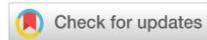


ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 614.841.123.24

Оригинальное теоретическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-14-21>

Уточнение модели низового лесного пожара с учетом конвективной турбулентности

Е.С. Андреева , Г.А. Сергеева , И.В. Богданова

Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

meteo0717@yandex.ru



EDN: XCYIOF

Аннотация

Введение. В научной литературе довольно активно обсуждается тема математического моделирования развития лесных пожаров для прогнозов скорости их распространения и площади, которую они охватят. С точки зрения процессов турбулентности оцениваются потенциальная высота и отклонение столбов огня, дыма, горячего воздуха, разброс частиц горения и рациональные направления гашения огня. Однако известные модели не дают четкого представления о том, как срабатывает турбулентность при переходе пожара с приповерхностного слоя на нестационарный приземный и выше. Иными словами, сложно просчитать переход низового пожара в его более опасную интенсивную форму. Восполнение этого недостатка — актуальная научная и прикладная задача. Цель данной работы — уточнить уравнения математических моделей распространения низовых лесных пожаров для лучшего контроля за этими инцидентами, что в итоге будет способствовать уменьшению рисков и сокращению ущерба от них.

Материалы и методы. Для достижения цели исследования были изучены труды, охватывающие разные подходы, как теоретические, так и прикладные, посвященные проблеме прогнозирования развития пожаров. В качестве основных приняты работы Д.Л. Лайхтмана, А.С. Гаврилова, П.М. Матвеева. Кроме анализа этих литературных источников, авторы применяли статистические методы обработки информации и использовали возможности математического моделирования.

Результаты исследования. Интерпретирована общепринятая эллиптическая форма контура низового лесного пожара в модели Р. Ротермела. Показаны ее недостатки для прогнозирования пятнистых и интенсивных верховых пожаров. Оценено введение в уравнение таких параметров, как относительная влажность воздуха, уклон местности, шероховатость или вязкость поверхности, особенности горящего вещества. Обозначены виды конвекций, характерных для пятнистого и интенсивного верхового пожара: внутренняя (термическая) и внешняя (механическая). Обоснован отказ от учета приповерхностной турбулентности. Для рассмотрения турбулентности приземных слоев воздуха авторы руководствовались представлениями о нестационарности и соответствующих физических закономерностях. В итоге базовая формула модели Р. Ротермела была дополнена вторым слоем, чтобы можно было прогнозировать развитие пожара от низового к интенсивному верховому. Безразмерный параметр 0,397 заменен коэффициентом турбулентности k_z , этот показатель внесен в откорректированное равенство Р. Ротермела и дополнен средним числом Ричардсона, которое показывает зависимость между температурой и скоростью диффузии в соседних слоях. Из этих составляющих была сформирована обновленная формула. В виде таблиц представлены результаты моделирования характерных случаев развития конвективной турбулентности и пожаров (с учетом и без учета турбулентности). Сводные данные позволяют говорить об адекватности модели, созданной в рамках представленной работы.

Обсуждение и заключение. При уточнении полуэмпирической модели Р. Ротермела для нестационарного приземного слоя обосновано введение коэффициента турбулентности. Кроме того, показана необходимость дополнения однослойной модели формулами второго уровня, характеризующими развитие пожара в нестационарном приземном слое. Откорректированная модель должна более эффективно прогнозировать параметры пятнистых и интенсивных верховых пожаров. Перспективны дальнейшие уточнения уравнений полуэмпирических моделей лесных пожаров. Целесообразно продолжить исследования в этом направлении.

Ключевые слова: математическое моделирование пожара, турбулентность в условиях пожара, переход пожара из низового в верховой

Благодарности. Авторы выражают особую благодарность профессору, доктору физико-математических наук А.С. Гаврилову, коллегам из Российского государственного гидрометеорологического университета и рецензенту за профессиональный анализ статьи и рекомендации для ее корректировки.

