

## ЭВОЛЮЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОЖАРА

Виталий Снитюк, Артем Быченко

**Аннотация:** В статье предложена эволюционная технология для определения времени и пути распространения пожара от точки его возникновения до особо опасного объекта. Она базируется на продукционных правилах, определяемых экспертным путем. Ядром такой технологии является использование методов *Soft Computing* для идентификации времени распространения и пути огня, а также оптимизации параметров соответствующих зависимостей. Рассмотрены аспекты решения указанной задачи с помощью нейронечеткой сети и эволюционных методов.

**Ключевые слова:** Эволюционное моделирование, пожары, особо опасные объекты.

---

### Введение

---

Современные исследования процессов пожаротушения методами математического моделирования в основном посвящены исследованию типовых ситуаций. В частности – пожаротушению в жилом секторе, распространению пожаров в лесных массивах, разработке эффективных технических средств пожаротушения. В то же время исследованию динамики пожаров на особо опасных объектах не уделяется должного внимания, несмотря на то, что в последнее время промышленный рост сопровождается увеличением количества экологических и промышленных катастроф и аварий. Такое состояние можно объяснить исключительным характером чрезвычайных происшествий, стоимостью моделирования уникальных ситуаций, неоправданной уверенностью руководства и персонала предприятий в их безопасности. Важно заметить, что возможные потери от возникновения критических аварийных ситуаций многократно превышают стоимость информационно-аналитических систем, с помощью которых можно осуществлять прогнозирование динамики развития пожаров и объективизировать процессы принятия решений, базируясь на анализе субъективных суждений экспертов.

Определенные результаты в указанном направлении были получены в работах [Быченко, 2006], [Снитюк, 2006]. Так, в статье [Быченко, 2006] предложен первый шаг реализации информационно-аналитической технологии, заключающийся в разработке процедуры формирования модели времени распространения пожара, с помощью которой можно максимально близко моделировать процесс принятия решений человеком. Выполнена структурная идентификация и инициализация модели времени распространения пожара. В работе [Снитюк, 2006] предложен подход к формированию указанной модели, базирующийся на использовании нечетких баз знаний и соответствующих методов и направленный на реализацию информационно-консультативной геоинформационной системы, которая позволит осуществлять прогнозирование процесса развития пожара в пространственно-временной системе координат.

Очевидно, что мощность банка моделей процесса распространения пожара превышает единицу. Формирование, исследование и использование модели определяется двумя главными факторами: соответствующим критерием ее оптимальности и особенностями внешней среды. Заметим, что такой критерий носит субъективный характер и определяется экспертным путем либо лицом, принимающим решение (ЛПР).

## Постановка задачи

Химические промышленные предприятия и предприятия энергетики имеют на своей территории особо опасные объекты, возникновение пожара на которых или достижение их огнем приведет к техногенным и экологическим катастрофам. Поскольку процесс развития пожара достаточно стремителен, то прогнозирование его пути и времени является актуальной научной задачей, поскольку ее решение позволяет выполнить оптимальное размещение сил и средств пожаротушения и предотвратить катастрофу. Традиционно такая задача решается начальником пожарного расчета, исходя из личного опыта и интуиции, возможно с использованием консультативной помощи подчиненных. Такой субъективизм зачастую приводит к неправильным, не подкрепленным расчетами и информационно-аналитическим сопровождением решениям и, следовательно, к человеческим жертвам и другим негативным последствиям.

Формально постановка задачи определения наиболее возможного пути и времени развития пожара является такой. Предположим, что предприятие, имеющее опасное производство, находится в некоторой системе координат  $XU$ . Пусть  $(x_0, y_0)$  – точка возникновения пожара,  $(x, y)$  – координаты особо опасного объекта. Тогда возникает несколько задач, в частности необходимо определить:

- минимально возможное время и соответствующий путь достижения пожаром точки  $(x, y)$ ;
- наиболее возможный путь и соответствующее время достижения пожаром точки  $(x, y)$ ;
- среднее возможное время и соответствующие пути достижения пожаром точки  $(x, y)$ .

