

**Ф. А. АБДУЛАЛИЕВ**, канд. техн. наук, доцент кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз, начальник отделения инновационных проектов и программ, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: hasfarid@inbox.ru)

**А. В. ИВАНОВ**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры пожарной безопасности технологических процессов и производств, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: refox@mail.ru)

**А. А. УЛЬЯНОВСКИЙ**, адъюнкт кафедры пожарной безопасности зданий и автоматизированных систем пожаротушения, Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России (Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский просп., 149; e-mail: campo1991@mail.ru)

УДК 614.841:517.958.536.2

## ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ РАЗВИТИЯ ПОЖАРА НА ОТКРЫТЫХ ТЕРРИТОРИЯХ С ПРИМЕНЕНИЕМ ПЕРКОЛЯЦИОННОГО ПРОЦЕССА И ФУНКЦИИ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Рассмотрен новый подход к прогнозированию распространения пожаров в сельских населенных пунктах. Показано, что динамика развития процессов (пожаров) и явлений носит нелинейный, а зачастую хаотичный (непредсказуемый) характер, что обуславливает необходимость поиска альтернативных методов моделирования с применением нестандартных математических аппаратов. Использована теория перколяции для получения модели процесса горения. При оценке пожарной опасности объектов, расположенных на открытых территориях, применена функция нейронных сетей. Показано, что описание развития пожара на основе перколяционного процесса с применением функции нейронной сети с учетом определенных данных позволит выполнить оценку пожарной опасности при проектировании строительных объектов.

**Ключевые слова:** методы прогнозирования пожаров; перколяционный процесс; развитие пожара; нейронная сеть; сельские населенные пункты.

**DOI:** 10.18322/PVB.2017.26.02.44-53

Прогнозирование возникновения и развития горения является актуальным вопросом с точки зрения обеспечения безопасности людей и сохранения материальных ценностей при пожарах на различных объектах. Специфика прогнозирования пожаров такова, что при оценке пожарной опасности, особенно для крупных и сложных объектов, требуется большой объем справочной информации и расчетных методов моделирования обстановки на пожаре.

Любой подход в моделировании представляет собой комплексную и сложную задачу. Понятие моделирования пожаров охватывает физико-математическое представление всех процессов, так или иначе связанных с возникновением и развитием пожара (воздействие опасных факторов пожара (ОФП) на человека, поведение людей в экстремальных ситуациях, стратегия и тактика пожаротушения, оценка потенциального и фактического ущерба от пожара).

Во многом выбор математических программ (будь то интегральные, зонные или полевые) зависит

от области применения расчета развития пожаров как для замкнутых пространств (помещений), так и на открытом воздухе (в основном лесные пожары), и воздействия на их развитие различных факторов [1–3]. Однако развитие пожаров на открытых территориях, особенно в сельских населенных пунктах, обусловлено конструктивными особенностями зданий и сооружений, удаленностью пожарных частей, наличием и расположением водоисточников, погодными условиями (максимальная и минимальная температура воздуха, атмосферные осадки, направление ветра) и т. д. [4–12], что не дает возможности точно детерминировать (определить или оценить) происходящие события во времени.

Предупреждение пожаров в сельских населенных пунктах, граничащих с лесными массивами, становится все более и более актуальной задачей. События жаркого лета наглядно показали, что пожарные подразделения не всегда способны предотвратить стихийное бедствие в сельских населенных пунктах,

особенно в условиях ограниченности сил и средств. Причина этого чаще всего заключается в отсутствии исследования системных связей противопожарного состояния объектов, расположенных на открытых территориях. При повышении эффективности таких объектов необходимо системно прорабатывать их противопожарную защиту, не допуская отступлений от нормативных требований, нарушение или несоблюдение которых, как правило, приводит к огромному материальному ущербу, человеческим жертвам, негативным социально-психологическим и экологическим последствиям.

Анализ доступной зарубежной и отечественной научной и нормативно-технической литературы в области пожарной безопасности показал, что вопрос прогнозирования развития пожаров в сельских населенных пунктах является, безусловно, актуальным (особенно в нашей стране). Пожары в деревнях, садоводствах и т. п. стали для нашей страны традиционными (табл. 1). Единая научная концепция создания математической модели для прогнозирования развития пожара в сельских населенных пунктах на данный момент отсутствует, поэтому возникает необходимость в совершенствовании методов прогнозирования пожаров при проектировании строительных объектов в сельских поселениях.

Основной целью моделирования является исследование различных объектов и предсказание результатов будущих наблюдений. Математическое моделирование и связанный с ним компьютерный эксперимент незаменимы в тех случаях, когда натурный эксперимент невозможен или затруднен по тем или иным причинам. Кроме того, все это вполне

можно сделать на компьютере, построив предварительно математические модели изучаемого явления.

В настоящей работе создан алгоритм (рис. 1) и разработана программа, по которой проводилось моделирование и связанная с ним серия компьютерных экспериментов.

Для получения модели процесса горения была использована теория перколяции [13–16], по которой вычислялась размерность и плотность заполнения пространства конкретного сельского населенного пункта. Для этого применялся алгоритм, основанный на вычислении пространственной меры  $P$ . Исследуемые объекты покрывались множеством точек  $N$ , образующих кластеры.

Тогда

$$P = \sum y(\delta_n) = y(\delta_n) N, \quad (1)$$

где  $y(\delta_n)$  — геометрический коэффициент, зависящий от выбора покрывающего объекта;

$\delta_n$  — размерность Хаусдорфа – Безиковича.