Для цитирования. Андреева Е.С., Сергеева Г.А., Богданова И.В. Уточнение модели низового лесного пожара с учетом конвективной турбулентности. *Безопасность техногенных и природных систем*. 2025;9(1):14–21. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-14-21>

Original Theoretical Research

Refinement of the Ground Forest Fire Model Taking into Account Convective Turbulence

Elena S. Andreeva  , Galina A. Sergeeva  , Irina V. Bogdanova 

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

 meteo0717@yandex.ru

Abstract

Introduction. The scientific literature is actively discussing the topic of mathematical modeling of forest fires development to predict the speed of spread and area covered. From the perspective of turbulent processes, the height and deflection of fire, smoke, and hot air columns, as well as the spread of combustion particles and rational directions for extinguishing the fire, are evaluated. However, existing models do not provide a clear understanding of how turbulence occurs during the transition of a fire from a near-surface to an unsteady surface layer and higher. In other words, calculating the transition from ground fire to its more intense form remains a challenge. Addressing this gap is an urgent scientific and practical task. The aim of this study is to refine the equations of mathematical models for predicting the spread of forest fires, in order to better control these incidents, which will ultimately help reduce risks and damage from them.

Materials and Methods. To achieve this goal, we studied works covering different approaches, both theoretical and practical, devoted to the problem of predicting the development of fires. The works of D.L. Laikhtman, A.S. Gavrilov, and P.M. Matveev were accepted as the main ones. In addition to analyzing these literary sources, the authors applied statistical methods of information processing and used the possibilities of mathematical modeling.

Results. The generally accepted elliptical shape of the contour of a ground forest fire in the R. Rothermel model has been interpreted. Its disadvantages for predicting spot and intense crown fires have been demonstrated. The introduction of parameters such as relative humidity, terrain slope, surface roughness or viscosity, and features of the burning substance into the equation has been evaluated. The types of convection typical of spot and intense crown fires have been indicated: internal (thermal) and external (mechanical). The decision not to consider near-surface turbulence has been justified. To account for surface air layer turbulence, the authors have relied on the concepts of instability and corresponding physical laws. As a result, the basic formula of the R. Rothermel model was supplemented with a second layer so that it was possible to predict the development of a fire from a ground one to an intense crown fire. The dimensionless parameter of 0.397 was replaced by turbulence coefficient k_z . This indicator was introduced into the corrected R. Rothermel equation and supplemented with the average Richardson number, which showed the relationship between temperature and the diffusion rate in neighboring layers. From these components, an updated formula has been developed. The results of simulations for typical cases of convective turbulence and fires, with and without turbulence, were presented in tables. Based on the summary data, we could conclude that the model developed within the scope of this work was adequate.

Discussion and Conclusion. When refining the semi-empirical R. Rothermel model for an unsteady surface layer, the introduction of a turbulence coefficient is justified. In addition, it is shown that it is necessary to supplement the single-layer model with second-level formulas characterizing the development of a fire in an unsteady surface layer. The adjusted model should more effectively predict the parameters of spot and intense crown fires. Further refinements of equations for semi-empirical forest fire models are promising, and it is advisable to continue research in this area.

Keywords: mathematical modeling of fire, turbulence in fire conditions, transition from ground to crown fire

Acknowledgements. The authors would like to express their special gratitude to A.S Gavrilov, Professor, Dr. Sci. (Phys.-Math.), their colleagues from the Russian State Hydrometeorological University, and the reviewer for their professional analysis of the article and recommendations that improved the quality of the article.

For citation. Andreeva ES, Sergeeva GA, Bogdanova IV. Refinement of the Ground Forest Fire Model Taking into Account Convective Turbulence. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(1):14–21. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-14-21>

Введение. По данным ООН, к концу XXI века количество интенсивных лесных пожаров возрастет на 50 %. В 2003 году пожары в Сибири (Российская Федерация) уничтожили около 22 млн га лесных экосистем. В 2004 году на Аляске (США) пострадало 2,6 млн га леса. В 2010 году в Боливии уничтожено 1,5 млн га лесных экосистем. В Канаде в 2011 году погибло 0,7 млн га, а в 2014 году — 3,4 млн га. В 2020 году в Австралии лесные пожары уничтожили более 16,8 млн га леса. Экономический ущерб исчисляется миллиардами долларов.

