

Прогноз лесной пожарной опасности на базе модельной концепции: математические основы и принципы параллельной реализации

Н.В. Барановский

Предлагается модельная концепция прогноза лесной пожарной опасности. В качестве входной информации служат данные из программных комплексов, реализующих модели атмосферы, систему усвоения данных об уровне антропогенной нагрузки (С.У.Д.А.Н.) и математические модели зажигания лесного горючего материала (ЛГМ) антропогенными (нагретые частицы) и природными (наземный грозовой разряд) источниками огня. Реализация концепции выполняется в рамках подхода ландшафтного распараллеливания.

1. Введение

Лесные пожары наносят огромный экономический и экологический ущерб. В настоящее время широко известны следующие методики прогноза лесной пожарной опасности – канадская [1] и американская [2] системы, европейская система [3] и методика на основе критерия Нестерова [4], которая с 1999 года используется в качестве ГОСТа [5] на территории РФ. Большинство методов базируется на метеоданных, которые получают с метеостанций или с помощью спутникового зондирования [6]. Ни первый, ни второй варианты не позволяют проводить прогнозные расчеты, а только позволяют оценивать текущую пожарную опасность лесопокрытых территорий.

2. Модельная концепция прогноза лесной пожарной опасности

Анализ обстановки в области охраны лесов от пожаров позволяет выделить основные узкие места существующего подхода к прогнозированию лесной пожарной опасности: 1) существующие методы прогноза лесной пожарной опасности не учитывают физико-химические процессы сушки и зажигания слоя ЛГМ, которые являются одними из определяющих в наступлении пожарной опасности; 2) на больших малоосвоенных территориях, как правило, имеется лишь редкая и неразвитая сеть метеостанций, а в настоящий момент именно эта информация используется для оценки пожарной опасности по существующему ГОСТу; 3) факторы антропогенной нагрузки и грозовой активности должным образом не учитываются; 4) в системе охраны лесов от пожаров отсутствует вычислительный центр для централизованной обработки исходной информации и выработки прогноза.

Чтобы ликвидировать данные недостатки предлагается модельная концепция прогноза лесной пожарной опасности [7]. Входная информация по метеопараметрам генерируется в программах, реализующих глобальные [8] или региональные модели атмосферы [9], и поступает в качестве входной в подсистемы оценки вероятности возникновения лесных пожаров по метеоусловиям и сценариям зажигания. Применимость моделей ограничивается областью прогноза возникновения лесных пожаров с целью оценки времени лесопожарного созревания слоя ЛГМ. Данная идея предложена автором в 2003 году [10]. Отметим, что годом позже такой же подход был предложен в работе американских исследователей [11]. Следует разработать систему усвоения данных об уровне антропогенной нагрузки (С.У.Д.А.Н.) [12] на контролируемой лесопокрытой территории, чтобы учесть пространственно-временной характер антропогенной нагрузки. Информация из систем пеленгации разрядов облако-земля [13] поступает в качестве входной в модель. В итоге детерминированно-вероятностная модель [14] позволяет определить вероятность возникновения лесных пожаров. Предполагается создание общегосударственного центра мониторинга лесной пожарной опасности, в который стекается исходная информация и в результате генерируется прогнозная информация и направляется заинтересованным потребителям. В центре функционирует многопроцессорная вычислительная система (МВС), которая

будет являться ядром всей информационно-вычислительной системы. Вся система может быть и распределенной, главное, чтобы была осуществима оперативная передача информации из различных подсистем для обработки на МВС. Взаимосвязь математических моделей и отдельных сегментов системы прогноза лесной пожарной опасности представлена на рис. 1.



Рис. 1. Взаимосвязь математических моделей и отдельных сегментов системы прогноза лесной пожарной опасности

3. Детерминированно-вероятностный критерий прогноза лесной пожарной опасности третьего поколения

Формула определения вероятности возникновения лесных пожаров имеет вид:

$$P_j = P(\Pi)P(\text{ЛП} / \Pi), \quad (3.1)$$

где $P(\Pi)$ – вероятность причины пожара, $P(\text{ЛП} / \Pi)$ – вероятность пожара при условии, что есть причины. С учетом типа причин формула запишется:

$$P_j = [P(\Pi_A) + P(\Pi_M) - P(\Pi_A \Pi_M)]P(\text{ЛП} / \Pi), \quad (3.2)$$

где $P(\Pi_A)$ – вероятность антропогенной причины, $P(\Pi_M)$ – вероятность грозовой причины, $P(\Pi_A \Pi_M)$ – вероятность совместного действия причин.