Исходными данными являются заключения  $m$  экспертов, в соответствии с пожеланиями которых выполнена дискретизация координатной сетки. Предположим, что путь огня может пройти по одному из  $p$  маршрутов:  $\{S_1, S_2, \dots, S_p\}$ . Каждый из маршрутов может состоять из разного количества участков. Так,

$$S_1 = \{s_1^1, s_1^2, \dots, s_1^{k_1}\}, S_2 = \{s_2^1, s_2^2, \dots, s_2^{k_2}\}, \dots, S_p = \{s_p^1, s_p^2, \dots, s_p^{k_p}\}, \quad (1)$$

где  $s_i^j$  –  $j$ -й участок  $i$ -го маршрута,  $k_i$  – количество участков  $i$ -го маршрута,  $i = \overline{1, p}$ . Очевидно, что время распространения пожара от точки  $(x_0, y_0)$  к точке  $(x, y)$  является суммой времен прохождения огнем указанных участков. Заметим, что участки в большинстве случаев являются отрезками прямой, но понятие участка маршрута включает в себя также технологические проемы, двери, окна и подобные конструкции.

Учитывая нормативную информацию, справочные материалы, опыт и интуицию, эксперт указывает время распространения огня по определенному участку в виде функции принадлежности. В большинстве случаев, если эксперт имеет наибольшую уверенность в некотором одном значении аргумента, то он определяет время через треугольную функцию принадлежности (ФП), имеющую два параметра [Згуровский, 1990]; если информационная энтропия является минимальной, ФП может иметь колоколообразную форму [Круглов, 2001]. Если у экспертов нет уверенности в точечном значении времени распространения огня и отсутствуют данные о подобных пожарах, то для решения нашей задачи рационально использовать трапециеподобные ФП, поскольку такие ФП позволяют использовать интервальное представление. Трапециеподобная ФП [Дюбуа, 1990] определяется пятью параметрами  $(\underline{m}, \bar{m}, \alpha, \beta, h)$ , где  $\underline{m}$  – нижнее модальное значение,  $\bar{m}$  – верхнее модальное значение,  $\alpha$  – левый коэффициент скошенности,  $\beta$  – правый коэффициент скошенности,  $h$  – высота. Поскольку в эволюционном моделировании используются нейронные сети, то для использования для их обучения

градиентных методов необходимо использовать гладкие ФП. Такими функциями являются колоколообразные (гауссовские) ФП с двумя параметрами.

### Продукционные представления времени развития пожара

Для представления экспертных суждений используем продукционные правила [Рассел, 2005], [Джарратано, 2007]. Рассмотрим два способа их записи. В первом случае эксперт делает заключение о наиболее возможном с его точки зрения пути распространения огня. Другой способ более емкий и базируется на суждениях экспертов о возможных путях развития пожара. Заметим, что в первом варианте пути распространения огня, указанные всеми экспертами должны совпадать, в противном случае задача сводится к другому варианту и эксперту предлагается оценивать варианты, предложенные другими экспертами. Таким образом, для наиболее возможного пути развития пожара имеем логическую схему:

$$\begin{aligned}
 & \text{If } t_1 \in A_1^1 \ \& \ t_2 \in A_2^1 \ \& \dots \ \& \ t_n \in A_n^1 \ \text{then } T \in B_1 \ \text{with weighth } w_1 \quad V \\
 & \text{If } t_1 \in A_1^2 \ \& \ t_2 \in A_2^2 \ \& \dots \ \& \ t_n \in A_n^2 \ \text{then } T \in B_2 \ \text{with weighth } w_2 \quad V \\
 & \dots \\
 & \text{If } t_1 \in A_1^m \ \& \ t_2 \in A_2^m \ \& \dots \ \& \ t_n \in A_n^m \ \text{then } T \in B_m \ \text{with weighth } w_m,
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

где  $t_i$  – входные величины, указывающие на время прохождения огнем  $i$ -го участка пути,  $i = \overline{1, n}$ ;  $n$  – количество участков пути;  $A_i^j$  – функция принадлежности, определенная  $j$ -м экспертом для времени  $t_i$ ,  $j = \overline{1, m}$ ;  $m$  – количество экспертов;  $T$  – время прохождения огнем от точки возникновения пожара  $(x_0, y_0)$  до точки  $(x, y)$ ;  $B_j$  – функция принадлежности, определенная  $j$ -м экспертом для времени  $T$ ;  $w_i$  – весовые коэффициенты, определяющие компетентность экспертов.

