

Математическое описание распространения лесного пожара

С.Н. Орловский^{1a}, А.И. Карнаухов^{2b}, В.А. Соколова^{3c}, А.А. Ореховская^{4d},
В.А. Марков^{5e}, А.С. Кривоногова^{5f}, С.В. Алексеева^{6g}

¹ Красноярский государственный аграрный университет, пр. Мира, 90, Красноярск, Россия

² Сибирский государственный аэрокосмический университет им. М.Ф. Решетнёва,
пр. Мира, 82, Красноярск, Россия

³ Высшая школа технологии и энергетики Санкт-Петербургского государственного университета
промышленных технологий и дизайна, ул. Большая Морская, 18, Санкт-Петербург, Россия

⁴ Белгородский государственный аграрный университет им. В.Я. Горина,
ул. Вавилова, 1, пос. Майский, Белгородская обл., Россия

⁵ Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова,
Институтский пер., 5, Санкт-Петербург, Россия

⁶ Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
ул. 2-я Красноармейская, 4, Санкт-Петербург, Россия

^a orlovskiysergey@mail.ru, ^b sky_angel_33@mail.ru, ^c sokolova_vika@inbox.ru, ^d orehovskaja_aa@bsaa.edu.ru,

^e mactor85@mail.ru, ^f kas.spb.lta@mail.ru, ^g pum222@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-8904-834X>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-7284-2050>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-8149-7191>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-4986-4155>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-6320-7197>,

^g <https://orcid.org/0000-0002-0629-5650>

Статья поступила 06.10.2022, принята 26.10.2022

В работе предложена методика прогнозирования развития и тушения лесных низовых пожаров на основе минимизации затрат на их тушение. Разработан метод определения набора оптимальных технологий тушения лесных пожаров различных типов. Выведены исходные аналитические формулы, позволяющие по параметрам пожара и предлагаемым технологии его тушения различными методами и средствами рассчитывать сроки локализации и тушения, а также размеры выгоревших лесных площадей и нанесенного ущерба. Отфильтрованы несущественные параметры лесных пожаров различных видов, предложены алгоритмы для решения задачи оптимизации технологий тушения очагов горения высокой, средней и низкой интенсивности в различных типах лесов. Метод определения оптимальных технологий базируется на выведенных формулах для расчета оптимальных технологий тушения, а также расчетов затрат на выполнение лесопожарных работ. В методике используется полный перебор всех вариантов и нейросетевой алгоритм. Применение нейросетей позволило не учитывать несущественные параметры анализируемых лесных пожаров и получить простые и доступные формулы для решения задачи оптимизации технологий тушения. Анализируя встречаемость технологий тушения в массиве полученной при выполнении расчетов информации, выбраны оптимальные технологии тушения в соответствии с заданными критериями. Получены формулы для решения задачи набора наиболее оптимальных технологий. Использование оптимизированных технологий тушения низовых лесных пожаров на различных стадиях их развития позволит службам лесной охраны организовать выполнение работ с рациональным количеством сил и средств, а также при минимальных затратах и ущербе.

Ключевые слова: методика; оптимизация; технологии тушения; лесные пожары; механизация; эффективность; ущерб.

Mathematical description of wildfire spread

S.N. Orlovskiy^{1a}, A.I. Karnauhov^{2b}, V.A. Sokolova^{3c}, A.A. Orekhovskaya^{4d},
V.A. Markov^{5e}, A.S. Krivonogova^{5f}, S.V. Alekseeva^{6g}

¹ Krasnoyarsk State Agrarian University; 90, Mira Pros., Krasnoyarsk, Russia

² Reshetnev Siberian State Aerospace University; 82, Mira Pros., Krasnoyarsk, Russia

³ St. Petersburg State University of Industrial Technologies and Design, Higher School of Technology and Energy; 18,
Bolshaya Morskaya St., St. Petersburg, Russia

⁴ Belgorod State Agrarian University named after V. Ya. Gorin; Mayskiy, Belgorod region, 1, Vavilov St., Russia

⁵ St. Petersburg State Forest Technical University; 5, Institutsky Per., St. Petersburg, Russia

⁶ St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 4, Vtoraya Krasnoarmeiskaya St., St. Petersburg,
Russia

^a orlovskiysergey@mail.ru, ^b sky_angel_33@mail.ru, ^c sokolova_vika@inbox.ru, ^d orehovskaja_aa@bsaa.edu.ru,

^e mactor85@mail.ru, ^f kas.spb.lta@mail.ru, ^g pum222@mail.ru

^a <https://orcid.org/0000-0001-8904-834X>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-7284-2050>, ^c <https://orcid.org/0000-0001-6880-445X>,

^d <https://orcid.org/0000-0001-8149-7191>, ^e <https://orcid.org/0000-0002-4986-4155>, ^f <https://orcid.org/0000-0001-6320-7197>,

^g <https://orcid.org/0000-0002-0629-5650>

Received 06.10.2022, accepted 26.10.2022

The paper proposes a method for predicting the development and extinguishing of forest ground fires based on minimizing the cost of extinguishing them. A method has been developed for determining a set of optimal technologies for extinguishing forest fires of various types. The initial analytical formulas are derived, which make it possible, according to the parameters of the fire and the proposed technology of extinguishing it by various methods and means, to calculate the terms of localization and extinguishing, as well as the size of the burnt forest areas and the damage caused. Non-essential parameters of forest fires of various types are filtered out, algorithms are proposed for solving the problem of optimizing technologies for extinguishing fires of high, medium and low intensity in various types of forests. The method for determining the optimal technologies is based on the derived formulas for calculating the optimal extinguishing technologies, as well as calculating the costs of forest fire work. The technique uses a complete enumeration of all options and a neural network algorithm. The use of neural networks made it possible not to take into account the insignificant parameters of the analyzed forest fires and made it possible to obtain simple and accessible formulas for solving the problem of optimizing extinguishing technologies. Analyzing the occurrence of extinguishing technologies in the array of information obtained when performing calculations, the optimal extinguishing technologies were selected in accordance with the specified criteria. Formulas for solving the problem of a set of the most optimal technologies are obtained. The use of optimized technologies for extinguishing ground fires at various stages of their development will allow forest protection services to organize the execution of work with a rational amount of manpower and resources, as well as at minimal cost and damage.

Key words: methodology; optimization; extinguishing technologies; forest fires; mechanization; efficiency; damage.

Введение. Для борьбы с лесными пожарами важно знать, как изменяется во времени геометрическая форма пожара на плоскости. В данной статье выводится уравнение распространения пожара, решение которого дает контур пожара в любой момент времени, если известны условия, влияющие на его развитие. Этот вопрос рассматривался в работах [2–5; 7; 12; 16–18] при весьма сильных упрощениях процесса распространения пожара.

Описание объекта исследования. Перейдем к выводу уравнения. Скорость движения каждого небольшого отрезка (элемента) кромки по нормали к ней зависит:

- 1) от изменения свойств горючих материалов в пространстве, т. е. от местоположения элемента кромки;
- 2) от факторов, меняющихся со временем, таких как температура и влажность воздуха, т. е. от времени;
- 3) от угла между этим направлением движения элемента кромки и некоторым фиксированным направлением.

Последняя зависимость может быть вызвана ветром, наклоном поверхности земли или тем и другим. Далее допустим, что кромку пожара в момент времени t описывает уравнение $y = f(x, t)$ в системе координат (x, y) . Выделим достаточно малый отрезок кромки (элемент кромки) длиной ΔL (рис. 1). Он движется с нормальной скоростью $v(x, y, \varphi, t)$, где x, y — координаты местоположения элемента кромки и φ — угол между нормалью элемента кромки и осью Ox (фиксированным направлением). За интервал времени $(t, t + \Delta t)$ этот элемент кромки преодолеет вдоль нормали путь длиной $v(x, y, \varphi, t) \cdot \Delta t + O_1(\Delta t)$ или, что то же самое, $y'_t \cdot \Delta t - \cos(90 - \varphi) + O_2(\Delta t)$, где $y'_t = \frac{bf(x,t)}{bt}$, а $O_1(\Delta t)$ и $O_2(\Delta t)$ бесконечно малые величины более высокого порядка, чем Δt . Длину элемента кромки можно выразить через соответствующий дифференциал Δx [1]:

$$\Delta L = \sqrt{1 + (2y_x)^2} \cdot \Delta x + O_3(\Delta x).$$

Или

$$\Delta L = \frac{\Delta x}{\cos(90 - \varphi)} + O_4(\Delta x).$$

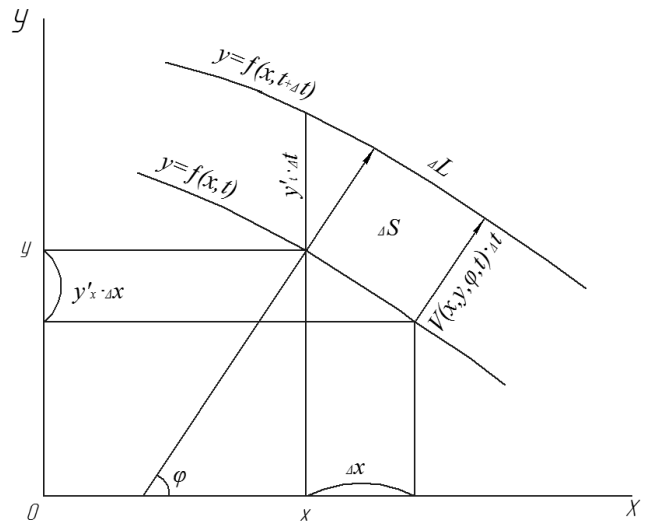


Рис. 1. К выводу уравнения распространения пожара

Результаты и их обсуждение. Для вывода искомого уравнения вычислим еще двумя способами площадь ΔS , которую проходит элемент кромки за время Δt :

$$\Delta S = \sqrt{1 + (y_x)^2} \cdot \Delta x \cdot v(x, y, \varphi, t) \cdot \Delta t + O_5(\Delta t) \cdot \Delta x + O_6(\Delta x) \cdot \Delta t, \tag{1}$$

$$\Delta S = \frac{\Delta x}{\cos(90 - \varphi)} \cdot y'_t \cdot \Delta t \cdot \cos(90 - \varphi) + O_7(\Delta t) \cdot \Delta x + O_8(\Delta x) \cdot \Delta t \tag{2}$$

Последние выражения приравняем, разделим на $\Delta x \cdot \Delta t$ и затем перейдем к пределу при $\Delta x \rightarrow 0$ и $\Delta t \rightarrow 0$.

Получим уравнение:

$$y_t = \sqrt{1 + (y_x)^2} \cdot v(x, y, \varphi, t), \tag{3}$$

в котором осталось сделать замену $\varphi = \arctg \frac{-1}{y_x}$.

Найденное уравнение:

$$y_t = \sqrt{1 + (y_x)^2} \cdot v(x, y, \arctg \frac{-1}{y_x}, t) \tag{4}$$

может быть использовано для прогнозирования развития действующих или возможных пожаров [3; 4].

Рассмотрим пожар в однородном лесу при постоянных условиях. В этом случае уравнение кромки принимает вид:

$$y_t = \sqrt{1 + (y_x)^2} \cdot v(\arctg \frac{-1}{y_x}), \tag{5}$$

полный интеграл которого представляет собой двухпараметрическое семейство интегральных поверхностей [1]:

$$y = \sqrt{1 + a^2} * v(\arctg \frac{-1}{a}) * t + ax + b, \quad (6)$$

где a и b — произвольные постоянные (параметры). Из условия $y = f(0,0) = 0$ находим, что $b = 0$.

$$\left[\begin{array}{l} y = \sqrt{1 + a^2} * v(\arctg \frac{-1}{a}) * t + ax \\ y = \frac{-a}{\sqrt{1+a^2}} * v(\arctg \frac{-1}{a}) * t + \frac{-1}{\sqrt{1+a^2}} * v(\arctg \frac{-1}{a}) * t \end{array} \right] \quad (7)$$

из которых следует исключить параметр a . Так как это сделать трудно, представим решение в параметрическом виде:

$$\left[\begin{array}{l} x(a, t) = \frac{-a}{\sqrt{1+a^2}} * v(\arctg \frac{-1}{a}) * t + \frac{-1}{\sqrt{1+a^2}} * v(\arctg \frac{-1}{a}) * t \\ y(a, t) = \frac{-1}{\sqrt{1+a^2}} * v(\arctg \frac{-1}{a}) * t + \frac{-a}{\sqrt{1+a^2}} * v(\arctg \frac{-1}{a}) * t \end{array} \right] \quad (8)$$

и сделаем замену параметра $a = -\text{ctg} \phi$, которая упростит его:

$$\left(\begin{array}{l} x(\phi, t) = [\cos \phi * v(\phi) - \sin \phi * v(\phi)] * t \\ y(\phi, t) = [\sin \phi * v(\phi) + \cos \phi * v(\phi)] * t \end{array} \right) \quad (9)$$

Проанализируем полученную кривую:

1. Скорость движения элементов кромки пожара, расположенных вдоль прямой $\frac{y \sin \phi * v(\phi) + \cos \phi * v(\phi)}{x \cos \phi * v(\phi) - \sin \phi * v(\phi)}$, постоянна, равна $v(\phi)$. Используя это обстоятельство, можно выделить тактические элементы пожара; фронт, фланги и тыл. Для этого необходимо задать интервалы скорости движения кромки соответствующих тактических элементов.

2. Периметр пожара спустя время t после возникновения определяется по формуле:

$$L(t) - \int_{-\pi}^{\mu} \sqrt{(x_{\rho})^2 + (y_{\phi})^2} * d\phi = t * \int_{-\pi}^{\mu} |v(\phi) + v(\phi)| d\phi \quad (10)$$

3. Площадь, охваченную пожаром, найдем, суммируя элементы площади ΔS (рис. 1):

$$S(t) = \int_0^t \int_{-\pi}^{\mu} dl(t) * v(\phi) * dt = \int_0^t \int_{-\pi}^{\mu} |v(\phi) + v(\phi)| d\phi * v(\phi) * dt. \quad (11)$$

Ликвидированные пожары имеют иную форму и параметры, которые зависят от тактики тушения. Поэтому будем считать, что:

1) тушение кромки пожара производится двумя группами с применением тактики охвата с фронта или с тыла;

2) скорость тушения каждой группы V_T зависит от скорости движения кромки $v(\phi)$, т. е. $V_T = V_T[v(\phi)]$;

3) направление оси пожара принято за фиксированное направление, от которого измеряется угол ϕ .

Рассмотрим треугольник на рис. 2. Для него с точностью до бесконечно малых величин $o(\Delta\phi)$ и $o(\Delta t)$ можно записать равенство:

$$[v(\phi) * \Delta t]^2 + [\Delta l(t)]^2 = [v_t * \Delta]^2 \quad (12)$$

Используя соотношение:

Интересующее нас решение является огибающей выделенного однопараметрического семейства интегральных поверхностей и определяется уравнениями [13; 15]:

$\Delta L(t) = t * |v(\phi) + v''(\phi)| * \Delta\phi + o(\Delta\phi)$ и переходя к пределу при $\Delta\phi \rightarrow 0$ и $\Delta t \rightarrow 0$, получим дифференциальное уравнение, связывающее параметр ϕ с текущим временем тушения t [14; 19–21]:

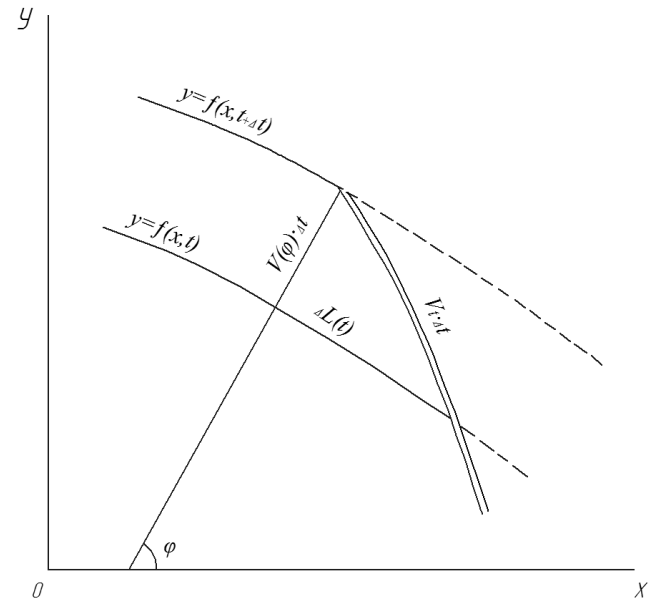


Рис. 2. К определению времени тушения пожара

$$\frac{+|v(\phi) + v(\phi)|}{\sqrt{v_t^2 + v^2(\phi)}} d(\phi) = \frac{dt}{t}, \quad (13)$$

в котором имеем знак «+» при тактике охвата с фронта, а знак «-» — при тактике охвата с тыла.

Найдем решение этого уравнения для этих случаев при условии, что тушение началось спустя время t_0 после возникновения пожара [14; 15]:

$$t = t_0 * \exp \left[\int_0^{\phi} \frac{|v(a) + v(a)|}{\sqrt{v_t^2 - v^2(a)}} da \right] \quad (14)$$

$$t = t_0 * \exp \left[\int_{\phi}^x \frac{|v(a) + v(a)|}{\sqrt{v_t^2 - v^2(a)}} da \right] \quad (15)$$

Отсюда сразу получим время тушения кромки:

$$t_T = t_1 - t_0 = t_0 * \exp \left[\int_0^\pi \frac{|v(a)+v(\vartheta)|}{\sqrt{v_t^2 - v^2(a)}} da \right] - t_0, \quad (16)$$

где t_1 — момент окончания тушения. Интересно отметить, что время тушения кромки одинаково для рассматриваемых тактик. Определим периметр локализованного пожара. При охвате с фронта [8; 9; 22–24]:

$$L_t = 2 \int_{t_0}^{t_1} v_t * dt = 2 \int_0^\pi v_t * d \left[\int_0^\varphi t_0 * \exp \frac{|v(a)+v(\vartheta)|}{\sqrt{v_t^2 - v^2(a)}} da \right] = 2t_0 \left\{ v_t [v(\pi)] * \exp \int_0^\pi \frac{|v(a)+v(\vartheta)|}{\sqrt{v_t^2 - v^2(a)}} da - v_t [v(0)] - \int_0^\pi \exp \int_0^\varphi \frac{|v(a)+v(\vartheta)|}{\sqrt{v_t^2 - v^2(a)}} da * dv_t [v(\varphi)] \right\} \quad (17)$$

При охвате с тыла:

$$L_t = 2t_0 * \left\{ v_t [v(0)] * \exp \int_0^\pi \frac{|v(a)+v(\vartheta)|}{\sqrt{v_t^2 - v^2(a)}} da - v_t [v(0\pi)] + \int_0^\pi \exp \int_0^\varphi \frac{|v(a)+v(\vartheta)|}{\sqrt{v_t^2 - v^2(a)}} da * dv_t [v(\varphi)] \right\} \quad (18)$$

Если скорость тушения кромки v_t постоянна, то периметр потушенного пожара не зависит от тактики и равен [15]:

$$L_t = 2 * t_0 * v_t * \left[\exp \int_0^\pi \frac{|v(a)+v(\vartheta)|}{\sqrt{v_t^2 - v^2(a)}} da - 1 \right] \quad (19)$$

Площадь потушенного пожара также легко вычислить. Например, при тактике охвата с фронта она равна:

$$S_r = 2 * \int_0^\pi \int_0^{t(\varphi)} t * [v(\varphi) + v(\vartheta)] * v(\varphi) * dt * d\varphi = t_0^2 \int_0^\pi |v(\varphi) + v(\vartheta)| * v(\varphi) * \exp * 2 \int_0^\varphi \frac{|v(a)+v(\vartheta)|}{\sqrt{v_t^2 - v^2(a)}} dx * d\varphi, \quad (20)$$

где было принято: $t(\varphi) = t_0 * \exp \int_0^\varphi \frac{|v(a)+v(\vartheta)|}{\sqrt{v_t^2 - v^2(a)}} da$.

Литература

1. Камке Эрих. Справочник по дифференциальным уравнениям в частных производных первого порядка: пер. с нем. Н.Х. Розова, Б.Ю. Стернина. М.: Наука, 1966. 260 с.
2. Подрезов Ю.В. Теоретические особенности прогнозирования динамики чрезвычайных лесопожарных ситуаций // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: сб. материалов Междунар. науч.-практической конф. (15 окт. 2021 г.). Красноярск: ФГБОУ ВО Сиб. пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2021. С. 5-11.
3. Орловский С.Н. К проблеме тушения крупных и катастрофических лесных пожаров с применением конверсионной военной техники в составе подразделений МЧС // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: сб. ст. по материалам VII Всерос. науч.-практической конф. (20 окт. 2017 г.). Железногорск, 2017. С. 34-39.
4. Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. М.: Лесная пром-сть, 1979. 160 с.
5. Указания по обнаружению и тушению лесных пожаров. М.: Федер. служба лесного хозяйства России, 1995. С. 84-85.
6. Орловский С.Н. Борьба с лесными, степными и торфяными пожарами. Красноярск: Краснояр. гос. аграр. ун-т, 2016. 299 с.

Заключение. Как видно из предыдущего, основные характеристики лесного пожара выражаются через функцию $v(\varphi)$. Остановимся на ее свойствах при влиянии на пожар только ветра. Очевидно, что при измерении угла φ от направления, определяемого осью пожара, функция $v(\varphi)$ монотонно убывает в интервале $(0, \pi)$, четная ($v(\varphi) = v(-\varphi)$) и производная ее $v'(\varphi)$ на концах этого интервала обращается в нуль ($v'(0) = v'(\pi) = 0$). Из работы [3] следует, что зависимость скорости движения фронта пожара v от скорости ветра v_2 хорошо описывается формулой:

$$V = V_1 * \exp(K * V_2).$$

По-видимому, и функция $v(\varphi)$ имеет аналогичный вид:

$$V(\varphi) = V_1 * \exp[K(\varphi) * V_2],$$

где V_1 — скорость движения кромки при отсутствии ветра; $K(\varphi)$ — функция с вышеперечисленными свойствами.

Выводы. Выведено уравнение распространения лесного пожара в произвольных условиях:

$$y_1 = \sqrt{1 + (y_x)^2} * v(x, y, \arctg \frac{-1}{y_x}, t), \quad (21)$$

решение которого дает контур пожара в любой момент после возникновения и, следовательно, может быть использовано для прогнозирования пожаров.

Полученное уравнение проанализировано для случая однородного леса. Установлена зависимость времени локализации от времени ожидания пожара, скорости движения кромки и скорости локализации, выражающаяся формулой:

$$t_T = t_0 * \exp \left[\int_0^\pi \frac{|v(a)+v(\vartheta)|}{\sqrt{v_t^2 - v^2(a)}} da \right] - t_0. \quad (22)$$

7. Доррер Г.А., Ушанов С.В. Математическое моделирование процессов распространения лесных пожаров и борьбы с ними // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 2000. № 2. С. 31-36.
8. Залесов С.В., Залесова Е.С., Оплетаяев А.С. Охрана лесов от пожаров: пособие для лесного пожарного. Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2013. 63 с.
9. Петров В., Смирнова А. Управление лесами в США // ЛесПромИнформ. 2016. № 2 (116). С. 162-164.
10. ГОСТ Р 22.1.09-99. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования. Введ. 01.01.2000. М.: Госстандарт России, 1999. 9 с.
11. Валендик Э.Н., Матвеев П.М., Сафронов М.А. Крупные лесные пожары. М.: Наука, 1979. 198 с.
12. Гришин А.М. О математическом моделировании природных пожаров и катастроф // Вестн. Томского гос. ун-та. Математика и механика. 2008. № 2 (3). С. 105-114.
13. Комиссаров С.В., Орловский С.Н., Ряполов В.Я. Подход к оптимизации тушения лесных пожаров // Проблемы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера: тр. III Всерос. науч.-практической конф. Красноярск: ИВМ СО РАН, 2003. Т. 2. С. 130-134.
14. Горбань А.Н., Дунин-Барковский В.Л., Кирдин А.Н., Миркес Е.М. Нейроинформатика. Новосибирск: Наука, 1998. 296 с.

15. Комиссаров С.В., Орловский С.Н. Оптимизация технологий тушения низовых лесных пожаров «OTLP-2»: авт. свид. об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2008610145; заявка № 2007614332. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9.01.2008.
16. Adab H., Kanniah K.D., Solaimani K. Modeling Forest Fire Risk in the Northeast of Iran Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Natural Hazards*. 2013. V. 65. P. 1723-1743.
17. Angayarkkani K., Radhakrishnan N. An Effective Technique to Detect Forest Fire Region through ANFIS with Spatial Data. 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, Kanyakumari, April 8-10, 2011. Kanyakumari, India, IEEE, 2011. P. 24-30.
18. Byram G.M. Combustion of Forest Fuels. *Forest Fire: Control and Use*. Ed. by K.P. Davis. New York, McGraw-Hill, 1959. P. 61-89.
19. Chuvieco E., Aguadoa I., Yebraa M., Nieto H., Salas J., Martín M.P. Development of a Framework for Fire Risk Assessment Using Remote Sensing and Geographic Information System Technologies. *Ecological Modelling*. 2010. V. 221, iss. 1. P. 46-58.
20. Cruz M.G., Alexander M.E., Wakimoto R.H. Development and Testing of Models for Predicting Crown Fire Rate of Spread in Conifer Forest Stands // *Canadian Journal of Forest Research*. 2005. V. 35. № 7. P. 1626-1639.
21. Davis R., Yang Z., Yost A., Belongie C., Cohen W. The Normal Fire Environment - Modeling Environmental Suitability for Large Forest Wildfires Using Past, Present, and Future Climate Normals. *Forest Ecology and Management*. 2017. V. 390. P. 173-186.
22. Dimopoulou M., Giannikos I. Spatial Optimization of Resources Deployment for Forest Fire Management. *International Transactions in Operational Research*. 2001. V. 8, iss. 5. P. 523-534.
7. Dorrer G.A., Ushanov S.V. Mathematical modeling of the processes of spreading forest fires and combating them // *Bulletin of higher educational institutions. Lesnoy zhurnal (Forestry journal)*. 2000. № 2. P. 31-36.
8. Zalesov S.V., Zalesova E.S., Opletaev A.S. Forest protection from fires: a manual for a forest firefighter. Ekaterinburg: Ural. gos. lesotekhn. un-t, 2013. 63 p.
9. Petrov V., Smirnova A. Forest Management in the USA // *LesPromInform*. 2016. № 2 (116). P. 162-164.
10. GOST R 22.1.09-99. Emergency safety. Wildfire monitoring and forecasting. General requirements. *Vved. 01.01.2000*. M.: Gosstandart Rossii, 1999. 9 p.
11. Valendik E.N., Matveev P.M., Safronov M.A. Large forest fires. M.: Nauka, 1979. 198 p.
12. Grishin A.M. On mathematical modeling of wildfires and disasters. *Journal Herald // Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics*. 2008. № 2 (3). P. 105-114.
13. Komissarov S.V., Orlovskij S.N., Ryapolov V.YA. Approach to optimizing forest fire extinguishing // *Problemy zashchity naseleniya i territorij ot chrezvychajnyh situacij prirodnoho i tekhnogennogo haraktera: tr. III Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. Krasnoyarsk: IVM SO RAN*, 2003. V. 2. P. 130-134.
14. Gorban' A.N., Dunin-Barkovskij V.L., Kirdin A.N., Mirkes E.M. *Neuroinformatics*. Novosibirsk: Nauka, 1998. 296 p.
15. Komissarov S.V., Orlovskij S.N. Optimization of technologies for extinguishing grass-roots forest fires "OTLP-2": avt. свид. ob oficial'noj registracii programmy dlya EVM № 2008610145; заявка № 2007614332. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9.01.2008.
16. Adab H., Kanniah K.D., Solaimani K. Modeling Forest Fire Risk in the Northeast of Iran Using Remote Sensing and GIS Techniques. *Natural Hazards*. 2013. V. 65. P. 1723-1743.
17. Angayarkkani K., Radhakrishnan N. An Effective Technique to Detect Forest Fire Region through ANFIS with Spatial Data. 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, Kanyakumari, April 8-10, 2011. Kanyakumari, India, IEEE, 2011. P. 24-30.

References

1. Kamke Erih. Reference to differential equations in first-order partial derivatives: per. s nem. N.H. Rozova, B.YU. Stermina. M.: Nauka, 1966. 260 p.
2. Podrezov YU.V. Theoretical features of forecasting the dynamics of emergency forest fire situations // *Monitoring, modelirovanie i prognozirovanie opasnyh prirodnyh yavlenij i chrezvychajnyh situacij: sb. materialov Mezhdunar. nauch.-prakticheskoy konf. (15 okt. 2021 g.)*. Krasnoyarsk: FGBOU VO Sib. pozharно-spasatel'naya akademiya GPS MCHS Ros-sii, 2021. P. 5-11.
3. Orlovskij S.N. On the problem of extinguishing large and catastrophic forest fires using conversion military equipment as part of the Ministry of Emergency Situations // *Monitoring, modelirovanie i prognozirovanie opasnyh prirodnyh yavlenij i chrezvychajnyh situacij: sb. st. po materialam VII Vseros. nauch.-prakticheskoy konf. (20 okt. 2017 g.)*. ZHeleznogorsk, 2017. P. 34-39.
4. Dorrer G.A. *Mathematical models of wildfire dynamics*. M.: Lesnaya prom-st', 1979. 160 p.
5. *Instructions for detecting and extinguishing forest fires*. M.: Feder. sluzhba lesnogo hozyajstva Rossii, 1995. P. 84-85.
6. Orlovskij S.N. *Fighting forest, steppe and peat fires*. Krasnoyarsk: Krasnoyar. gos. agrar. un-t, 2016. 299 p.
18. Byram G.M. Combustion of Forest Fuels. *Forest Fire: Control and Use*. Ed. by K.P. Davis. New York, McGraw-Hill, 1959. P. 61-89.
19. Chuvieco E., Aguadoa I., Yebraa M., Nieto H., Salas J., Martín M.P. Development of a Framework for Fire Risk Assessment Using Remote Sensing and Geographic Information System Technologies. *Ecological Modelling*. 2010. V. 221, iss. 1. P. 46-58.
20. Cruz M.G., Alexander M.E., Wakimoto R.H. Development and Testing of Models for Predicting Crown Fire Rate of Spread in Conifer Forest Stands // *Canadian Journal of Forest Research*. 2005. V. 35. № 7. P. 1626-1639.
21. Davis R., Yang Z., Yost A., Belongie C., Cohen W. The Normal Fire Environment - Modeling Environmental Suitability for Large Forest Wildfires Using Past, Present, and Future Climate Normals. *Forest Ecology and Management*. 2017. V. 390. P. 173-186.
22. Dimopoulou M., Giannikos I. Spatial Optimization of Resources Deployment for Forest Fire Management. *International Transactions in Operational Research*. 2001. V. 8, iss. 5. P. 523-534.