

УДК 004.94, 519.63

КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ, ПРИМЕРЫ АНАЛИЗА РАСПРОСТРАНЕНИЯ НИЗОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук

Белорусский государственный университет, Минск

COMPUTER MODEL, EXAMPLES OF ANALYSIS OF THE SPREAD OF GROUND FOREST FIRES

D.V. Barovik, V.B. Taranchuk

Belarusian State University, Minsk

Рассмотрена задача компьютерного моделирования распространения низовых лесных пожаров в двумерной постановке. Приведена формулировка начально-краевой задачи в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных. Представлены результаты вычислительных экспериментов по изучению сценариев распространения зоны горения вблизи полян во фронте, тыле и флангах пожара. Выявлены и показаны качественные отличия эволюции температурного фронта на разных стадиях процесса горения при нескольких характерных размерах лесопожарных разрывов (полян), различных представительных значениях скорости ветра в пологе леса.

Ключевые слова: низовой лесной пожар, математическая модель, динамика фронта пожара, размер неоднородного включения, скорость ветра.

The problem of computer modeling of two-dimensional surface forest fire spread is considered. The initial-boundary value problem in the form of a system of partial differential equations is described. The results of numerical experiments investigating scenarios how fire zone spreads near fuelbreaks in different directions are provided. The qualitative differences in the evolution of the temperature front at different stages of the combustion process at several characteristic sizes of forest fire breaks (glades), different representative values of wind speed in the forest canopy are revealed and shown.

Keywords: surface forest fire, wildland fire, wildfires, mathematical model, fire front dynamics, fuelbreak size, wind velocity.

Введение

Лесные массивы, являющиеся одним из основных типов растительного покрова Земли, подвержены влиянию целого ряда различных природных и техногенных факторов. Наибольший экологический и экономический ущерб на состояние лесных экосистем оказывают пожары [1], [2]. Примером являются пожары в Австралии, начавшиеся в сентябре 2019 года. По подсчетам Всемирного фонда дикой природы [3] в них погибло более миллиарда животных. По мнению специалистов центра Moody's Analytics по состоянию на начало 2020 года экономический ущерб превысит 4.4 миллиарда долларов США [4].

На земном шаре существуют целые регионы, в которых лесные пожары происходят с регулярной периодичностью, и при этом не возрастает успешность в их предотвращении и тушении. Разработки математических моделей лесных пожаров начались с середины прошлого века в США и активно продолжаются во всем мире в настоящее время [5]. Прорыв в этих исследованиях позволит решать значительное число задач практического и научного характера. Обзор научных публикаций указывает как на определенные достижения так и на ряд нерешенных вопросов [6]–[9]: недостаточная обоснованность принимаемых в моделях уравнений и их коэффициентов

для описаний кинетики физико-химических превращений и реакций [10], [11]; сложность выбора адекватных моделей турбулентности в газовой фазе [12]; незначительное число аналитических решений и масштабных натурных экспериментов, которые можно брать за эталон для верификации моделей. Наблюдается пробел между слишком упрощенными моделями, дающими прогнозы с большой погрешностью, и моделями с таким чрезмерным количеством параметров, что разработка быстродействующих численных методов для их решения становится самостоятельной проблемой [13].

Обзор научных статей и монографий позволяет условно разделить модели лесных пожаров по их математической «начинке» на следующие три группы [14], [15]: теоретические [16], статистические [17] и полуэмпирические [18], [19].

При создании *статистических (эмпирических) моделей* основой являются: сбор и систематизация статистических данных о наблюдавшихся в прошлом скоростях распространения лесных пожаров в зависимости от выбранных и запротоколированных основных параметров (скорость ветра, температура окружающей среды, вид лесных насаждений и др.); статистическая обработка полученных результатов, определение коэффициентов корреляции между выбранными переменным и скоростью распространения огня.

Прогноз в таких моделях дается с определенной вероятностью, полученные соотношения могут показывать неудовлетворительные результаты в ситуациях, отличных от тех, в которых были собраны эмпирические данные [17].

Полуэмпирические модели строятся на основе предположений о виде формул, описывающих скорости распространения пожара. Например, модель Ротермела предполагает, что низовой пожар распространяется в виде вытянутого по направлению ветра эллипса. Для связи между входными параметрами (угол рельефа, сила ветра, количество горючей растительности, ее влажность и т. п.) и скоростью фронта пожара привлекаются общие физические законы сохранения массы и энергии. Эти законы упрощаются путем замены в выражениях целого ряда членов на коэффициенты, подбор которых для конкретных типов лесных насаждений и климатических условий производится путем обобщения экспериментальной информации. Практика показывает, что такие полуэмпирические модели более точны по сравнению со статистическими (эмпирическими) моделями. В то же время такие модели значительно проще в программной реализации по сравнению с теоретическими [18], [19].

