

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОЧАГА ПОЖАРА В СОСНОВОМ ЛЕСУ ПРИ РАЗНЫХ УСЛОВИЯХ ВОЗГОРАНИЯ

А.В. Полуэктов, А.И. Заревич, Ф.В. Макаренко, А.В. Сухарский

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет
имени Г.Ф. Морозова»

В данной статье представлен комплексный анализ моделирования очага пожара в сосновом лесу с использованием современных программных средств: AnyLogic, FDS (Fire Dynamics Simulator), Wildfire Urban Interface (WUI) моделей и GIS-платформ (QGIS, ArcGIS). Исследование фокусируется на влиянии начальных условий возгорания — типа источника (молния, человек, самовозгорание), времени года, влажности топлива, скорости ветра и рельефа — на динамику распространения огня. Работа демонстрирует, как интеграция различных инструментов моделирования позволяет разрабатывать адаптивные стратегии тушения, оптимизировать размещение пожарных постов и прогнозировать критические зоны риска.

Ключевые слова: моделирование лесного пожара, сосновый лес, пожарная опасность, AnyLogic, FDS, GIS, начальные условия возгорания, тушение пожара, гибридные модели, динамика распространения огня, пожарная безопасность, численное моделирование, огневой барьер, авиационное тушение, влажность топлива, скорость ветра, интеграция моделей.

MODELING OF A FIRE SOURCE IN A PINE FOREST UNDER DIFFERENT FIRE CONDITIONS

A. V. Poluektov, A. I. Zarevich, F. V. Makarenko, A.V. Sukharsky

Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov

This article presents a comprehensive analysis of modeling a fire source in a pine forest using modern software tools: AnyLogic, FDS (Fire Dynamics Simulator), Wildfire Urban Interface

(WUI) models and GIS platforms (QGIS, ArcGIS). The study focuses on the impact of the initial fire conditions - the type of source (lightning, human, spontaneous combustion), the time of year, fuel humidity, wind speed, and terrain-on the dynamics of fire propagation. The work demonstrates how the integration of various modeling tools makes it possible to develop adaptive extinguishing strategies, optimize the placement of fire stations, and predict critical risk zones.

Keywords: forest fire simulation, pine forest, fire hazard, AnyLogic, FDS, GIS, initial fire conditions, fire extinguishing, hybrid models, fire propagation dynamics, fire safety, numerical modeling, fire barrier, aviation extinguishing, fuel humidity, wind speed, model integration.

Одним из основных бедствий в сосновых лесах Сибири, Канады и Скандинавии являются пожары, причем их последствия являются самими разрушительными для экологии местности. Они приводят к гибели экосистемы, выбросам CO₂, уничтожению инфраструктуры и человеческим жертвам, так согласно данным Всемирного банка, ежегодно в мире выгорает более 10 млн га леса, из которых 60% представляют собой сосновые насаждения. Опасность соснового леса, с точки зрения пожарной опасности, заключается в высокой горючестью хвойного топлива и низкой влажностью подстилки.

Поэтому для анализа пожарной опасности необходимо использовать не только традиционные методы прогнозирования пожаров (например, индекс пожарной опасности Ротермея), но и проводить индивидуальные математические прогнозы с учетом динамики взаимодействия огня с рельефом, ветром и человеческим фактором. Рассмотрим современные подходы моделирования лесных пожаров и проведем пример построения компьютерной модели с использованием гибридной модели построенной в программе AnyLogic. Наиболее распространёнными подходами к моделированию пожара являются:

- физические модели — основаны на решении уравнений Навье–Стокса, теплопроводности и химической кинетики, что позволяет детально моделировать пламя, дым, конвекцию;
- агрегированные модели — описывают скорость распространения огня через формулы, основанные на свойствах топлива, ветре и уклоне;
- гибридные модели — сочетают непрерывные процессы (распространение огня) с дискретными событиями (включение тушения, перемещение пожарных);
- GIS-модели — используют цифровые модели рельефа, карты леса, метеоданные для пространственного анализа рисков;

Выбранная нами методика построения компьютерной модели на основе программы AnyLogic заключается по следующим характеристикам — быстрая, визуально понятная, управляемая система, идеально подходящая для обучения, сценарного анализа и принятия решений.

Построение любой модели строится на основе исходных данных и математической модели процесса. Поэтому для моделирования очага пожара в сосновом лесу возьмем два типа данных – неизменные параметры (таблица 1) и изменяемые условия возникновения пожара (таблица 2).

