

Научная статья

УДК 614.841.123.24

DOI: 10.37482/0536-1036-2025-5-55-67

Моделирование развития лесных пожаров с учетом пятнистых возгораний

Е.С. Андреева[✉], *д-р геогр. наук, доц.*; *ResearcherID: [ACG-6543-2022](#)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7087-1870>

И.В. Богданова, *канд. техн. наук, доц.*; *ResearcherID: [HLG-6288-2023](#)*,

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7726-7374>

Г.А. Сергеева, *канд. геогр. наук*; *ResearcherID: [JUJ-2392-2023](#)*,

ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2497-4829>

Донской государственный технический университет, пл. Гагарина, д. 1, г. Ростов-на-Дону, Россия, 344000; meteo0717@yandex.ru[✉], ibogdanova@donstu.ru, gsergeeva@donstu.ru

Поступила в редакцию 21.04.24 / Одобрена после рецензирования 16.07.24 / Принята к печати 19.07.24

Аннотация. Лесные пожары ежегодно уничтожают миллионы гектаров леса, нанося урон экосистемам, воздействуя на состояние приземного и пограничного слоев воздуха, обуславливая тем самым существенные экологические риски. Так, лесные пожары 2023 г., охватив площадь 28,6 млн га, стали причиной гибели почти 0,71 % лесных массивов поверхности Земли. В связи с чем прогнозирование параметров развития интенсивных лесных пожаров является актуальной задачей. Современные математические модели, описывающие течение лесных пожаров, не учитывают роль конвективного фактора. Отсутствие возможности принимать во внимание тепловую конвекцию может приводить к существенному искажению моделируемых параметров процесса, препятствуя эффективной защите населения и объектов экономики от огня. Цель исследования – обсуждение возможностей уточнения уравнений математических моделей развития лесных пожаров для разработки мер по снижению социально-экономических рисков для населения. Используются работы П.М. Матвеева, Н.П. Курбатского, С.В. Пузача, Д.Л. Лайхтмана, А.С. Гаврилова. В числе примененных авторами методов: литературные, аналитико-статистические, аналитико-графические, методы математического моделирования. Обосновано введение параметра турбулентности в уравнение прогностической модели. Показана необходимость дополнения 1-слойной модели уравнениями 2-го слоя, характеризующими развитие пожара в нестационарном приземном слое. Доказана статистическая сходимость результатов расчетов модели, содержащей уточнение по сравнению с классическим уравнением модели Р. Ротермела. Полученные уточненные уравнения модели позволят эффективно рассчитывать параметры пятнистых и интенсивных верховых пожаров в пределах лесных экосистем. Введение коэффициента турбулентности в прогностическое уравнение дало возможность выявить наибольшие отклонения в вычисленных высотах эллипса – предполагаемой формы распространения огня. Уточненное уравнение модели позволит существенно скорректировать размеры данного отрезка эллипса на основе учета развивающихся вертикальных конвективных потоков, способствующих трансформации низового лесного пожара в интенсивный верховой. Дальнейший научный поиск в этом направлении поможет разрабатывать действенные меры по снижению социально-экономических рисков, связанных с лесными пожарами.



Ключевые слова: пятнистые пожары, мониторинг пожароопасности, математическое моделирование, прогнозирование лесных пожаров, социально-экономические риски, экологические риски, конвекция, конвективная турбулентность

Благодарности: Авторы выражают благодарность коллегам из РГГМУ, и особую благодарность проф., д-ру физ.-мат. наук А.С. Гаврилову.

Для цитирования: Андреева Е.С., Богданова И.В., Сергеева Г.А. Моделирование развития лесных пожаров с учетом пятнистых возгораний // Изв. вузов. Лесн. журн. 2025. № 5. С. 55–67. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-55-67>

Original article

Modeling Forest Fire Development Taking into Account Spot Fires

Elena S. Andreeva[✉], Doctor of Geography, Assoc. Prof.; ResearcherID: [ACG-6543-2022](https://orcid.org/0000-0001-7087-1870),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7087-1870>

Irina V. Bogdanova, Candidate of Engineering, Assoc. Prof.; ResearcherID: [HLG-6288-2023](https://orcid.org/0000-0002-7726-7374),
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7726-7374>

Galina A. Sergeeva, Candidate of Geography; ResearcherID: [JUU-2392-2023](https://orcid.org/0009-0007-2497-4829),
ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2497-4829>

Don State Technical University, pl. Gagarina, 1, Rostov-on-Don, 344000, Russian Federation;
meteo0717@yandex.ru[✉], ibogdanova@donstu.ru, gsergeeva@donstu.ru

Received on April 21, 2024 / Approved after reviewing on July 16, 2024 / Accepted on July 19, 2024