Для построения **теоретических (математических) моделей** привлекаются фундаментальные законы тепломассопереноса, горения, газовой динамики, химических реакций и др. Записываются такие модели в виде системы дифференциальных уравнений в частных производных. Применение численных методов на высокопроизводительных компьютерах является основным инструментом для их решения. Вознаграждением за сложность таких моделей является то, что именно теоретические модели позволяют отвечать на широкий круг вопросов. Они дают возможность не только качественно, но и количественно исследовать динамику всего спектра величин в зоне пожара, тестировать различные методы по предотвращению, возникновению всех видов пожаров (низовых, верховых, пятнистых), развитию и их тушению с учетом конкретных климатических и территориальных факторов.

Профессором Гришиным А.М. [20] была создана наиболее общая теоретическая модель распространения лесных и торфяных пожаров. Целый ряд исследователей ([9], [21], [22]), включая авторов данной работы, берут модель Гришина за основу и модифицируют ее [23] для целей практического использования [24], с учетом специфических условий территорий и климата.

Использованная в данной работе математическая модель для случая низовых лесных пожаров ранее применялась авторами только в одномерной постановке. В данной работе представлены итоги серии проведенных численных экспериментов в двумерной постановке с учетом

неоднородностей и при различных скоростях ветра. Для того, чтобы не отсылать читателей к предыдущим публикациям, ниже приведены все основные формулы модели, пояснения и комментарии дополнений.

1 Математическая модель распространения лесных пожаров

Ниже приводится двумерная (осредненная по высоте полога леса) математическая модель распространения лесных пожаров, позволяющая рассчитывать распределения по пространству и эволюцию по времени следующих величин: T – измеряемая в Кельвинах температура лесного массива как сплошной многофазной реагирующей среды; $\varphi_j, j = 1, 2, 3, 4$ – объемные доли компонент лесного горючего материала (ЛГМ), где через φ_1 обозначено сухое органическое вещество ЛГМ, φ_2 – содержащаяся в древесине (растительности) вода в связанной и свободной формах, φ_3 – коксик (древесный уголь), являющийся продуктом пиролиза ЛГМ в условиях недостатка кислорода, φ_4 – зола (негорючая минеральная часть ЛГМ); $c_v, v = 1, 2, 3$ – массовые концентрации компонентов газовой фазы, где c_1 – кислород, c_2 – горючие газы, возникающие в процессе термического разложения, c_3 – смесь остальных негорючих газов (водяной пар, как результат сушки; углекислый газ, выделяющийся при догорании коксика и окислении горючих газов; инертные компоненты воздушной смеси и продукты реакций пиролиза и горения).

Предложенное ниже математическое описание позволяет учитывать следующие физико-химические процессы: теплоподвод, обусловленный конвекцией, теплопроводностью и радиационным излучением; нагрев ЛГМ; испарение воды из них (сушка); разложение сухого органического вещества ЛГМ (целлюлозы) на компоненты (газы, уголь, золу) под воздействием высокой температуры (пиролиз); горение газообразных и догорание твердых продуктов пиролиза. Детали упрощения модели, ее верификация, преобразования и получение уравнений, соображения о границах применимости, аппроксимирующая конечно-разностная схема и особенности возможной интерактивности при проведении расчетов приведены в статьях [25], [26].

В формулируемой начально-краевой задаче определяемыми функциями модели являются $T, \varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4, c_1, c_2, c_3$. Эти функции зависят как от времени, так и от пространственных координат, и связаны соотношениями (1.1)–(1.11):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} &= \Phi_{\varphi_1}(\varphi_1, T), \quad \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = \Phi_{\varphi_2}(\varphi_2, T), \\ \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} &= \Phi_{\varphi_3}(\varphi_1, \varphi_3, c_1, c_2, T), \quad \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0, \end{aligned} \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial c_1}{\partial t} + (V, \text{grad } c_1) - \frac{1}{\rho_s} \text{div}(\rho_s D_T \text{grad } c_1) = \quad (1.2)$$

$$= \Phi_{c_1}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T),$$

$$\frac{\partial c_2}{\partial t} + (V, \text{grad } c_2) - \frac{1}{\rho_5} \text{div}(\rho_5 D_T \text{grad } c_2) =$$

$$= \Phi_{c_2}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T),$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\rho_5 c_{p_5} (V, \text{grad } T) - \text{div}(\lambda_T \text{grad } T)}{\rho_5 c_{p_5} + \sum_{j=1}^4 \rho_j \varphi_j c_{p_j}} =$$

$$= \Phi_T(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T).$$

Функции (правые части) записанных дифференциальных уравнений:

$$\Phi_{\varphi_1}(\varphi_1, T) = -\frac{R_1}{\rho_1}, \quad \Phi_{\varphi_2}(\varphi_2, T) = -\frac{R_2}{\rho_2},$$

$$\Phi_{\varphi_3}(\varphi_1, \varphi_3, c_1, c_2, T) = \frac{\alpha_c R_1}{\rho_3} - \frac{M_C R_3}{M_1 \rho_3},$$