Событие $\Pi_A = A \cdot A_j$, т.е. произведение событий A (посещение лесной территории) и A_j (наличие источников огня); $\Pi_M = M \cdot M_j$, т.е. произведение событий M (гроза) и M_j (наземный грозовой разряд). В итоге получим:

$$P_j = [P(A)P(A_j / A) + P(M)P(M_j / M) - P(A)P(M)P(A_j, M_j / A, M)]P(\text{ЛП} / \Pi), \quad (3.3)$$

где $P(A)$ – вероятность посещения лесной территории, $P(A_j / A)$ – вероятность наличия источников огня при условии, что лесная территория посещается людьми, $P(M)$ – вероятность грозы, $P(M_j / M)$ – вероятность удара в землю при условии, что идет гроза, $P(A_j, M_j / A, M)$ – вероятность совместного действия антропогенного источника огня и удара молнии в землю при условии,

что лесная территория одновременно подвергается посещению людьми и идет гроза. Вероятность причины возникновения лесных пожаров предлагается оценивать по формулам:

$$P(A) \approx \frac{N_A}{N_{ПС}}, \quad P(A/A) \approx \frac{N_{ПДН}}{N_{ПН}}, \quad (3.4)$$

$$P(M) \approx \frac{N_M}{N_{ПС}}, \quad P(M/M) \approx \frac{N_{МЧ}}{N_{МС}}, \quad (3.5)$$

$$P(A, M/A, M) \approx \frac{N_{ПДН}}{N_{ПН}} \cdot \frac{N_{МЧ}}{N_{МС}}, \quad (3.6)$$

где N_A – количество дней в пожароопасный сезон, когда лесная территория посещается людьми, N_M – число дней с грозами; $N_{ПС}$ – общее число дней пожароопасного сезона; $N_{ПДН}$ – число антропогенных пожаров в конкретный день недели; $N_{ПН}$ – общее количество антропогенных пожаров за неделю; $N_{МЧ}$ – число прошедших наземных грозовых разрядов на конкретный час, начиная с 00.00 часов; $N_{МС}$ – общее число наземных разрядов в сутки.

Следует оценить $P(ЛП / П)$. Событие $ЛП/П = C \cdot Z$, т.е. произведение событий C (ЛГМ сухой) и Z (зажигание ЛГМ). Тогда справедлива формула:

$$P(ЛП / П) = P(C)P(Z / C), \quad (3.7)$$

где $P(C)$ – вероятность, что ЛГМ сухой, $P(Z/C)$ – вероятность зажигания ЛГМ при условии, что он достаточно сухой. Зажигание ЛГМ может происходить от антропогенного источника огня, удара молнии в землю и совместного действия этих источников. Следует рассматривать событие $Z = Z_A + Z_M$, т.е. сумму совместных событий Z_A – зажигание антропогенным источником и Z_M – зажигание от удара молнии в землю. Тогда справедлива формула:

$$P(ЛП / П) = P(C) \cdot [P(Z_A / C) + P(Z_M / C) - P(Z_A Z_M / C)], \quad (3.8)$$

где $P(Z_A)$ – вероятность зажигания ЛГМ антропогенным источником, $P(Z_M)$ – вероятность зажигания ЛГМ ударом молнии в землю, $P(Z_A Z_M)$ – вероятность зажигания ЛГМ при совместном действии антропогенного источника огня и наземного грозового разряда. Могут быть использованы различные варианты расчета вероятностных членов.

Вариант 1. Используем статистические данные по лесным пожарам:

$$P(Z_A/C) \approx \frac{N_{ПА}}{N_{КП}}, \quad P(Z_M/C) \approx \frac{N_{ПМ}}{N_{КП}}, \quad P(Z_A Z_M/C) \approx \frac{N_{ПAM}}{N_{КП}}, \quad (3.9)$$

где $N_{ПА}$ – количество пожаров от антропогенной нагрузки; $N_{ПМ}$ – количество пожаров от ударов молний; $N_{КП}$ – общее количество пожаров, $N_{ПAM}$ – число лесных пожаров возникших от антропогенного источника и удара грозы.

Вариант 2. Используем данные экспериментов:

$$P(Z_A/C) \approx \frac{N_{ЗА}}{N_{КЗА}}, \quad P(Z_M/C) \approx \frac{N_{ЗМ}}{N_{КЗМ}}, \quad P(Z_A Z_M/C) \approx \frac{N_{ЗА}}{N_{КЗА}} \frac{N_{ЗМ}}{N_{КЗМ}}, \quad (3.10)$$

где $N_{ЗА}$ – число попыток, когда ЛГМ зажегся от антропогенного источника, $N_{КЗА}$ – общее число попыток зажечь ЛГМ антропогенным источником, $N_{ЗМ}$ – число попыток, когда ЛГМ зажегся электрическим разрядом, $N_{КЗМ}$ – общее число попыток зажечь ЛГМ электрическим разрядом.

Вариант 3. Используем численное моделирование процесса зажигания ЛГМ антропогенным источником или мощным электрическим разрядом. Следует использовать программный генератор псевдослучайных чисел для задания характеристик антропогенного источника (например, размер и температура горячей частицы) и грозового удара в землю (например, продолжительность разряда, сила тока). Рассчитываем некоторое количество различных вариантов задач зажигания ЛГМ антропогенным источником [15] и ударом молнии в дерево [16]. Какие-то варианты приведут к зажиганию, а какие-то нет. Тогда искомые вероятности можно определить также по формулам (3.10), но в данном случае $N_{ЗА}$ – число вариантов расчета, когда ЛГМ зажегся от антропогенного источника, $N_{КЗА}$ – общее число вариантов расчета процесса зажигания ЛГМ антропогенным источником, $N_{ЗМ}$ – число вариантов расчета, когда ЛГМ зажегся электрическим разрядом, $N_{КЗМ}$ – общее число вариантов расчета процесса зажигания ЛГМ электрическим разрядом.

