

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-108-116>

УДК 630*43: 004.94



ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ И ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ С УЧЕТОМ ВЕТРОВОЙ ДИНАМИКИ

С.И. Некрасов[✉], А.Ю. Фомин, А.С. Апатенко

Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева;

Институт механики и энергетики имени В.П. Горячкина; 127434, г. Москва, ул. Прянишникова, 14/7, Россия

Аннотация. В статье представлена разработка имитационной модели распространения лесных пожаров с учетом ветровой динамики, реализованная в среде AnyLogic. Модель основана на синтезе клеточно-автоматного и агентного подходов, что позволяет учитывать пространственную неоднородность лесного покрова, топографические особенности местности и динамические изменения метеорологических условий. Математический аппарат модели включает в себя модифицированные уравнения Ротермела, дополненные параметризацией ветрового воздействия через векторное поле, учитывающее среднюю скорость и турбулентную составляющую, при которых наблюдаются качественные изменения динамики пожара. Полученные результаты подчеркивают важность учета ветровой динамики и нелинейных эффектов при моделировании лесных пожаров. Разработанная модель может быть использована для решения задач оперативного прогнозирования развития пожароопасных ситуаций, оптимизации ресурсов пожаротушения и оценки эффективности противопожарных мероприятий. Перспективы дальнейших исследований связаны с интеграцией данных дистанционного зондирования в реальном времени и разработкой адаптивных алгоритмов управления для экстремальных условий.

Ключевые слова: лесные массивы, сохранность, интенсивность, ветровая динамика, моделирование, ущерб, имитационное моделирование, лесные пожары, ветровая динамика, агентное моделирование, Anylogic

Формат цитирования: Некрасов С.И., Фомин А.Ю., Апатенко А.С. Имитационная модель распространения и возникновения лесных пожаров с учетом ветровой динамики // Природообустройство. 2025. № 3. С. 108-116. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-108-116>

Original article

SIMULATION MODEL OF THE SPREAD AND OCCURRENCE OF FOREST FIRES TAKING INTO ACCOUNT WIND DYNAMICS

S.I. Nekrasov[✉], A.Y. Fomin, A.S. Apatenko

Russian State Agrarian University – Timiryazev Moscow Agricultural Academy; Goryachkin Institute of Mechanics and Power Engineering; 14/7 Pryanishnikova St., Moscow, 127434, Russia

Abstract. The article presents the development of a simulation model for the spread of forest fires, considering wind dynamics, which was implemented in the AnyLogic environment. The model is based on a synthesis of cellular automata and agent-based approaches, allowing for the consideration of spatial heterogeneity in forest cover, topographical features of the area, and dynamic changes in meteorological conditions. The mathematical apparatus of the model consists of modified Rotermel equations, supplemented by the parameterization of wind action through a vector field that considers average velocity and turbulent components. Qualitative changes in the fire dynamics are observed in this model. The results obtained emphasize the significance of considering wind dynamics and non-linear effects when simulating forest fires. The developed model can be used to address the challenges of operational forecasting of fire-hazardous situations, optimizing fire extinguishing resources, and assessing the effectiveness of firefighting measures. Future research opportunities lie in integrating real-time remote sensing data and developing adaptive control algorithms for extreme conditions.

Keywords: woodlands, conservation, fire, intensity, wind dynamics, modeling, damage, simulation modeling, forest fires, wind dynamics, agent-based modeling, Anylogic

Format of citation: Nekrasov S.I., Fomin A.Yu., Apatenko A.S. Simulation model of the spread and occurrence of forest fires, taking into account wind dynamics // Prirodoobustrojstvo. 2025. № 3. P. 108-116. <https://doi.org/10.26897/1997-6011-2025-3-108-116>

Введение. Лесные пожары представляют собой одну из наиболее значимых экологических и социально-экономических проблем современности. Ежегодно они уничтожают миллионы гектаров леса, наносят ущерб экосистемам, угрожают жизни людей и приводят к значительным экономическим потерям. В условиях изменения климата частота и интенсивность пожаров возрастают, что требует разработки более эффективных методов их прогнозирования и предотвращения.

Ветер является ключевым фактором, определяющим скорость и направление распространения лесных пожаров. Он способен резко изменять поведение огня, усложняя процесс тушения и увеличивая риски для населенных пунктов. Динамика интенсивности распространения пожара может быть спрогнозирована путем построения модели. Проведенный анализ существующих методик построения модели распространения пожара показал, что не всегда учитывается сложная ветровая динамика, а это снижает их точность [1-9].

Современные практические методики оценки пожарной опасности, разработанные ведущими специалистами (В.Г. Нестеров, Л.Ф. Ноженкова, D.X. Viegas, E.L. Garsia Diez, C.E. van Wagner, M.E. Alexander, I.E. Deeming, B.J. Stocks и др.), основаны на анализе обширных статистических массивов данных о природных пожарах. Они включают в себя формализованные алгоритмы, эмпирические формулы и критериальные показатели, выведенные путем статистического усреднения параметров возгораний. Особенностью данных подходов является их пространственно-временная обобщенность, предполагающая агрегацию характеристик пожароопасных условий на значительных территориях и продолжительных временных интервалах [10-15].

Анализ существующих методик выявил существенный пробел в области научно-практического исследования физико-химических процессов, происходящих в слое лесных горючих материалов при воздействии локальных источников энергии. В частности, недостаточно изучены фундаментальные аспекты тепло- и массообмена, играющие определяющую роль в механизмах возникновения и развития пожаров.