$$\Phi_{c_1}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T) =$$

$$= \frac{1}{\rho_5} \left(R_{s1} - c_1 Q - \frac{\alpha}{c_{p_5} \Delta h} (c_1 - c_{1\infty}) \right),$$

$$\Phi_{c_2}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T) =$$

$$= \frac{1}{\rho_5} \left(R_{s2} - c_2 Q - \frac{\alpha}{c_{p_5} \Delta h} (c_2 - c_{2\infty}) \right),$$

$$\Phi_T(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, c_1, c_2, T) =$$

$$= \frac{-q_2 R_2 + q_3 R_3 + q_5 R_5 - \frac{\alpha}{\Delta h} (T - T_\infty) - 4\kappa_R \sigma T^4}{\rho_5 c_{p_5} + \sum_{j=1}^4 \rho_j \varphi_j c_{p_j}},$$

$$\sum_{v=1}^3 c_v = 1, \quad \rho_5 = \frac{\rho_\infty T_\infty}{M_\infty T} \left(\sum_{v=1}^3 \frac{c_v}{M_v} \right)^{-1},$$

$$Q = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_C R_3}{M_1},$$

$$R_1 = k_{01} \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right),$$

$$R_2 = k_{02} T^{-1/2} \rho_2 \varphi_2 \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right),$$

$$R_3 = k_{03} s_\sigma \varphi_3 \rho_5 c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right),$$

$$R_{s1} = -R_3 - \frac{R_5 M_1}{2M_2},$$

$$R_{s2} = (1 - \alpha_c) v_T R_1 - R_5,$$

$$R_5 = \rho_5 \min\left(c_2, \frac{M_2}{2M_1} c_2\right) k_{CO} \exp\left(-\frac{E_{CO}}{RT}\right).$$

Используются обозначения: t – время; рельефно-метеорологические характеристики задаются не возмущенной пожаром температурой T_∞ окружающей среды, направлением и скоростью ветра V , высотой моделируемого слоя ЛГМ Δh ; ρ_j , $j=1, 2, 3, 4$ – истинная плотность φ -ой компоненты

ЛГМ; ρ_5 – плотность смеси газов (газовой фазы); ρ_∞ – не возмущенная пожаром плотность воздуха; R – универсальная газовая постоянная; константы $c_{1\infty}$ и $c_{2\infty}$ – массовые концентрации кислорода и горючих газов в невозмущенной атмосфере; M_1, M_2, M_3, M_C и M_∞ – молекулярные массы кислорода, угарного газа, смеси негорючих газов, углерода (древесного угля) и не возмущенная пожаром молекулярная масса воздуха соответственно; c_{p_j} , $j=1, 2, 3, 4$ – теплоемкости φ -ых компонент ЛГМ; c_{p_5} – теплоемкость газовой фазы; Q – массовая скорость возникновения / исчезновения газовой фазы; λ_T и D_T – коэффициенты турбулентной теплопроводности и диффузии (для учета турбулентных процессов использован аналог теории Прандтля с постоянными числами Прандтля и Шмидта, обоснование и пределы применимости оговорены в [20, с. 247, с. 312]); через R с нижним числовым индексом обозначаются массовые реакции возникновения (исчезновения) различных элементов, где R_1 соответствует образованию кислорода в реакции пиролиза, R_2 – испарению воды φ_2 из ЛГМ (сушка φ_1), R_3 – исчезновению (горению) коксового остатка φ_3 ; s_σ – удельная поверхность коксика φ_3 ; R_{s1}, R_{s2} – массовые скорости образования кислорода c_1 и горючих газов c_2 ; α_c – коксовое число сухого ЛГМ, v_T – доля газообразных горючих продуктов пиролиза ЛГМ; R_5 – массовая скорость горения (окисления) горючих газов; q_2, q_3 и q_5 – количества выделяемой / поглощаемой энергии (тепловые эффекты) в процессах испарения R_2 , горения конденсированного горючего R_3 и газообразного горючего продукта пиролиза R_5 соответственно; α – коэффициент тепло и газообмена, между атмосферой и моделируемым слоем ЛГМ; κ_R – коэффициент радиационного излучения лесного массива; σ – постоянная Стефана-Больцмана; k_{01}, k_{02}, k_{03} и E_1, E_2, E_3 – предэкспоненты и энергии активации соответствующих физико-химических реакций R_1, R_2, R_3 .

Существенной и неотъемлемой частью приведенной математической модели (1.1)–(1.11) является целый ряд коэффициентов и функций, характеризующих состав и пространственное распределение ЛГМ, а также скорости процессов сушки, пиролиза, горения и других. Выбор конкретных значений для оснстки модели производился на основе приведенных в литературных источниках справочным данным, а также результатам экспериментальных исследований [20], [27].

Способ задания корректных начальных и граничных условий подробно описан в публикациях [24], [28], [29].