Abstract. Forest fires annually destroy millions of hectares of forest, damaging ecosystems and affecting the state of the surface and boundary layers of the air, thereby causing significant environmental risks. Thus, the forest fires of 2023, covering an area of 28.6 mln ha, caused the death of almost 0.71 % of the forests on the Earth's surface. In this regard, forecasting the parameters of the development of intense forest fires is an urgent task. Modern mathematical models describing the development of forest fires do not take into account the role of the convective factor. The inability to take thermal convection into account can lead to a significant distortion of the modeled parameters of the process, preventing effective protection of the population and economic facilities from fire. The aim of the study has been to discuss the possibilities of refining the equations of mathematical models of forest fire development in order to develop measures to reduce socio-economic risks for the population. The works of P.M. Matveev, N.P. Kurbatskij, S.V. Puzach, D.L. Lajkhtman and A.S. Gavrilov have been used. The methods used by the authors include literary, analytical-statistical, analytical-graphical, and mathematical modeling methods. The introduction of the turbulence parameter into the equation of the predictive model has been justified. The necessity of supplementing the 1-layer model with the equations of the 2nd layer characterizing the development of a fire in an unsteady surface layer has been shown. The statistical convergence of the calculation results of the model containing the refinement has been proven in comparison with the classical equation of the R. Rothmel model. The obtained refined model equations will make it possible to effectively calculate the parameters of spot and intense crown fires within forest ecosystems. The introduction of the turbulence coefficient into the predictive equation has made it possible to identify the largest deviations in the calculated heights of the ellipse and the expected shape of fire propagation. The refined model equation will make it possible to significantly adjust the dimensions of this segment of the ellipse based on the consideration of

developing vertical convective flows that contribute to the transformation of a ground forest fire into an intense crown one. Further scientific research in this area will help develop effective measures to reduce the socio-economic risks associated with forest fires.

Keywords: spot fires, fire hazard monitoring, mathematical modeling, forest fire forecasting, socio-economic risks, environmental risks, convection, convective turbulence

Acknowledgements: The authors express their gratitude to their colleagues from the Russian State Hydrometeorological University, and special thanks to Professor, Doctor of Physics and Mathematics, A.S. Gavrilov.

For citation: Andreeva E.S., Bogdanova I.V., Sergeeva G.A. Modeling Forest Fire Development Taking into Account Spot Fires. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2025, no. 5, pp. 55–67. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2025-5-55-67>

Введение

Лесными пожарами с начала XXI в. в мире уничтожена существенная площадь лесных экосистем. По данным ООН количество интенсивных лесных пожаров к концу XXI в. возрастет на 50 %. Так, например, в результате лесных пожаров 2003 г. в Российской Федерации, в Сибири, было уничтожено около 22 млн га лесных экосистем; в 2004 г. в США, на Аляске, пострадало 2,6 млн га леса; в 2010 г. в Боливии погибло 1,5 млн га лесных экосистем; в Канаде в 2011 г. – 0,7 млн га, а в 2014 г. – уже 3,4 млн га. Наконец, одни из самых крупных лесных пожаров, уничтоживших более 16,8 млн га леса, наблюдались в 2020 г. в Австралии. При этом экономический ущерб от данных катастрофических явлений превысил сумму в 3,5 млрд долларов США. Отсюда вытекает проблема адекватной оценки параметров лесных пожаров на основе моделирования, следовательно, разработка мер по снижению социально-экономических и экологических рисков является здесь приоритетной как в теоретическом, так и в практическом отношении.

Математические модели, предназначенные для прогноза природных пожаров в лесных массивах, имеют свою специфику, что связано не только с особенностями горящей лесной экосистемы, но и с комплексом метеорологических условий местности [1–4]. Важным при построении модельных уравнений является учет пространственно-временного фактора, поскольку возникновение и развитие горения происходит на определенной площади за конкретное время [5–8]. Отдельной проблемой при этом становится расчет возможной длительности пожаров, поскольку последняя зависит от комплекса факторов, зачастую трудноопределяемых [9].

Внесение уточнений и подбор параметров для эффективного прогноза пожаров в лесных экосистемах возможно в случае полуэмпирических моделей. Последние, базируясь на основе законов сохранения массы, энергии и количества движения, предполагают запись модельных уравнений в упрощенном виде, а соответствующие коэффициенты или эмпирические параметры могут быть получены в результате многочисленных наблюдений или экспериментов [10]. Подобные модели широко распространились в середине XX в. и использовались в основном для прогноза динамики низовых пожаров. Обычно в описываемых моделях учитывались параметры горючести лесного материала, включая исходное жизненное состояние древостоя; метеорологические условия, из всей совокупности которых главным образом оценивалась скорость ветра; а

также рельеф местности. В то же время определяющим фактором возникновения и дальнейшего развития лесного пожара, кроме параметров, характеризующих лесные массивы, являются именно метеорологические условия местности, даже при наличии так называемого человеческого фактора, когда доказанным является искусственное происхождение возгораний. Горючесть материала лесной подстилки или уклоны местности, учитываемые, например, в модели Р. Роттермела [27], имеют вторичное значение. Кроме того, указанная модель позволяет прогнозировать параметры низовых пожаров, что снижает возможности ее применения для решения большего спектра задач.