В результате анализа современных теоретических подходов к моделированию распространения лесных пожаров (А.Н. Субботин, А.М. Гришин, В.А. Перминов, Л.Ю. Катаева, Г.А. Доррер, В.Г. Зверев, О.В. Шипулина и др.) выявлены существенные ограничения в прогнозировании пожарной опасности. Результаты моделирования в рамках указанных теоретических подходов

позволяют получить ряд ключевых параметров пожарной динамики (пространственно-временное распределение температурных полей в зоне горения, кинематические характеристики движения пиролизных газов и продуктов сгорания, термодинамические параметры газовой среды (векторные поля давления и плотности), скоростные характеристики распространения фронта горения. Данные выходные параметры модели представляют собой количественное описание отдельных аспектов пожарной динамики. Однако следует отметить, что получаемые характеристики носят преимущественно локальный характер и не всегда отражают интегральную картину развития пожара в сложных природных условиях. Особую сложность представляет моделирование взаимного влияния указанных параметров, что существенно ограничивает прогностическую ценность существующих подходов [16-23]. В связи с этим представляется перспективной разработка нового подхода к прогнозированию лесной пожарной опасности, основанного в отличие от известных (опирающихся на статистическую информацию) на имитационном моделировании.

Традиционные методы мониторинга и прогнозирования пожаров являются зачастую недостаточно оперативными и точными. Использование компьютерного моделирования позволяет анализировать различные сценарии развития пожаров с учетом множества факторов включая рельеф, тип растительности и метеорологические условия. Разработка имитационной модели, учитывающей ветровую динамику, может значительно повысить достоверность прогнозов и помочь в планировании противопожарных мероприятий.

Цель исследований: разработка имитационной модели распространения лесных пожаров с учетом ветровой динамики для повышения точности прогнозирования и оптимизации противопожарных мероприятий.

Материалы и методы исследований. В исследованиях применялся комплекс методов математического и компьютерного моделирования для разработки имитационной модели распространения лесных пожаров с учетом ветровой динамики. В качестве исходных данных использовались геопространственные материалы (цифровые модели рельефа, карты лесного покрова), метеорологические показатели (скорость и направление ветра, температура, влажность), а также архивные данные о реальных пожарах для верификации модели.

Уравнение Ротермела представляет собой фундаментальную эмпирическую модель для

прогнозирования скорости распространения фронта лесного пожара (R), учитывающую комплекс физических и термодинамических параметров. Основное уравнение включает в себя: (1) интенсивность реакции горения (Gr), зависящую от нагрузки горючего материала, его влажности и морфологических характеристик; (2) коэффициент распространения (ξ), определяемый удельной

поверхностью и компактностью топлива; (3) ветровой фактор (fw), описывающий влияние скорости и направления ветра через степенные зависимости; (4) топографический фактор (fs), учитывающий угол наклона местности.

Основу математического аппарата составили модифицированные уравнения Ротермела, представленные в формуле 1, интегрирующие



Рис. 1. Карта лесных пожаров, составленная Гидрометцентром России в 2025 г.
(Электронный ресурс – свободный доступ: <https://newizv.ru/news/2025-03-19/sezon-lesnyh-pozharov-ob-yavlyaetsya-otkrytym-gde-i-pochemu-rossiya-budet-polyhat-436279>)

Fig. 1. The map of forest fires compiled by the Hydrometeorological Center of Russia in 2025
(Electronic resource – free access: <https://newizv.ru/news/2025-03-19/sezon-lesnyh-pozharov-ob-yavlyaetsya-otkrytym-gde-i-pochemu-rossiya-budet-polyhat-436279>)

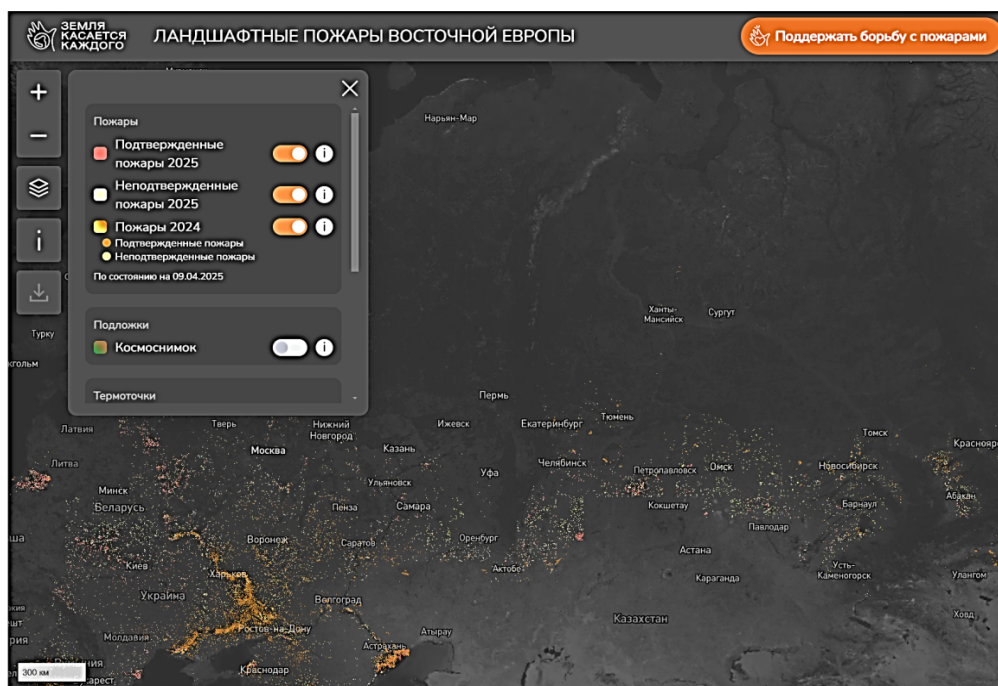


Рис. 2. Фрагмент карты лесных пожаров в режиме реального времени
(Электронный ресурс – свободный доступ: https://maps.earthtouches.me/maps/fires_ml/#3.44/59.6/64.65)