Частота лесных пожаров и ущерб от них ставят вопросы об адекватном моделировании соответствующих рисков их возникновения, о прогнозировании развития чрезвычайной ситуации и разработке мер по снижению потерь. Построение модельных уравнений предполагает, что горение происходит на определенной площади в течение конкретного времени. Необходимо также рассчитать возможную длительность пожара, которая зависит от комплекса факторов, зачастую трудно определяемых [1].

Полуэмпирические модели позволяют подбирать и уточнять параметры для эффективного прогноза пожаров в лесных экосистемах. Такие формулы базируются на законах сохранения массы, энергии и движения. Они предполагают запись модельных уравнений в упрощенном виде, а соответствующие коэффициенты или эмпирические параметры можно получить в результате наблюдений или экспериментов [2]. Рассмотренные модели распространились в середине XX века и использовались в основном для прогноза динамики низовых пожаров. Обычно в них учитываются параметры горючести лесного материала, в том числе исходное состояние древостоя и рельеф местности.

Определяющими факторами возникновения и развития лесного пожара будут метеорологические условия, особенно ветер. Горючесть материала лесной подстилки или уклоны местности, учитываемые, например, в модели Ричарда Ротермела [1–3], имеют второстепенное значение. Цель данного исследования — уточнить математическую модель распространения лесных пожаров. Она позволит точнее прогнозировать развитие чрезвычайной ситуации и, соответственно, более оперативно и адекватно реагировать на нее. Своевременная реакция и принимаемые меры должны сократить потери, связанные с пожарами.

Материалы и методы. Исследование базируется на анализе трудов о нестационарности приземного слоя Д.Л. Лайхтмана, о строении пограничного слоя А.С. Гаврилова и др. [4, 5], о пятнистости лесных пожаров и вероятности их преобразований в интенсивные верховые П.М. Матвеева и др.

Авторы задействовали также литературные, аналитико-статистические, аналитико-графические методы, математическое моделирование.

Для данного исследования проанализированы проблемы математического моделирования при прогнозировании лесных пожаров. Отмечены практически непреодолимые сложности расчетов по наиболее опасным верховым пожарам [6–8], которые обусловлены неизвестными физическими характеристиками перераспределения тепла и количества движения воздуха — факторами, определяющими параметры пожара.

Итак, следует отметить, что в математических моделях не представлена трансформация пятнистых возгораний в интенсивный верховой пожар [9]. В 70-е годы XX века П.М. Матвеев установил, что пожар становится пятнистым, если интенсивности конвективных потоков хватает для поднятия и переноса горящих частиц. При этом времени их горения должно быть достаточно, чтобы поджечь удаленные от очага объекты: лесную подстилку, надпочвенный покров, древостой и пр.

В 1964 году Н.П. Курбатский предложил первую модель тепломассообмена. В ней площадь выгора оценивалась по скорости приземного воздуха, как и большинство моделей распространения огня. В 2018 году группа авторов предложила современную версию модели тепломассообмена для прогноза пятнистости возгораний, отметив сложности при составлении уравнений и не решив проблему до конца [9].

Как показано в [1–3], пятнистость свойственна любому верховому пожару при усилении ветра. Однако с точки зрения физики приземного слоя сильный приземный поток (ветер) будет способствовать возгоранию и распространению огня на первой стадии пожара. На второй стадии развиваются оба вида конвекции:

- внутренняя (порождаемая пожаром, собственная, тепловая, с неустойчивым приземным слоем воздуха);
- внешняя (создается внутримассовыми условиями, скорость приземного потока утрачивает значение и препятствует трансформации низового пожара в пятнистый, верховой).

Гаврилов А.С., Мханна А.И., Харченко Е.В. в статье «Верификация модели атмосферного пограничного слоя применительно к задачам прогноза загрязнения атмосферы от очагов лесных пожаров» подчеркивают необходимость учета доли турбулентного притока тепла в условиях нестационарного приземного слоя с развитой тепловой турбулентностью [4]. Установлено, что даже при весьма незначительном тепловом потоке, $q = 0,003 \text{ Вт}/\text{м}^2$ в приземных условиях, интенсивность турбулентного притока тепла существенно увеличивалась — за 35 минут с 0 до +10,2 °C.