Очевидно, что модельные расчеты и оценки пожарной опасности в настоящее время и в перспективе не утратят своей научной новизны при разработке мер по защите населения и снижению социально-экономических рисков лесных пожаров. Целью данной работы является обсуждение возможностей уточнения уравнений математических моделей лесных пожаров, включая пятнистые, для планирования на основе анализа их результатов эффективных мероприятий по снижению социально-экономических рисков для населения.

Объекты и методы исследования

Объект исследования – лесные экосистемы. Работа базируется на анализе трудов о пятнистости лесных пожаров и вероятности их преобразований в интенсивные верховые П.М. Матвеева [18], Н.П. Курбатского [7, 15], С.В. Пузача [20] и др.; на результатах изучения нестационарности приземного слоя Д.Л. Лайхтмана [16], с учетом данных о строении пограничного слоя А.С. Гаврилова [8].

В числе основных использованных авторами методов – литературные, аналитико-статистические, аналитико-графические, методы математического моделирования.

Результаты исследования и их обсуждение

Произведен обзор и анализ существующих проблем, возникающих при создании математических моделей для прогнозирования лесных пожаров. Ряд сложностей прогноза наиболее опасных верховых пожаров, связанный с выяснением физических характеристик перераспределения тепла и количества движения воздуха, определяющих приоритетные параметры пожара, представляется почти неустранимым. В научных работах, посвященных моделированию интенсивных верховых лесных пожаров, экспериментальных данных для разработки расчетной модели пятнистости возгораний и их дальнейшей трансформации в интенсивный верховой пожар практически нет [11–14].

Первые исследования пятнистых пожаров были проведены П.М. Матвеевым в 1975 г. [18]. Так, было установлено, что пожар становится пятнистым при интенсивности конвективных потоков, которой хватает для поднятия и переноса горящих частиц. При этом времени их горения достаточно для того, чтобы поджечь удаленные от очага возгорания объекты: лесную подстилку, надпочвенный покров, древостой и пр.

Первая модель тепломассообмена, предложенная в 1964 г. Н.П. Курбатским [15], предполагала оценку площади выгора на основе учета скорости приземного воздуха, как и большинство моделей распространения огня.

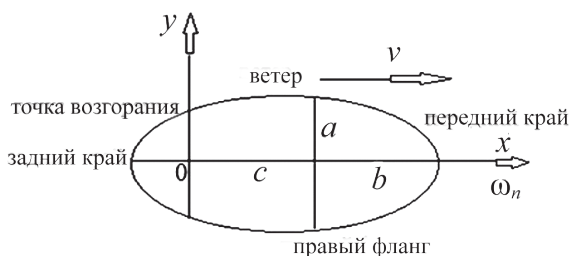
В 2018 г. С.В. Пузач и др. [20] предложили современную версию модели теплообмена для прогноза пятнистости возгораний, отметив ряд сложностей, возникающих при составлении уравнений, и не решив до конца указанную проблему.

Как отражено в исследованиях [13, 14], пятнистость свойственна любому верховому пожару при усилении ветра [17, 19]. Однако, как представляется авторам работы, с точки зрения физики приземного слоя сильный приземный поток (ветер), возможно, способствует возгоранию и дальнейшему разрастанию огня (на 1-й стадии пожара), но на 2-й стадии, когда развивается как внутренняя конвекция (тепловая неустойчивость приземного слоя воздуха, порождаемая пожаром), так и, возможно, внешняя, связанная с внутримассовыми условиями, скорость приземного потока не только утрачивает свое значение, но даже препятствует развитию низового пожара и его трансформации в пятнистый, верховой. Необходимость учета доли турбулентного притока тепла в условиях нестационарного приземного слоя с хорошо развитой тепловой турбулентностью подчеркивалась в работе [7] и было установлено, что даже при весьма незначительном тепловом потоке $q = 0,003 \text{ Вт/м}^2$ интенсивность турбулентного притока тепла в приземных условиях увеличивалась существенно, возрастая за 35 мин до $+10,2 \text{ }^\circ\text{C}$ (при начальных значениях температуры $0 \text{ }^\circ\text{C}$).

Отсюда очевидно, что роль конвективного фактора, в первую очередь тепловой внутренней конвекции [2, 6–10, 13–14], возникающей вследствие развития огня, нельзя не учитывать при построении математических моделей лесных пожаров, особенно пятнистых и пятнистых, трансформирующихся в верховые.