2 Программный комплекс расчета динамики лесного пожара

Приведенная система дифференциальных уравнений решается численно, результаты

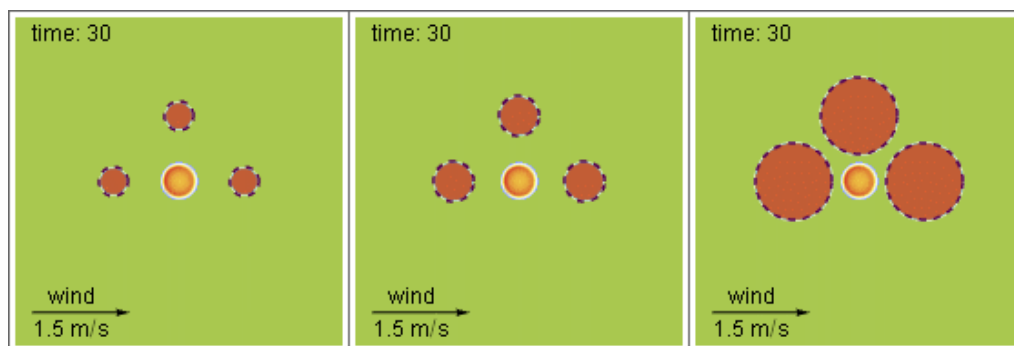


Рисунок 2.1 – Лесной пожар приближается к полянам круглой формы различных размеров: 2.25, 4.5 и 18 квадратных метров соответственно

рассчитываются, протоколируются и визуализируются с использованием средств системы Wolfram Mathematica [30]–[32]. Для аппроксимации применяются явные численные схемы с локально равномерной адаптируемой сеткой по пространству и переменным шагом по времени. Временные шаги выбираются из условий устойчивости численной схемы [28], [29] с учетом специфики и скоростей протекания физико-химических процессов на каждой конкретной итерации [33]. Создание базы данных и архивирование результатов расчетов каждого варианта позволяет осуществлять интеллектуальную обработку результатов и корректировать расчетную сетку локально с учетом поведения сеточных функций.

Рассмотрим модельную задачу распространения низового лесного пожара. Рассчитывается и анализируется динамика сопутствующих физико-химических процессов на площади в квадратной области 20 на 20 метров. Изучается процесс распространения пожара на участках, когда в центре области (в начале координат) «возникает» и начинает распространяться очаг горения. Для простоты описания считается, что направление ветра в пологом леса направлено по оси Ox (слева направо на приведенных ниже графиках). При этом по направлению ветра, против ветра и перпендикулярно (на одном из флангов) имеются участки с отсутствием горючей растительности (поляны) [34], [35]. В примерах ниже рассматриваются варианты развития пожаров на площадях лесного массива одинаковой плотности ЛГМ с включениями, в которых лесной горючий материал отсутствует – круглые поляны различных размеров (схематически показаны на рисунке 2.1). Маленькие поляны имеют площадь 2.25 м², средние – 4.5 м² (в два раза больше) и крупные – 18 м², т. е. в четыре раза больше площади средней поляны. На приведенных ниже рисунках отображаются зоны лесного горючего материала. Зеленым оттенком показан незатронутый пожаром лес, коричневым – участки с отсутствием горючего материала (поляны или уже сгоревший лес). Также видами цветового градиента в иллюстрации синтезированы карты плотности

распределения температуры – показывают положение и форму текущего фронта горения.

Отметим подобранные по результатам вычислительных экспериментов, обеспечивающие приведенные и обсуждаемые сценарии развития процессов значения коэффициентов и определяющих параметров модели: температура окружающей среды $T_0 = 304$ К, высота слоя горючей растительности $\Delta h = 0.1$ м, его объемная плотность $\rho_0 = 5$ кг/м³, влагосодержание $W = 10\%$, коксовое число $\alpha_c = 0.1$; характеристики турбулентных процессов в газовой фазе $D_T = 1.5$ м²/с, $\lambda_T = 1000$ Дж/(м·с·К); коэффициенты энергообмена $\kappa_R = 1.5$ м⁻¹, $\alpha = 100$ Вт/(м²·К). Значения для плотностей компонент ЛГМ, молекулярных масс, теплоемкостей, коэффициенты физико-химических реакций и ряд других величин приводились в работах [29], [34].

3 Результаты моделирования преодоления пожаром полян различных размеров

На рисунках 3.1–3.3 приведены результаты расчетов при равновесной скорости ветра на середине высоты пламени $V = 1.5$ м/с для трех разных размеров полян. Геометрия отличается только площадью полян, формы полян и положения их центров относительно очага горения идентичны для всех трех вариантов. Распределения визуализируются в одни и те же моменты времени.