Теория перколяции (протекания) имеет дело с образованием связанных объектов в неупорядоченных (случайных) средах. Большинство результатов исследований с использованием теории перколяции получено в результате компьютерного моделирования. При этом приходится проводить множество компьютерных испытаний на больших объектах, что потребовало разработки эффективных алгоритмов.

При классическом подходе перколяционный процесс обычно рассматривают на различных типах решеток в различных пространствах, узлы которых “заняты” независимо друг от друга некоторыми объектами с вероятностью  $p < 1$  (рис. 2). В роли таких

**Таблица 1.** Характеристика обстановки на пожарах в сельских поселениях Ленинградской области (пример из анализа)

№ п/п	Характеристика	Дата пожара					
		27.03.11	02.04.11	24.04.11	04.05.11	02.06.11	08.07.11
1	Направление и скорость ветра, м/с, облачность	↑3 Ясно	→5 Пасмурно	→2 Ясно	↙6 Облачно	↘6 Облачно	↖2 Облачно
2	Температура воздуха, °С	±12	+6	+6	+4	+20	+22
3	Расстояние от ПЧ до пожара, км	8	40	17	15	10	16
4	Время следования $t_{\text{приб}} - t_{\text{сообщ}}$ , мин	14	37	19	15	18	20
5	Время подачи первых стволов $t_{\text{под}} - t_{\text{сообщ}}$ , мин	15	38	20	16	19	21
6	Время локализации $t_{\text{лок}} - t_{\text{приб}}$ , мин	26	36	20	77	102	16
7	Количество личного состава $N_{\text{ПА}}$ , 3	6	6	6	12	6	6
8	Общий расход воды $Q$ , л/с	14,8	14,8	14,8	26	14,8	14,8
9	Вид водоисточника	ПГ	ПВ	ПВ	ПГ	ПВ	ПГ
10	Расстояние до водоисточника, м	1000	400	150	700	1000	800
11	Степень огнестойкости	V	V	III	V	IV	V

Примечание. ПГ — пожарный гидрант; ПВ — пожарный водоём;  $N_{\text{ПА}}$  — количество пожарных автомобилей.

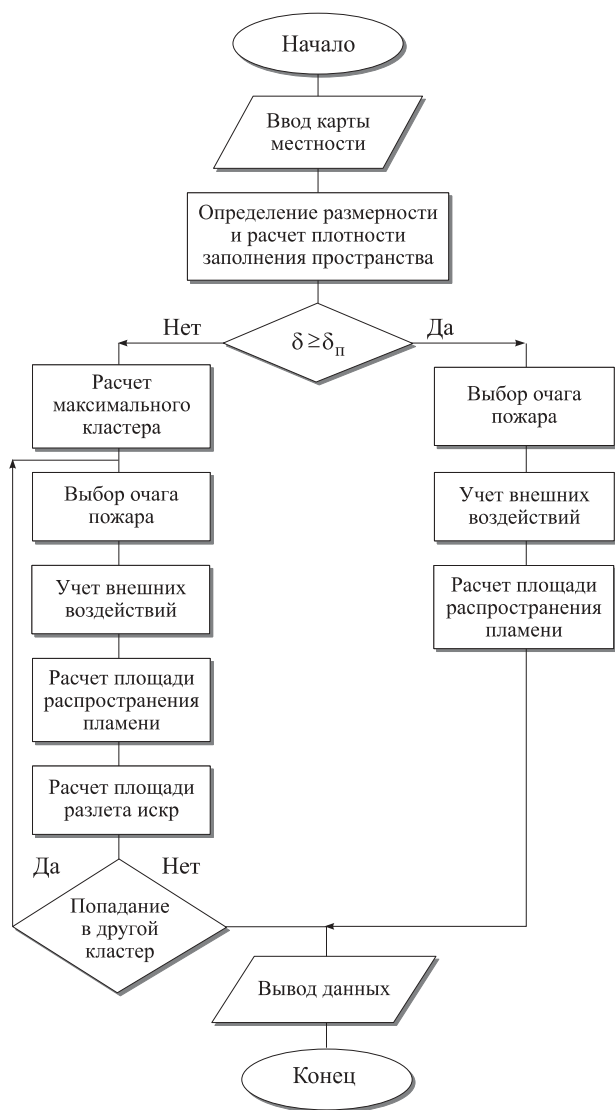


Рис. 1. Блок-схема алгоритма развития и распространения пожаров в сельских населенных пунктах

объектов могут выступать строения, деревья и т. п. Доля занятых (“пустых”) узлов решетки равна  $1 - p$ . При этом требуется определить, образуют ли занятые узлы непрерывный путь от нижнего края решетки до верхнего. Под непрерывным понимается путь, соединяющий один занятый узел решетки с соседним занятым узлом. Если такой путь существует, то говорят, что процесс “протекает” (в переводе с англ. *percolation process*). Наименьшая плотность  $x$  занятых узлов, по которому “протекает” процесс, является критической плотностью, или порогом перколяции  $x_c$  [13].

Таким образом, если рассматривать черные узлы в качестве горящих объектов, то образование цепочки горящих объектов (вероятность распространения пламени от горящего объекта к соседнему), проходящей через всю систему, соответствует образованию пожара в сельском населенном пункте.