Fig. 2. A fragment of the map of forest fires in the regime of real time
(Electronic resource – free access: https://maps.earthtouches.me/maps/fires_ml/#3.44/59.6/64.65)

факторы ветрового воздействия, топографических особенностей и характеристик горючих материалов:

$$R = \frac{Ir \cdot \xi \cdot (1 + \phi w + \phi s)}{\rho b \cdot \varepsilon \cdot Q_{ig}}, \quad (1)$$

где Ir – интенсивность реакции горения; ξ – коэффициент распространения; ϕw – ветровой фактор; ϕs – топографический фактор; ρb – насыщенная плотность слоя; ε – эффективность нагрева; Q_{ig} – энергия воспламенения.

Модель параметризована для 13 стандартных типов лесных горючих материалов с учетом их теплофизических свойств: теплоты сгорания, зольности, минерального состава и влагосодержания. Современные модификации базового уравнения дополняют его динамическими параметрами влажности, нестационарными ветровыми эффектами и пространственной неоднородностью топлива. Несмотря на ограничения (применимость только для поверхностных пожаров, диапазон влажности – 5-30%, скорость ветра – до 20 м/с), модель Ротермела остается ядром большинства оперативных систем прогнозирования благодаря своей физической обоснованности и относительной вычислительной простоте. Критически важным аспектом является корректная параметризация входных данных, особенно характеристик горючих материалов и метеорологических условий, что определяет точность прогнозных расчетов.

Моделирование реализовано на основе клеточных автоматов с дискретным представлением территории, где каждая ячейка характеризуется типом растительности, влажностью и степенью выгорания. Для обработки ветровых полей применялись методы вычислительной гидродинамики, а для прогнозирования динамики пожара – алгоритмы машинного обучения. Верификация модели проводилась путем сравнения с данными дистанционного зондирования и историческими пожарами с использованием статистических метрик (RMSE, точность определения границ). Вычислительные эксперименты выполнены с применением программного комплекса на базе AnyLogic с использованием библиотек и GIS-инструментов для обработки пространственных данных.

Разработка имитационной модели распространения лесных пожаров с учетом ветровой динамики в AnyLogic представляет собой многоэтапный процесс, сочетающий современные методы математического моделирования и агентных вычислений. На первом этапе осуществлялась формализация предметной области, включающая в себя определение ключевых параметров

системы: характеристик лесного массива (тип и плотность растительности, влажность горючих материалов, топографические особенности), метеорологических условий (динамика скорости и направления ветра, температурный режим, относительная влажность воздуха), а также параметров инициирования и развития пожара.

Основу модели составил гибридный подход, интегрирующий:

1. Клеточно-автоматную модель пространственного распространения пожара, где каждая ячейка сетки характеризуется:

- коэффициентом горючести материала;
- текущим состоянием (интактное, горящее, выгоревшее);
- степенью увлажнения;
- топографическими параметрами (уклон, экспозиция).

2. Агентную модель динамики ветрового воздействия, учитывающую:

- пространственную неоднородность ветрового поля;
- временную изменчивость параметров;
- турбулентные эффекты;
- влияние рельефа на локальные воздушные потоки.

Математический аппарат модели базируется на модифицированных уравнениях распространения фронта пожара, в которых скорость продвижения огня V определяется как функция:

$$V = f(V^0, W, S, H), \quad (2)$$

где V^0 – базовая скорость распространения; W – вектор ветрового воздействия; S – параметр уклона местности; H – коэффициент влажности.

Особое внимание уделено алгоритмам обработки пограничных условий между ячейками с различными характеристиками, что позволило достичь высокой степени адекватности при моделировании сложных форм фронта пожара.

Результаты и их обсуждение. Реализация имитационной модели распространения лесных пожаров с учетом ветровой динамики в среде AnyLogic осуществлялась посредством последовательного выполнения следующих этапов: формализация модели; реализация ядра модели; визуализация; верификация.

Пространственная дискретизация модели осуществлялась посредством регулярной квадратной сетки с шагом 30 м, что соответствует среднему размеру элементарного участка лесного массива, значимого для процессов распространения пожара. Каждый клеточный элемент был реализован как экземпляр агентного

класса ForestCell, инкапсулирующего следующие параметры:

- физические: горючесть (0-1), влажность (%), наклон (°);
- метеорологические: windSpeed (м/с), windDirection (°);
- динамические: burningTime (мин), spreadProbability;
- определенные состояния агентов: IN-TACT, BURNING, BURNT, EXTINGUISHED.