Иную форму представления имеет система продукций для варианта оценки всеми экспертами всех предложенных вариантов:

$$\begin{aligned}
& \text{if } t_1^1 \in A_1^{11} \ \& \ t_2^1 \in A_2^{11} \ \& \ \dots \ \& \ t_{k_1}^1 \in A_{k_1}^{11} \ \text{then } T_1 \in B_1^1 \ V \\
& \text{if } t_1^2 \in A_1^{21} \ \& \ t_2^2 \in A_2^{21} \ \& \ \dots \ \& \ t_{k_2}^2 \in A_{k_2}^{21} \ \text{then } T_2 \in B_1^2 \ V \\
& \dots \\
& \text{if } t_1^p \in A_1^{p1} \ \& \ t_2^p \in A_2^{p1} \ \& \ \dots \ \& \ t_{k_p}^p \in A_{k_p}^{p1} \ \text{then } T_p \in B_1^p \ \text{with weighth } w_1 \\
& \text{or} \\
& \text{if } t_1^1 \in A_1^{12} \ \& \ t_2^1 \in A_2^{12} \ \& \ \dots \ \& \ t_{k_1}^1 \in A_{k_1}^{12} \ \text{then } T_1 \in B_2^1 \ V \\
& \text{if } t_1^2 \in A_1^{22} \ \& \ t_2^2 \in A_2^{22} \ \& \ \dots \ \& \ t_{k_2}^2 \in A_{k_2}^{22} \ \text{then } T_2 \in B_2^2 \ V \\
& \dots \\
& \text{if } t_1^p \in A_1^{p2} \ \& \ t_2^p \in A_2^{p2} \ \& \ \dots \ \& \ t_{k_p}^p \in A_{k_p}^{p2} \ \text{then } T_p \in B_2^p \ \text{with weighth } w_2 \\
& \text{or} \\
& \dots \\
& \text{or} \\
& \text{if } t_1^1 \in A_1^{1m} \ \& \ t_2^1 \in A_2^{1m} \ \& \ \dots \ \& \ t_{k_1}^1 \in A_{k_1}^{1m} \ \text{then } T_1 \in B_m^1 \ V \\
& \text{if } t_1^2 \in A_1^{2m} \ \& \ t_2^2 \in A_2^{2m} \ \& \ \dots \ \& \ t_{k_2}^2 \in A_{k_2}^{2m} \ \text{then } T_2 \in B_m^2 \ V \\
& \dots \\
& \text{if } t_1^p \in A_1^{pm} \ \& \ t_2^p \in A_2^{pm} \ \& \ \dots \ \& \ t_{k_p}^p \in A_{k_p}^{pm} \ \text{then } T_p \in B_m^p \ \text{with weighth } w_m.
\end{aligned} \tag{3}$$

В выражении (3)  $t_i^j$  – время прохождения огнем  $i$ -го участка в  $j$ -варианте развития пожара,  $i = \overline{1, k_q}$ ;  $k_q$  – количество участков распространение огня в  $q$ -варианте развития пожара,  $q = \overline{1, p}$ ;  $A_i^k$  – функция принадлежности определенная  $k$ -м экспертом для времени  $t_i^j$ ,  $k = \overline{1, m}$ ;  $T_q$  – время прохождения огнем от точки  $(x_0, y_0)$  до точки  $(x, y)$  при  $q$ -м варианте развития пожара;  $B_k^q$  – функция принадлежности определенная  $k$ -м экспертом для  $q$ -го варианта развития пожара.

### Определение компетентности экспертов на базе аксиомы несмещенности

Компетентность экспертов, выраженная в весовых коэффициентах их суждений, для ЛПР на момент проведения экспертизы и моделирования может быть неизвестна. Возможно, что возникнет необходимость проверки компетентности и подтверждения или опровержения оценки ЛПР. Предположим, что априорная информация об уровне компетентности экспертов отсутствует. Тогда рационально воспользоваться процедурой ее определения, разработанной в статье [Снитюк, 2000]. Такая процедура базируется на аксиоме несмещенности [Матвеевский, 1987], сущность которой заключается в том, что суждение большинства компетентно. Следствием из нее есть утверждение о том, что наиболее компетентным является тот эксперт, суждения которого максимально совпадают с суждениями других экспертов, т.е.

$$\gamma_{\max} = \max_k \gamma_k = \max_k \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_i \mu(\Omega_{ij}, \Omega_{ik})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{p>j}^m w_i \mu(\Omega_{ij}, \Omega_{ip})}, \tag{4}$$

где  $\gamma_k$  – компетентности экспертов,  $k = \overline{1, m}$ ;  $w_i$  – весовые коэффициенты, указывающие на важность вопроса,  $i = \overline{1, n}$ ;  $\mu(\Omega_j, \Omega_k)$  – мера близости ответов  $j$ -го и  $k$ -го экспертов на  $i$ -й вопрос.

