — P. 166–169.
30. Kuznetsov G.V., Baranovskiy N.V. Focused Sun's rays and forest fire danger: new concept // *Proceedings of SPIE*. — 2013. — Paper 889011. — doi:10.1117/12.2033929.
31. Гришин А.М., Берцун В.Н., Зинченко В.И. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения. — Томск: Изд-во Том. ун-та, 1981. — 160 с.
32. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Аддитивные схемы для задач математической физики. — М.: Наука, 2001. — 320 с.
33. Ковеня В.М., Тарнавский Г.А., Черный С.Г. Применение метода расщепления в задачах аэродинамики. — Новосибирск: Наука, 1990. — 245 с.
34. Хмельнов Д.Е. Улучшенные алгоритмы решения разностных и q -разностных уравнений // *Программирование*. — 2000. — № 2. — С. 70–78.
35. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. — М.: Эдиториал УРСС, 2003. — 784 с.
36. Ngiamsoongnirn K., Juntasaro E., Juntasaro V., Uthayopas P. A parallel semi-coarsening multigrid algorithm for solving the Reynolds-averaged Navier–Stokes equations // *Proceedings of International Conference HPCAsia-04*. IEEE Computer Society. — 2004. — P. 258–266.
37. Clematis A., D'Agostino D., Gianuzzi V. Load balancing and computing strategies in pipeline optimization for parallel visualization of 3D irregular meshes // *EuroPVM/MPI. Lecture Notes in Computer Science*. — 2005. — **3666**. — P. 457–466.
38. Корнеев В.Д. Параллельное программирование в MPI. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2000. — 213 с.
39. Ильин В.П. О стратегиях распараллеливания в математическом моделировании // *Программирование*. — 1999. — № 1. — С. 41–46.
40. Аветисян А.И., Гайсарян С.С., Самоваров О.И. Возможности оптимального выполнения параллельных программ, содержащих простые и итерированные циклы, на неоднородных параллельных вычислительных системах с распределенной памятью // *Программирование*. — 2002. — № 1. — С. 38–54.
41. Барановский Н.В. Ландшафтное распараллеливание и прогноз лесной пожарной опасности // *Сибирский журнал вычислительной математики*. — 2007. — **10**, № 2. — С. 141–152.

Поступила 10.04.2014