Таким образом, очевидна роль конвекции, особенно тепловой внутренней [4, 5]. Этот фактор нужно учитывать при построении математических моделей трансформации пятнистых лесных пожаров в верховые.

Результаты исследования. Модель Р. Ротермела [1, 6] базируется на эмпирическом материале и позволяет результативно рассчитывать параметры низового лесного пожара (рис. 1).

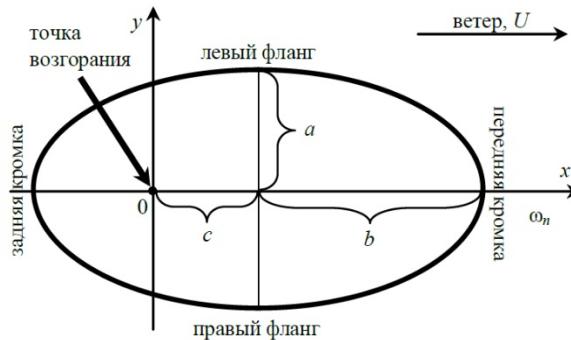


Рис. 1. Общепринятая эллиптическая форма контура низового лесного пожара

Для прогнозирования поведения лесного пожара вычисляются параметры эллипса: a , b и c (формулы 1–3). При этом центральной расчетной характеристикой модели будет скорость продвижения лесного пожара, ω_n (м/сек), определяемая по (4) [1].

$$a = \frac{b}{LB}, b = \frac{\omega_n}{2} + \frac{1+HB}{HB}, c = b - \frac{\omega_n}{HB}, \quad (1)$$

$$LB = 0,936 \exp(0,2566U) + 0,461 \exp(-0,1548U) - 0,397, \quad (2)$$

$$B = \frac{LB + \sqrt{LB^2 - 1}}{LB - \sqrt{LB^2 - 1}}, \quad (3)$$

$$\omega_n = \omega_0 (1 + k(U) + k(S)), \quad (4)$$

где a — отрезок эллипса (высота); b — отрезок эллипса (длина во фронтальной зоне огня); c — отрезок эллипса (длина выгора); LB — ширина отрезка b ; HB — высота отрезка эллипса b ; U — скорость потока (ветра), м/сек; ω_n — скорость продвижения лесного пожара, м/мин; ω_0 — плотность пласта горючих веществ, кг/м³; $k(U)$ — величина частичек вегетативной прогораемой материи, м²; $k(S)$ — скорость полного прогорания растительности, м/мин.

Авторы полагают, что данная модель неприменима для прогнозирования пятнистых и интенсивных верховых пожаров. Кроме того, она практически не учитывает метеорологические параметры за исключением скорости приземного потока (ветра) [7, 8]. В этой связи следует уточнить основное прогностическое уравнение (2), включив в него дополнительные параметры. Так, в 1967 году М.А. Софонов предложил при оценке скорости распространения низового пожара учитывать не только скорость ветра, но и относительную влажность воздуха с учетом ее суточных флуктуаций, а также уклон местности, шероховатость или вязкость поверхности [9–11].

Если верховой пожар эволюционировал из низового, скорость распространения огня нужно вычислять на двух уровнях: приповерхностном (0–1 м) и приземном (1–2 м) [12]. В приповерхностном слое важнее учесть характеристики горящего вещества, включая его плотность и количество (см. формулу 4). В приземном слое (второй уровень модели) более важными будут такие параметры, как температура и влажность воздуха, вертикальные и горизонтальные скорости потока:

$$\omega_{n_1} = \omega_n \cdot \left| \frac{t_0}{t_1} \right| \cdot \left| \frac{v_0}{v_g} \right| \cdot \left| \frac{f_0}{f_1} \right|, \quad (5)$$

где ω_{n_1} — скорость продвижения огня в приземном слое, м/мин; ω_n — скорость продвижения пожара в приповерхностном слое, м/мин, из формулы (4); t_0 — температура воздуха в приповерхностном слое, °С; t_1 — температура воздуха в приземном слое на высоте 1–2 м, °С; v_0 — скорость потока воздуха в приповерхностном слое, м/сек; v_g — горизонтальная составляющая скорости потока воздуха, м/сек; f_0 — относительная влажность воздуха в приповерхностном слое воздуха, %; f_1 — относительная влажность воздуха в приземном слое на высоте 1–2 м.