Рассмотрим возможности учета изложенных представлений в классической математической модели лесных пожаров, взяв при этом модель Р. Ротермела [27], поскольку, базируясь на эмпирическом материале, она позволяет достаточно результативно рассчитывать параметры низового лесного пожара. На рисунке показана схема контура для расчета параметров низового пожара, основанная на представлениях о возможной эллиптической форме распространения огня.

Схема контура низового пожара
в модели Р. Ротермела [27]
(v – скорость потока ветра)
The outline of the ground fire
contour in the R. Rothermel model
[27] (v – the wind flow velocity)



Для прогнозирования поведения лесного пожара в модели Р. Ротермела осуществляется вычисление параметров эллипса: a , b и c :

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

$$LB = 0,936 \exp(0,2566v) + 0,461 \exp(-0,1548v) - 0,397; \quad (1)$$

$$B = \frac{LB + \sqrt{LB^2 - 1}}{LB - \sqrt{LB^2 - 1}},$$

где a – высота эллипса; b – длина эллипса (фронтальная зона огня); c – длина эллипса (выгор); LB, HB – ширина и высота отрезка эллипса b соответственно; ω_n – скорость продвижения лесного пожара, м/мин; v – скорость потока (ветра), м/с.

При этом центральной расчетной характеристикой модели является скорость продвижения лесного пожара (м/мин) [1]:

$$\omega_n = \omega_0(1 + k(U) + k(S)), \quad (2)$$

ω_0 – плотность пласта горючих веществ, кг/м³; $k(U)$ – величина частичек вегетативной прогораемой материи, м²; $k(S)$ – скорость полного прогорания вегетативного горючего, м/мин.

Несмотря на преимущества данной модели, как представляется авторам, в исходном виде она неприменима для прогнозирования пятнистых и интенсивных верховых пожаров, которые представляют собой наибольшую опасность для социума и объектов экономики [25, 26]. Кроме того, в модели Р. Ротермела практически не учитываются метеорологические параметры за исключением скорости приземного потока. В связи с этим следует уточнить основное прогностическое уравнение (1), включив в него еще ряд параметров. В частности, М.А. Софронов [21] при оценке скорости распространения низового пожара предложил учитывать не только скорость ветра, но и относительную влажность воздуха, а также уклон местности, шероховатость или вязкость поверхности.

Исходя из сказанного, как представляется авторам, для интенсивного верхового пожара, возможно, эволюционировавшего из низового, вычисления скорости распространения огня необходимо производить на 2 уровнях, используя 2-слойные модели: приповерхностном (высоты 0–1 м) и приземном (высоты 1–2 м) [7]. В этом случае формулу (2), описывающую процессы термического преобразования горючего вещества в приповерхностном слое, необходимо дополнить более точными параметрами, характеризующими количество прогораемого вещества лесных массивов (U), а также мощность формирующегося при этом теплового потока (Q):

$$\omega_n = UQ, \quad (3)$$

где ω_n – скорость продвижения лесного пожара, м/мин; U – удельный объем пласта горючих веществ, м³/кг; Q – тепловой поток прогораемой части лесного массива, включая лесную подстилку, Вт/м².

В приземном слое (2-й уровень модели) более важными являются такие параметры, как температура воздуха, вертикальные и горизонтальные составляющие скорости потока, влажность воздуха. Возможным уравнением для вычисления скорости продвижения пожара в приземном слое может служить следующее:

$$\omega_{n1} = \omega_n \cdot \left| \frac{t_0}{t_1} \right| \cdot \left| \frac{v_0}{v_g} \right| \cdot \left| \frac{f_0}{f_1} \right|,$$

где ω_{n1} – скорость продвижения огня в приземном слое, м/мин; t_0 – температура воздуха в приповерхностном слое, °C; t_1 – температура воздуха в приземном

слое на высоте 1–2 м, °C; v_0 – скорость потока воздуха в приповерхностном слое, м/с; v_g – горизонтальная составляющая скорости потока воздуха, м/с; f_0 – относительная влажность воздуха в приповерхностном слое воздуха, %; f_1 – относительная влажность воздуха в приземном слое на высоте 1–2 м.

Модельные уравнения Р. Ротермела для прогноза дальнейшего распространения низового пожара позволяют рассчитывать 3 характеристики возможного эллипса: a , b , c . Данное представление возможного развития пожара в виде эллиптической фигуры представляется достоверным. Однако недоучет вертикальной составляющей параметра эллипса a в случае низового пожара не влечет никаких последующих ошибок. При пятнистом и интенсивном верховых пожарах, когда происходит развитие как внутренней термической, так и внешней механической конвекции и последующей турбулентности, позволяющей «забрасывать» горящие частицы вверх и в стороны от очага, возможны существенные изменения не только параметра a , но и параметров b и c . Поэтому для учета турбулентности приземных слоев воздуха (в приповерхностном слое 0–1 м учитывать турбулентность бессмысленно, т. к. она будет «гаситься» поверхностным слоем лесной подстилки или почвы) будем руководствоваться известными теоретическими представлениями о нестационарности и физических закономерностях приземного слоя воздуха. Так, Д.Л. Лайхтманом [16] обоснована модель нестационарного приземного слоя, включая систему уравнений движения без учета силы Кориолиса; притока тепла Θ ; баланса энергии турбулентности b . Система замыкалась с помощью гипотезы Монина–Обухова и обобщенной формулы Кармана:

$$\begin{aligned}\frac{du}{dt} &= \frac{d}{dz} k \frac{du}{dz}; \\ \frac{d\Theta}{dt} &= -\frac{d}{dz} k \frac{d\Theta}{dz}; \\ \frac{db}{dt} &= k \left(\frac{du}{dt} \right)^2 - k \frac{g}{T} \frac{d\Theta}{dz} - \frac{cb^2}{k} + \alpha_b \frac{d}{dz} k \frac{db}{dz}; \\ k &= l\sqrt{b}; \\ l &= -2\kappa C \frac{1}{4} + \frac{\left(\frac{du}{dz} \right)^2 - \frac{g}{T} \frac{d\Theta}{dz}}{\frac{d}{dz} \left[\left(\frac{du}{dz} \right)^2 - \frac{g}{T} \frac{d\Theta}{dz} \right]},\end{aligned}\tag{4}$$

где u – скорость движения частиц воздуха, м/с; t – температура воздуха, °C; z – высота, м; Θ – приток тепла, Дж/с·м²·кг; b – энергия турбулентности, Дж/кг; k – коэффициент турбулентности, м/с; g – ускорение свободного падения, м/с²; l – масштаб турбулентности, м; C – постоянная [16], $\sim 0,046$; κ – постоянная Кармана, вычислена для решения данной задачи, $\sim 0,397$; α_b – постоянная [16], $0,73$.

Исходя из представлений о физических закономерностях нестационарного приземного слоя воздуха, изложенных в трудах Д.Л. Лайхтмана [16], можно сделать вывод о важности турбулентных движений в распределении тепла, энергии, частиц воздуха. В связи с чем для непосредственного решения описываемой задачи рассмотрим диффузию вещества и энергии, возникающую вследствие нагревания и трансформации поверхностного слоя почвы при пожарах [6–10, 22–24], моделирование которых основывается на теории градиентного переноса. Последняя характеризуется коэффициентом турбулентной диффузии k при моделировании турбулентности в приземном слое. В данных обстоятельствах для учета вертикальных потоков вещества и тепловой энергии, возникающих при интенсивном пятнистом пожаре, будем оценивать диффузионный перенос только в вертикальной плоскости k_z . При этом, как представляется, искажений в расчетах не будет, т. к. горизонтальные составляющие коэффициента турбулентности будут пренебрежимо малы из-за шероховатости поверхности и действия силы трения между частицами вещества. Для упрощения модельного уравнения воспользуемся уравнением М.И. Будыко [5], рассчитывающим коэффициент вертикальной диффузии на единичном уровне:

$$k_z = k_1 p \frac{z}{z_1} \sqrt{1 - \overline{Ri}}, \quad (5)$$

где k_z – коэффициент вертикальной диффузии, м/с; $k_1 p$ – k_z на единичной высоте z_1 и в равновесных условиях, на высоте 1 м составляет 0,1–0,2 м/с; $\overline{Ri}$ – среднее по пограничному слою число Ричардсона,

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

T_a – температура по абсолютной шкале, К.

В связи с изложенными соображениями внесем некоторые дополнения в исходную формулу (1) модели Р. Ротермела для уточнения развития пожара от низового к интенсивному верховому (2-й слой модели), рассчитывая скорость продвижения огня ω_n в приземном слое по формуле (5) и дополнив уравнение (1) выражением для расчета коэффициента турбулентности k_z с заменой им безразмерного параметра (0,397), поскольку по смыслу последний выполняет роль параметра, снижающего размеры ширины отрезка эллипса a . Учет интенсивной конвекции и последующей турбулентности способны скорректировать параметр ширины отрезка a с большей точностью по отношению к реальным условиям. Тогда формула (1) может быть представлена следующим образом:

$$LB = 0,936 \exp(0,2566\nu) + 0,461 \exp(-0,1548\nu) - k_z \cdot$$

С учетом формул (4) и (5) получим итоговое выражение:

$$LB = 0,936 \exp(0,2566\nu) + 0,461 \exp(-0,1548\nu) - k_1 p \frac{z}{z_1} \sqrt{1 - \frac{g \frac{dT}{dz}}{T_a \left(\frac{dT}{dz} \right)^2}}.$$