4. Математические основы С.У.Д.А.Н.

В настоящей работе представлены математические основы создания С.У.Д.А.Н. В литературе есть факты, которые позволяют рассматривать антропогенную нагрузку как детерминированный процесс. Авторы [17] утверждают, что процессы принятия решений и поведения, несмотря на влияние многообразных факторов, не являются случайными, так как всем людям присущи общие реакции на информацию о структуре и качествах пространства, общие механизмы восприятия этой информации для принятия решения. Люди со сходными полями информации проявляют сходные предпочтения мест отдыха, то есть ведут себя в географическом пространстве почти одинаково. Следует заметить, что детали реализации СУДАН могут отличаться от реализации систем усвоения данных, например, в метеорологии.

Уравнение пространственно-временной динамики антропогенной нагрузки:

$$\frac{\partial N^*}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(A \frac{\partial N^*}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(A \frac{\partial N^*}{\partial y} \right), \quad (4.1)$$

Граничные условия будут зависеть от конкретной задачи. Например, граничные условия первого рода:

$$N^*(0, y, t) = N_{x0}^*, \quad (4.2)$$

$$N^*(x_{end}, y, t) = 0, \quad (4.3)$$

$$N^*(x, 0, t) = 0, \quad (4.4)$$

$$N^*(x, y_{end}, t) = N_{y_{end}}^*, \quad (4.5)$$

Начальные условия:

$$N^*(x, y) \Big|_{t=0} = N_0^*(x, y), \quad (4.6)$$

Линейный источник антропогенной нагрузки представлен на рис. 2.а (автомагистраль). На рис. 2.б продемонстрированы результаты модельного расчета пространственно-временной динамики виртуального числа лесных пожаров на момент времени 1 час.

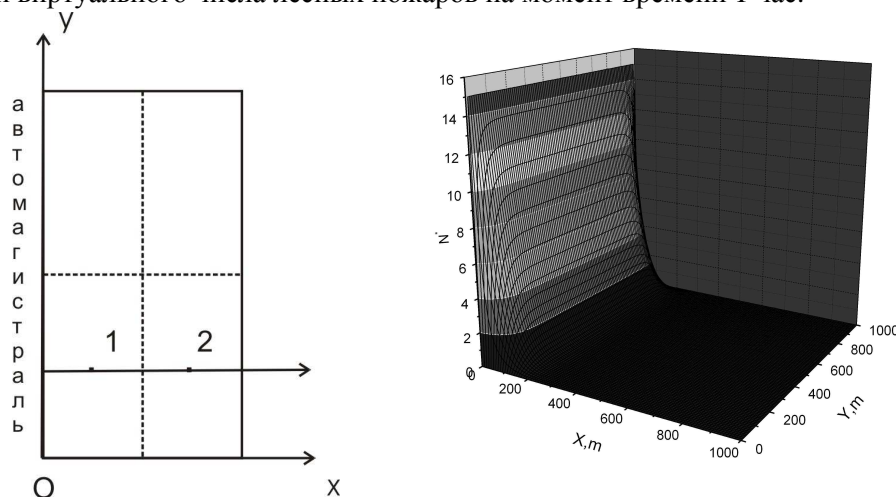


Рис. 2. Линейный источник антропогенной нагрузки (а) и результаты модельного расчета пространственно-временной динамики виртуального числа лесных пожаров на момент времени 1 час

Обозначения: N^* - виртуальное число лесных пожаров, t - время, x, y - пространственные координаты, A - коэффициент, отражающий скорость распространения источников антропогенной нагрузки, ось Y - автомагистраль.

Под виртуальным числом лесных пожаров понимается возможное число лесных пожаров в каждой точке лесопокрытой территории, несмотря на их фактическое отсутствие. Так как вероятность наличия источников огня в каждой точке лесной территории отлична от нуля.

5. Математическое моделирование зажигания ЛГМ антропогенным источником

Рассматривается следующая физическая модель. На подстилающей поверхности находится слой ЛГМ, на который выпадает частица, нагретая до высоких температур. Происходит нагрев слоя ЛГМ и его термическое разложение с выделением газообразных продуктов пиролиза (например, CO). Продукты пиролиза диффундируют в воздух, содержащий окислитель – кислород и инертную компоненту – азот. В газовой фазе при определенных температурах и концентрациях реагирующих газов протекает реакция окисления газообразных горючих продуктов пиролиза и происходит газозажигание смеси окислителя и горючего. Геометрически задача ставится следующим образом – рассматривается трехслойная пластина: 1 – газовая смесь, 2 – частица, нагретая до высоких температур, 3 – ЛГМ. Граничные условия 4-го рода выставляются на границах раздела слоев Γ_1, Γ_2 .