Для определения меры близости суждений экспертов предложен алгоритм [Снитюк, 2000], базирующийся на их анкетировании, классификации вопросов анкеты в зависимости от типа ответов, соответствующих моделях и их композиции. Полученные значения компетентности экспертов используются в качестве исходных данных моделирования.

---

### Эволюционная идентификация времени распространения пожара

---

Заключения экспертов в форме (2)-(3) имеют неточный характер, выраженный значениями соответствующих параметров функций принадлежности. Их настройка и оптимизация являются необходимым условием получения математических моделей и дальнейшего использования в практических задачах. Рассмотрим методы получения параметров (2).

**Нейросетевое моделирование.** Без ограничения общности в качестве модели выберем нейросеть TSK (Takagi, Sugeno, Kang'a) [Takagi, 1985]. Реализованная в ней система правил аналогична (2) и имеет вид:

$$\Pi_k : \text{если } (x_1 \in A_1^k \ \& \ x_2 \in A_2^k \ \& \ \dots \ \& \ x_n \in A_n^k), \text{ то } y = p_{k0} + \sum_{j=1}^n p_{kj} x_j, \text{ где } \mathcal{Y} \quad (5)$$

Нейронная сеть, реализующая соответствующий вывод, изображена на рис. 1.

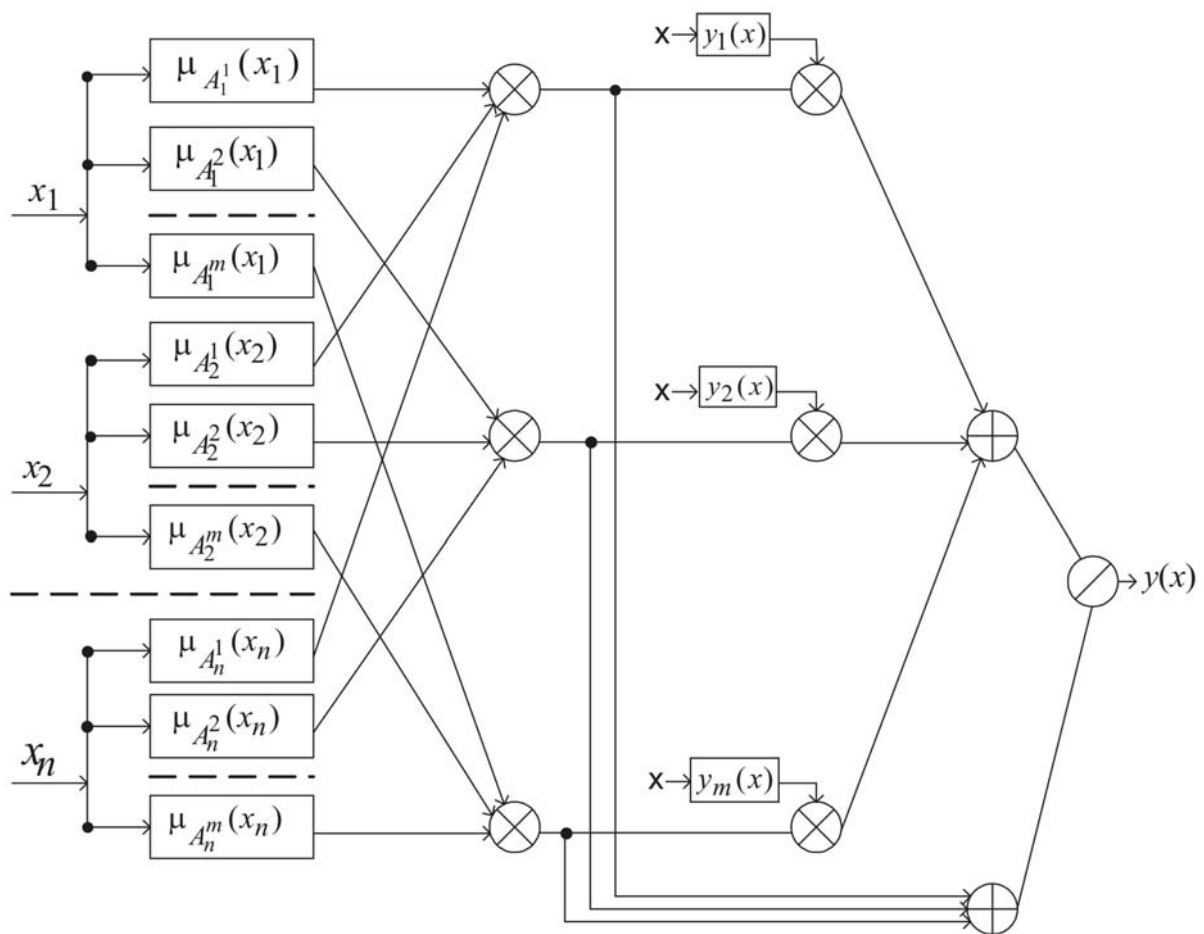


Рис. 1. Структура нечеткой нейронной сети TSK

В первом шаре нейронов выполняется фаззификация входных значений, т. е. для каждого значения каждой переменной и каждого значения терм-множества находят значения ФП  $\mu_{A_j^k}(x_j)$ ,  $k = \overline{1, m}$ ,  $j = \overline{1, n}$ . Количество нейронов второго шара соответствует количеству входов сети. В них выполняется агрегация ФП отдельных переменных и для каждого правила рассчитывается

$$w^k = \min_{i=1, \dots, n} \{\mu_{A_i^k}(x_i)\}, \quad k = \overline{1, m}.$$