Качественно наблюдается следующее поведение. Сначала линия контура пожара разрывается, встретившись с полянами. Пожар «огibaет» поляны. По направлению «против ветра» распространение пожара прекращается. А «по ветру» и поперёк (перпендикулярно) направления ветра разорванные контуры пожара вновь смыкаются и пожар распространяется единым фронтом. Заметно различие в конфигурации фронта после преодоления полян разных размеров. Следует отметить результаты, показанные на графике time 195 на рисунке 3.3 – добавляются нетипичные для предыдущих моментов направления распространения пожара: перпендикулярно вверх и против ветра.

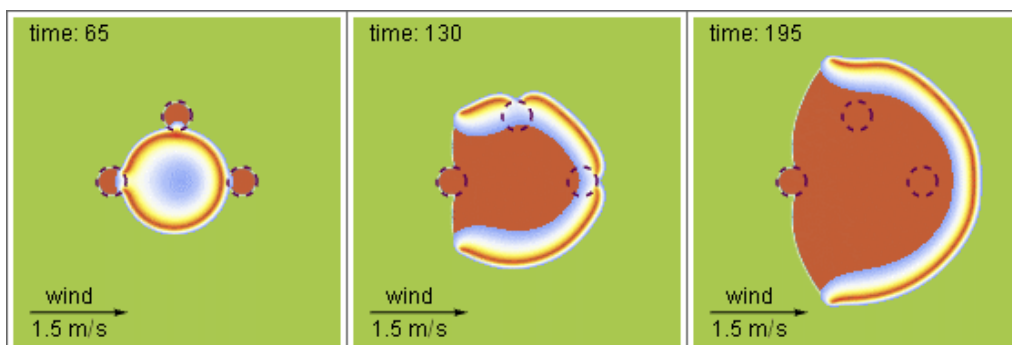


Рисунок 3.1 – Распространение пожара для случая трех полей по 2.25 кв. м

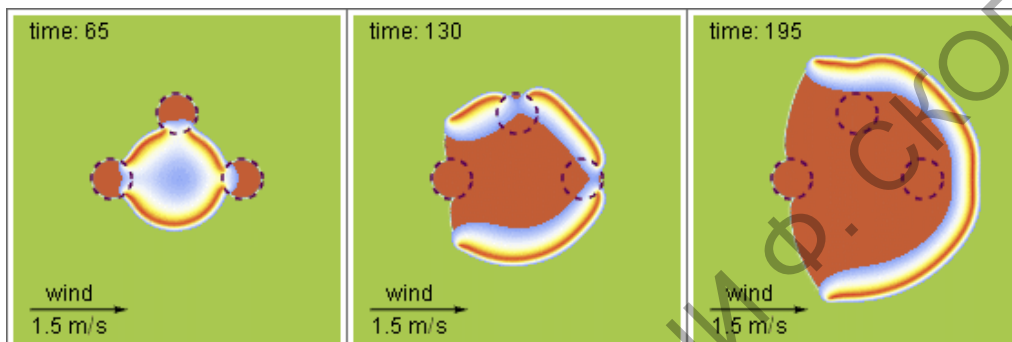


Рисунок 3.2 – Распространение пожара для случая трех полей по 4.5 кв. м

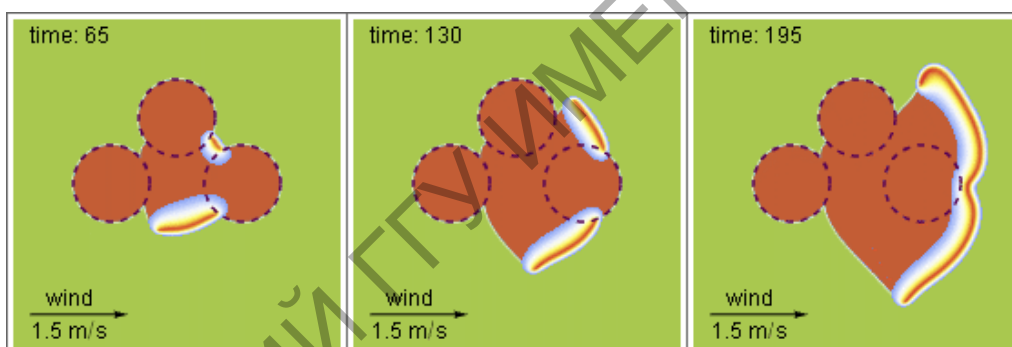


Рисунок 3.3 – Распространение пожара для случая трех полей по 18 кв. м

4 Учет влияния скорости ветра

Влияние на характер распространения лесного пожара величины скорости ветра ([36]) иллюстрируют рисунки 3.1, 4.1 и 4.2. В приведенных вычислительных экспериментах в части геометрии рассматриваются случаи круглых полей «малого» размера. Выше (см. рисунок 3.1) показан расчет для скорости ветра $V = 1.5$ м/с; на рисунках 4.1 и 4.2 приведены результаты двух

дополнительных серий расчетов, отличающихся от варианта на рисунке 3.1 только тем, что скорости ветра V равны 1 и 2 м/с соответственно. Особый интерес вызывает рисунок 4.2. При низких скоростях ветра фронты пожара преодолевают поляны во всех направлениях, в том числе, и против ветра. Примечательно и то, что ширина полосы отжига в направлении ветра более узкая, чем на флангах, а в тылу эта ширина максимальна.