Система нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности и диффузии для системы “газовая смесь-частица-ЛГМ”, соответствующая сформулированной физической модели, имеет следующий вид:

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \lambda_3 \frac{\partial^2 T_3}{\partial x^2} + q_p \cdot k_1 \cdot \rho_3 \cdot \varphi_1 \cdot \exp\left(-\frac{E_1}{RT_3}\right) \quad (5.1)$$

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \lambda_2 \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} \quad (5.2)$$

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + q_5(1 - \nu_5) \cdot R_5 \quad (5.3)$$

Граничные условия для уравнений (5.1 - 5.3):

$$x=0, \quad \alpha_1(T - T_e) = \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x}, \quad (5.4.1)$$

$$x = \Gamma_2, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x}, T_1 = T_2, \quad (5.4.2)$$

$$x = \Gamma_1, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x}, T_2 = T_3 \quad (5.4.3)$$

$$x=L, \quad \alpha_2(T - T_e) = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial x} \quad (5.4.4)$$

Начальные условия для уравнений (5.1 – 5.3):

$$t=0, \quad T_3 = 300K, \quad T_1 = 300K, \quad T_2 = 700K \quad (5.5)$$

Кинетическое уравнение и начальное условие:

$$\rho_3 \frac{\partial \varphi}{\partial t} = -k_1 \rho_3 \varphi \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad t=0, \quad \varphi = \varphi_0 \quad (5.6)$$

Уравнение диффузии для окислителя:

$$\frac{\partial C_4}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_4}{\partial x^2} - \frac{M_4}{M_5} R_5 \quad (5.7)$$

Граничные и начальные условия для уравнения (5.7):

$$x=0, \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial x} = 0, \quad (5.8.1)$$

$$x = \Gamma_2, \quad \rho D \frac{\partial C_4}{\partial x} = 0, \quad (5.8.2)$$

$$t=0, \quad C_4 = 0,3 \quad (5.8.3)$$

Уравнение диффузии для газообразных горючих продуктов пиролиза:

$$\frac{\partial C_5}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C_5}{\partial x^2} - R_5 \quad (5.9)$$

Граничные и начальные условия для уравнения (5.9):

$$x=0, \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial x} = 0, \quad (5.10.1)$$

$$x = \Gamma_2, \quad \rho D \frac{\partial C_5}{\partial x} = Y_5, \quad (5.10.2)$$

$$t=0, \quad C_5 = 0, \quad (5.10.3)$$

Уравнение баланса массы:

$$C_{N_2} = 1 - C_{O_2} - C_{CO}, \quad (5.11)$$

Выражение для массовой скорости реакции R_5 [18]:

$$R_5 = k_5 M_5 T^{-2,25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right) \cdot \begin{cases} x_1^{0,25} x_2, & x_1 > 0,05 \\ x_1 x_2, & x_1 < 0,05 \end{cases} \quad (5.12)$$

$$x_i = \frac{C_i}{\sum_{k=4}^6 \frac{C_k}{M_k} M_i}, \quad (5.13)$$

где T – температура (1 – воздуха, 2 – частицы, 3 – слоя ЛГМ); C – концентрация (4 – окислителя, 5 – горючего газа, 6 – инертных компонентов воздуха); ρ, c, λ – плотность, теплоемкость и теплопроводность (1 – воздуха, 2 – пластины, 3 – слоя ЛГМ); q_p – тепловой эффект реакции пиролиза ЛГМ; k_l – предэкспонент реакции пиролиза ЛГМ; E_l – энергия активации реакции пиролиза ЛГМ; R – универсальная газовая постоянная; φ – объемная доля сухого органического вещества ЛГМ; q_5 – тепловой эффект реакции окисления оксида углерода; v_5 – доля теплоты поглощенная слоем ЛГМ; R_5 – массовая скорость реакции окисления оксида углерода; α_1 – коэффициент теплоотдачи; α_2 – коэффициент теплопередачи; M_i – молекулярная масса компонент газовой фазы (4 – кислород, 5 – оксид углерода, 6 – азот); k_5 – предэкспонент реакции окисления оксида углерода; E_5 – энергия активации реакции окисления оксида углерода; D – коэффициент диффузии.

В общем случае температура горячих углеродистых или стальных частиц может изменяться в диапазоне от 330 К до 1500 К. Рассматривались относительно низкие значения начальной температуры частиц, представляющие наибольший интерес для практики. Принимается, что в начальный момент времени частица имеет температуру от 900 К до 1800 К. Зажигание наступает тогда, когда теплоприход от реакции окисления газообразных продуктов пиролиза превысит теплоприход от горячей частицы. В таблице 1 представлены времена задержки воспламенения для различных температур углеродистой частицы.