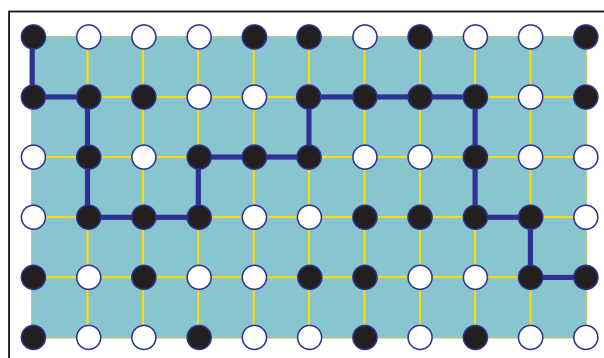


Рис. 2. Перколяционный процесс на двумерной решетке

Путь, представленный синей линией на рис. 2, указывает на то, что система выше порога перколяции. Самая важная черта физики всех критических явлений состоит в том, что вблизи критического состояния система распадается на блоки с отличающимися свойствами, причем размер отдельных блоков неограниченно растет при приближении к критической (пороговой) точке. Конфигурация блоков при этом случайна. В некоторых физических явлениях вся конфигурация меняется хаотически, в других — при переходе от образца к образцу. Блоки расположены беспорядочно, поэтому в процессе их формирования трудно увидеть какие-либо геометрические закономерности. Однако эти закономерности есть и обладают вполне определенными свойствами. Физические и химические свойства в системе неразрывно связаны с их геометрией.

При исследовании перколяции вводится понятие кластера, под которым понимается совокупность связанных узлов. Ими могут быть как удаленные (блокированные) узлы, так и узлы, участвующие в передаче огня. Если  $x < x_c$ , то в системе есть только кластеры из конечного числа узлов, поэтому развитие пожара будет локализовано и горение прекратится. Если  $x > x_c$ , то обязательно появятся узлы, принадлежащие бесконечному кластеру [13].

Порядок моделирования развития пожара заключался в следующем:

- строительные объекты располагали на квадратной решетке, которая соответствует сельскому населенному пункту, с учетом класса горючести: деревянные (IV и V степени огнестойкости), кирпичные постройки и конструкции (I и II степени огнестойкости) и кирпичные конструкции с деревянной отделкой (III степень огнестойкости);
- определяли размерность пространства Хаусдорфа – Безиковича путем генерирования случайных точек методом Монте-Карло (рис. 3);
- если отношение пожарной нагрузки (общей площади пространства) к общей площади строительных объектов на территории этого пространства больше или равно пределу перколяции (отношение количества точек к общему количеству попаданий точек на строительные объекты), то определяли площадь  $S$  распространения пламени с помощью компьютерного моделирования (рис. 4);
- если это отношение меньше предела перколяции, то вычисляли максимальные кластеры.

При моделировании применительно к сельским населенным пунктам учитывали внешние воздействия на процесс горения (направление и скорость ветра), рассчитывали линейную скорость распространения фронта пожара  $r(\theta)$  (м/мин) (распространение фронта пожара происходило в виде эллипса с точкой воспламенения, находящейся в одном из фокусов):

$$r(\theta) = \frac{r_h \left( 1 - \sqrt{1 - 1/B^2} \right)}{\left( 1 - \sqrt{1 + 1/B^2} \right)} \cos(\theta), \quad (2)$$

где  $\theta$  — угол отклонения распространения фронта от направления ветра, град;  
 $r_h$  — скорость распространения фронта в направлении ветра, м/мин;  
 $B$  — отношение длины строительного объекта к ширине.  
 Программа также учитывала характер развития пожара (по принципу лесного пожара): по поверх-

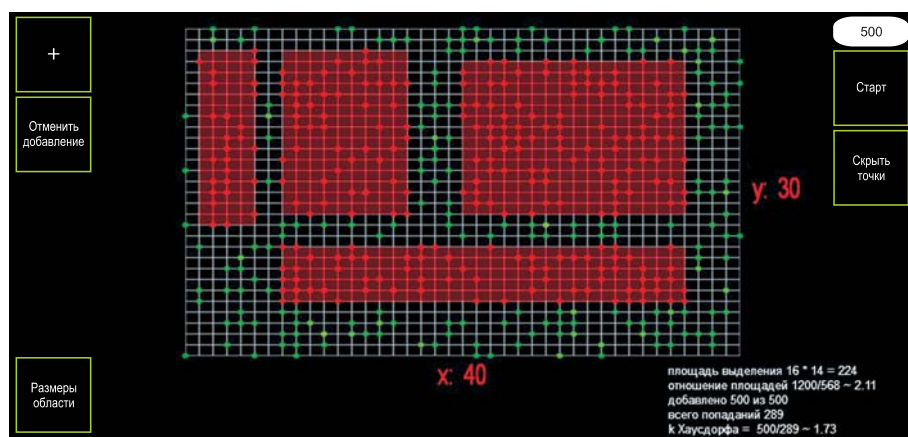


Рис. 3. Определение размерности пространства Хаусдорфа – Безиковича методом Монте-Карло