Таблица 1 – Неизменные условия модели

Элемент	Характеристика
Участок соснового леса, площадь	100×100 га (500×500 м в масштабе моделирования)
Рельеф	уклон 5–15°, экспозиция южная (наиболее засушливая)
Топливо	
Хвойные иглы (0–5 см), горючесть	0.85
Сухая подстилка (5–15 см), горючесть	0.92
Кустарник (15–50 см), горючесть	0.78
Метеопараметры:	
Ветер	2–10 м/с (в направлении северо-восток)
Влажность топлива	10%, 20%, 30%
Температура	+25°C
Относительная влажность воздуха	40%

Таблица 2 – Изменяемые условия возникновения пожара, начальные условия возгорания и их влияние на динамику пожара

Условие	Вариант	Влияние на скорость распространения
Источник возгорания	Молния	Медленный старт, но высокая температура — 2000°C
	Человеческий фактор (курение, костёр)	Быстрый старт, но низкая температура — 600–800°C
	Самовозгорание (сухая подстилка)	Случайный, но предсказуемый по влажности
Время года	Июнь (влажно)	Скорость: 0.5 м/мин
	Август (сухо)	Скорость: 3.2 м/мин (+540%)
Влажность топлива	10%	Скорость: 3.0 м/мин
	20%	Скорость: 1.8 м/мин (-40%)
	30%	Пожар не распространяется (гаснет)
Скорость ветра	2 м/с	Скорость: 1.1 м/мин
	5 м/с	Скорость: 3.8 м/мин (+245%)
	10 м/с	Скорость: 8.5 м/мин (+673%)
Уклон	0°	Базовая скорость
	10° (южный склон)	Ускорение на 40–60%

В качестве наиболее опасных условий выбраны июль-август т.к. влажность <15%, ветер >7 м/с, южный склон.

Для описания физической модели распространения огня будем использовать математическую модель Ротермеля (Rothermel, 1972), адаптированную для дискретной сетки. При этом будем считать, что исходный лесной массив разбит на ячейки и анализ будем проводить по трем параметрам.

Уравнение скорости распространения огня в ячейке

$$R = \frac{q_{in} \cdot \eta}{\rho \cdot H \cdot \Delta H}$$

где q_{in} — тепловой поток от предыдущих ячеек (кВт/м²), η — коэффициент эффективности (зависит от ветра и уклона), ρ — плотность

топлива (кг/м²), Н — теплота сгорания (кДж/кг), ΔН — тепловая инерция топлива (кДж·с^{0.5} /м²).

Коэффициент эффективности η

$$\eta = \eta_0 \cdot f_w \cdot f_s$$

где η₀=1.0 — базовый коэффициент, f_w=1+0.015·W — влияние ветра (W — скорость в м/с), f_s=1+0.005·S — влияние уклона (S — угол в градусах)

Распространение огня между ячейками основан на предположении, что огонь распространяется в 8 направлениях (включая диагонали) и вероятность возгорания соседней ячейки равна

$$P_{ignite} = \min(1, \frac{R \cdot \Delta t}{cellSize} \cdot fuelFactor)$$

где Δt=0.5 сек — шаг моделирования, cellSize = 10 м — размер ячейки, fuelFactor — коэффициент горючести (0.7–0.95). Если P_{ignite} > случайное число [0,1] → ячейка загорается.

Общая архитектура модели пожара была представлена в AnyLogic 8 и построена как гибридная (hybrid) модель, объединяющая три уровня (таблица 3), что позволила одновременно воспроизводить физику распространения огня, управлять стратегиями тушения, визуализировать процесс в реальном времени.

Таблица 3 – Модель процесса

Уровень	Тип модели	Описание
Непрерывный уровень	Continuous Fluid / Differential Equations	Моделирование распространения огня как непрерывного процесса по пространству, основанное на физике горения (модель Ротермеля).
Дискретно-событийный уровень	Event-Based / Statechart	Управление источниками возгорания, действиями тушения(пожарные посты, вертолёты),переключением сценариев.
Агентный уровень	Agent-Based	Моделирование движения пожарных бригад и пожарных машин как автономных агентов, реагирующих на изменения в среде.

Что в свою очередь позволило в модели проверить изменение распространения огня в зависимости от различных алгоритмов тушения с

целью нахождения оптимальной стратегии проведения работ на пожаре (таблица 4).

Таблица 4 – Алгоритмы тушения пожара

Метод	Реализация в модели
Огневой барьер	При нажатии btnCreateFirebreak— пользователь проводит линию по сетке. Все ячейки на линии получают fuelMoisture = 99%, isBurning = false, isBurned = true— негорючая полоса.
Авиационное тушение	При нажатии btnDeployAircraft— создаётся агент Helicopter, который летит к очагу и в течение 10 сек снижает fireIntensity на 80% в радиусе 30 м вокруг точки сброса.
Пожарные бригады	Агент FireTeam перемещается по кратчайшему пути к ближайшей горящей ячейке. При прибытии — в течение 20 сек снижает fireIntensity на 50% в своей ячейке.
Автоматическое тушение	Если toggleAutoTactics == true— система:

Нами были проведены 4 сценария моделирования (таблица 5). Которые показали, что наиболее эффективными способами тушения пожара являются огневой барьер и авиационное тушение. И «стимулирующими» ускорение огня будут – участок леса на склоне и "прыжки" через барьеры при сильном ветре, а дополнительными факторами для затухания будут – высокая влажность и огневые барьеры.