Таблица 1 Время задержки зажигания для углеродистой частицы

Температура частицы	Время задержки зажигания
900 К	2.63 с
1000 К	0.46 с
1100 К	0.19 с
1200 К	0.099 с

Нижний предел зажигания – температура частицы 900 К. При температурах меньше 900 К зажигания не происходит. Выделенный диапазон температур, в котором происходит зажигание сухого ЛГМ, соответствует реальным температурам, достигаемым в практически значимых пожароопасных ситуациях. К таким, например, можно отнести раздувание непогашенных костров ветром и разлет отдельных частиц не догоревшей древесины (углей) на расстояния 1-3 м от источника открытого огня. Наличие предельного значения температуры, при котором еще происходит зажигание ЛГМ, в рассматриваемом случае обусловлено не только кинетикой процессов термического разложения и газофазного воспламенения смеси горючего и окислителя. Важным фактором является также то, что частица, в отличие от массивного нагретого тела [19] имеет конечный запас тепла. В таблице 2 представлены времена задержки воспламенения для различных температур стальной частицы.

Таблица 2 Время задержки зажигания для стальной частицы

Температура частицы	Время задержки зажигания
900 К	0.3 с
1000 К	0.07 с
1100 К	0.05 с
1200 К	0.02 с

Нижний предел зажигания – температура частицы 900 К.

Анализ распределения температуры в системе “газовая смесь-частица-ЛГМ” позволяет сделать вывод, что зажигание происходит в газовой фазе в непосредственной близости от поверхности частицы. В этой зоне, где происходит вдув газообразных продуктов пиролиза, концентрация оксида углерода максимальна и близка к единице. Концентрация окислителя (кислорода) по мере приближения к поверхности частицы падает вследствие вдува газообразных продуктов пиролиза, а также расхода окислителя на реакцию окисления оксида углерода. Концентрация инертных компонентов адекватным образом изменяется при изменении концентраций оксида углерода и окислителя. Можно выделить некоторый максимум концентрации инертной компоненты в области зажигания в газовой фазе вследствие притока двуокиси углерода от реакции окисления газообразных продуктов пиролиза. Выделенные закономерности аналогичны как для углеродистой, так и для стальной частицы. Отличия состоят в том, что прогрев и все остальные процессы в случае стальной частицы происходят быстрее в связи с большей теплопроводностью стали.

Проверка достоверности выполненного исследования является самостоятельной проблемой. В работах [20, 21] представлены данные по экспериментальному исследованию зажигания слоя ЛГМ, которые трудно однозначно идентифицировать из-за того, что рассматривалось зажигание от стальной спирали, имеющей практически постоянную температуру в течение длительного времени. То есть в опытах [20,21] реализовывались граничные условия первого рода. Можно с уверенностью сказать, что имеется качественное соответствие результатов – полученные в данной работе значения времени задержки зажигания существенно больше времени задержки воспламенения в [20,21].

6. Математическое моделирование зажигания дерева наземным грозовым разрядом

Процессы протекания тока имеют свои особенности в случае удара молнии в ствол дерева хвойной породы (относятся к голосеменным), например, сосны. В структуре древесины покрытосеменных заметную роль играют сосуды, по которым движется влага [22]. Внутренняя часть ствола, пронизанная такими транспортными каналами, является хорошим проводником электрического тока. Одним из отличий строения древесины хвойных является отсутствие сосудов [22]. Поэтому центральная часть ствола смолистого хвойного дерева имеет значительно большее сопротивление, чем кора и подкорковый слой. Вследствие этого в сосне электрический ток разряда молнии проходит преимущественно по наружным слоям, насыщенным влагой [22].

Рассматривается следующая физическая модель. На поверхности земли произрастает отдельно стоящее дерево хвойной породы. В ствол дерева ударяет наземный грозовой разряд определенной полярности. Электрический ток наземного грозового разряда протекает по стволу. Предполагается, что в различных сечениях ствола параметры тока одинаковы и он протекает в подкорковой зоне хвойного дерева. В результате происходит разогрев древесины за счет Джоулева тепла и при достижении определенных тепловых потоков из подкорковой зоны ствола и критической температуры происходит зажигание дерева. Влиянием влажности древесины на процесс зажигания пренебрегается. Последнее допущение достаточно обосновано для кратковременных дождей с грозами, а также для начального периода дождя, когда грозовая активность обычно максимальна.

Задача решается для цилиндра, который моделирует ствол дерева. Рассматривается определенное сечение ствола. Схема области решения: 1 – сердцевина, 2 – подкорковая зона, 3 – кора ствола дерева; R_s – внешний радиус ствола, R_1 – граница раздела подкорковой зоны и коры, R_2 – граница раздела сердцевины и подкорковой зоны.