Апробация полученного уравнения и моделирование различных случаев с характерным развитием конвективной турбулентности позволила получить результаты, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Результаты моделирования параметров интенсивных пожаров с учетом и без учета турбулентности [2, 8, 16] для нестационарного приземного слоя
The results of modeling the parameters of intense fires with and without turbulence [2, 8, 16] for an unsteady surface layer

v , м/с	k_z , м/с	LB	HB	a	b	c
4,000	—	2,470	22,521	0,521	1,290	1,268
4,000	0,500	2,370	19,640	0,552	1,301	1,276
8,000	—	7,001	139,001	0,220	1,507	1,500
8,000	2,000	5,400	107,002	0,281	1,509	1,500
12,000	—	11,610	579,501	0,170	2,001	1,997
12,000	5,000	7,010	199,290	0,290	2,005	1,995

Примечание: Полужирным шрифтом обозначены наибольшие отклонения в вычисленных значениях отрезка a эллипса, полученные с помощью расчетов по уточненной формуле в сравнении с классической формулой Р. Ротермела в условиях нестационарного приземного слоя.

Адекватность найденных значений отрезка a эллипса была проверена с помощью критерия Стьюдента (двухвыборочного t -критерия). Для чего было произведено сравнение значений, вычисленных с помощью модели Р. Ротермела и с учетом предложенного авторами уравнения (табл. 2). Значение t -критерия Стьюдента оказалось меньше критического (табличного) значения: $0,609 < 2,776$, что доказывает статистическую сходимость полученных результатов расчетов модели, содержащей уточнение, и, как следствие, адекватность предложенного уточнения.

Отсюда уточненное уравнение, обоснованное для нестационарного приземного слоя (2-й слой модели), позволит существенно скорректировать размеры отрезка a эллипса на основе учета развивающихся как внутренних, так и внешних вертикальных конвективных потоков, способствующих возникновению турбулентности приземного слоя и трансформации низового лесного пожара в интенсивный верховой.

Таблица 2

Результаты сравнения уточненного варианта модели с классическим уравнением модели Р. Ротермела
The results of comparison of the refined version of the model with the classical equation of the R. Rothermel model

Уравнение	Среднее значение	Дисперсия	Степени свободы	Объединенная дисперсия	Вычисленный t -критерий	Критическое значение t -критерия при уровне достоверности 95 %
Уточненное	0,374	0,016	4	0,02	0,609	2,776
Модель Р. Ротермела	0,304	0,024	4			

Заключение

В результате уточнения полуэмпирической модели Р. Ротермела для нестационарного приземного слоя обосновано введение параметра турбулентности – соответствующего коэффициента турбулентности. Показана необходимость дополнения 1-слойной модели уравнениями 2-го слоя, характеризующими развитие пожара в нестационарном приземном слое. Полученные уточненные уравнения позволят более эффективно рассчитывать параметры пятнистых и интенсивных верховых пожаров в пределах лесных экосистем. Дальнейшее уточнение уравнений полуэмпирических моделей лесных пожаров является перспективным, исследования в этом направлении следует продолжать.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Абаимов А.П., Прокушкин С.Г., Суховольский В.Г., Овчинникова Т.М. Оценка и прогноз послепожарного состояния лиственницы Гмелина на мерзлотных почвах Средней Сибири // Лесоведение. 2004. № 2. С. 3–11.

Abaimov A.P., Prokushkin S.G., Sukhovol'skii V.G., Ovchinnikova T.M. Assessment and Forecast of Post-Fire Condition of Gmelin Larch on Permafrost Soils of Central Siberia. *Lesovedenie* = Russian Journal of Forest Science, 2004, no. 2, pp. 3–11. (In Russ.).

2. Андреева Е.С., Сергеева Г.А., Богданова И.В. Уточнение модели низового лесного пожара с учетом конвективной турбулентности // Безопасность техногенных и природных систем. 2025. Т. 9, № 1. С. 14–21.

Andreeva E.S., Sergeeva G.A., Bogdanova I.V. Refinement of the Ground Forest Fire Model Taking into Account Convective Turbulence. *Bezopasnost' tekhnogennykh i prirodnnykh sistem* = Safety of Technogenic and Natural Systems, 2025, vol. 9, no. 1, pp. 14–21. (In Russ.). <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-14-21>

3. Аноikin Р.К. Анализ математических моделей, используемых для прогнозирования низовых лесных пожаров // Технологии гражданской безопасности. 2020. Т. 17, № 2(64). С. 58–60.

Anoikin R.K. Analysis of Mathematical Models Used for Forest Ground Fires Forecasting. *Tekhnologii grazhdanskoj bezopasnosti* = Civil Security Technology, 2020, vol. 17, no. 2(64), pp. 58–60. (In Russ.). <https://doi.org/10.54234/CST.19968493.2020.17.2.64.10.58>

4. Баровик Д.В., Таранчук В.Б. Алгоритмические основы построения компьютерной модели прогноза распространения лесных пожаров // Вестн. Полоцк. гос. ун-та. Сер. С: Фундаментальн. науки. Информат. 2011. № 12. С. 51–56.