В нейронах третьего шара рассчитываются, собственно, значения функций TSK, которые умножаются на выходы нейронов предыдущего шара, т.е.

$$g_i = w^i \cdot (\rho_{i0} + \sum_{j=1}^n \rho_{ij} x_j).$$

Очевидно, что количество нейронов совпадает с количеством нейронов предыдущего шара. Четвертый шар образуют два нейрона. В первом из них рассчитывается сумма  $f_1 = \sum_{i=1}^n g_i$ , во втором –

$$f_2 = \sum_{i=1}^n w^i. \text{ Результирующий единственный нейрон пятого шара выполняет деление } Y = \frac{f_1}{f_2}.$$

Общее выражение функционирования сети TSK есть таким:

$$y(x) = \frac{1}{\sum_{k=1}^m \prod_{j=1}^n \mu_{A_j^k}(x_j)} \cdot \sum_{k=1}^m (p_{k0} + \sum_{j=1}^n p_{kj} x_j) \cdot \prod_{j=1}^n \mu_{A_j^k}(x). \quad (6)$$

Предположим, что нечеткой нейросетью реализуется неизвестное отображение

$$T = F(X). \quad (7)$$

Существует учебная выборка  $\{(x^1, t^1), \dots, (x^n, t^n)\}$ . Заметим, что векторы  $x^i, i = \overline{1, n}$  являются действительными. Целевая функция для  $k$ -го образа будет такой:

$$E_k = \frac{1}{2} (\hat{Z}^k(\gamma) - Z^k)^2, \quad k = \overline{1, n}, \quad (8)$$

де  $Z^k(\gamma)$  – рассчитанные значения выхода нейросети,  $Z^k$  – значения, заданные таблично. Обучение сети осуществляется по градиентному методу. Фаззификация входов нейросети осуществляется ФП

$$\mu_{A_j^i}(x_i) = \frac{1}{1 + e^{b_j^i(x_i - a_j^i)}}, \quad i = \overline{1, n}, \quad j = \overline{1, m},$$

где  $m$  – количество правил. Тогда вектор параметров нейросети, которые подлежат оптимизации, будет таким:

$$\gamma = (a_1^1, b_1^1, a_1^2, b_1^2, \dots, a_1^n, b_1^n, a_2^1, b_2^1, \dots, a_2^n, b_2^n, \dots, a_m^1, b_m^1, \dots, a_m^n, b_m^n, p_{10}, p_{11}, p_{12}, \dots, p_{1n}, \dots, p_{m0}, p_{m1}, p_{m2}, \dots, p_{mn}).$$