Математически процесс разогрева дерева наземным грозовым разрядом перед зажиганием описывается системой нестационарных дифференциальных уравнений теплопроводности:

$$\rho_1 c_1 \frac{\partial T_1}{\partial t} = \frac{\lambda_1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_1}{\partial r} \right), \quad (6.1)$$

$$\rho_2 c_2 \frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{\lambda_2}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + JU, \quad (6.2)$$

$$\rho_3 c_3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = \frac{\lambda_3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_3}{\partial r} \right), \quad (6.3)$$

Граничные условия для уравнений (6.1) – (6.3):

$$r=0, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = 0, \quad (6.4)$$

$$r=R_2, \quad \lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial r} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r}, \quad T_1 = T_2, \quad (6.5)$$

$$r=R_1, \quad \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial r} = \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r}, \quad T_2 = T_3, \quad (6.6)$$

$$r=R_s, \quad \lambda_3 \frac{\partial T_3}{\partial r} = \alpha(T_e - T_3), \quad (6.7)$$

Начальные условия для уравнений (6.1) – (6.3):

$$t=0, \quad T_i(r) = T_{i0}(r), \quad i=1,2,3, \quad (6.8)$$

где T_i , ρ_i , c_i , λ_i – температура, плотность, теплоемкость и теплопроводность соответственно сердцевины ($i=1$), подкорковой зоны ($i=2$), коры ($i=3$) ствола; α – коэффициент теплоотдачи; J – сила тока наземного грозового разряда; U – напряжение наземного грозового разряда; r – координата, t – время. Индексы “e” и “0” соответствуют параметрам внешней среды и параметрам древесины в начальный момент времени.

Проведено параметрическое исследование влияния характеристик наземного грозового разряда на процесс разогрева древесины ствола в течение грозового импульса. Необходимо отметить, что до настоящего времени не опубликовано экспериментальных данных о кинетике процесса зажигания больших массивов древесины. Очевидно, это обусловлено трудностями реального экспериментального изучения этого процесса. Но известен подход [23], в котором условия зажигания древесины хвойной породы (сосны) описываются двумя параметрами (тепловым потоком и температурой поверхности зажигания). Фактически в [23] моделируется процесс газозафазного зажигания конденсированного вещества в условиях высоких тепловых пото-

ков и относительно малых времен воздействия источника нагрева при избытке окислителя. Экспериментальные данные [23] по критическим температуре и тепловому потоку к поверхности коры использованы в настоящей работе в качестве критериев зажигания (таблица 3).

В таблице 4 приведены результаты численных расчетов условий зажигания (в зависимости от напряжения наземного грозового разряда при длительности импульса 500 мс).

В таблице 5 показаны условия зажигания в зависимости от силы тока наземного грозового разряда при напряжении $U=100$ кВ.

Таблица 3 Экспериментальные данные по условиям зажигания древесины сосны [23]

Время задержки зажигания, с	Тепловой поток, кВт/м ²	Температура поверхности, К
63.5	12.5	658
45.0	21	700
11.1	42	726
2.6	84	773
0.4	210	867

Таблица 4 Условия зажигания дерева в зависимости от напряжения разряда при силе тока $J=23.5$ кА

Напряжение, U, кВ	Выполнение условий [23]	Температура поверхности, К	Тепловой поток изнутри ствола к поверхности, кВт/м ²
1 – 85	За время действия наземного грозового разряда условия зажигания не достигаются	<867	<210
90	Условия зажигания выполняются	867	242
95	Условия зажигания выполняются	867	246
100	Условия зажигания выполняются	867	249
105	Условия зажигания выполняются	867	252
110	Условия зажигания выполняются	867	255

Таблица 5 Условия зажигания ствола дерева в зависимости от силы тока при напряжении $U=100$ кВ

Сила тока, J, кА	Выполнение условий [23]	Температура поверхности, К	Тепловой поток изнутри ствола к поверхности, кВт/м ²
1 – 20	За время действия наземного грозового разряда условия зажигания не достигаются	<867	<210
23.5	Условия зажигания выполняются	867	249
30	Условия зажигания выполняются	867	264
35	Условия зажигания выполняются	867	274

В результате действия рассматриваемого наземного грозового разряда ствол дерева в подкорковой зоне разогревается до температур, при которых природные горючие материалы горят (более 1200 К). Анализ зависимостей величины теплового потока и температуры границы подкорковой зоны показывает, что по температуре (867 К) и тепловому потоку (249 кВт/м²) условия зажигания для рассматриваемого разряда достигаются для достаточно типичных параметров грозового разряда. Полученные результаты также показывают, что оценка условий возникновения лесных пожаров в результате грозовых разрядов может быть проведена при использовании достаточно простой математической модели (6.1) – (6.8). Исходными данными для эксплуатации такой модели служат параметры наземного грозового разряда и характеристики древесины. Напряжение, сила тока и продолжительность конкретного разряда могут быть оценены или даже зафиксированы посредством современных систем регистрации грозовой активности

[24,25]. Теплофизические характеристики любых типов древесины могут быть определены достаточно простыми способами [23] для каждого уровня влажности.