Barovik D.V., Taranchuk V.B. Algorithmic Fundamentals of Computer Model for Forest Fires Prediction. *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya C: Fundamental'nye nauki. Informatika* = Vestnik of Polotsk State University. Part C. Fundamental Sciences, 2011, no. 12, pp. 51–56. (In Russ.).

5. Будыко М.И. Тепловой баланс земной поверхности. Л.: Гидрометеиздат, 1956. 255 с.

Budyko M.I. *Heat Balance of the Earth's Surface*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1956. 255 p. (In Russ.).

6. Василенко С.В., Гаврилов А.С., Липовицкая И.Н., Мханна А. Метод климатологического анализа вертикальной структуры атмосферного пограничного слоя с использованием численной модели // Уч. зап. Рос. гос. гидрометеорол. ун-та. 2006. № 2. С. 53–64.

Vasilenko S.V., Gavrilov A.S., Lipovitskaya I.N., Mkhanna A. A Method of Climatological Analysis of the Vertical Structure of the Atmospheric Boundary Layer Using a Numer-

ical Model. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* = Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University, 2006, no. 2, pp. 53–64. (In Russ.).

7. Возникновение лесных пожаров: сб. ст. / под ред. Н.П. Курбатского. М.: Наука, 1964. 57 с.

The Occurrence of Forest Fires: Collection of Articles. Ed. by N.P. Kurbatskij. Moscow, Nauka Publ., 1964. 57 p. (In Russ.).

8. Гаврилов А.С. О строении пограничного слоя атмосферы над поверхностью с произвольными свойствами шероховатости // *Метеорол. и гидрол.* 1973. № 12. С. 35–42.

Gavrilov A.S. On the Structure of the Atmospheric Boundary Layer above the Surface with Arbitrary Roughness Properties. *Meteorologiya i gidrologiya* = Russian Meteorology and Hydrology, 1973, no. 12, pp. 35–42. (In Russ.).

9. Гаврилов А.С., Мханна А., Харченко Е.В. Верификация модели атмосферного пограничного слоя применительно к задачам прогноза загрязнения атмосферы от очагов лесных пожаров // *Уч. зап. Рос. гос. гидрометеорол. ун-та*. 2013. № 32. С. 119–129.

Gavrilov A.S., Mhanna A., Kharchenko E.V. Verification of the Model of Atmospheric Boundary Layer Applied to the Problem Prediction of Air Pollution from Forest Fires. *Uchenye zapiski Rossijskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta* = Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University, 2013, no. 32, pp. 119–129. (In Russ.).

10. Гаврилов А.С., Петров Ю.С. Оценка точности определения турбулентных потоков по стандартным гидрометеорологическим измерениям над морем // *Метеорол. и гидрол.* 1981. № 4. С. 52–59.

Gavrilov A.S., Petrov Yu.S. Assessment of the Accuracy of Turbulent Flow Determination Using Standard Hydrometeorological Measurements over the Sea. *Meteorologiya i gidrologiya* = Russian Meteorology and Hydrology, 1981, no. 4, pp. 52–59. (In Russ.).

11. 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 // *Вестн. Томск. гос. ун-та. Математика и механика*. 2009. № 3(7). С. 99–108.

Grishin A.M., Pugacheva P.V. Analysis of Impact of Forest and Steppe Fires on Cities and Villages and the New Determinate and Probability Model for Prediction of Fire Dangerous in Villages and Cities. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika*, 2009, no. 3(7), pp. 99–108. (In Russ.).

12. Карлин Л.Н., Ванкевич Р.Е., Тумановская С.М., Андреева Е.С., Ефимова Ю.В., Хаймина О.В., Клеванный К.А., Фрумин Г.Т., Еремина Т.Р., Еришова А.А. Гидрометеорологические риски. СПб.: Рос. гос. гидрометеорол. ун-т, 2008. 282 с.

Karlin L.N., Vankevich R.E., Tumanovskaya S.M., Andreeva E.S., Efimova Yu.V., Khajmina O.V., Klevannyj K.A., Frumin G.T., Eremina T.R., Ershova A.A. *Hydrometeorological Risks*. St. Petersburg: Russian State Hydrometeorological University Publ., 2008. 282 p. (In Russ.).

13. Кулешов А.А., Мышецкая Е.Е. Математическое моделирование лесных пожаров с применением многопроцессорных ЭВМ // *Математическое моделирование*. 2009. Т. 1, № 5. С. 629–634.