При пятнистом и интенсивном верховом пожаре развивается внутренняя (термическая) и внешняя (механическая) конвекция. Турбулентность «разбрасывает» частицы вверх и в стороны от очага, что может существенно изменить параметры a , b и c .

Авторы отмечают, что в приповерхностном слое (0–1 м) бессмысленно учитывать турбулентность, так как она гасится поверхностным слоем лесной подстилки или почвы. Для учета турбулентности приземных слоев воздуха следует руководствоваться представлениями о нестационарности и физических закономерностях приземного слоя воздуха:

$$\frac{du}{dt} = \frac{d}{dz} k \frac{du}{dz}, \quad (6)$$

$$\frac{d\Theta}{dt} = -\frac{d}{dz} k \frac{d\Theta}{dz}, \quad (7)$$

$$\frac{db}{dt} = k \left(\frac{du}{dt} \right)^2 - k \frac{g}{T} \frac{d\Theta}{dz} - \frac{cb^2}{k} + \alpha_b \frac{d}{dz} k \frac{db}{dz}, \quad (8)$$

$$k = l \sqrt{b}, \quad (9)$$

$$l = -2\kappa C \frac{1}{4} + \frac{\left(\frac{du}{dz} \right)^2 - \frac{g}{T} \frac{d\Theta}{dz}}{\frac{d}{dz} \left[\left(\frac{du}{dz} \right)^2 - \frac{g}{T} \frac{d\Theta}{dz} \right]}, \quad (10)$$

где u — скорость потока воздуха, м/сек; t — температура воздуха, °С; z — высота, м; Θ — приток тепла, Дж/с м²·кг; b — энергия турбулентности, Дж/кг; g — ускорение свободного падения, м/сек²; l — масштаб турбулентности, м; k — коэффициент турбулентности, м/сек; c — постоянная Д.Л. Лайхтмана (~0,046); α_b — постоянная Д.Л. Лайхтмана, рассчитанная по анализу размерностей (0,73); κ — постоянная Кармана, вычисленная для решения данной задачи (~0,397).

Исходя из представлений Д.Л. Лайхтмана о физических закономерностях нестационарного приземного слоя воздуха, можно сделать вывод о роли турбулентных движений в распределении тепла, энергии, частиц воздуха. В случае диффузии вещества и энергии при нагревании и трансформации поверхностного слоя почвы в условиях пожара [13–15] моделирование основывается на теории градиентного переноса. Коэффициент турбулентной диффузии — k . Значение диффузионного переноса в вертикальной плоскости — k_z . Горизонтальные составляющие коэффициента турбулентности будут пренебрежимо малы из-за шероховатости поверхности и действия силы трения. Для упрощения модельного уравнения следует воспользоваться уравнением М.И. Будыко, рассчитывающим коэффициент вертикальной диффузии k_z на единичном уровне:

$$k_z = k_{1p} \frac{z}{z_1} \sqrt{1 - \overline{Ri}}, \quad (11)$$

где k_z — коэффициент вертикальной диффузии, м/сек; k_{1p} — значение k_z на единичной высоте z_1 и в равновесных условиях, на высоте 1 м составляет 0,1–0,2 м/сек; \overline{Ri} — среднее по пограничному слою число Ричардсона, безразмерный показатель:

$$\overline{Ri} = \frac{g \frac{dT}{dz}}{T_a \left(\frac{dT}{dz} \right)^2}, \quad (12)$$

где T — температура воздуха, °С; T_a — температура в абсолютной шкале, К; g — ускорение свободного падения (9,8 м/сек²).

Авторы предлагают внести дополнения в исходную формулу (2) модели Р. Ротермела для уточнения развития пожара от низового к интенсивному верховому (второй слой модели), рассчитывая скорость продвижения огня ω_{n1} в приземном слое по формуле (5). При этом уравнение (2) дополняется выражением для расчета коэффициента турбулентности k_z и заменяется им безразмерный показатель 0,397, поскольку по смыслу последний выполняет роль параметра, снижающего ширину отрезка эллипса a . По мнению авторов данной работы, учет интенсивной конвекции и последующей турбулентности способен скорректировать ширину отрезка a с большей точностью по отношению к реальным условиям. Тогда формулу (2) можно представить:

$$LB = 0,936 \exp(0,2566U) + 0,461 \exp(-0,1548U) - kz. \quad (13)$$

С учетом выражений (11) и (12) получим итоговое:

$$LB = 0,936 \exp(0,2566U) + 0,461 \exp(-0,1548U) - k_{1p} \frac{z}{z_1} \sqrt{1 - \frac{g \frac{dT}{dz}}{T_a \left(\frac{dT}{dz} \right)^2}}. \quad (14)$$

В таблице 1 представлены результаты апробации уравнения (14) и моделирования характерных случаев развития конвективной турбулентности.

Таблица 1

Некоторые результаты моделирования параметров пожаров с учетом и без учета турбулентности [16] для нестационарного приземного слоя

№	Характеристика	U , м/сек	k_z , м/сек	LB	HB	a	b	c
1	Слабый	4,000	—	2,470	22,521	0,521	1,290	1,268
2	Слабый	4,000	0,500	2,370	19,640	0,552	1,301	1,276
3	Умеренный	8,000	—	7,001	139,001	0,220	1,507	1,500
4	Умеренный	8,000	2,000	5,400	107,002	0,281	1,509	1,500
5	Сильный	12,000	—	11,610	579,501	0,170	2,001	1,997
6	Сильный	12,000	5,000	7,010	199,290	0,290	2,005	1,995

Обсуждение и заключение. Итак, рассмотрена модель горения в условиях нестационарного приземного слоя. Значения отрезка a эллиптического контура пожара с учетом уточненного выражения (14) сравнивались с классической формулой Р. Ротермела [16]. Анализ результатов моделирования с коэффициентом турбулентности (таблица 1) позволил выявить наибольшие отклонения указанных значений. При этом не обнаружены существенные различия параметров эллипса b и c , что может подтвердить целесообразность предложенного уточнения.

Адекватность полученных значений отрезка a эллипса определена по критерию Стьюдента (двуихвборочный t -критерий). Для этого сравнивались вычисленные значения отрезка эллипса a в полуэмпирической модели Р. Ротермела и в предложенном авторами уравнении (14). Результаты проверки приводятся в таблице 2. Вычисленное значение t -критерия Стьюдента намного меньше критического (табличного): $0,609 < 2,776$. Это доказывает статистическую сходимость результатов расчетов в уточненной модели, представленной выражением (14).

Таблица 2

Результаты сравнения уточненного варианта модели, содержащего параметр турбулентности, с классическим уравнением модели Р. Ротермела

№	Среднее значение	Дисперсия	Степени свободы	Объединенная дисперсия	Значение t -критерия	
					вычисленное	критическое*
1	0,374	0,016	4	0,02	0,609	2,776
2	0,304	0,024	4			

*При достоверности 95 %.

Примечание № 1 соответствует расчетам с применением уравнения (14), учитывающего турбулентность. № 2 соответствует расчетам классического выражения модели Р. Ротермела без учета турбулентности.

Таким образом, введение выражения (14) обосновано для нестационарного приземного слоя (второй слой модели) и позволяет существенно корректировать размеры отрезка a эллипса с учетом внутренних и внешних вертикальных конвективных потоков, которые формируют турбулентность приземного слоя и трансформируют низовой лесной пожар в интенсивный верховой.

Скорректированная модель дает возможность более эффективно рассчитывать параметры пятнистых и интенсивных верховых пожаров в пределах лесных экосистем. Перспективны дальнейшие уточнения уравнений полуэмпирических моделей лесных пожаров. Следует продолжать исследования в этом направлении.