Приведем основные выражения для обучения модели TSK:

$$a_i^j(t+1) = a_i^j(t) - \eta \frac{\partial E_k}{\partial a_i^j(t)}, \quad k = \overline{1, p}, \quad p - \text{количество обучающих образов};$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial a_i^j} = \frac{\partial E_k}{\partial \hat{Z}^k(\gamma)} \cdot \frac{\partial \hat{Z}^k(\gamma)}{\partial \mu_{A_j^i}(x_i)} \cdot \frac{\partial \mu_{A_j^i}(x_i)}{\partial a_i^j} = (\hat{Z}^k(\gamma) - Z^k) \cdot \left[ \frac{1}{\sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{A_j^i}(x_i)} \times \right. \\ \left. \times (p_{j0} + \sum_{i=1}^m p_{ji} x_i) \prod_{i=1}^n \mu_{A_j^i}(x_i) - \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_j^i}(x_i)}{(\sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{A_j^i}(x_i))^2} \cdot \sum_{j=1}^m (p_{j0} + \sum_{i=1}^m p_{ji} x_i) \cdot \prod_{i=1}^n \mu_{A_j^i}(x_i) \right] \cdot \frac{b_j^i \cdot e^{b_j^i(x_i - a_j^i)}}{(1 + e^{b_j^i(x_i - a_j^i)})^2}.$$

$$b_i^j(t+1) = b_i^j(t) - \eta \frac{\partial E_k}{\partial b_i^j(t)}, \quad k = \overline{1, p}.$$

В этом случае выражение для вычисления производной отличается от предыдущего только последним множителем:

$$\frac{\partial \mu_{A_j^i}(x_i)}{\partial b_j^i} = \frac{(a_i^j - x_i) \cdot e^{b_j^i(x_i - a_j^i)}}{(1 + e^{b_j^i(x_i - a_j^i)})^2}.$$

Для совокупности параметров  $p_{ij}, j = \overline{1, m}, i = \overline{0, n}$  коррекция осуществляется так:

$$p_{ij}(t+1) = p_{ij}(t) - \eta \frac{\partial E_k}{\partial p_{ij}},$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial p_{ij}} = \frac{\partial E_k}{\partial \hat{Z}^k(\gamma)} \cdot \frac{\partial \hat{Z}^k(\gamma)}{\partial p_{ij}} = (\hat{Z}^k(\gamma) - Z^k) \cdot \frac{x_i \prod_{i=1}^n \mu_{A_i}(x_i)}{\sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{A_i}(x_i)},$$

$$\frac{\partial E_k}{\partial p_{j0}} = (\hat{Z}^k(\gamma) - Z^k) \cdot \frac{\prod_{i=1}^n \mu_{A_i}(x_i)}{\sum_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \mu_{A_i}(x_i)}.$$

Очевидно, что количество параметров в зависимости (6) является очень большим для адекватного и быстрого обучения нейросети. Существуют методы ускорения процесса обучения, базирующиеся на разделении совокупности параметров на две группы. Параметры первой группы вычисляются в результате решения системы уравнений или считаются постоянными величинами, параметры второй группы получают в процессе обучения нечеткой сети.

**Эволюционное моделирование.** Известно, что эволюционное моделирование используется преимущественно для оптимизации дискретнозначных функций. Эволюционные методы имеют различия, но общим является наличие целевой функции или функции приспособленности. В нашей задаче такой функцией является сумма функций (8). Потенциальные решения представляют собой элементы вектора  $\gamma$ . Существуют два подхода к представлению потенциальных решений. В первом случае такие решения представляют как генотипы, т.е. соответствующие бинарные хромосомы, поскольку известно, что такое представление обладает максимальной информационной насыщенностью. Второй подход базируется на фенотипическом представлении, при котором решения имеют десятичный вид. Для него характерно получение новых решений с использованием нормально распределенных смещений и без рекомбинаций.

У нейросетевых моделей и эволюционных методов есть как преимущества, так и недостатки. В пользу эволюционного моделирования свидетельствует отсутствие требований к целевым функциям и предусмотренная внутри алгоритмов операция мутации, позволяющая минимизировать риск получения локальных оптимумов. Преимуществом нейросетевых технологий является определяемое алгоритмами монотонное стремление целевой функции к удовлетворительному значению. Эффективность использования той или другой технологии зависит от количества участков прохождения пожара, количества экспертов и процедуры использования обучающей и контрольной последовательностей.

---

### Особенности критериальной оценки полученных результатов

---

На предыдущем шаге получены оценки параметров, использование и учет которых направлены на объективизацию субъективных суждений. Вместе с тем, проблема принятия оптимального или допустимого решения остается. Решение задачи идентификации времени пожара в случае учета продукционных правил (2) и дальнейшего принятия решений не представляет трудности, поскольку путь распространения идентифицирован, а время является некоторым средневзвешенным экспертным показателем.