Kuleshov A.A., Myshetskaya E.E. Mathematical Simulation of Forest Fires Using Multiprocessor Computers. *Matematicheskoe modelirovanie* = Mathematical Models and Computer Simulations, 2009, vol. 1, pp. 629–634. <https://doi.org/10.1134/S2070048209050093>

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

Kuleshov A.A., Myshetskaya E.E., Yakush S.E. Numerical Simulation of Forest Fire Propagation Based on Modified Two-Dimensional Model. *Matematicheskoe mod-*

elirovanie = Mathematical Models and Computer Simulations, 2017, vol. 9, pp. 437–447. <https://doi.org/10.1134/S207004821704007X>

15. Курбатский Н.П. Пожарная опасность в лесу и ее измерение по местным шкалам // Лесн. пожары и борьба с ними: сб. ст. / под ред. Н.П. Курбатского. М.: АН СССР, 1963. С. 5–30.

Kurbatskij N.P. Fire Danger in the Forest and its Measurement on Local Scales. *Lesnye pozhary i bor'ba s nimi*: Collection of Articles. Ed. by N.P. Kurbatskij. Moscow, the USSR Academy of Sciences Publ., 1963, pp. 5–30. (In Russ.).

16. Лайхтман Д.Л., Шеметова Г.В. Нестационарный приземный слой. Резкое изменение турбулентного потока тепла // Некоторые вопросы физики атмосферы. Тр. Ленингр. гидрометеорол. ин-та. 1974. Вып. 49. С. 12–18.

Lajkhtman D.L., Shemetova G.V. Unsteady Surface Layer. Abrupt Change in Turbulent Heat Flux. *Nekotorye voprosy fiziki atmosfery. Trudy Leningradskogo Gidrometeorologicheskogo instituta*, 1974, iss. 49, pp. 12–18. (In Russ.).

17. Мартынов А.В., Греков В.В., Попова О.В. Комплект средств измерений для экспресс-анализа интумесцентной защиты огнезащиты на строительном объекте // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2021. № 3. С. 61–68.

Martynov A.V., Grekov V.V., Popova O.V. Measuring Tool Kit for Express Analysis of Intumescent Fire Protection at a Construction Facility. *Pozhary i chrezvychajnye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya* = Fires and Emergencies: Prevention, Elimination, 2021, no. 3, pp. 61–68. (In Russ.). <https://doi.org/10.25257/FE.2021.3.61-68>

18. Матвеев П.М. Вероятность пятнистых загораний при лесных пожарах // Вопросы лесной пирологии: сб. ст. / под ред. Н.П. Курбатского. Красноярск: Ин-т леса и древесины, 1975. С. 44–65.

Matveev P.M. The Probability of Spot Fires during Forest Fires. *Voprosy lesnoj pirologii*: Collection of Articles. Ed. by N.P. Kurbatski. Krasnoyarsk, Institute of Forest and Wood Publ., 1975, pp. 44–65. (In Russ.).

19. Меднов А.О., Попова Е.С. Обеспечение пожарной безопасности на основе изучения особенностей развития пожаров и учета применяемых легковоспламеняющихся жидкостей // Тр. Ростов. гос. ун-та путей сообщения. 2017. № 3. С. 82–84.

Mednov A.O., Popova E.S. Ensuring Fire Safety Based on Studying the Characteristics of Fire Development and Taking into Account the Flammable Liquids Used. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobscheniya*, 2017, no. 3, pp. 82–84. (In Russ.).

20. Пузач С.В., Ле Т.А., Нгуен Т.Х. Пожарная опасность пятнистого возгорания при верховом лесном пожаре для объектов энергетики // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2018. № 2. С. 64–70.

Puzach S.V., Le T.A., Nguyen T.H. Fire Hazard from Spotting Ignition at Crown Fires for Power Engineering Facilities. *Pozhary i chrezvychajnye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya* = Fires and Emergencies: Prevention, Elimination, 2018, no. 2, pp. 64–70. (In Russ.). <https://doi.org/10.25257/FE.2018.2.64-70>

21. Софронов М.А., Волокитина А.В. Пирологическое районирование в таежной зоне. Новосибирск: Наука, 1990. 204 с.

Sofronov M.A., Volokitina A.V. *Pyrological Zoning in the Taiga Zone*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1990. 204 p. (In Russ.).

22. Abannikov V.N., Seroukhova O.S., Mkhanna A.I.N., Podgaiskii E.V. 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, vol. 1010, art. no. 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1010/1/012033>

23. Adamyan V.L., Sergeeva G.A., Seferyan L.A., Gorlova N.Yu. Development of Technological Measures to Ensure the Safety of Production Facilities in Petrochemical Industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1083, art. no. 012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1083/1/012050>

24. Andreeva E.S. The Possibilities of Using the Minimax Method to Diagnose the State of the Atmosphere. *Journal of Atmospheric Science Research*, 2023, vol. 6, iss. 2, pp. 42–49. <https://doi.org/10.30564/jasr.v6i2.5519>

25. 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, vol. 1001, art. no. 012119. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1001/1/012119>

26. 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, vol. 273, art. no. 04006. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127304006>

27. Rothermel R.C. *A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wildland Fuels*. Ogden, Utah, U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1972, Research Paper INT-115. 40 p.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest