

УДК 681.326

Разработка математической модели оценки лесной пожарной опасности на базе нейросетевого алгоритма с учетом данных о влажности лесных горючих материалов, человеческого фактора и грозовой активности

О.В. Потемкина, канд. хим. наук, И.Ф. Ясинский, канд. техн. наук, Ф.Н. Ясинский, д-р физ.-мат. наук

Предлагается математическая модель оценки лесной пожарной опасности на основе нейронной сети с учетом влажности лесных горючих материалов, человеческого фактора и грозовой активности.

Ключевые слова: математическое моделирование, лесная пожарная опасность, нейронная сеть.

Mathematical Model Development for Estimating Forest Fires Danger with the Usage of the Neural Networks Algorithm with Data about Forest Materials Humidity, Human Factor and Thunder Possibility

O.V. Potemkina, Candidate of Chemistry, I.F. Yasinskiy, Candidate of Engineering, F.N. Yasinskiy, Doctor of Physics and Mathematics

The authors consider the mathematical model for estimating the forest fires danger based on neural networks with a glance of the forest materials humidity, human factor and thunder possibility.

Key words: mathematical modeling, forest fires danger, neural network.

Возрастающие возможности современной суперкомпьютерной техники позволяют поставить и решить следующие задачи:

1) улучшить оценки лесной пожарной опасности в отношении определения на каждый данный момент наиболее вероятных мест возникновения очагов возгорания;

2) предсказать направление и скорость распространения пожара в зависимости от метеорологических условий, состава и состояния леса.

Ниже остановимся на предложенной нами методике оценки лесной пожарной опасности.

Принятая в настоящее время в России методика расчета лесной пожарной опасности узаконена [1, 2] и опирается на разделение лесов на пять категорий по уровню пожарной опасности и на использование критерия Нестерова при оценке роли погодного фактора. Отмечая простоту, удобство и успешность этой методики, считаем, что можно существенно улучшить оценку лесной пожарной опасности, опираясь на возросшие возможности современной вычислительной техники. Считаем, что в оценку лесной пожарной опасности следует включить следующие факторы: влажность почвы, влажность лесного горючего материала, человеческий фактор и грозовую опасность. Что касается влажности лесного горючего материала, то это, прежде всего, влажность сухих мертвых веток небольшого диаметра. В основу предлагаемой нами методики положена нейросетевая технология. Являясь адаптивной, она позволяет накапливать полезную информацию и по мере работы улучшает свои показатели. В системе выделены три блока:

1. Блок учета влажности лесного горючего материала и влажности почвы.

2. Блок учета человеческого фактора и грозовой активности.

3. База данных о категориях природной пожарной опасности по всей области.

Рассмотрим их последовательно и в совместной работе.

Блок учета влажности лесного горючего материала. Пусть имеется множество веток мертвого лесного горючего материала различного диаметра. Именно они являются тем «порохом», который поджигает лесной пожар. Пусть d_i , $i = 1, 2, \dots, N$, – диаметры и число типоразмеров этих веток. Очень толстые ветки не представляют интереса, так как не с них начинается пожар. Для каждого типоразмера можно описать процесс высыхания-увлажнения следующими уравнениями [3, 4]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} &= A_{11} \Delta W + A_{12} \Delta T, \\ \frac{\partial T}{\partial t} &= A_{21} \Delta T, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$D_w = \begin{cases} 3,3 \cdot 10^{-8} w^{0,62} \left(\frac{T}{T_0}\right)^{5,65}, & w_k < w < 0,25, \\ 1,1 \cdot 10^{-8} (1 + 6,5w^{2,44}) \left(\frac{T}{T_0}\right)^{5,72}, & 0,25 < w \leq 1, \end{cases}$$

$$\delta_T = 1,35 \cdot w^2 \exp(6,68w), w_k < w < 1,$$

$$A_{21} = \frac{\lambda}{c\rho}; \rho = 550 - 800 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = \rho_{\text{сх}} + w\rho_{\text{вод}},$$

$$\lambda = 0,15 - 0,20,$$

$$C = C_{\text{сх}} + W C_{\text{вод}},$$

$$A_{11} = \rho_c D_w,$$

$$A_{12} = \rho_c D_w \delta_T.$$

Здесь W – масса влаги, отнесенная к массе сухой древесины; T – абсолютная температура; $T_0 = 273 + 20 = 293^\circ$; t – время; Δ – оператор Лапласа, который для тел с осевой симметрией («ветка») имеет вид

$$\Delta A = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A}{\partial r} \right),$$

где r – текущий радиус, $0 \leq r \leq R$; $R = d/2$ – внешний радиус.

К уравнениям (1) присоединяются граничные условия. В центре ветки – это условие симметрии:

$$\frac{\partial w}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0; \quad \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0.$$

На поверхности ветки ставятся условия третьего рода, учитывающие теплообмен с окружающей средой. Этот обмен зависит от влажности воздуха, его температуры, скорости ветра, солнечной радиации, атмосферного давления, влажности и температуры на поверхности самой ветки. Отметим, что особенно сильную роль играет скорость ветра.

Испарение с поверхности равно

$$j = (0,0229 + 0,0174 \cdot \vartheta) (\rho_1 - \rho_{\text{пар}}) \frac{760}{B},$$

где j – поток испаряемой влаги; ϑ – скорость ветра; ρ_1 – давление насыщенного пара при температуре поверхности ветки; $\rho_{\text{пар}}$ – парциальное давление пара при заданной температуре воздуха и его влажности $\varphi\%$.

Для определения φ потребуются температуры сухого и влажного термометров, а также давление насыщенного пара $\rho_{\text{нас}}$ при данной температуре воздуха. В результате находим

$$\rho_{\text{пар}} = \frac{\varphi}{100} \cdot \rho_{\text{нас}}$$

С другой стороны, поток j можно считать равным

$$j = \rho_c D_w \frac{w_N - w_{N-1}}{h} + \rho_c D_w \delta_T \frac{T_N - T_{N-1}}{h}, \quad (2)$$

где w_N – влажность на поверхности ветки; h – шаг сетки в используемой разностной схеме; w_{N-1} – влажность в предпоследнем узле сетки.

Приравняв j из уравнения (2), находим W на поверхности ветки. Температуру на поверхности ветки находим из равенства

$$\alpha (T_{\text{воз}} - T_N) = -\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = -\lambda \frac{T_N - T_{N-1}}{h},$$

где α – коэффициент теплоотдачи, который зависит от разности температур:

$\alpha = 3 + 0,08 \cdot \Delta T$ при $\Delta T < 5^\circ K$ при естественной конвекции; $\alpha = 2,2 + 2,8 \cdot \sqrt[4]{\Delta T}$ при $\Delta T > 5^\circ K$ при естественной конвекции; и от скорости ветра: $\alpha = 5,3 + 3,6 \cdot \vartheta$ при $\vartheta < 5 M/c$ (при наличии ветра); $\alpha = 6,47 \cdot \vartheta^{3/4}$ при $\vartheta > 5 M/c$ (при наличии ветра).

С помощью этих выражений вычисляется температура на поверхности ветки.

Для сухой древесины $\lambda = 0,15 - 0,2$.

Для влажной древесины $\lambda = 0,2 + \lambda_{\text{воды}} w$.

Дифференциальные уравнения (1) заменяются соответствующими разностными схемами. Для первого уравнения, например, эта схема будет иметь вид

$$\frac{w_j^{k+1} - w_j^k}{\tau} = \frac{A_{11}(w_j^k, T_j^k)}{r_j h} \times \left(\frac{r_{j+1} + r_j}{2} \frac{w_{j+1}^k - w_j^k}{h} - \frac{r_j + r_{j-1}}{2} \frac{w_j^k - w_{j-1}^k}{h} \right) + \frac{A_{12}(w_j^k, T_j^k)}{r_j} \cdot \left(\frac{r_{j+1} + r_j}{2} \frac{T_{j+1}^k - T_j^k}{h} - \frac{r_j + r_{j-1}}{2} \frac{T_j^k - T_{j-1}^k}{h} \right),$$

$j = 2, \dots, N-1$.

Здесь верхний индекс обозначает номер момента времени, а нижний – номер узла на радиусе; τ и h – шаги по времени и по радиусу; $t^{k+1} = t^k + \tau$; $r_{j\pm 1} = r_j \pm h$.

Отметим, что равновесную влажность лесных горючих материалов можно оценить как

$$w_{\text{рав}} = \frac{\varphi}{5} (1,1 - 0,004 (T - 293)),$$

где $0 < \varphi < 1$ – влажность воздуха; T – абсолютная температура.

Обычно $w_{\text{рав}} = 0,1 - 0,15$.

Кроме влажности мертвых веток (сухой) следует учесть также влажность почвы. Влажность почвы не следует рассчитывать. Она достаточно инертна. Далее используется влажность почвы, полученная непосредственным измерением.

В предлагаемую расчетную схему мы включили критерий Нестерова

$$\Gamma^{k+1} = \Gamma^k \xi^k + T^k (T^k - T_p^k),$$

где T_p^k – точка росы, которая вычисляется следующим образом:

$$T_p = \frac{b \phi(T, \varphi)}{a + \phi(T, \varphi)},$$

$$\phi(T, \varphi) = \frac{a T}{b + T} + \ln \varphi,$$

$$a = 17,27; \quad b = 237,7;$$

T_p, T – в градусах Цельсия; φ – влажность воздуха в объемных относительных числах, $0 \leq \varphi \leq 1$; F_3 – горимость по Нестерову; ξ^k – множитель, учитывающий осадки:

$$\xi^k = \begin{cases} 0 & \text{при } O^k > 3 \text{ мм,} \\ 1 & \text{при } O^k < 3 \text{ мм;} \end{cases}; K - \text{ номер суток; } O^k -$$

суточный уровень осадков в миллиметрах; T^k, T_p^k – температура воздуха и температура точки росы на 13–15 часов текущего дня.

Схема блока учета влажности показана на рис. 1, где $F_1 = w_n$ – влагосодержание почвы; $F_2 = \sum_{s=1}^3 \beta_s w(d_s)$ – осредненная влажность

сухостоя; d_s – диаметр веток; β_s – весовые коэффициенты при осреднении влажности веток в отношении их пожарной опасности; $F_3 = \Gamma^K$ – горимость по Нестерову.

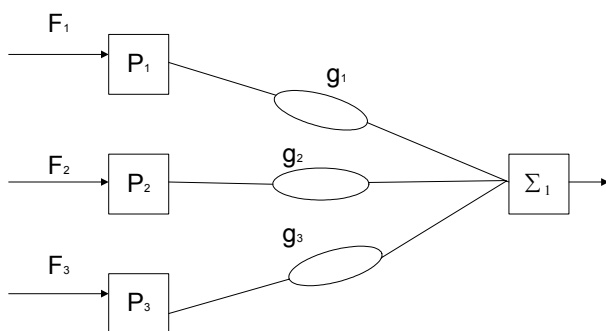


Рис. 1. Схема блока учета влажности

Каждая из представленных входных величин F_1, F_2, F_3 поступает на вход очередного нейрона, где подвергается преобразованию согласно одной из следующих сигмообразных функций:

1) для F_1, F_2

$$P_i = 1 - \frac{1}{1 + \exp(-\alpha_i(F_i - F_i^0))};$$

2) для F_3

$$P_3 = \frac{1}{1 + \exp(-\alpha_3(F_3 - F_3^0))}.$$

Здесь параметр α_i определяет остроту перехода, а F_i^0 – порог или сдвиг перехода и выбор соответствующей функции P_i .

Такая конструкция блока позволяет все разнохарактерные величины F_1, F_2, F_3 привести к величинам P_1, P_2, P_3 из интервала $[0, +1]$:

$$\Sigma_1 = g_1 P_1 + g_2 P_2 + g_3 P_3,$$

где g_1, g_2, g_3 – весовые коэффициенты, которые находятся в процессе настройки нейросети.

Рост P_1, P_2, P_3 означает рост пожарной опасности.

Блок учета человеческого фактора.

Известно, что во всем мире более 90 % лесных пожаров возникают по вине человека. Блок учета человеческого фактора устроен аналогично блоку учета влажности лесных горючих материалов.

Учитываемые при этом факторы следующие.

F_4 учитывает близость населенных пунктов:

$$F_4 = f_c f_n \sum_{i=1}^n \frac{N_i}{\varepsilon^2 + r_i^2},$$

где n – число ближайших к данной точке (принимаемых во внимание) населенных пунктов; N_i – число жителей в i -м населенном пункте; r_i – расстояние от данной точки до i -го населенного пункта; ε – постоянная для защиты от нуля в знаменателе; f_c – сезонный множитель (зависит от дня и месяца пожароопасного сезона); f_n – недельный множитель (в субботу и воскресенье число возгораний в лесах на 40% больше); $f_n = 1$ в рабочие дни; $f_n = 1,4$ в выходные и праздничные дни.