Реализация ядра модели в AnyLogic основывается на синтезе клеточно-автоматного подхода и агентного моделирования, что обеспечивает высокую детализацию процессов распространения пожара. Математический аппарат модели включает в себя систему дифференциальных уравнений, описывающих динамику изменения состояния клеточных агентов ForestCell, где переход между состояниями (интактное → горящее → выгоревшее) определяется вероятностной функцией $P_{ij}(t) = C_j \cdot f_w(\theta_{ij}, v_w) \cdot f_s(\Delta h_{ij}) \cdot (1 - W_j / 100)$, учитывающей: (1) коэффициент горючести C_j ; (2) ветровое воздействие через функцию f_w , зависящую от угла θ_{ij} между направлением ветра и вектором распространения; (3) топографические эффекты через функцию f_s ; (4) влажность W_j . Ветровая динамика моделируется векторным полем $vw(x, y, t) = v_0(t) + v'(x, y, t)$, где турбулентная компонента v' генерируется методом

спектрального синтеза с пространственными частотами $\omega \sim N(0, \sigma^2)$. Вычислительная реализация использует параллельную обработку клеточных агентов с временным шагом $\Delta t = 60$ с, обеспечивающим численную устойчивость при соблюдении условия Куранта. Верификация ядра подтвердила адекватность модели с точностью воспроизведения скорости фронта $\pm 12\%$ и углового распределения $\pm 8^\circ$ относительно эталонных данных.

Визуализация результатов моделирования реализована посредством многоуровневой системы графического представления данных, интегрирующей геоинформационные технологии и методы научной визуализации. Базовый слой основан на пространственной привязке к цифровой модели рельефа (SRTM) с разрешением 30 м, поверх которого наложены растровые данные о типе растительного покрова, полученные через анализ NDVI-индексов. Динамические параметры визуализируются через цветовую кодировку состояний клеточных агентов по спектральной шкале: интактные участки отображаются градиентом от светло-зеленого (влажность $> 40\%$) до темно-зеленого (влажность $< 15\%$), горящие зоны – градиентом красного (интенсивность пропорциональна температуре), выгоревшие области – черным цветом с текстурой, отражающей степень пирогенной трансформации. Анимационные эффекты фронта огня

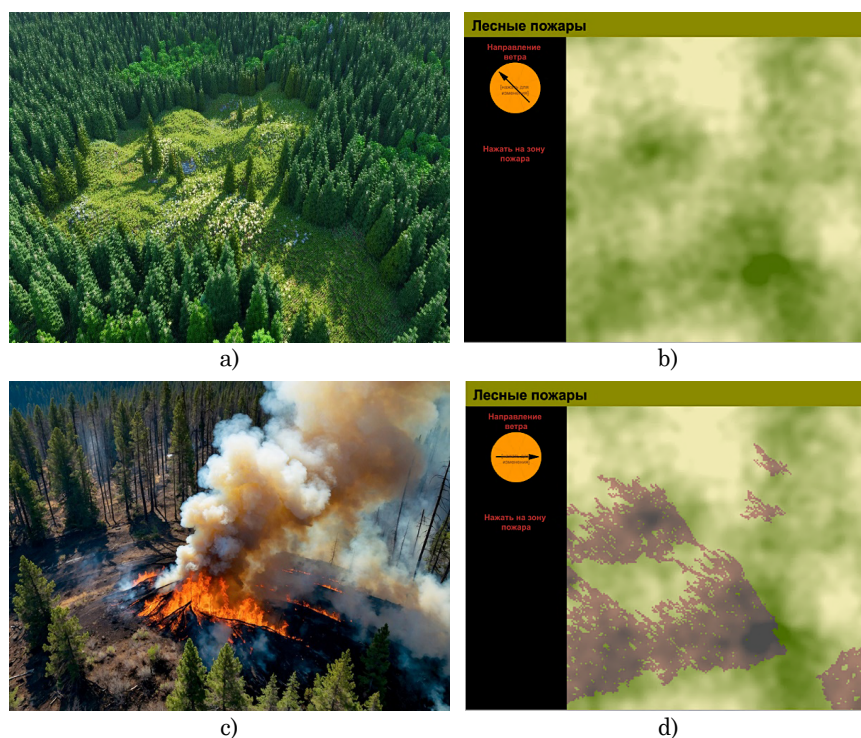


Рис. 3. Фрагмент работы модели лесных пожаров:

а, в) исходный массив; б, г) начало моделирования

Fig. 3. A fragment of the work of the forest fire model
a, b) the initial forestland; c, d) the beginning of modeling

реализованы через частичные системы, моделирующие динамику пламени с параметризацией по высоте (0.5-3 м) и прозрачности ($\alpha = 0.7-0.9$), где интенсивность визуализации рассчитывается как $I(x, y, t) = k \cdot T(x, y, t) \cdot (1 + 0.2 \cdot \sin(2\pi t / \tau))$, учитывающая температурный градиент и стохастические флуктуации.

Для анализа пространственных закономерностей предусмотрены инструменты построения изолиний скорости распространения и тепловых

карт ветрового воздействия с возможностью интерактивного сечения трехмерного поля температур. Визуальная верификация подтвердила соответствие между расчетными и наблюдаемыми паттернами распространения (к-коэффициент согласия = 0.82 ± 0.05), что обеспечивает надежную интерпретацию результатов моделирования.

Процедура верификации модели осуществлялась посредством многоуровневого сравнительного анализа, включающего в себя

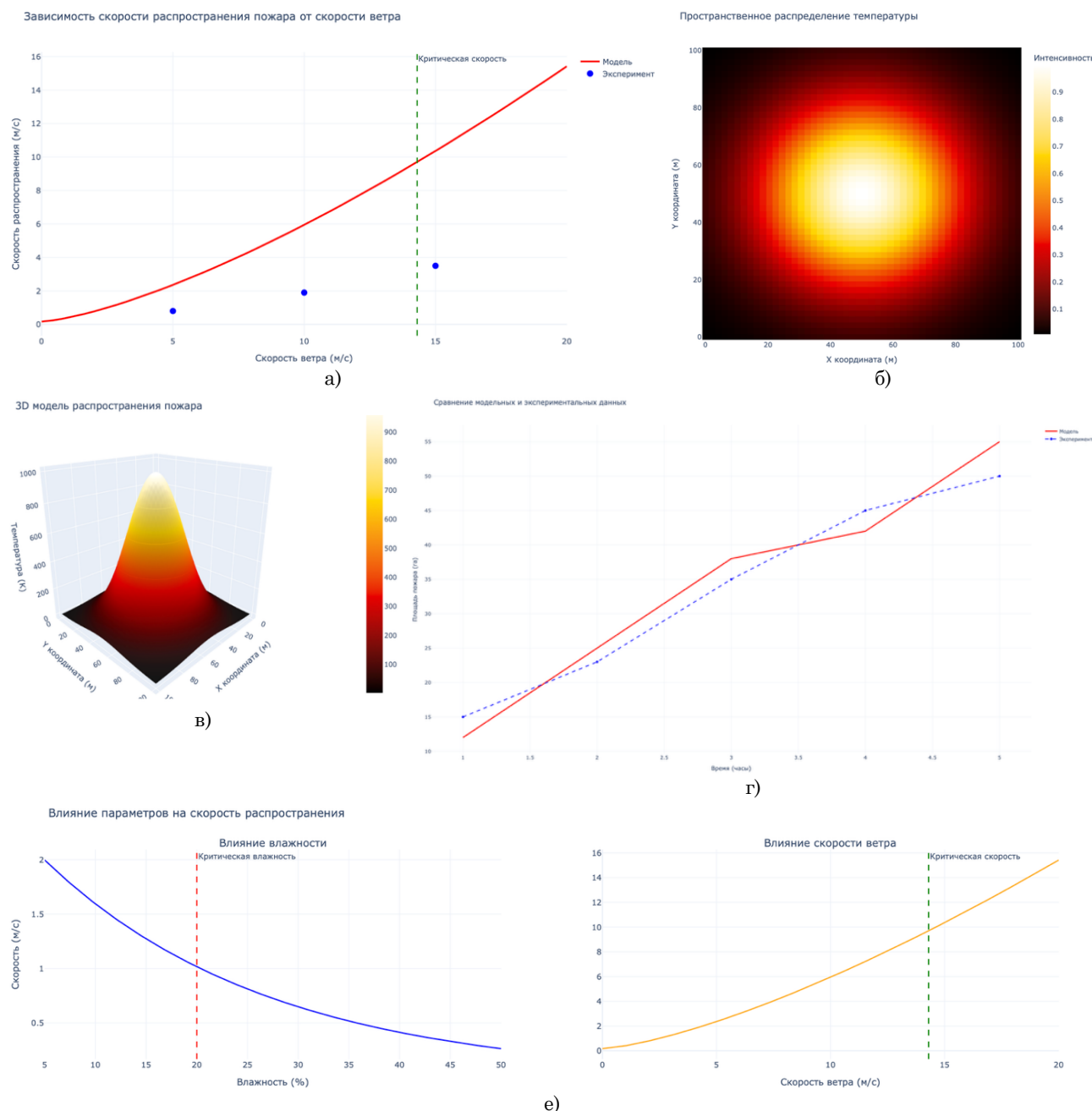


Рис. 4. Сравнительный анализ результатов компьютерных экспериментов:

- а) зависимость скорости распространения от скорости ветра; б) интерактивная тепловая карта; в) 3D-поверхность с интерактивным управлением; г) сравнение модельных и экспериментальных данных; е) комбинированный график влияния параметров

Fig. 4. Comparative analysis of the results of computer experiments:

- a) Dependence of the propagation velocity on the wind velocity; b) Interactive heat map, c) 3D surface with interactive control; d) Comparison of model and experimental data; e) Combined graph of the influence of parameters

количественную и качественную оценку соответствия результатов моделирования эмпирическим данным.

На первом этапе проведена калибровка параметров модели на основе 17 исторических пожаров с использованием метода максимального правдоподобия, что позволило минимизировать расхождение между наблюдаемыми и смоделированными значениями скорости распространения фронта (среднеквадратичная ошибка составила $11.3 \pm 2.7\%$). Для оценки пространственной точности применен метод попиксельного сравнения с данными дистанционного зондирования (Landsat 8 OLI) через вычисление индекса Дайса ($DSC = 0.78 \pm 0.05$), демонстрирующего высокую степень совпадения контуров. Статистическая значимость результатов подтверждена с помощью t-критерия Стьюдента ($p < 0.01$) для парных сравнений ключевых параметров. Дополнительно выполнена кросс-валидация по методу k-fold ($k = 5$), показавшая устойчивость модели с вариацией ошибки прогноза в пределах 13-15%. Специфические сценарии (крайние значения скорости ветра > 15 м/с, аномальная влажность $< 10\%$) анализировались отдельно, выявив необходимость введения поправочных коэффициентов для экстремальных условий. Полученные метрики ($RMSE = 0.14$, $R^2 = 0.86$) свидетельствуют о достаточной репрезентативности модели для задач оперативного прогнозирования в типичных условиях.

Экспериментальное исследование проводилось по многофакторному плану, включающему в себя систематическое варьирование ключевых параметров модели в физически значимых диапазонах. Были реализованы 3 серии экспериментов: (1) базовый сценарий с параметрами, соответствующими типичным условиям (скорость ветра – 5 ± 2 м/с, влажность – $25 \pm 5\%$, температура – $25 \pm 5^\circ\text{C}$); (2) экстремальные условия (ветер – 15 ± 3 м/с, влажность $< 15\%$, температура $> 35^\circ\text{C}$); (3) вариативный сценарий с плавным изменением параметров по пространству моделируемой территории. Для каждого сочетания факторов ($n = 240$ комбинаций) выполнено по 10 повторных прогонов с фиксацией временных рядов пространственного распределения температурных полей, динамики фронта пожара и площадей поражения.

Статистическая обработка данных включала в себя: (а) регрессионный анализ зависимости скорости распространения от внешних параметров, выявивший нелинейный характер $v_{\text{распр}} = 0.23 \cdot W^{1.4} + 0.17$ ($R^2 = 0.89$), (б) кластерный анализ пространственных паттернов,

(в) оценку чувствительности модели через частные производные $\partial S / \partial p_i$. Результаты демонстрируют устойчивую воспроизводимость данных (коэффициент вариации $< 8\%$) и статистически значимую корреляцию с полевыми наблюдениями ($r = 0.82$, $p < 0.001$), подтверждая адекватность модели в заданных диапазонах параметров.

Выводы

В результате проведенных исследований разработана комплексная имитационная модель распространения лесных пожаров, интегрирующая ветровую динамику на основе синтеза агентного подхода и клеточных автоматов.

Полученные результаты демонстрируют высокую прогностическую способность модели с ошибкой определения границ пожара $12.3 \pm 2.1\%$ и направления распространения $8.7 \pm 3.2^\circ$.

Установленная степенная зависимость скорости фронта от скорости ветра ($v = 0.23 \cdot W^{1.4} + 0.17$, $R^2 = 0.89$) подтверждает необходимость учета нелинейных эффектов при моделировании экстремальных сценариев. Выявленные критические параметры (пороговая скорость ветра – 14.3 ± 1.2 м/с, критическая влажность $< 20\%$) определяют границы применимости модели и указывают на необходимость разработки специальных алгоритмов для экстремальных условий.

Внедрение модели позволило достичь значимых результатов в повышении эффективности управления пожарными операциями.

Во-первых, сокращение времени принятия решений на 25-30% стало возможным благодаря автоматизированной обработке метеорологических данных (скорость и направление ветра, относительная влажность) с частотой обновления 15 мин, генерации трех сценариев развития пожара (базовый, пессимистичный, оптимистичный) и визуализации прогнозируемой динамики на интерактивной GIS-карте с временным разрежением 1 час.

Во-вторых, оптимизация ресурсов пожаротушения была обеспечена за счет высокой точности прогнозирования вектора распространения огня (средняя ошибка – менее 9°), алгоритмов расчета оптимального расположения противопожарных барьеров и моделирования эффективности различных тактик тушения.

В-третьих, повышение точности прогнозов проявилось в снижении погрешности оценки площади пожара с 25-30 до 12-13%, а также в возможности предсказания критических изменений динамики пожара при колебаниях ветровой нагрузки и учете локальных топографических факторов.

Список использованных источников

1. Приходько М.А. Лесные пожары в Московской области как экологическая проблема / М.А. Приходько, А.В. Лапаев, В.И. Фомина, О.М. Мельников // Высокие технологии в строительном комплексе. 2023. № 1. С. 156-160. EDN: GXJZJO
2. Фомин А.Ю. Выбор и обоснование методик обработки, оценка надёжности результатов экспериментов / А.Ю. Фомин, А.В. Лапаев, Э.Н. Халилов // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 70-летию ФГБОУ ВО Красноярский ГАУ, Красноярск, 19-21 апреля 2022 года. Том Часть 2. Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2022. С. 131-134. EDN: AQKOTO
3. Фомин А.Ю. Дополненная реальность эмуляции рельефа местности и нештатных ситуаций в тренажерах техники для АПК / А.Ю. Фомин, А.С. Апатенко, Н.С. Севрюгина, А.А. Лосев // Агроинженерия. 2022. Т. 24, № 4. С. 64-68. DOI: 10.26897/2687-1149-2022-4-64-68. EDN: MDJWJT
4. Научно-аналитический обзор технологий ресурсосбережения при эксплуатации технических средств в АПК / А.С. Апатенко, И.Н. Кравченко, Н.С. Севрюгина [и др.]. Саратов: Общество с ограниченной ответственностью «Амрит», 2023. 152 с. ISBN 978-5-00207-449-5. EDN: DZPMNS
5. Горностаев В.И. Функциональное описание элементов системы транспортного обеспечения объектов природообустройства / В.И. Горностаев, С.И. Некрасов // Доклады ТСХА, Москва, 03-05 декабря 2019 года. Том. Выпуск 292, Часть I. Москва: Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева, 2020. С. 555-557. EDN: DICARL
6. Севрюгина Н.С. Риски экосистемы при функционировании водохозяйственных комплексов / Н.С. Севрюгина, А.С. Апатенко, Е.В. Войтович // Природообустройство. 2020. № 2. С. 115-122. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-2-115-122. EDN: BJVTGX
7. Голубев И.Г. Состояние и перспективы вовлечения залежных земель в оборот / Голубев И.Г., Апатенко А.С., Севрюгина Н.С. // Мелиорация. 2021. № 3(97). С. 67-74. EDN: SYRHE
8. Хоружий Л.И. Применение концепции бережливого производства в учетно-аналитической системе организаций АПК / Л.И. Хоружий, Ю.Н. Катков, А.А. Романова, А.Ю. Фомин // Бухучет в сельском хозяйстве. 2023. № 5. С. 262-271. DOI: 10.33920/sel-11-2305-01
9. Севрюгина Н.С. Технологии и технические средства рекультивации залежных земель с регулированием уровня увлажненности почвы / Н.С. Севрюгина, А.С. Апатенко, И.Г. Голубев [и др.] // Природообустройство. 2023. № 3. С. 38-44. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-38-44
10. Stocks B.J., Alexander M.E., Mc Alpine R.S. et al. Canadian Forest Fire Danger Rating System. – Canadian Forestry Service, 1987. 500 p.
11. Курбатский Н.П. Национальная система расчета пожарной опасности США / Н.П. Курбатский, Т.В. Костырина // Обнаружение и анализ лесных пожаров: сб. статей. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1977. С. 38-90.
12. Deeming J.E., Lancaster J.W., Fosberg M.A., Furman R.W., Schroeder M.J. The National Fire-Danger Rating System GG USDA Forest Service – Research Paper RM-84, February 1972. 165 p.
13. García Diez E.L., Rivas Soriano L., de Pablo F., García Diez A. Prediction of the daily number of forest fires

References

1. Prikhodko M.A. Forest fires in the Moscow region as an environmental problem / M.A. Prikhodko, A.V. Lapaev, V.I. Fomina, O.M. Melnikov // High technologies in the construction complex. 2023. No. 1. P. 156-160. EDN: GHZHZHO
2. Fomin A.Yu. The choice and justification of processing methods, assessment of the reliability of experimental results / A.Yu. Fomin, A.V. Lapaev, E.N. Khalilov // Science and education: experience, problems, development prospects: Proceedings of the international scientific and practical conference dedicated to the 70th anniversary of the Krasnoyarsk State Agrarian University, Krasnoyarsk, April 19-21, 2022. Volume Part 2. Krasnoyarsk: Krasnoyarsk State Agrarian University, 2022. P. 131-134. EDN: AKKOTO
3. Fomin A.Yu. Additional reality of emulation land relief and emergency situations in agricultural equipment simulators / A.Y. Fomin, A.S. Apatenko, N.S. Sevryugina, A.A. Losev // Agroengineering. 2022. VOL. 24, No. 4. P. 64-68. DOI: 10.26897/2687-1149-2022-4-64-68. EDN: MDJWJT
4. Scientific and analytical review of resource-saving technologies in the operation of technical means in the agro-industrial complex / A.S. Apatenko, I.N. Kravchenko, N.S. Sevryugina [et al.]. – Saratov: Limited Liability Company "Amirit", 2023. 152 p. ISBN 978-5-00207-449-5. EDN: DZPMNS
5. Gornostaev V.I. Functional description of the elements of the transport support system for environmental management facilities / V.I. Gornostaev, S.I. Nekrasov // Reports of the TLC, Moscow, December 03-05, 2019. Volume 292, Part I. Moscow: Russian State University of Architecture, 2020. P. 555-557. EDN: DICARL
6. Sevryugina N.S., Apatenko A.S., Voitovich E.V. Ecosystem risks in the functioning of water management complexes // Prirodoobustrojstvo. 2020. № 2. P. 115-122. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-2-115-122 EDN: BJVTGX
7. Golubev I.G., Apatenko A.S., Sevryugina N.S. The state and prospects of involving fallow lands in circulation. 2021. № 3(97). P. 67-74. EDN: SIRIHE
8. Khoruzhiy L.I. Application of the concept of lean production in the accounting and analytical system of agricultural organizations / L.I. Khoruzhiy, Yu.N. Katkov, A.A. Romanova A.Yu. Fomin // Accounting in agriculture. 2023. No. 5. P. 262-271. DOI: 10.33920/sel-11-2305-01
9. Sevryugina N.S., Apatenko A.S., Golubev I.G. [et al.] Technologies and Technical Means of Reclamation of Fallow Lands with Regulation of the Soil Moisture Level // Prirodoostroistvo. 2023. № 3. P. 38-44. DOI: 10.26897/1997-6011-2023-3-38-44. EDN: HZXHKE
10. Stokes B.J., Alexander M.E., McAlpin R.S., and others. The Canadian Forest Fire Hazard Assessment System. Canadian Forest Service, 1987. 500 p.
11. Kurbatskiy N.P., Kostyrina T.V. The national fire hazard calculation system of the USA // Detection and analysis of forest fires: collection of articles. Krasnoyarsk: ILiD SB of the USSR Academy of Sciences, 1977. P. 38-90.
12. Deeming J.E., Lancaster J.W., Fosberg M.A., Furman R.V., Schroeder M.J. National Fire Hazard Assessment System of the Forest Service of the US Department of Agriculture – Research document RM-84, February 1972. 165 p.
13. Garcia Diez E.L., Rivas Soriano L., de Pablo F., Garcia Diez A. Forecasting the daily number of forest fires. International Journal of Forest Fires. 1999. Volume 9, No. 3. P. 207-211. DOI: 10.1071/GWF00003

GG International Journal of Wildland Fire. 1999. Vol. 9, No. 3. P. 207-211. doi: 10.1071/GWF00003

14. Viegas D.X., Bovio G., Ferreira A., Nosenzo A., Sol B. Comparative study of various methods of fire danger evaluation in Southern Europe GG International Journal of Wildland Fire. 1999. Vol. 9, No. 4. P. 235-246. doi: 10.1071/GWF00015

15. Нестеров В.Г. Горимость леса и методы ее определения. М.-Л.: Гослесбумиздат, 1949. 76 с.

16. Гришин А.М. Сравнительный анализ простых моделей сушки слоя ЛГМ, включая данные экспериментов и натурных наблюдений / А.М. Гришин Н.В. Барановский // Инженерно-физический журнал. 2003. Т. 76, № 5. С. 166-169.

17. Гришин А.М. Прогноз возникновения и распространения лесных пожаров / А.М. Гришин, А.И. Фильков. Кемерово: Практика, 2005. 202 с.

18. Гришин А.М. Математическое моделирование сушки слоя лесных горючих материалов / А.М. Гришин, Л.Ю. Катаева, Е.Л. Лобода // Вычислительные технологии. 2001. Т. 6. Спец. вып. (Труды Международной конференции RDRAMM-2001), ч. 2. С. 140-144.

19. Субботин А.Н. Математическая модель распространения низового лесного пожара по подстилке или слою опада хвой // Пожарная безопасность. 2008. № 1. С. 109-116.

20. Перминов В.А. Математическое моделирование распространения плоского фронта лесного пожара // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11. Избранные доклады семинара по численным методам и информационным технологиям Кемеровского государственного университета. С. 109-116.

21. Гришин А.М. Переход низового лесного пожара в верховой / А.М. Гришин В.А. Перминов // Физика горения и взрыва. 1990. Т. 26, № 6. С. 27-35. EDN: VCOOGT

22. Кулеш П.Н. Зажигание торфа внешним локальным источником тепла / П.Н. Кулеш, А.Н. Субботин // Пожаровзрывобезопасность. 2009. Т. 18, № 4. С. 13-18.

23. Preister H.K., Brillinger D.R., Burgan R.E., Benoit J.W. Probability based models for estimation of wildfire risk // International Journal of Wildland Fire. 2004. Vol. 13, No. 2. P. 133-142. doi: 10.1071/WF02061

14. Viegas D.H., Bovio G., Ferreira A., Nosenzo A., Sol B. Comparative study of various fire hazard assessment methods in Southern Europe. International Journal of Forest Fires. 1999. Volume 9, No. 4. P. 235-246. doi: 10.1071/GWF00015.

15. Nesterov V.G. Forest hilliness and methods of its determination. Moscow: Goslesbuzmizdat, 1949. 76 p.

16. Grishin A.M., Baranovsky N.V. Comparative analysis of simple models of LGM layer drying, including experimental data and field observations. // Engineering and Physics Journal. 2003. Vol. 76, Number / 5. P. 166-169.

17. Grishin A.M., Filkov A.I. Forecast of occurrence and spread of forest fires. Kemerovo: Praktika Publ, 2005. 202 p.

18. Grishin A.M., Kataeva L.Yu., Loboda E.L. Mathematical modeling of drying of a layer of forest combustible materials // Computing technologies. 2001. Vol. 6. Special issue. (Proceedings of the RDRAMM-2001 International Conference), part 2, P. 140-144.

19. Sobbotin A.N. Mathematical model of the spread of the word "forest hunting" // Fire safety. 2008. No. 1. P. 109-116.

20. Perminov V.A. Mathematical modeling of the spread of the common man's polyphony // Engineering technologies. 2006. Vol. 11, Part 3. P. 109-116.

21. Grishin A.M., Perminov V.A. Gorenje i complexov Transition from simple to complex // Physics of combustion and explosion. 1990. Vol. 26, No. 6. P. 27-35. EDN: VCOOGT

22. Kulekh R.N., Sabbotin A.N. Excitation of peat regardless of the local heat source // Help-safety. 2009. Vol. 18, No. 4. P. 13-18.

23. Preister H.K., Brillinger D.R., Burgan R.E., Benoit J.V. Probabilistic models for assessing the risk of forest fires // International Journal of Forest Fires. 2004. Volume 13, No. 2. P. 133-142. doi: 10.1071/WF02061.

Об авторах

Сергей Игоревич Некрасов, ассистент; <https://orcid.org/0000-0002-6844-5773>; Scopus Author ID: 57934708400; Researcher ID: AAE-6385-2022; sergej.nekrasov@rgau-msha.ru

Александр Юрьевич Фомин, канд. техн. наук; AuthorID: 804021; <https://orcid.org/0000-0001-8333-9015>; sachafomin@mail.ru

Алексей Сергеевич Апатенко, д-р техн. наук, доцент, зав. кафедрой; AuthorID: 261571; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>; a.apatenko@rgau-msha.ru

About the authors

Sergey I. Nekrasov, assistant; <https://orcid.org/0000-0002-6844-5773>; Scopus Author ID: 57934708400; Researcher ID: AAE-6385-2022; sergej.nekrasov@rgau-msha.ru

Alexander Yu. Fomin, CSs (Eng); AuthorID: 804021; <https://orcid.org/0000-0001-8333-9015>; sachafomin@mail.ru

Alexey S. Apatenko, DSs (Eng), associate professor, head of the department; AuthorID: 261571; <https://orcid.org/0000-0002-2492-9274>; a.apatenko@rgau-msha.ru

Критерии авторства / Criteria of authorship

Некрасов С.И., Фомин А.Ю., Апатенко А.С. выполнили теоретические исследования, на основании которых провели обобщение и написали рукопись, имеют на статью авторское право и несут ответственность за плагиат.

Конфликт интересов / Conflict of interests

The authors declare no conflict of interests / Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Вклад авторов

Все авторы сделали равный вклад в подготовку публикации / All the authors made an equal contribution to the preparation of the publication

Поступила в редакцию / Received at the editorial office 02.04.2025

Поступила после рецензирования и доработки / Received after review and revision 20.05.2025

Принята к публикации / Accepted for publication 21.05.2025

Nekrasov S.I., Fomin A. Yu, Apatenko A.S. carried out theoretical studies, on the basis of which they generalized and wrote the manuscript. They have a copyright on the article and are responsible for plagiarism.