Список литературы / References

1. Аноин Р.К. Анализ математических моделей, используемых для прогнозирования низовых лесных пожаров. *Технологии гражданской безопасности*. 2020;17(2(64)):58–60. <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2020.17.2.64.10.58>
Anoikin RK. Analysis of Mathematical Models Used for Forest Ground Fires Forecasting. *Tekhnologii Grazhdanskoi Bezopasnosti*. 2020;17(2(64)):58–60. (In Russ.) <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2020.17.2.64.10.58>
2. Кулешов А.А., Мышецкая Е.Е. Математическое моделирование лесных пожаров с применением многопроцессорных ЭВМ. *Математическое моделирование*. 2008;20(11):28–34.
Kuleshov AA, Myshetskaya EE. Mathematical Modeling of Forest Fires Using Supercomputers. *Matematicheskoe modelirovaniye*. 2008;20(11):28–34. (In Russ.)

3. Гришин А.М., Пугачева П.В. Анализ действия лесных и степных пожаров на города и поселки и новая детерминированно-вероятностная модель прогноза пожарной опасности в населенных пунктах. *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика.* 2009;(3(7)):99–108. URL: <https://www.mathnet.ru/rus/vtgu/y2009/i3/p99> (дата обращения: 01.09.2024).

Grishin AM, Pugacheva PV. Analysis of Impact of Forest and Steppe Fires on Cities Andvillages and the New Determinate and Probability Model for Prediction of Firedangerous in Villages and Cities. *Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics.* 2009;(3(7)):99–108. (In Russ.) URL: <https://www.mathnet.ru/rus/vtgu/y2009/i3/p99> (accessed: 01.09.2024).

4. Гаврилов А.С., Мханна А.И.Н., Харченко Е.В. Верификация модели атмосферного пограничного слоя применительно к задачам прогноза загрязнения атмосферы от очагов лесных пожаров. *Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета.* 2013;(32):119–129. URL: <https://www.rshu.ru/university/notes/archive/issue32/uz32-119-129.pdf> (дата обращения: 01.09.2024).

Gavrilov AS, Mhanna A, Kharchenko EV. Verification of the Model of Atmospheric Boundary Layer Applied to the Problem Prediction of Air Pollution from Forest Fires. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University.* 2013;(32):119–129. (In Russ.) URL: <https://www.rshu.ru/university/notes/archive/issue32/uz32-119-129.pdf> (accessed: 01.09.2024).

5. Andreeva ES. The Possibilities of Using the Minimax Method to Diagnose the State of the Atmosphere. *Journal of Atmospheric Science Research.* 2022;6(2):42–49. <https://doi.org/10.30564/jasr.v6i2.5519>

6. Abannikov VN, Seroukhova OS, Mkhanna AIN, Podgaiskii EV. Assessing the Impact of Agrometeorological Conditions on the Yield of Grain and Leguminous Crops in European Russia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2022;1010:012033. <http://doi.org/10.1088/1755-1315/1010/1/012033>

7. Denisov OV, Pleshko MS, Ponomareva IA, Merenyashev VE. Scale Factor Management in the Studies of Affine Models of Shockproof Garment Elements. *E3S Web of Conferences.* 2018;33:03068. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183303068>

8. Пузач С.В. Ле Ань Туан, Нгуен Тхань Хай. Пожарная опасность пятнистого возгорания при верховом лесном пожаре для объектов энергетики. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение и ликвидация.* 2018;(2):64–70. <https://doi.org/10.25257/FE.2018.2.64-70>

Puzach S, Le TA, Nguyen TH. Fire Hazard from Spotting Ignition at Crown Fires for Power Engineering Facilities. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination.* 2018;(2):64–70. (In Russ.) <https://doi.org/10.25257/FE.2018.2.64-70>

9. Кулешов А.А., Мышецкая Е.Е., Якуш С.Е. Моделирование распространения лесных пожаров на основе модифицированной двумерной модели. *Математическое моделирование.* 2016;28(12):20–32.

Kuleshov AA, Myshetskaya EE, Yakush SE. Numerical Simulation of Forest Fire Spread Based on Modified 2D Model. *Matematicheskoe modelirovanie.* 2016;28(12):20–32. (In Russ.)

10. Denisov OV, Bulygin YI, Ponomarev AE, Ponomareva IA, Lebedeva VV. Innovative Solutions Shockproof Protection in Occupations Associated with an Increased Risk of Injury. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2017;50:012044. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/50/1/012044>

11. Denisov O, Andreeva E. An Innovative Approach to the Elimination of Combustion Foci at MSW Landfills (on the Example of the Rostov Region). *E3S Web of Conferences.* 2021;273:04006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127304006>

12. Карлин Л.Н., Ванкевич Р.Е., Тумановская С.М., Андреева Е.С., Ефимова Ю.В., Хаймина О.В. и др. *Гидрометеорологические риски.* Санкт-Петербург: Российский государственный гидрометеорологический университет; 2008. 282 с.

Karlin LN, Vankevich RE, Tumanovskaya SM, Andreeva ES, Efimova YuV, Khaimina OV, et al. *Hydrometeorological Risks.* Saint Petersburg: Russian State Hydrometeorological University; 2008. 282 p. (In Russ.)

13. Мартынов А.В., Греков В.В., Попова О.В. Комплект средств измерений для экспресс-анализа интумесцентной огнезащиты на строительном объекте. *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация.* 2021;(3):61–68. <https://doi.org/10.25257/FE.2021.3.61-68>

Martynov A, Grekov V, Popova O. Measuring Tool Kit for Express Analysis of Intumescence Fire Protection at a Construction Facility. *Fires and Emergencies: Prevention, Elimination.* 2021;(3):61–68. (In Russ.) <https://doi.org/10.25257/FE.2021.3.61-68>

14. Bogdanova I, Dymnikova O, Loskutnikova I. Analysis of the Noise Load from the Manufacturing Enterprise on the Territory of Residential Buildings Based on Complex Mathematical Model. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020;1001:012119. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012119>

15. Adamyan VL, Sergeeva GA, Seferyan LA, Gorlova NYu. Development of Technological Measures to Ensure the Safety of Production Facilities in Petrochemical Industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2021;1083:012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1083/1/012050>

16. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. Алгоритмические основы построения компьютерной модели прогноза распространения лесных пожаров. *Вестник Полоцкого государственного университета. Фундаментальные науки*. 2011;12:51–56.

Barovik DV, Taranchuk VB. Algorithmic Foundations of Constructing a Computer Model for Predicting the Spread of Forest Fires. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C. Fundamental'nye nauki*. 2011;12:51–56. (In Russ.)

Об авторах:

Елена Сергеевна Андреева, доктор географических наук, доцент, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), meteo0717@yandex.ru

Галина Александровна Сергеева, кандидат географических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), sergeeva_ga@mail.ru

Ирина Виссарионовна Богданова, кандидат технических наук, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды Донского государственного технического университета (344003, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), bogirka@gmail.com

Заявленный вклад авторов:

Е.С. Андреева: разработка концепции, научное руководство.

Г.А. Сергеева: написание черновика рукописи.

И.В. Богданова: написание черновика рукописи, визуализация.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Elena S. Andreeva, Dr. Sci. (Geogr.), Associate Professor, Professor of the Department of Life Safety and Environmental Protection, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), [ResearcherID](#), meteo0717@yandex.ru

Galina A. Sergeeva, Cand. Sci. (Geogr.), Associate Professor of the Department of Life Safety and Environmental Protection, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), sergeeva_ga@mail.ru

Irina V. Bogdanova, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Life Safety and Environmental Protection, Don State Technical University (1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, 344003, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), bogirka@gmail.com

Claimed Contributorship:

ES Andreeva: concept development, academic advising.

GA Sergeeva: writing a draft of the manuscript.

IV Bogdanova: writing a draft of a manuscript, visualization.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию / Received 10.11.2024

Поступила после рецензирования / Revised 23.11.2024

Принята к публикации / Accepted 12.12.2024