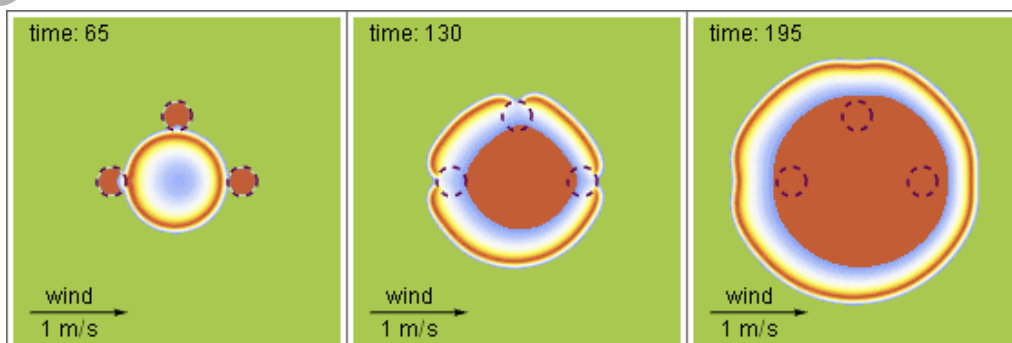


Рисунок 4.1 – Распространение пожара для случая полей в виде кругов при скорости ветра 1 м/с

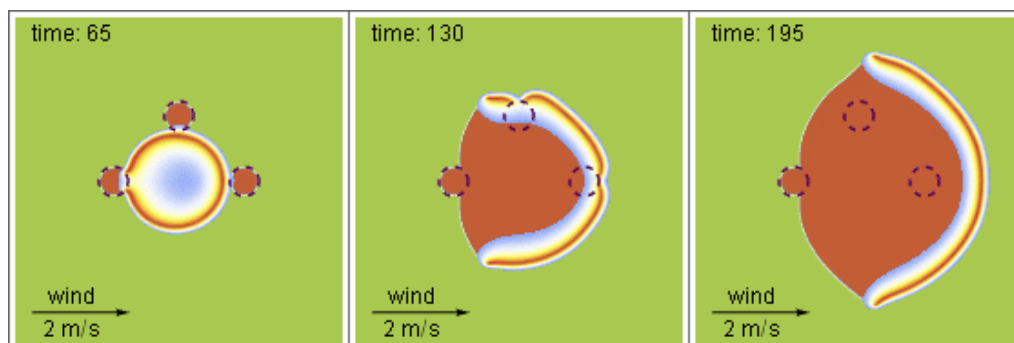


Рисунок 4.2 – Распространение пожара для случая полян в виде кругов при скорости ветра 2 м/с

Заключение

Приведенные выше результаты иллюстрируют динамику только двух (температура и объемная плотность лесных горючих материалов) характеристик процессов. По факту в модели вычисляются распределения шести величин, позволяющие оценить: появление и объем выделяемого водяного пара, выброс загрязняющих окружающую среду газов, образование угля и золы, расчет иных важных с практической точки зрения физико-химических процессов, влияющих на экологию [37].

Следует отметить, что из-за трудоемкости вычислений использование настоящей компьютерной модели в режиме реального времени невозможно. В то же время, так как все получаемые в вычислительных экспериментах результаты протоколируются в базу данных [26], автоматически соответствующими средствами комплекса осуществляется наполнение коллекций типовых сценариев процессов. Возможна интеллектуальная обработка данных [38], в т. ч. унификация, введение признаков и категорий, отнесение результатов серий расчетов пожаров к конкретным территориям и климатическим условиям. Соответствующие каталоги сценариев могут использоваться в комплексе с полуэмпирическими моделями [39], [40].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Экспертное исследование природных пожаров: методическое пособие* / И.Д. Чешко [и др.]. – СПб.: СПб университет ГПС МЧС России, 2019. – 252 с.
2. *Potential threat to human health during forest fires in the Belarusian exclusion zone* / A.A. Dvornik [et al.] // *Aerosol Science and Technology*. – 2018. – Vol. 52, iss. 8. – P. 923–932. – DOI: 10.1080/02786826.2018.1482408.
3. *Statement from WWF-Australia on Australia's bushfire emergency* [Electronic resource]. – www.wwf.org.au, 2020. – Mode of access: www.wwf.org.au/news/news/2020/statement-from-wwf-australia-on-australia-s-bushfire-emergency. – Date of access: 20.04.2020.
4. *Economic impact of Australia's bushfires set to exceed \$4.4bn cost of Black Saturday* [Electronic

resource]. – theguardian.com, 2020. – Mode of access: www.theguardian.com/australia-news/2020/jan/08/economic-impact-of-australias-bushfires-set-to-exceed-44bn-cost-of-black-saturday. – Date of access: 20.04.2020.