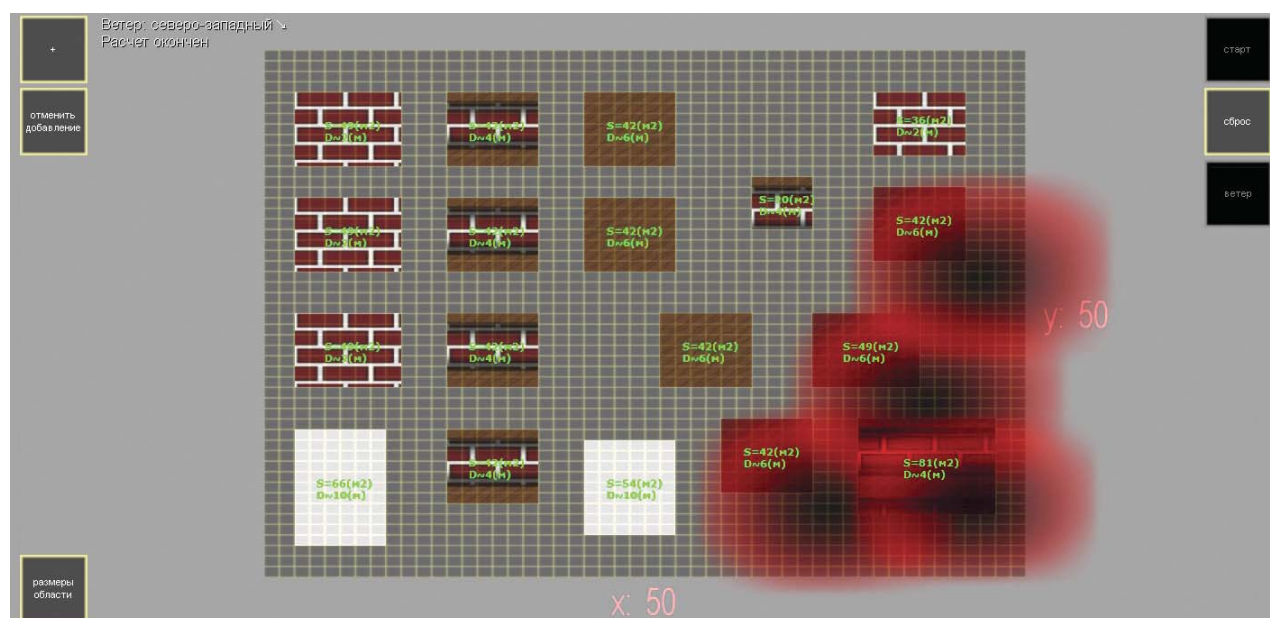


Рис. 4. Пример развития пожара на исследуемом участке

ности земли (“низовой” пожар), при котором горят трава, кустарники и стволы деревьев, находящиеся в непосредственной близости от строения); горение верхней части домов и близстоящих деревьев (“верховой” пожар); возникновение новых очагов пожара в результате выброса и переноса ветром горящих головней (количество искр зависит от множества случайных параметров, таких как территориальное расположение горючих объектов, рельеф местности, природные и погодные условия, время года).

Как правило, основным следствием распространения пожара является передача тепла в период активного горения. Количество тепла, выделившегося в единицу времени, зависит от мощности источника зажигания. В перколяционной модели территория, на которой расположены сельские поселения, представлена как система горючих (воспламеняющихся при внешнем термическом воздействии) участков (узлов), распределенных в пространстве. Возможные состояния различных (отдельных) участков (узлов) и переходы между этими состояниями можно привести к матрице согласно марковскому процессу [14]. План сельской местности моделируется в виде решетки. Узлы на решетке — это пожарная нагрузка, которая соответствует исследуемым объектам. Узлы соединены между собой связями, которые могут быть двух классов: одни соединяют участки, для которых существует вероятность того, что огонь между ними будет переноситься в результате передачи тепла; другие — пару участков, между которыми огонь будет распространяться посредством искр.

Весь промежуток времени с момента возникновения пожара до начала его тушения называют временем свободного развития пожара  $\tau_{св}$ :

$$\tau_{св} = \tau_{возн} + \tau_{обн} + \tau_{дисп} + \tau_{выезд} + \tau_{приб} + \tau_{н.т}, \quad (3)$$

Где  $\tau_{возн}$ ,  $\tau_{обн}$ ,  $\tau_{дисп}$ ,  $\tau_{выезд}$ ,  $\tau_{приб}$ ,  $\tau_{н.т}$  — время возникновения, обнаружения пожара, сообщения о нем,

выезда пожарных подразделений, прибытия их к месту и начала тушения пожара.

Именно с этого момента происходит активное горение несущих конструкций, перекрытий, элементов чердачного покрытия строительных объектов. В качестве примера были рассмотрены реальные пожары, происшедшие в сельских поселениях Ленинградской области (рис. 5).

В ходе анализа из статистических данных более чем по 50 пожарам были выбраны фактические площади пожаров  $S_{факт}$  на момент их локализации и на основании результатов моделирования определены расчетные площади пожаров  $S_{расч}$ , которые были сведены в табл. 2. В результате анализа был получен коэффициент применимости модели  $F_a$  ( $F_a = S_{расч} / S_{факт}$ ).

При оценке пожарной опасности объектов, расположенных на открытых территориях, возникло два вопроса. Первый вопрос связан с факторами окружающей среды, влияющими на развитие и распространение пожаров, второй — с точностью обработки данных. Решение этих вопросов было достигнуто путем использования *нейронных сетей* [17, 18].

Обучающиеся нейронные сети позволяют моделировать явления при затруднении или невозможности получения закономерностей происходящих процессов. Нарастив сложность такой нейронной сети, можно получить более точные и полные прогнозы. В основе данного подхода лежит нахождение удачной формализации изучаемого явления в терминах входных и выходных сигналов, подбор свойств нейронной сети и выбор набора данных для обучения. В работе проведен анализ применимости нейронных сетей к моделированию развития пожара с учетом погодной обстановки и участия пожарных подразделений (время прибытия, тушение).