Иная ситуация имеет место, если эксперты указывают множество путей распространения пожара от исходной до конечной точки. Неопределенность, вызванная неединственностью особо опасных объектов на возможном пути распространения огня, и различные масштабы возможных катастроф определяют критерии принятия решений. Очевидно, что в роли таких критериев могут быть:



- наиболее возможный путь распространения огня и разработка соответствующей процедуры определения времени распространения огня по этому пути;
- путь, время распространения огня по которому является минимальным, и разработка процедуры определения такого пути из множества возможных;
- путь, время распространения по которому является средним, и разработка соответствующей процедуры его определения.

Такие критерии являются аналогами известных критериев Сэвиджа и Гурвица [Таха, 2005]. Предусловием выбора решения, исходя из перечисленных критериев, является построение и использование экспертной системы, базирующейся на нечеткой базе знаний с правилами типа (2) или (3) и оптимизированными параметрами.

---

### Нерешенные задачи и перспективы исследований

---

Осуществляя моделирование и определяя путь и время распространения пожара от точки его возникновения до особо опасного объекта необходимо знать о последствиях, авариях, катастрофах, к которым может привести достижение его огнем. Таким образом, возникает задача идентификации функции убытков от последствий пожара. Знание ее значений является необходимым условием принятия решений в критических условиях.

Применение эволюционного моделирования обосновывается значительной субъективностью исходной информации, отсутствием единственной математической модели и соответствующих математических методов. В то же время разработка экспертных систем для решения подобных задач на базе реализации геоинформационных технологий сталкивается с массой проблем, разрешение которых в условиях ресурсного дефицита невозможно. Однако возрастающие риски, связанные с развитием опасных производств, раньше или позже приведут к созданию и использованию подобных технологий.

---

### Библиография

---

- [Быченко, 2006 ] А.А. Быченко. Модели распространения пожара на особо опасных объектах в условиях неопределенности // Искусственный интеллект. – 2006. – № 3. – С. 359-365
- [Снитюк, 2006] В.Е. Снитюк, А.О. Биченко. Аспекты нечеткости при моделировании процессов распространения пожара на особо опасных объектах // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. – 2006. – Вып. 134. – С.89-93
- [Згуровский, 1990] М.З. Згуровский. Интегрированные системы оптимального управления и проектирования. – Киев: Выща школа, 1990. – 351 с.
- [Круглов, 2001] В.В. Круглов. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. – Москва: Физматлит, 2001. – 224 с.
- [Дюбуа, 1990] Д. Дюбуа, А. Прад. Теория возможностей. – Москва: Радио и связь, 1990. – 286 с.
- [Хайкин, 2006] С. Хайкин. Нейронные сети: полный курс. – М.: “Вильямс”, 2006. – 1104 с.
- [Рассел, 2005] С. Рассел, П. Норвиг. Искусственный интеллект: Современный подход. – М.: Вильямс, 2005. – 1424 с.
- [Джарратано, 2007] Д. Джарратано, Г. Райли. Экспертные системы: Принципы разработки и программирования. – М.: “И.Д. Вильямс”, 2007. – 1152 с. [Снитюк, 2000] В.Е. Снитюк, Рифат Мохаммед Али. Модели и методы определения компетентности экспертов на базе аксиомы несмещенности // Вестник Черкасского государственного технологического университета. – 2000. – № 4. – С. 121-126.
- [Матвеевский, 1987] С.Ф. Матвеевский Основы системного проектирования комплексов летательных аппаратов. – Москва: Машиностроение, 1987. – 239 с.

[Takagi, 1985] T. Takagi, M. Sugeno. Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control // IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics. – 1985. – Vol. 15. – Pp. 116-132.

[Таха, 2005] Таха Хемди А. Введение в исследование операций. – Москва: “Вильямс”, 2005. – 912 с.

---

### **Информация об авторах**

---

**Виталий Снитюк** – Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко; пр. Акад. Глушкова 2, стр. 6, Киев, Украина; e-mail: [svit@artint.com.ua](mailto:svit@artint.com.ua)

**Артем Быченко** – Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля; ул. Оноприенко, 8, Черкассы, Украина; e-mail: [bichenko@ukr.net](mailto:bichenko@ukr.net)