5. Волокитина, А.В. Прогнозирование поведения пожаров растительности / А.В. Волокитина, Т.М. Софронова, М.А. Корец // *Лесной журнал*. – 2020. – № 1. – С. 9–25.

6. *Wildfires front dynamics: 3D structures and intensity at small and large scales* / N. Frangieh [et al.] // *Combustion and Flame*. – 2020. – Vol. 211. – P. 54–67. – DOI: 10.1016/j.combustflame.2019.09.017.

7. Гладской, И.Б. К моделированию распространения природных пожаров с использованием ГИС-технологий / И.Б. Гладской, А.В. Павлова, С.Е. Рубцов // *Экологический вестник центров Черноморского экономического сотрудничества*. – 2019. – Т. 16, № 4. – С. 13–21. – DOI: 10.31429/vestnik-16-4-13-21.

8. *Experimental and Numerical Studies of Suppression of Forest Combustible Material Pyrolysis under Influence of Steam-Water Curtain* / D. Antonov [et al.] // *MATEC Web of Conferences: Heat and mass transfer in the thermal control system of technical and technological energy equipment, HMTTSC 2018, EDP Sciences*. – 2018. – P. 01003.

9. Perminov, V. Mathematical modeling of forest fires initiation, spread and impact on environment / V. Perminov, A. Goudov // *International Journal of GEOMATE*. – 2017. – Vol. 13, iss. 35. – P. 93–99. – DOI: 10.21660/2017.35.6704.

10. Барановский, Н.В. Физическое моделирование процессов зажигания еловой хвои углеродистой нагретой до высоких температур частицей / Н.В. Барановский, А.В. Захаревич // *Вопросы лесной науки*. – 2019. – Т. 2 (1). – С. 1–15. – DOI: 10.31509/2658-607x-2019-2-1-1-15.

11. Ласута, Г.Ф. Моделирование процессов возникновения и распространения лесного низового пожара с оценкой уровня тепловой нагрузки от фронта пламени / Г.Ф. Ласута, П.Н. Гоман // *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. – 2019. – Т. 3, № 2. – С. 138–154. – DOI: 10.33408/2519-237X.2019.3-2.138.

12. Сыродой, С.В. Влияние кинетической модели описания процессов термического

разложения на результаты математического моделирования загорания частиц древесной биомассы / С.В. Сыродой, Г.В. Кузнецов // Труды седьмой Российской национальной конференции по теплообмену. В 3 т. – М.: Издательский дом МЭИ. – 2018. – Т. 1. – С. 457–460.

13. Баровик, Д.В. Алгоритмические основы построения компьютерной модели прогноза распространения лесных пожаров / Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук // Вестник ПГУ. Серия С: Фундаментальные науки. – 2011. – № 12. – С. 51–56.

14. *Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour* / E. Pastor [et al.] // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2003. – Vol. 29. – P. 139–153. – DOI: 10.1016/S0360-1285(03)00017-0.

15. Баровик, Д.В. Состояние проблемы и результаты компьютерного прогнозирования распространения лесных пожаров / Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук // Вестник БГУ. Серия 1. Физика. Математика. Информатика. – 2011. – № 3. – С. 78–84.

16. Кулешов, А.А. Моделирование распространения лесных пожаров на основе модифицированной двумерной модели / А.А. Кулешов, Е.Е. Мышецкая, С.Е. Якуш // Математическое моделирование. – 2016. – Т. 28, № 12. – С. 20–32.

17. Экспериментально-численное моделирование процесса горения и распространения огня в условиях лесного низового пожара / П.Н. Гоман [и др.] // Технологии техносферной безопасности. – 2011. – № 3 (37). – 8 с.

18. Баровик, Д.В. О развитии методики Роттермела и реализации двумерной компьютерной модели прогноза распространения лесных пожаров / Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук // Вестник Віцебскага дзяржаўнага ўніверсітэта. – 2011. – № 6 (66). – С. 5–11.

19. Баровик, Д.В. Адаптация модели Роттермела для реализации в программном комплексе прогноза распространения лесных пожаров / Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук // Технологии техносферной безопасности. – 2011. – Вып. 6 (40). – 6 с.

20. Гришин, А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1992. – 408 с.

21. Марзаева, В.И. Математическое моделирование распространения верховых лесных пожаров при наличии противопожарных разрывов и заслонов / В.И. Марзаева // Журнал технической физики. – 2019. – Т. 89, вып. 8. – С. 1141–1149. – DOI: 10.21883/JTF.2019.08.47883.392-18.

22. Кулешов, А.А. Результаты расчетов распространения фронта лесных пожаров по двумерной трехфазной модели / А.А. Кулешов, Е.Е. Мышецкая // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. – 2019. – № 115. – С. 1–9. – DOI: 10.20948/prepr-2019-115.

23. Баровик, Д.В. Об особенностях адаптации математических моделей вершинных верховых

лесных пожаров / Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук // Вестник БГУ. Серия 1. Физика. Математика. Информатика. – 2010. – № 1. – С. 138–143.

24. Barovik, D. Mathematical modelling of running crown forest fires / D. Barovik, V. Taranchuk // *Mathematical Modelling and Analysis*. – 2010. – Vol. 15, № 2. – P. 161–174. – DOI: 10.3846/1392-6292.2010.15.161-174.

25. Баровик, Д.В. Численная реализация математической модели верховых лесных пожаров / Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук // Весці БДПУ. Серыя 3. – 2010. – № 2 (64). – С. 40–44.

26. Баровик, Д.В. Базы данных результатов численного моделирования (на примере задачи распространения лесных пожаров) / Д.В. Баровик // Вестник БГУ. Серия 1. Физика. Математика. Информатика. – 2010. – № 2. – С. 170–174.

27. Heat transfer and phase transformations in the localization of forest fuel combustion / G.V. Kuznetsov [et al.] // *Interfacial Phenomena and Heat Transfer*. – 2019. – Vol. 7, № 2. – P. 167–195. – DOI: 10.1615/InterfacPhenomHeatTransfer.2019031564.

28. Баровик, Д.В. К обоснованию математических моделей низовых лесных пожаров / Д.В. Баровик, В.И. Корзюк, В.Б. Таранчук // Труды института математики. – 2013. – Т. 21, № 1. – С. 3–15.

29. Баровик, Д.В. О корректности одной математической модели низовых лесных пожаров / Д.В. Баровик, В.И. Корзюк, В.Б. Таранчук // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2013. – Т. 57, № 4. – С. 5–9.

30. Таранчук, В.Б. О средствах Wolfram Mathematica для распараллеливания вычислений в компьютерных моделях лесных пожаров / В.Б. Таранчук, Д.В. Баровик // Веб-программирование и интернет-технологии WebConf 2015. Минск: Белорусский государственный университет. – 2015. – С. 108–109.

31. Barovik, D.V. Crown Forest Fire Mathematical Model Realization in Wolfram Mathematica / D.V. Barovik, V.B. Taranchuk // *Computer Algebra Systems in Teaching and Research*. – 2011. – Vol. *Mathematical Modeling in Physics, Civil Engineering, Economics and Finance*. – P. 5–15.

32. Barovik, D.V. Results of Crown Forest Fires Mathematical Modelling / D.V. Barovik, V.B. Taranchuk // *Computer Algebra Systems in Teaching and Research*. – 2011. – Vol. *Mathematical Modeling in Physics, Civil Engineering, Economics and Finance*. – P. 16–22.

33. *Implicit-Explicit Methods for a Convection-Diffusion-Reaction Model of the Propagation of Forest Fires* / R. Burger [et al.] // *Mathematics*. – 2020. – № 8 (6). – P. 1034. – DOI: 10.3390/math8061034.

34. Баровик, Д.В. Моделирование процессов распространения низовых лесных пожаров при наличии полей на пути огня / Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук // Математические методы в

технике и технологиях (ММТТ). – 2017. – Т. 12, Ч. 1. – С. 109–113.

35. *Taranchuk, V.* Numerical Modelling of Surface Forest Fire Spread in Nonuniform Woodland / V. Taranchuk, D. Barovik // *Computer Algebra Systems in Teaching and Research (CASTR)*. – 2019. – Vol. VIII. – P. 159–168.

36. *Таранчук, В.Б.* Методы, средства, отдельные результаты компьютерного моделирования низовых лесных пожаров / В.Б. Таранчук, Д.В. Баровик // *Информационные технологии и системы 2017 (ИТС 2017): материалы международной научной конференции*. – Минск: БГУИР. – 2017. – С. 178–179.

37. *Таранчук, В.Б.* Компьютерное моделирование лесных пожаров / В.Б. Таранчук, Д.В. Баровик // *Наука, инновации, инвестиции: сборник материалов 2-го Белорусско-Латвийского форума*. – Минск: Белорусский национальный технический университет. – 2014. – С. 73–75.

38. *Таранчук, В.Б.* Средства и примеры интеллектуальной обработки данных для геологических моделей / В.Б. Таранчук // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2019. – № 3 (40). – С. 117–122.

39. *Баровик, Д.В.* Структура и функционал модуля «оперативно-аналитический блок» программного комплекса регистрации и обработки сообщений о чрезвычайных ситуациях / Д.В. Баровик, В.Б. Таранчук, Л.В. Школьников // *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*. – 2013. – № 2 (34). – С. 84–94.

40. *Баровик, Д.В.* Методические и алгоритмические основы программного комплекса «Расчет и визуализация динамики лесного пожара» / Д.В. Баровик, В.И. Корзюк, В.Б. Таранчук // *Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация*. – 2011. – № 2 (30). – С. 22–33.

Поступила в редакцию 02.06.2020.