Элементарной ячейкой нейронной сети является *нейрон*. Нейрон с одним вектором входа  $p$  с  $R$  эле-

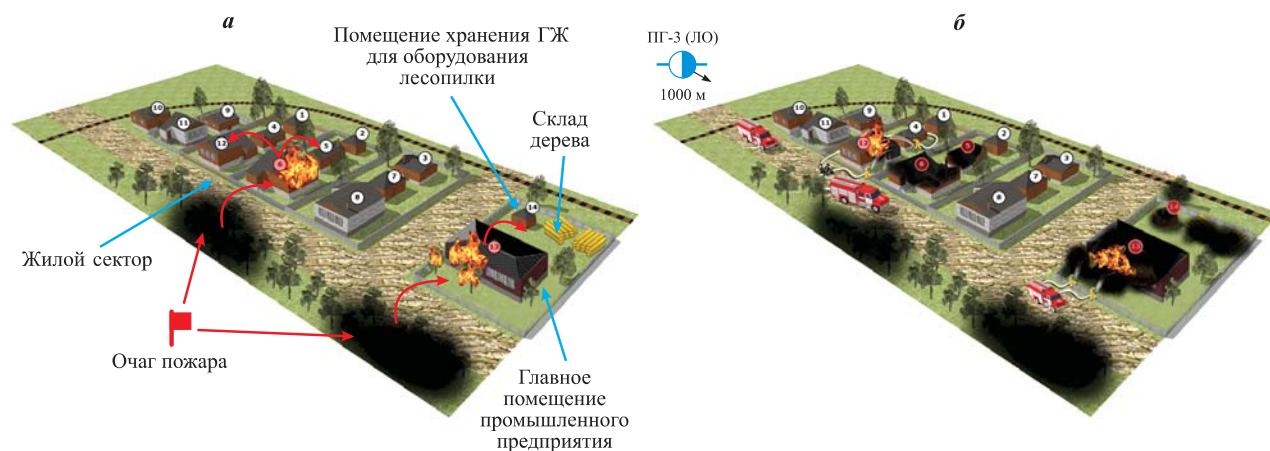


Рис. 5. Пожар в сельском населенном пункте Гатчинского района Ленинградской области (пример из анализа): а — время свободного развития пожара 20 мин; б — то же, 40 мин (локализация пожара)

Таблица 2. Пример из анализа пожаров в сельских поселениях Ленинградской области

№ п/п	Сельское поселение	фактическая на момент локализации $S_{факт}$	Площадь пожара, м <sup>2</sup>					Коэффициент применимости модели $F_a$ при времени свободного развития пожара, мин				
			расчетная $S_{расч}$ при времени свободного развития пожара, мин					0–20	20–40	40–60	60–90	90–120
			0–20	20–40	40–60	60–90	90–120					
1	Б. Колпанское (д. М. Колпаны, ул. Западная, 6)	108	–	*! 168	216	270	–	–	1,55	–	–	–
2	Элизаветинское (д. Раболово, 8)	170	–	–	*! 260	357	477	–	–	1,52	–	–
3	Таицкое (п. Тайцы, садоводство “Тайга”)	102	*!	226	388	–	–	–	–	–	–	–
4	Войковицкое (п. Войковицы)	250	*	* 116	* 460	!600	751	–	–	–	2,4	–
5	Б. Колпанское (д. М. Колпаны, ул. Центральная)	314	–	* 64	* 236	!520	–	–	–	–	1,65	–
6	Войковицкое (д. Тяглино, уч. 29)	100	*	! 170	268	268 (огонь перекинулся на лес)	–	–	1,7	–	–	–

Примечание. Символ \* означает приезд и/или боевые действия ПО, ! — локализацию пожара.

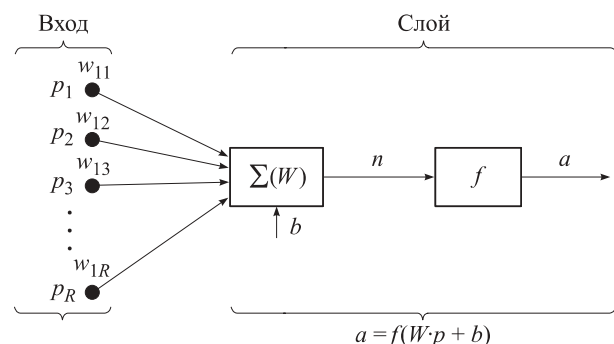


Рис. 6. Структурная схема нейронной сети

ментами  $p_1, p_2, \dots, p_R$  показан на рис. 6. Здесь все элементы входных сигналов умножаются на *весовые коэффициенты*  $w_{11}, w_{12}, \dots, w_{1R}$ , и взвешенные значения передаются на сумматор. Их сумма равна скалярному произведению вектора-строки  $w$  на вектор входа  $p$ . Нейрон дополняется скалярным *смещением*  $b$ , которое суммируется со взвешенной суммой входов. Получаем результирующую сумму  $n$ :

$$n = w_{11}p_1 + w_{12}p_2 + w_{1R}p_R + b, \tag{4}$$

которая служит *аргументом функции активации*  $f$ . Функцией активации  $f$ , как правило, является логическая функция активации  $\log \text{sig}(n) = 1/(1 + \exp(-n))$ . Сети обычно имеют несколько *слоев*, каждый из которых характеризуется своей матрицей весов  $W$ , смещением  $b$ , операциями умножения  $w \cdot p$ , суммирования, функцией активации  $f$  и вектором выхода  $a$ . В сети каждый элемент вектора входа соединен со