F_5 учитывает близость к автомобильным дорогам:

$$F_5 = f_c f_n \sum_{s=1}^{nd} \frac{I_s}{\varepsilon_s + r_s},$$

где I_s – интенсивность использования дороги номер S (число автомобилей в час); r_s – кратчайшее расстояние от данной точки до дороги.

F_6 учитывает присутствие объектов, представляющих повышенную опасность:

$$F_6 = \sum_{\mu=1}^{n_\mu} \frac{O_\mu}{\varepsilon^2 + r_\mu^2},$$

где O_μ – величина, определяющая уровень опасности объекта (металлургические, химические, военные и другие производства, пожары в соседних районах, торфяные пожары).

F_7 учитывает грозовую активность:

$$F_7 = M,$$

где M – число ударов молнии.

Аналогично предыдущему,

$$\Sigma_2 = g_4 P_4 + g_5 P_5 + g_6 P_6 + g_7 P_7.$$

Рост Σ_2 соответствует росту пожарной опасности.

Блок, учитывающий природную пожарную опасность различных участков леса.

Участки леса в зависимости от состава растительности, топографии территории и ее состояния делятся на пять категорий пожарной опасности. Для включения этой информации в общую схему территория области покрывается прямоугольной декартовой сеткой с постоянным шагом H . Узлы сетки, соответственно, будут иметь координаты

$$x_{i\pm 1} = x_i \pm H,$$

$$y_{j\pm 1} = y_j \pm H,$$

$$i = 1, \dots, N_x; j = 1, \dots, N_y.$$

Таким образом, территория разбивается на малые квадратные ячейки площадью h^2 , каждую из которых можно отнести к определенной категории опасности. Эти данные находятся в памяти компьютера в виде соответствующей базы данных. Поскольку значительная часть ячеек может попасть на места, не занятые лесом, целесообразно нумеровать по порядку только ячейки, попадающие на лесные участки, затем программно по номеру ячейки вызывать из памяти координаты ячейки и ее характеристики в отношении природной пожарной опасности. Эти данные записаны в указанную базу:

$$\Sigma_3 = \chi_i,$$

где i – номер ячейки.

Задавая i , получаем из базы данных координаты ячейки x_i, y_i и категорию пожароопасности данного участка χ_i .

Настройка нейросети. Общая схема оценки лесной пожарной опасности представлена на рис. 2.

Весовые коэффициенты g_1, \dots, g_{10} находятся методом обратного распространения ошибки [5, 6]. Коэффициенты $\alpha_1, \dots, \alpha_7$ находятся с помощью генетического алгоритма. Используя параллельность вычислительного устройства, создается популяция сетей с различными значениями α , которые генерируют следующие популяции при успешности предыдущего поколения [7].