7. Реализация концепции в рамках подхода ландшафтного распараллеливания

Реализована первая стадия концепции. Разработан параллельный программный комплекс прогноза лесопожарного созревания слоя ЛГМ в рамках подхода ландшафтного распараллеливания. Под данным термином понимается технология геометрической декомпозиции, когда под минимальным вычислительным блоком подразумевается территория лесотаксационного выдела (можно назвать ландшафтом). Расчеты проводились на вычислительном кластере Томского государственного университета. Реализация параллельной MPI-программы осуществляется на языке программирования "Си" с применением функций библиотеки передачи сообщений MPI. Алгоритм параллельной программы: исходные данные разрезаются и рассылаются корневым процессом параллельной программы. Затем на каждом узле параллельная программа обрабатывает свою часть данных. Межпроцессорных обменов нет, распараллеливание организовано крупнозернистыми блоками. По окончании вычислений корневой процесс собирает результаты со всех процессорных узлов и сохраняет их в файле результатов. Разработаны масштабируемые параллельные программы. На рисунке 3.а представлена зависимость эффективности работы параллельной программы от числа задействованных процессоров.

Анализ результатов, представленных на рисунке 3.а показывает, что реальная эффективность по сравнению с оценкой падает незначительно. Разница в результатах, соответствующих 100000 и 60000 выделов, объясняется тем, что с ростом вычислительной нагрузки NV размер информационных пакетов, которые передаются по коммуникационной среде также увеличивается. На рисунке 3.б представлена зависимость ускорения работы параллельной программы от числа задействованных процессоров.

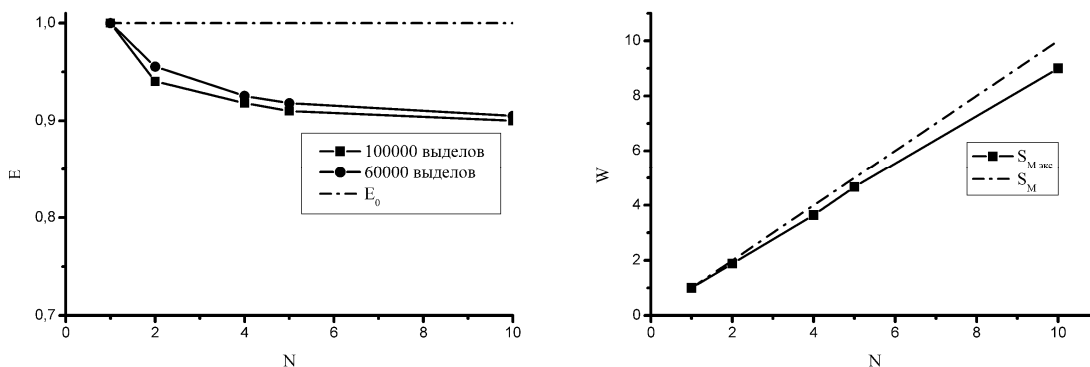


Рис. 3. Эффективность (а) и ускорение (б) параллельной программы

В реальной ситуации ускорение несколько меньше, чем полученное при оценке без учета потерь, так как часть времени теряется на рассылку данных в начале и сбор результатов на завершающей стадии работы параллельной программы. Видно, что с ростом числа процессоров ускорение несколько падает, хотя вычислительная нагрузка на каждый процессор уменьшается. Однако в то же время увеличивается доля времени, которое затрачивает корневой процесс на взаимодействие с другими процессами при рассылке и сборе данных, так как скоростные показатели коммуникационной среды вычислительного кластера все-таки не велики и здесь начинают играть роль архитектурные аспекты.

Проанализировав полученные результаты, можно сделать вывод о том, что алгоритм рассматриваемой задачи очень хорошо подходит для параллельной реализации на МВС. В результате имеет место ускорение, практически пропорциональное числу задействованных процессоров МВС. Эффективность практически не зависит от числа задействованных процессоров, так

как в процессе работы программы нет межпроцессорных передач данных. Установлено, что падение производительности невелико и $\max_{M \in [1,16]} (\alpha_M) = 0,09$.

Следует заметить, что несмотря на применение эвристики для распределения данных в случае, когда NV не делится нацело на M (статическая эвристика с предварительным распределением перед началом выполнения параллельного цикла), это не приводит к заметной разбалансировки вычислительной нагрузки и нет необходимости применять средства динамической перебалансировки вычислительной нагрузки в процессе выполнения параллельной программы. Рассылка и сбор данных корневым процессом параллельной программы технически реализованы посредством векторных вариантов функций рассылки и сбора данных библиотеки MPI.

8. Заключение

В рамках новой концепции прогноза лесной пожарной опасности разработан проблемно-ориентированный подход ландшафтного распараллеливания. Как показал анализ результатов проведенного исследования, данный подход очень эффективен при решении задач лесопожарного созревания слоя ЛГМ, определения вероятности возникновения лесных пожаров, оценки экологических последствий лесных пожаров. Параллельная программа достигает практически максимально возможного ускорения, когда ускорение практически пропорционально числу задействованных процессоров.