всеми входами нейрона, и это соединение задается матрицей весов  $W$ . При этом каждый нейрон включает суммирующий элемент, который формирует скалярный выход  $n$ . Совокупность скалярных функций  $n$  объединяется в вектор входа  $n$  функции активации слоя. Выходы слоя нейрона формируют вектор-столбец  $a$ . Таким образом, описание слоя нейронов имеет вид:

$$a = f(W \cdot p + b). \tag{5}$$

Количество входов  $R$  в слое может не совпадать с количеством нейронов  $S$ . В каждом слое, как правило, используется одна и та же функция активации. Каждый нейрон генерирует определенную часть выходов. Элементы вектора входа передаются в сеть через матрицу весов  $W$ , имеющую вид:

$$W = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \dots & w_{1R} \\ w_{21} & w_{22} & \dots & w_{2R} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_{S1} & w_{S2} & \dots & w_{SR} \end{bmatrix}. \tag{6}$$

Заметим, что индексы строк матрицы  $W$  указывают адресаты (пункты назначения) весов нейронов, а индексы столбцов — источник, являющийся входом для этого веса. Таким образом, элементы матрицы весов  $w = W$  определяют коэффициент, на который умножается второй элемент входа при передаче его на первый нейрон.

Процесс обучения требует набора примеров поведения желаемых входов  $p$  и желаемых (целевых) выходов  $t$ . Во время этого процесса веса и смеще-

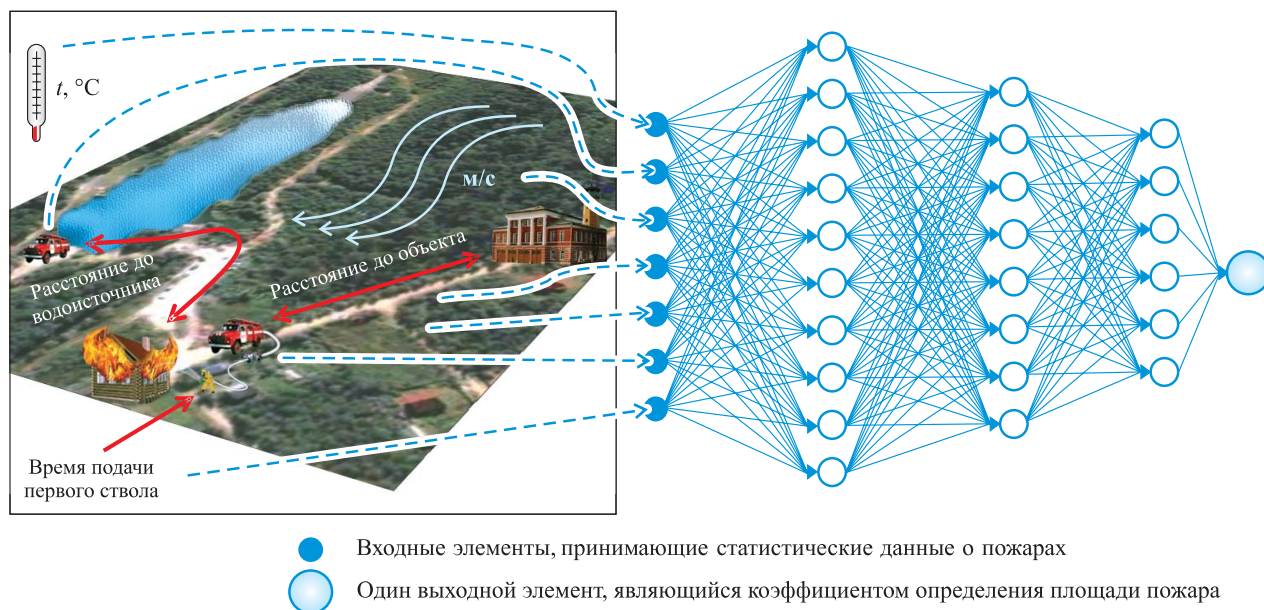


Рис. 7. Схема применения нейронной сети для оценки пожарной опасности в сельских населенных пунктах

ния настраивают так, чтобы минимизировать некоторый функционал ошибки. По умолчанию в качестве такого функционала для сетей принимается среднеквадратичная ошибка между векторами выхода  $a$  и  $t$ .

При обучении сети рассчитывается некоторый функционал, характеризующий качество обучения:

$$J = \frac{1}{2} \sum_{q=1}^Q \sum_{i=1}^{S^M} \left( t_i^q - a_i^{qS^M} \right)^2, \quad (7)$$

где  $J$  — функционал;

$Q$  — объем выборки;

$q$  — номер выборки;

$S^M$  — число нейронов выходного слоя;

$M$  — число слоев сети;

$a^q$  — вектор сигнала на выходе сети;  $a^q = [a_i^{qS^M}]$ ;

$t^q$  — вектор желаемых (целевых) значений сигнала на выходе сети для выборки с номером  $q$ ;

$t^q = [t_i^q]$ .

Для того чтобы обучить нейронную сеть, применяемую в исследовании процесса распространения пожаров на открытых территориях, использовался математический пакет MATLAB® (лицензия № 576818). В качестве входных характеристик были взяты статистические данные по пожарам в сельских населен-

ных пунктах, происшедшим в Ленинградской области (см. табл. 1).

В качестве входных данных модели использовали: скорость ветра, температуру, расстояние от ПЧ до пожара, время следования, время подачи первых стволов, время локализации, расстояние до водоема (рис. 7).

В ходе исследования была построена многослойная нейронная сеть:

- 1-й слой — 10 нейронов;
- 2-й слой — 8 нейронов;
- 3-й слой — 6 нейронов;
- 4-й слой — 1 нейрон.

Слой выбирались путем экспертной оценки. Максимальное отклонение в обученной нейронной сети составило  $5,2 \cdot 10^{-5}$ , максимальное количество циклов обучения — 1200.

Таким образом, исследования показали, что прогнозирование развития пожаров в сельских населенных пунктах на основе перколяционного процесса с применением функции нейронной сети и с учетом определенных данных позволит выполнить оценку пожарной опасности сельских населенных пунктов. Данные рекомендации можно использовать для планирования противопожарных мероприятий и тактики пожаротушения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кошмаров Ю. А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. — М. : Академия ГПС МВД России, 2000. — 118 с.
2. Гришин А. М. О математическом моделировании природных пожаров и катастроф // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2008. — № 2(3). — С. 105–114.
3. Доррер Г. А. Динамика лесных пожаров. — Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2008. — 404 с.

4. Лунд Э. Э., Федотов П. А. Пожарная тактика. Правила тушения пожаров в вопросах и ответах. — СПб. : Тип. “Товарищество М. О. Вольфъ”, 1907.
5. Повзик Я. С. Пожарная тактика : учебник. — М. : ЗАО “Спецтехника”, 2004. — 416 с.
6. Терехнев В. В. Пожарная тактика. Понятие о тушении пожара. — Екатеринбург : Изд-во “Калан”, 2010. — 348 с.
7. Методические рекомендации по действиям подразделений федеральной противопожарной службы при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ : утв. письмом МЧС России от 26.05.2010 № 43-2007-18. URL: <http://lawru.info/dok/2010/05/26/n220225.htm> (дата обращения: 05.06.2016).
8. Рекомендации по организации пожаротушения в сельской местности : утв. ГУГПС МВД России 26.12.2000; введ. 26.12.2000. — М. : ВНИИПО, 2001. — 135 с.
9. СП 53.13330.2011. Планировка и застройка территорий садоводческих (дачных) объединений граждан, здания и сооружения (актуал. ред. СНиП 30-02-97\*). — Введ. 20.05.2011. — М. : ОАО “ЦПП”, 2011.
10. СП 11.13130.2009. Места дислокации подразделений пожарной охраны. Порядок и методика определения. — Введ. 01.05.2009. — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2009.
11. Порядок привлечения сил и средств подразделений пожарной охраны, гарнизонов пожарной охраны для тушения пожаров и проведения аварийно-спасательных работ : утв. приказом МЧС РФ от 05.05.2008 № 240. URL: <http://base.garant.ru/193545/> (дата обращения: 05.06.2016).
12. Брушлинский Н. Н., Соколов С. В. О нормировании времени прибытия пожарных подразделений к месту пожара // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 9. — С. 42–48.
13. Абдулалиев Ф. А., Моторыгин Ю. Д. Описание развития пожара с помощью перколяционной модели // Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20, № 8. — С. 25–33.
14. Ramachandran G. Non-deterministic modelling of fire spread // Journal of Fire Protection Engineering. — 1991. — Vol. 3, No. 2. — P. 37–48. DOI: 10.1177/104239159100300201.
15. Эфрос А. Л. Физика и геометрия беспорядка. — М. : Наука, 1982. — 265 с.
16. Broadbent S. R., Hammersley J. M. Percolation processes: I. Crystals and mazes // Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society. — 1957. — Vol. 53, No. 3. — P. 629–641. DOI: 10.1017/S0305004100032680.
17. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей / Пер. с англ. — М. : Изд-во “Вильямс”, 2001. — 290 с.
18. Медведев В. С., Потемкин В. Г. Нейронные сети. MATLAB 6. — М. : Изд-во “Диалог-МИФИ”, 2002. — 496 с.

*Материал поступил в редакцию 14 июня 2016 г.*

**Для цитирования:** Абдулалиев Ф. А., Иванов А. В., Ульяновский А. А. Вероятностный подход к моделированию развития пожара на открытых территориях с применением перколяционного процесса и функции нейронной сети // Пожаровзрывобезопасность. — 2017. — Т. 26, № 2. — С. 44–53. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.44-53.

English

## PROBABILISTIC APPROACH TO THE MODELING OF FIRE DEVELOPMENT ON OPEN LAND BY THE USE PERCOLATION PROCESS AND FUNCTION OF THE NEURAL NETWORK

**ABDULALIEV F. A.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Criminology and Technical Engineering Expertise Department, Head of Department of Innovative Projects and Programs, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: hasfarid@inbox.ru)

**IVANOV A. V.**, Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor of Fire Security of Technological Processes and Productions Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: refox@mail.ru)



**ULYANOVSKIY A. A.**, Postgraduate Student of Fire Safety of Buildings and Automated Fire Extinguishing Systems Department, Saint Petersburg University of State Fire Service of Emercom of Russia (Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; e-mail: campo1991@mail.ru)

## ABSTRACT

**Introduction.** Prevention of fires in rural settlements bordering forests, is becoming more and more urgent task. There is a problem of their prevention, containment and suppression. Fires in open territories are large in scale, the need to consider the weather conditions, design features of buildings and structures, the distance of fire stations, availability and location of water sources, etc.

**Purpose.** Development of models describing the development of the fires to assess the fire danger of objects located in open areas.

**Tasks:**

1. The development of the percolation model describing fire development.
2. The creation of a model fire hazard analysis facilities located in open areas, with the use of neural networks, based on expert data.

**Methods.** Stochastic analysis, mathematical modeling, percolation theory, neural networks.

**Theory.** To obtain a model of the combustion process, was used the theory of percolation, which is used to calculate the dimension and density of a space-filling (specific) rural settlement.

In the percolation model, the territory on which the rural settlement is represented as a system of combustible (flammable at external heat exposure) stations (nodes) distributed in space. Plan rural area modeled in the form of a lattice. The nodes on the grid is a fire load that corresponds to the test object. Nodes are interconnected by links. These relationships can be of two classes. Some of them connect the stations between which there is a probability that the fire will be transferred by the transfer of heat. When the other class connect a couple of sections, between which the fire will spread by means of sparks.

**Calculations.** The procedure of calculations was the following:

- construction facilities were located on a square lattice, which corresponds to rural settlements. Construction of objects, flammability class was divided into wood (IV and V degree of fire resistance), brick buildings and structures (I and II degree of fire resistance) and brick construction with wood trim (III degree of fire resistance);
- defining the dimension of the space of Hausdorff – Besicovitch, by generating random points Monte;
- if the ratio of the fire load (the total space) total area of construction facilities in the territory of that space is greater than or equal to the percolation limit (the ratio of the number of points to the total number of hit points to construction sites), determine the area  $S$  of flame propagation using a computer simulation;
- if not, calculated the maximum cluster.

**Results.** As a result, was modeled with the real fires that occurred in rural settlements of the Leningrad region.

**Discussion.** For the determination of fire hazard properties are located in open areas, two questions arose. The first question was associated with external environmental factors influencing the development and spread of fires. The second was associated with the accuracy of data processing. The solution to these questions obtained by the use of neural networks.

As the input characteristics there were taken statistics of fires in rural areas that occurred in Leningrad region: wind speed, temperature, distance from the inverter to the fire, journey time, time of following of the first barrels, while localized, the distance to the water source.

**Conclusions.** Thus, the study showed that the prediction of the development of fires in rural settlements on the basis of percolation process with the use of neural networks, will allow to assess the fire danger of objects located in open areas. These guidelines can be used for planning of fire-prevention actions and tactics of fire suppression.

**Keywords:** forecasting methods fires; percolation process; development of fire; neural network; rural settlements.

## REFERENCES

1. Koshmarov Yu. A. *Forecasting of fire hazards in the case of indoor fire*. Moscow, State Fire Academy of Ministry of Interior of Russia Publ., 2000. 118 p.
2. Grishin A. M. About mathematical modelling natural fires and catastrophes. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika (Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics)*, 2008, no. 2(3), pp. 105–114 (in Russian).
3. Dorrer G. A. *Dynamics of wildfires*. Novosibirsk, Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2008. 404 p. (in Russian).
4. Lund E. E., Fedotov P. A. *Fire tactics. Rules of fire extinguishing in questions and answers*. Saint Petersburg, Publishing House “Company of M. O. Wolff”, 1907 (in Russian).
5. Povzik Ya. S. *Fire tactic. Textbook*. Moscow, Spetstekhnika Publ., 2004. 416 p. (in Russian).
6. Terebnev V. V. *Fire tactic. Concept of fire extinguishing*. Yekaterinburg, Publishing House “Kalan”, 2010. 348 p. (in Russian).
7. *The methodical recommendations for the operations of State Fire Service units while extinguishing fire and carrying out wreckings* (in Russian). Available at: <http://lawru.info/dok/2010/05/26/n220225.htm> (Accessed 5 June 2016).
8. *Recommendations on the organization of fire extinguishing in rural areas*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection, 2001. 135 p. (in Russian).
9. *Set of rules 53.13330.2011. Planing and occupation of territories of gardening (country's) unions of citizens, buildings and erections (updated edition of Construction Norms and Regulations 30-02–97\*)*. Moscow, TsPP Publ., 2011 (in Russian).
10. *Set of rules 11.13130.2009. Location of fire service divisions. Procedure and methods of determination*. Moscow, All-Russian Research Institute for Fire Protection of Emercom of Russia, 2009 (in Russian).
11. *The mobilization order of Fire protection service forces, facilities and garrisons to extinguish fire and carry out wreckings* (in Russian). Available at: <http://base.garant.ru/193545/> (Accessed 5 June 2016).
12. Brushlinskiy N. N., Sokolov S. V. About regulations of response time of fire services. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 9, pp. 42–48 (in Russian).
13. Abdulaliev F. A., Motorygin Yu. D. Percolation model of fire development. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2011, vol. 20, no. 8, pp. 25–33 (in Russian).
14. Ramachandran G. Non-deterministic modelling of fire spread. *Journal of Fire Protection Engineering*, 1991, vol. 3, no. 2, pp. 37–48. DOI: 10.1177/104239159100300201.
15. Efros A. L. *Physics and geometry of a disorder*. Moscow, Nauka Publ., 1982. 265 p. (in Russian).
16. Broadbent S. R., Hammersley J. M. Percolation processes: I. Crystals and mazes. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 1957, vol. 53, no. 3, pp. 629–641. DOI: 10.1017/S0305004100032680.
17. Callan R. *The essence of neural networks*. London, Prentice Hall Europe, 1999. 232 p. (Russ. ed.: Kallan R. Osnovnyye kontseptsii neyronnykh setey. Moscow, Publishing House “Williams”, 2001. 290 p.).
18. Medvedev V. S., Potemkin V. G. *Neural networks. MATLAB 6*. Moscow, Publishing House “Dialog-MIFI”, 2002. 496 p. (in Russian).

**For citation:** Abdulaliev F. A., Ivanov A. V., Ulyanovskiy A. A. Probabilistic approach to the modeling of fire development on open land by the use percolation process and function of the neural network. *Pozharovzryvobezopasnost — Fire and Explosion Safety*, 2017, vol. 26, no. 2, pp. 44–53. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.02.44-53.