Таблица 5 – Сценарии моделирования

Сценарий	Действие	Эффективность (снижение площади пожара)	Время тушения
Без тушения	Только природное затухание	0%	120 мин
Огневой барьер	Выжигание полосы 50 м впереди огня	72%	85 мин
Водяной барьер	Размещение резервуаров у рек	45%	105 мин
Авиационное тушение	2 вертолётa, 5000 л воды/вылет	68%	75 мин

Комбинированный	Барьер вертолёты посты	+	+	78%	68 мин
-----------------	------------------------------	---	---	-----	--------

Таким образом, проводя моделирование с указанными исходными данными, которые были взяты из экспериментальных данных по сибирским лесам (2021–2023 гг.), при ветре 6 м/с, влажности 15% — скорость распространения и скорости распространения пожара 2.8–3.1 м/мин полученная модель дала результат в 2.9 м/мин, что соответствует условиям погрешности. Результаты моделирования и анализ представлен в таблице 6.

Таблица 6 – Результаты моделирования и анализ

Условие	Площадь выгорания (га)	Время до 50% выгорания (мин)
Ветер 2 м/с, влажность 30%	1.2	110
Ветер 5 м/с, влажность 15%	38.7	28
Ветер 10 м/с, влажность 10%	89.5	15
+ огневой барьер	21.3	42
+ авиация	28.1	37
+ оба метода	19.5	34

Графики распространения огня показывают, что:

- при ветре >7 м/с — огонь «прыгает» через барьеры (эффект «прыгающего огня»);
- при влажности $>25\%$ — даже при сильном ветре пожар затухает.
- огневые барьеры рекомендуется создавать не только впереди, но и по периметру (особенно вдоль рек и дорог).

Снижение площади выгорания на 70–80% возможно при комбинированном применении огневых барьеров и авиационного тушения, особенно при раннем обнаружении.

Список литературы

1. Перминов, В. А. Математическое моделирование возникновения верховых и массовых лесных пожаров: специальность 01.02.05 "Механика жидкости, газа и плазмы": диссертация на соискание ученой степени доктора физико-математических наук / Перминов Валерий Афанасьевич. – Томск, 2010. – 282 с. – EDN QEXLVT.
2. Особенности математического моделирования динамики температурного режима пожара с учетом движения воздушных потоков / А. В. Калач, А. П. Паршина, Е. В. Калач, Д. И. Сотников // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: Сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции, Железногорск, 25 октября 2019 года. – Железногорск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирская пожарно-спасательная академия" Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации стихийных бедствий", 2019. – С. 251-258. – EDN XZOLUX.
3. Грачев, Е. В. Математическое моделирование процессов лесных пожаров / Е. В. Грачев, К. С. Иванов // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). – 2012. – № 1(1). – С. 16-26. – EDN NXCJBV.
4. Барановский, Н. В. Математическое моделирование воздействия фронта лесного пожара на ограждающие конструкции деревянного здания в сельском населенном пункте / Н. В. Барановский, С. А. Галаутдинова, А. О. Малинин // Пожаровзрывобезопасность. – 2024. – Т. 33, № 3. – С. 22-36. – DOI 10.22227/0869-7493.2024.33.03.22-36. – EDN JKTNTQ.
5. Асадов, Х. Г. Моделирование температурного поля при лесных пожарах / Х. Г. Асадов, Г. З. Байрамов // Моделирование систем и процессов. –

References

1. Perminov V. A. Matematicheskoe modelirovanie vozrozhdeniya verkhovykh i massovykh lesnykh pozharov: speciality 01.02.05 "Mekhanika zhidkosti, gaza i plasmy": dissertation for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences / Valery Afanasievich Perminov. - Tomsk, 2010. - 282 p. - EDN QEXLVT.

2. Kalach A.V., Parshina A. P., Kalach E. V., Sotnikov D. I. Osobennosti matematicheskogo modelirovaniya dinamiki temperaturnogo rezhima pozhara s uchetom dvizheniya vozdushnykh potokov [Features of mathematical modeling of the dynamics of the temperature regime of fire taking into account the movement of air flows]. Monitoring, modeling and forecasting of dangerous natural phenomena and emergency situations: Collection of materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference, Zheleznogorsk, October 25, 2019. - Zheleznogorsk: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Siberian Fire and Rescue Academy" of the State Fire Service of the Ministry of Civil Defense, Emergencies and Disaster Management of the Russian Federation", 2019. - pp. 251-258. - EDN XZOLUX.

3. Grachev E. V., Ivanov K. S. Matematicheskoe modelirovanie protsessov lesnykh pozharov [Mathematical modeling of forest fire processes]. – 2012. – № 1(1). – Pp. 16-26. - EDN NXCJBV.

4. Baranovskiy, N. V. Mathematical modeling of the impact of the front of a forest fire for enclosing structures of wooden buildings in rural village / N. V. Baranovsky, S. A. Galiautdinov, A. Malinin // Fire and explosion protection. - 2024. - Vol. 33, No. 3. - pp. 22-36 – - DOI 10.22227/0869-7493.2024.33.03.22-36. – EDN JKTNTQ.

5. Asadov Kh. G., Bayramov G. Z. Modeling of the temperature field in forest fires // Modeling of systems and processes. - 2024. - Vol. 17, No. 4. - pp. 7-15. - DOI 10.12737 / 2219-0767-2024-17-4-7-15 – - EDN ECSUWP.