Литература

1. Stocks B.J., Alexander M.E., McAlpine R.S. at all. Canadian Forest Fire Danger Rating System. Canadian Forestry service, 1987. 500 P.
2. Курбатский Н.П., Костырина Т.В. Национальная система расчета пожарной опасности США. // Сб. «Обнаружение и анализ лесных пожаров». Красноярск: ИЛиД СО АН СССР, 1977. С. 38–90.
3. A. Camia, P. Barbosa, G. Amatulli, J. San-Miguel-Ayanz. Fire Danger Rating in the European Forest Fire Information System (EFFIS): Current developments // Forest Ecology and Management. 2006. Vol. 234. Supplement 1. P. S20.
4. Нестеров В.Г. Горимость леса и методы ее определения. М.; Л.: Гослесбумиздат, 1949. 76 С.
5. ГОСТ Р 22.1.09-99 “Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования”
6. Сухинин А.И., Пономарев Е.И. Картирование и краткосрочное прогнозирование пожарной опасности в лесах Восточной Сибири по спутниковым данным // Сибирский экологический журнал. 2003. № 6. С. 669 – 675.
7. Барановский Н.В. Новая концепция прогноза лесной пожарной опасности // Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф: Тезисы IX Всероссийской конференции (17–22 сентября 2007 г., Барнаул). – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та. 2007. С. 13 – 13.
8. Толстых М.А. Полулагранжева модель атмосферы с высоким разрешением для численного прогноза погоды. Метеорология и гидрология, 2001, № 4, С. 5 – 15.
9. Z. Lixiang, Z. Xiaoshan, L. Yongzuo, W. Jinggui. Case study on tropical cyclone track prediction with MM5 // Journal of Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing, China, 2000. Vol. 23. N 1. P. 73 – 80.
10. Барановский Н.В., Гришин А.М., Лоскутникова Т.П. Информационно-прогностическая система определения вероятности возникновения лесных пожаров // Вычислительные технологии. 2003. № 2. С. 16 – 26.

11. Hoadley J.L., Westrick K.J., Ferguson S.A., Goodrick S.L., Bradshaw L., Werth P.A. The effect of increased model resolution in predicting meteorological parameters used in fire danger rating // *Journal of Applied Meteorology*. 2004. Vol. 43. P. 1333 – 1347.
12. Барановский Н.В. Математические основы системы усвоения данных об уровне антропогенной нагрузки на контролируемой лесопокрытой территории. / *Наука на рубеже тысячелетий “Progressive technologies of development”*: 3-я Международная научно-практическая конференция: 24 – 25 ноября 2006 г. Тамбов: ОАО “Тамбовполиграфиздат”. 2006. С. 120 – 121.
13. Cummins K.L., Murphy M.J., Bardo E.A., Hiscox W.L., Pyle R.B., Pifer A.E. A combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. national lightning detection network // *Journal of Geophysical Research*. 1998. Vol. 103. P. 9035–9044.
14. Барановский Н.В. Математическое моделирование наиболее вероятных сценариев и условий возникновения лесных пожаров. Дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Томск: Томский государственный университет. 2007. 153 С.
15. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания слоя лесных горючих материалов нагретой до высоких температур частицей. // *Пожаровзрывобезопасность*. 2006, Т. 15. № 4, С. 42 – 46.
16. Кузнецов Г.В., Барановский Н.В. Математическое моделирование зажигания дерева хвойной породы наземным грозовым разрядом // *Пожаровзрывобезопасность*. 2008. Т. 17. № 3. С. 41 – 45.
17. Андреев Ю.А., Ларченко Г.Ф. Социально-психологические аспекты рекреационных посещений леса и возникновение пожаров // *Лесные пожары и борьба с ними*. М.: ВНИИЛМ, 1987. С. 251-263.
18. Гришин А.М., Шипулина О.В. Математическое моделирование распространения вершинных лесных пожаров в однородных лесных массивах и вдоль просек // *Физика горения и взрыва*. 2002. Т. 38. № 6, С. 17 – 29.
19. Вилюнов В.Н. Теория зажигания конденсированных веществ. Новосибирск: Наука. 1984, 187 С.
20. Гришин А.М., Долгов А.А., Зима В.П. и др. Исследование зажигания слоя лесных горючих материалов // *Физика горения и взрыва*. 1998. Т. 34. № 6, С. 14 – 22.
21. Гришин А.М., Долгов А.А., Зима В.П. и др. Лабораторные исследования возникновения и распространения низового лесного пожара // *Физика горения и взрыва*. 1996. Т. 32. № 6, С. 3 – 11.
22. Эзау К. Анатомия семенных растений. Книга 1. М.: Мир, 1980. 218 С.
23. Заболотный А.Е., Заболотная М.М., Заболотная Ю.А., Тимошин В.Н. Определение зон безопасного применения твердотопливных генераторов пожаротушащих аэрозолей // *Вопросы специального машиностроения*. 1995. Вып. 7 – 8. С. 15 – 21.
24. Burke C.P., Jones D.L. On the polarity and continuing current in unusually large lightning flashes deduced from ELF events // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 1996. Vol. 58. P. 531 – 548.
25. Soriano L.R., De Pablo F., Tomas C. Ten-year study of cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2005. Vol. 67. N 16. P. 1632 – 1639.