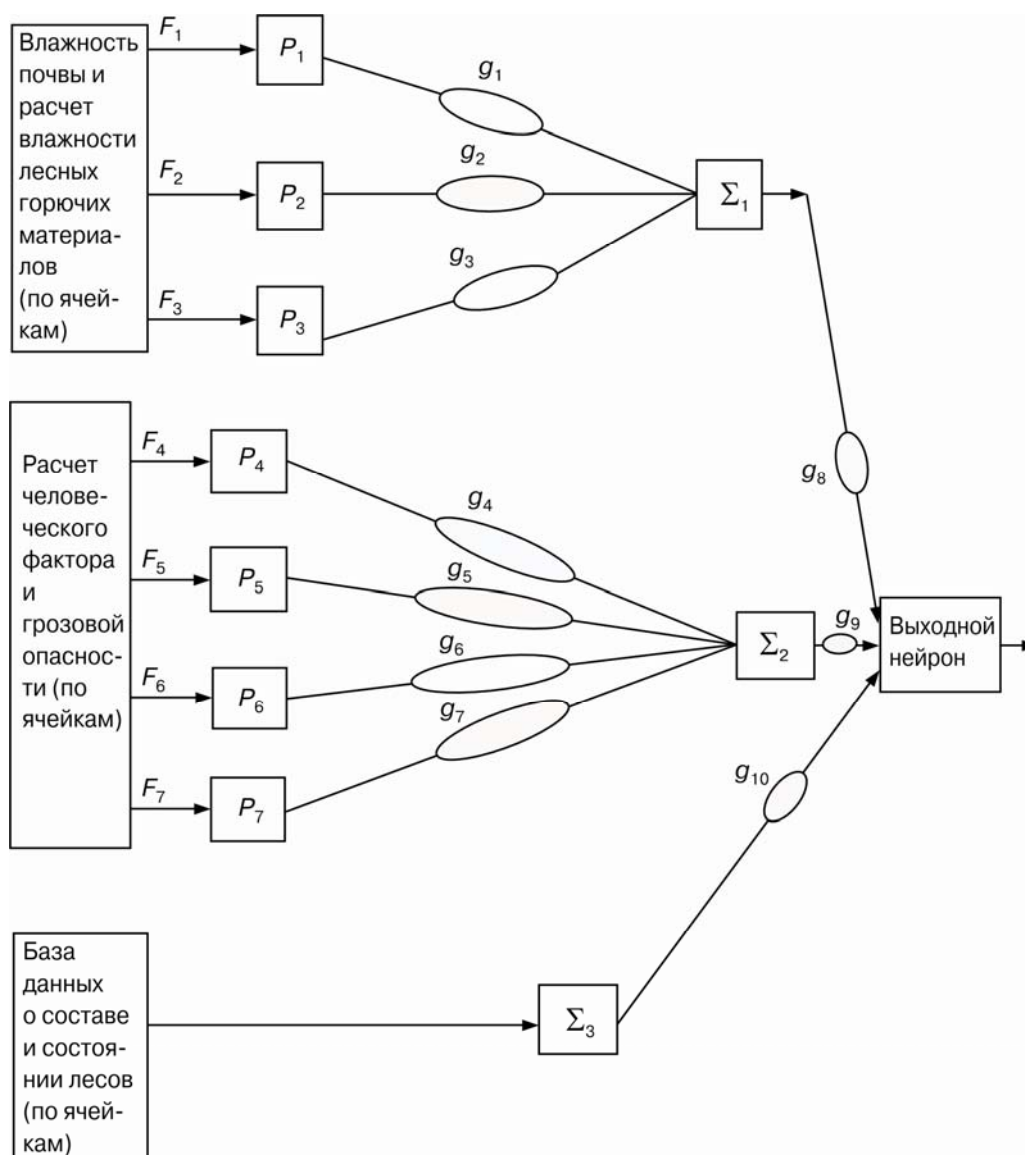


Рис. 2. Общая схема оценки лесной пожарной опасности

Данная адаптивная технология позволяет накапливать полезную информацию и улучшать качество предсказания по мере поступления фактических данных.

Список литературы

1. **Постановление** Правительства РФ от 30.06.2007 №417 «Об утверждении Правил пожарной безопасности в лесах».

2. **Приказ** Минсельхоза от 16.12.2008 №532 «Об утверждении классификации природной пожарной опасно-

сти лесов и классификации пожарной опасности в лесах по условиям погоды».

3. **Лыков А.В.** Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 470 с.

4. **Глауберман Х.Б.** Отопление, вентиляция, сушка, увлажнение. – М.: Гизлепром, 1959. – 480 с.

5. **Головко В.А.** Нейронные сети: обучение, организация и применение. – М.: Изд-во журнала «Радиотехника», 2001. – 256 с.

6. **Хайкин С.** Нейронные сети. Полный курс. – М.: Изд-во «Вильямс», 2006. – 1104 с.

7. **Сидоров С.Г., Ясинский И.Ф., Ясинский Ф.Н.** Генетический алгоритм поиска глобального минимума // Вестник ИГЭУ. – 2007. – Вып. 4. – С. 24–26.

* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ ГК № 13 G25.31.0077.

Потемкина Ольга Владимировна,
Ивановский институт государственной противопожарной службы МЧС России,
заместитель начальника,
телефон (4932) 26-16-24.

Ясинский Игорь Федорович,
Ивановская государственная текстильная академия,
кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной математики и информационных технологий,
e-mail: igor2266@yandex.ru

Ясинский Федор Николаевич,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор физико-математических наук, профессор кафедры высокопроизводительных вычислительных систем,
телефон (4932) 26-98-29.