

# НЕЙРОСЕТЕВАЯ МОДЕЛЬ ПРЕДСКАЗАНИЯ АБСОЛЮТНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ МЕРОПРИЯТИЙ И ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

Нгуен Вьонг Ань

Академия ГПС МЧС России  
vuonganh2709@gmail.com

## NEURAL NETWORK MODEL FOR PREDICTING THE ABSOLUTE EFFECTIVENESS OF PREVENTIVE MEASURES AND SUPPORTING MANAGEMENT DECISIONS

Nguyen Vuong Anh

*Summary.* The article analyzes and evaluates the effectiveness of preventive measures using neural networks. The input data for training the neural network include information about fires collected in Vietnam, such as population, number of fires, number of deaths, and number of preventive measures. Based on these indicators, the effectiveness of the preventive measures is predicted. The results of the study play a fundamental role in the practices of the General Directorate of the Fire Service in the decision-making process to enhance fire safety in the provinces and cities of Vietnam. The construction of a model for predicting the effectiveness of fire prevention and extinguishment measures in Vietnam is based on a multilayer neural network. Decisions to ensure fire safety in the country can be made based on the forecast results. Efficiency of forecasting and fire risk values have been established for the provinces and cities in Vietnam. These indicators assist in developing models for optimally predicting the effectiveness of preventive measures. The results indicate the feasibility of predicting the absolute value of preventive work's effectiveness using quantitative and categorical variables. A relatively large forecasting error is linked, on one hand, to the necessity of considering a greater number of input parameters, and on the other hand, to the need to expand the data set for training the neural network. After refining the model, the obtained results enable the evaluation of the effectiveness of preventive measures for the provinces and cities in Vietnam.

*Keywords:* fire safety, preventive measures, neural network, management decision support, prediction model.

*Аннотация.* В статье анализируется и оценивается эффективность профилактических мероприятий с использованием нейронных сетей. Входные данные для обучения нейронной сети включают информацию о пожарах, собранную во Вьетнаме: население, количество пожаров, число жертв, количество профилактических мероприятий. На основании этих данных прогнозируется эффективность профилактических мероприятий. Полученные результаты исследования служат фундаментом в практике Главного управления противопожарной службы при принятии решений по повышению пожарной безопасности в провинциях и городах Вьетнама. Разработка модели прогнозирования эффективности мер по предотвращению и тушению пожаров во Вьетнаме основана на многослойной нейронной сети. На основе результатов прогнозирования могут быть приняты решения по обеспечению пожарной безопасности в стране. Уровни эффективности прогнозирования и пожарных рисков определены для провинций и городов Вьетнама. Эти показатели помогают разрабатывать модели для оптимального прогнозирования эффективности профилактических мер. Результаты свидетельствуют о возможности прогнозирования абсолютного значения эффективности профилактической работы на основе количественных и категориальных переменных. Относительно большая ошибка прогноза связана, с одной стороны, с необходимостью учета большего количества входных параметров, с другой стороны — с необходимостью увеличения объема данных для обучения нейронной сети. После доработки модели полученные результаты позволяют оценить эффективность профилактических мероприятий для провинций и городов Вьетнама.

*Ключевые слова:* пожарная безопасность, профилактические мероприятия, нейронная сеть, поддержка принятия управленческих решений, модель предсказания.

## Введение

Вьетнам занимает площадь 331,212 км<sup>2</sup> и имеет население более 98 миллионов человек, что делает страну одной из самых густонаселённых (около 319 чел./км<sup>2</sup>). Территория Вьетнама разделена на 63 административные единицы провинциального уровня, включая 5 крупнейших централизованно управляемых городов с большим населением: Хошимин (9,5 миллиона человек), Ханой (8,8 миллиона человек), Хайфон (2,3 миллиона человек), Кантхо (1,5 миллиона человек) и Дананг (1,3 миллиона человек) [1].

Обеспечение пожарной безопасности во Вьетнаме — это одна из важнейших функций государства. Эту функцию выполняют органы исполнительной власти в соответствии с положениями Закона «О пожарной безопасности» № 27 от 2001 года и Закона «О внесении изменений и дополнений в ряд статей Закона о пожарной безопасности» № 40 от 2013 года Вьетнама [4].

Система обеспечения пожарной безопасности представляет собой комплекс технических решений, направленных на устранение и минимизацию рисков возникновения пожара, оперативное тушение в случае его

возникновения, предотвращение распространения огня и снижение ущерба для людей и имущества [9, 10, 15].

В настоящее время во Вьетнаме отсутствует метод оценки эффективности противопожарных мер. Кроме того, использование методов искусственного интеллекта для прогнозирования эффективности противопожарной защиты в России все еще сталкивается с множеством ограничений. Поэтому мы анализируем и оцениваем эффективность предотвращения пожаров во Вьетнаме, используя модели искусственного интеллекта для разработки решений по предотвращению пожаров [5–7].

### Литературный обзор

В период с 2016 по 2021 год во Вьетнаме среднее количество пожаров превышало 3274, причём в городах было зарегистрировано 58,4 % случаев, а в сельской местности — 41,6 %. Прямой ущерб в среднем составлял 61,75 миллиона долларов, а число погибших — 89 человек в год. Общая характеристика пожарной обстановки во Вьетнаме представлена в таблице 1 [2,3]. Анализ пожарной обстановки показывает, что с 2010 по 2018 год во Вьетнаме наблюдалась тенденция к увеличению количества пожаров и их последствий, а затем — к снижению с 2019 по 2021 год [15]. При этом объём противопожарных мероприятий за эти годы особо не изменился, хотя в 2020 году их количество было наименьшим. В 2020 году также произошёл и сильно усилился всплеск пандемии COVID-19, что ограничило реализацию противопожарных мероприятий.

Таблица 1.

Количество пожаров и их последствия за период 2016–2021 гг. во Вьетнаме

Годы	Население млн чел.	Количество пожаров, ед.	Ущерб, млн долл.	Гибели при пожаре, чел.	Количество профилактических мер
2016	93,6	3006	64,9	98	1157196
2017	94,6	3794	87,5	99	1539074
2018	95,5	4047	70,2	97	1413302
2019	96,4	3790	72,7	85	1262179
2020	97,3	2764	43,2	75	305983
2021	98,5	2245	32,0	85	1307482
Среднее	95,9	3274	61,7	89	1164202

Профилактические мероприятия по пожарной безопасности — это деятельность, направленная на предотвращение возникновения пожара и минимизацию ущерба, причиненного пожаром. Она включает в себя проверки на наличие пожарных сигнализаций, контроль за частотой проведения этих проверок, пожарно-техническое обследование, проверку соблюдения противопо-

жарных норм и правил, обучение сотрудников правилам пожарной безопасности и инструктаж по применению средств тушения пожара [8]. В практике противопожарной отрасли Вьетнама уделяется всё большее внимание оценке эффективности противопожарных мер. Без такой оценки невозможно эффективное решение организационно-управленческих задач, направленных на снижение уровня пожарной опасности в стране. При оценке эффективности профилактических мер необходимо учитывать такие факторы, как численность населения, количество произошедших пожаров, число погибших людей и количество противопожарных проверок [11]. В данной статье рассматривается оценка эффективности профилактических мер во Вьетнаме с помощью обучения и использования нейронных сетей.

В предыдущей работе [12] методами статистического и дискриминационного анализа была оценена эффективность профилактических мероприятий в отношении снижения количества пожаров и жертв от них. Были выявлены ряд статистически значимых корреляций, в частности, между относительной безопасностью (отношение числа погибших на пожарах к населению) муниципального образования (МО) и его размерами, а также значимое снижение эффективности профилактических мероприятий с ростом численности населения. Одновременно, дальнейшее разделение МО на подклассы указывает на более высокую чувствительность эффективности профилактики к численности населения для подкласса тип 1 — городские районы областного центра, по сравнению с подклассом тип 11 — города и другие МО этого типа в области [11, 12]. Наконец, для таких специфических показателей, как гибель/профилактика и пожары/профилактика в зависимости от населения, было установлено наличие так называемых «тяжелых хвостов» («heavy tails»). Логарифмическая нормальность распределения в этих случаях является следствием существенной нелинейности процессов в задаче статистического описания многомерного пространства. Это характерно для сложных социально-экономических процессов. Следовательно, возникает необходимость увеличения размерности входных переменных для оценки эффективности профилактических мероприятий, что ограничивает возможности применения стандартных корреляционных или регрессивных моделей. Требуется учет специфики МО, численности населения и других параметров как качественного, так и количественного типа. Для решения этой задачи предполагается использовать классифицирующий искусственный интеллект на основе многослойных нейронных сетей обратного распространения, чему и посвящена предлагаемая работа [13].

Рассмотрим теперь результаты обучения нейронных сетей (НС) в разрезах выходного категориального пространства. В качестве примера возьмем одномерное

сечение гибель/профилактика и пожары/профилактика. Результаты представлены в таблице 2, где  $P$  обозначает вероятность правильного предсказания на тестовом наборе,  $K$  — число нейронов скрытого слоя,  $S$  — количество эпох обучения ( $S = 100, 500$ ),  $x_1$  — гибель/профилактика,  $x_2$  — пожары/профилактика.

Таблица 2.

Модель анализирует одномерные сечения выходных переменных

K	P			
	S = 100		S = 500	
	$x_1$	$x_2$	$x_1$	$x_2$
64	0.571	0.678	0.607	0.615
128	0.590	0.566	0.703	0.556
256	0.681	0.652	0.818	0.708

Предсказания в одномерных сечениях категориального пространства в сечении гибель/профилактика слабо зависят от числа нейронов, если их количество превышает 64, при этом максимальная вероятность правильной классификации достигается уже при 500 эпохах и составляет 0.818. Надежность классификации в одномерном сечении категориального пространства пожары/профилактика ниже — 0.708, и при этом также слабо зависит от числа нейронов скрытого слоя ( $K \geq 64$ ) и длительности обучения ( $S \geq 500$ ).

Высокая надежность прогнозов в сечении профилактика/гибель, очевидно, связана с эффективным реализовыванием профилактических мероприятий во Вьетнаме, что приводит к снижению количества людей, погибших в результате пожаров. Кроме того, меньшая вероятность прогнозирования в сечении пожары/профилактика указывает на то, что количество пожаров уменьшается благодаря профилактике [14].

**Материалы и методы**

Представляет интерес не только классификация эффективности профилактических мероприятий, но и предсказание их абсолютных значений эффективности. Для решения этой задачи была разработана многослойная нейронная сеть, в которой в качестве входных переменных использовались ранее введенные количественные характеристики муниципальных образований (население) и категориальные (с учетом подклассов 1 и 11). Выходными переменными являлись относительная эффективность профилактических мероприятий — переменные  $x_1, x_2, x_3$ , где  $x_1$  — гибель/профилактика,  $x_2$  — пожары/профилактика,  $x_3$  — гибель/население.

Полносвязная нейронная сеть состояла из трех внутренних слоев с нулевым сдвигом и функцией активации гиперболический тангенс  $\tanh(x)$ . Выходной слой также использовал функцию активации  $\tanh(x)$ . В качестве

меры качества обучения использовалось среднеквадратичное отклонение.

$$W(z_i) = \sum_{i=0}^{Q-1} (y_i - z_i)^2, \tag{1}$$

где  $y_i$  — ожидаемый выход,  $z_i$  — реализованный выход,  $Q$  — количество выходных переменных.

Вариабельными параметрами являлись количество нейронов в слоях и число эпох обучения. База для обучения, размер пакета и доля данных, выделенных для валидации, были аналогичны ранее описанным. Обучение проводилось методом обратного распространения ошибки с использованием стохастической градиентной оптимизации. Схема нейронной сети представлена на рисунке 1.

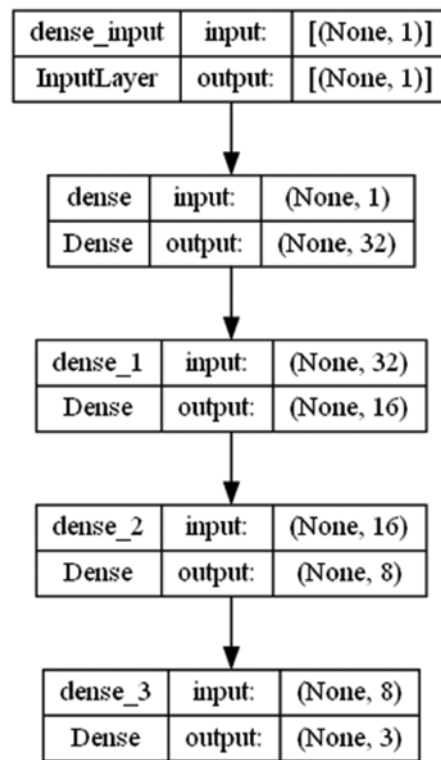
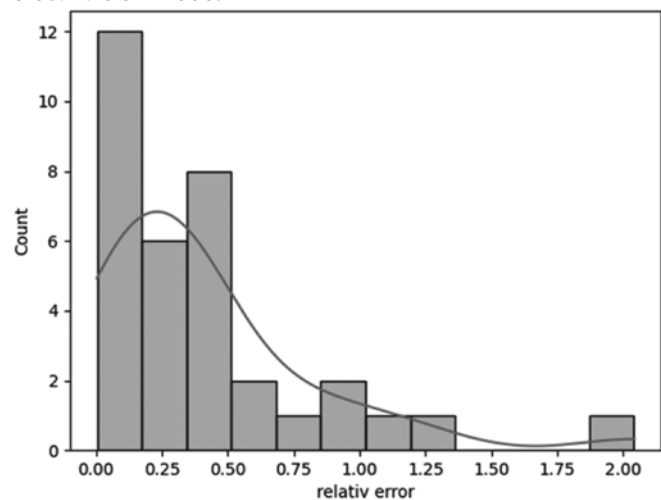


Рис. 1. Топология предсказывающей НС

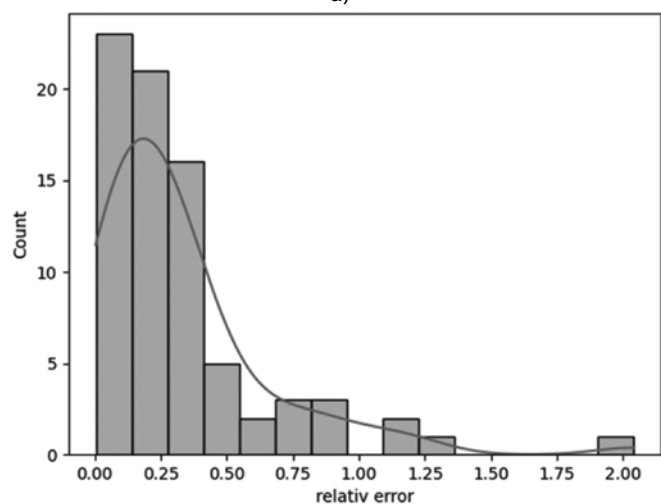
В процессе тестирования нейронной сети (НС) вычислялась относительная ошибка предсказания — величина  $\frac{\Delta x_i}{x_i}$ , где  $\Delta x_i = |x_i - x_i^*|$  представляет собой разницу между истинным и предсказанным значениями одной из трех переменных  $x_1, x_2, x_3$ . На рисунке 2 представлены гистограммы распределения относительной ошибки предсказания эффективности профилактической деятельности во Вьетнаме.

В таблице 3 представлены средние относительные ошибки предсказания абсолютной эффективности профилактики для параметров гибель/профилактика, пожары/профилактика и гибель/население при различных

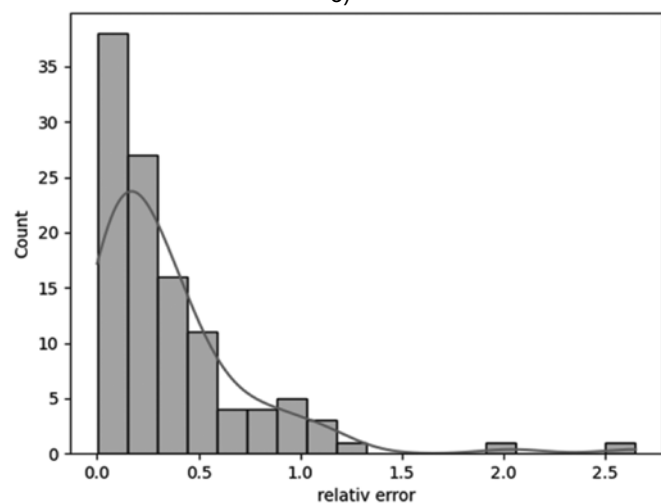
топологиях сети. Количество эпох обучения всегда составляло  $S = 1000$ .



а)



б)



в)

Рис. 2. Гистограммы распределения предсказаний абсолютной эффективности профилактики на тестовом наборе. Топология сети: 32, 16, 8. а — гибель/профилактика, б — пожары/профилактика, в — гибель/население

Таблица 3.

Средняя относительная ошибка предсказания абсолютных значений эффективности профилактики

K	$x_1$	$x_2$	$x_3$
8, 4, 2	0.60	0.49	0.50
16, 8, 4	0.41	0.35	0.48
32, 16, 8	0.404	0.324	0.355

Полученные результаты свидетельствуют о возможности прогнозирования абсолютного значения эффективности профилактической работы на основе количественных и категориальных переменных. Относительно большая ошибка прогноза связана, с одной стороны, с необходимостью учета большего числа входных параметров, с другой стороны, с необходимостью увеличения объема базы обучения нейронных сетей. Вместе с тем, необходимо отметить, что значительный вклад в среднюю ошибку предсказания вносят «хвосты» распределения — редкие события с низким значением предсказываемых величин. В то же время, более двух третей тестового набора имеют среднюю ошибку предсказания вдвое меньше, как показано на рис. 2. Дальнейшее увеличение размеров сети и количества эпох не приводит к существенным изменениям в результатах.

### Результаты

Полученные результаты позволяют оценить эффективность профилактических мероприятий для муниципальных образований (МО) различных типов и населения, но для оптимизации профилактических мероприятий и поддержки принятия решений они могут быть не слишком удобны. Предлагаем реализовать другой алгоритм решения этого вопроса. Для этого создадим нейронную сеть, на входе которой будет категория МО (возможно, с учетом подкатегории МО), численность населения и удельная профилактика, то есть отношение численности профилактических мероприятий за предшествующий год к населению МО в текущем году. Переменные с соответствующими нормировками на максимальное значение обозначим как  $x$  и  $y$ . На выходе нейронной сети будут пожарные риски  $R_1$  и  $R_2$  — отношение числа пожаров к численности населения и отношение числа погибших в них к численности населения. Создадим многослойную нейронную сеть по аналогии с описанной в предшествующем разделе, с 5 (6) переменными на входе и 2 на выходе. Количество эпох обучения и число внутренних слоев являются настраиваемыми параметрами, мерой является среднее квадратическое отклонение между реализацией и обучающими примерами, а метод оптимизации — метод стохастических градиентов.

После обучения, сеть на данной базе предсказывает риски  $R_{1,2} = F(x,y)$ . Далее, полученная трехмерная зави-



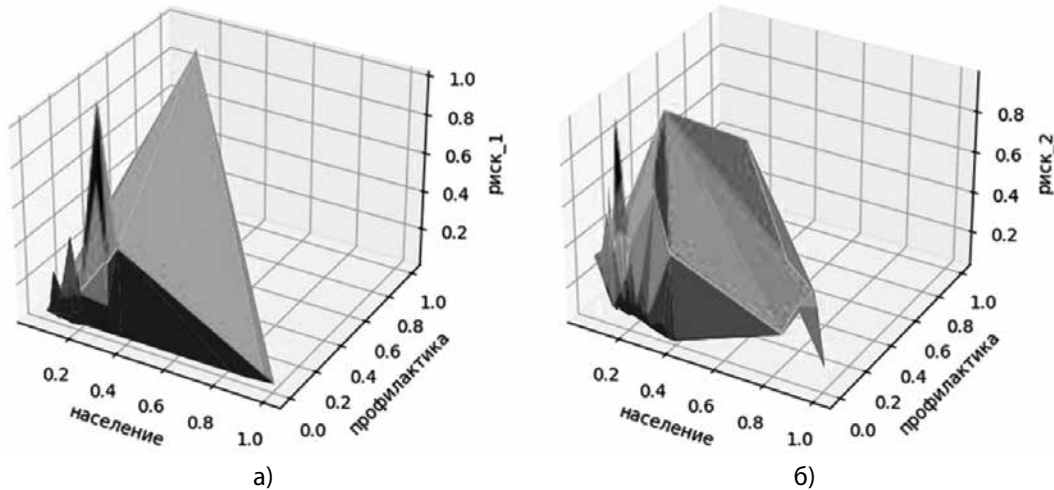


Рис. 3. Пожарные риски в зависимости от населения и удельной профилактики:  
а) пожары/население б) гибель/население

симость проектируется на плоскость  $(x,y)$  при условии  $R_{1,2} < R_{ном}$ , где  $R_{ном}$  — нормативный риск [16, 17]. Полученная эмпирическая зависимость аппроксимируется методом наименьших квадратов с определением доверительного интервала для коэффициентов аппроксимации и  $F$ -критерия. Она связывает нормированную профилактику с типом МО и численностью населения с учетом типа МО, при условии, что полученные риски меньше нормативных. Для анализируемых регионов риски в зависимости от населения и нормированной профилактики представлены на рис. 3. Поверхности восстановлены на основе нейросетевого моделирования.

Оптимальная профилактика показана на рис. 4. Сводные данные и уравнения регрессии представлены в таблице 4.

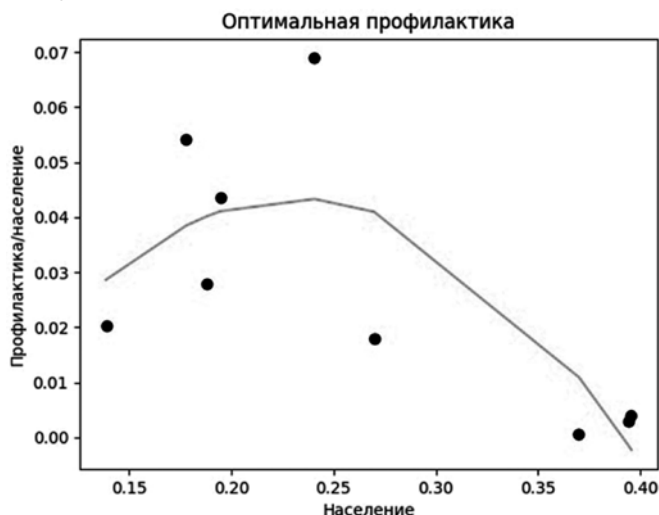


Рис. 4. Оптимальная профилактика в зависимости от населения. Нормативный риск  $R_{ном}=0.1$  от максимального значения на обучающем наборе

Таблица 4.

Оптимальная профилактика в зависимости от населения

Зависимость	F	Нормировки			
		Нас.	Проф./Нас.	Пож./Нас.	Гиб./Нас.
$y=(0.78+0.57)x - (1.70+1.02)x^2$	4.761	200000	1.351	0.022	0.00050

Указаны  $F$  — критерий и нормировки. Нормативный риск  $R_{ном}=0.1$ .

Уровень значимости коэффициентов регрессии 0.98.

### Обсуждение

Построение модели прогнозирования эффективности мер по предотвращению и тушению пожаров во Вьетнаме на основе многослойной нейронной сети [12] позволяет принимать решения, направленные на обеспечение пожарной безопасности в стране. В процессе исследования использовались методы анализа, синтеза, сравнения, математической статистики, а также методы искусственного интеллекта.

Значения эффективности прогнозирования и пожарных рисков установлены для провинций и городов Вьетнама. Эти показатели помогают строить модели для оптимального прогнозирования эффективности профилактических мер.

Использование методов многослойного обучения нейронных сетей для прогнозирования эффективности профилактических мер во Вьетнаме [13] демонстрирует результаты, которые будут применены в практике работы Главного Управления противопожарной службы Вьетнама для управления пожарными рисками и ресурсами, учитывая динамические и территориальные особенности пожарной опасности.

Результаты исследования свидетельствуют о возможности прогнозирования абсолютного значения эффективности профилактической работы на основе количественных и категориальных переменных. Относительно большая ошибка прогноза связана, с одной стороны, с необходимостью учета большего числа входных параметров, с другой стороны, с необходимостью увеличения объема данных для обучения нейронной сети. После доработки модели полученные результаты позволяют оценить эффективность профилактических мероприятий для провинций и городов Вьетнама [14].

### Заключение

1. Полученные результаты способствуют повышению эффективности принятия управленческих решений. Действительно, вводя в обученную сеть тип муниципального образования (МО), как с учетом деления на подклассы, так и без него, можно оценить попадание в тот или иной класс по эффективности профилактической работы в трехмерном пространстве выходных параметров (гибель/

профилактика, пожары/профилактика, гибель/население), либо в любых одномерных или двумерных сечениях этого пространства.

2. Разработана модель нейронной сети, оценивающая эффективность профилактических мероприятий в пространстве гибель — пожары — население в зависимости от типа и подкласса МО, как с точки зрения классификации прогнозов, так и прогнозов абсолютной эффективности профилактики. Надежность классификации в трехмерном выходном пространстве составляет 0.950 при агрегировании в два класса.
3. Величину абсолютной эффективности профилактических мероприятий можно предсказать, используя обученную многослойную нейронную сеть (НС) с тремя скрытыми слоями по 32, 16 и 8 нейронов соответственно. Увеличение числа слоев и количества нейронов в них не приводит к снижению относительной ошибки предсказания, которая составляет 0.404, 0.324 и 0.355 в сечениях гибель/профилактика, пожары/профилактика, гибель/население соответственно.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Отчёт Главного Статистического управления Вьетнама о социально-экономическом положении за 2010-2021 гг. Ханой, 2021. — 270 с.
2. Отчёт по противопожарной работе Главного Управления пожарной охраны и аварийно-спасательных служб МОБ Вьетнама за 2010-2021 гг. Ханой, 2022. — 125 с.
3. Дао А.Т. Анализ пожарной обстановки во Вьетнаме в 2001-2015 годах [Электронный ресурс] // Технологии техносферной безопасности [сайт]. 2016. Вып. № 5 (69). — 7с. Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-5/29-05-16.ttb.pdf> (дата обращения 10.05.2022).
4. Закона «О внесении изменений и дополнений в ряд статей Закона о пожарной безопасности» № 40 от 2013 г. Вьетнама, 2013. — 8 с.
5. Чупакова А.О., Гудин С.В. Проблемы управления пожарной безопасностью производственных объектов с использованием методов искусственного интеллекта [Электронный ресурс] // Технологии техносферной безопасности [сайт]. 2018. Вып. № 6 (82). — 7с. Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2018-6/03-06-18.ttb.pdf> (дата обращения 10.01.2024).
6. Топольский Н.Г., Бутузов С.Ю., Вилисов В.Я., Семиков В.Л. Нейросетевое моделирование эффективности реагирования на чрезвычайные ситуации в многоуровневой системе управления [Электронный ресурс] // Технологии техносферной безопасности [сайт]. 2021. Вып. № 2 (92). — 12с. Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2021-2/06-02-21.ttb.pdf> (дата обращения 10.01.2024).
7. Кадиев Ш.К., Хабибулин Р.Ш., Годлевский П.П., Семиков В.Л. Обзор исследований в области классификации для машинного обучения при разработке интеллектуальных систем поддержки принятия управленческих решений [Электронный ресурс] // Технологии техносферной безопасности [сайт]. 2020. Вып. № 3 (89). — 10с. Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2020-3/02-03-20.ttb.pdf> (дата обращения 10.01.2024).
8. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации (ППБ 01-03).
9. Рязанов В.А., Соболев Н.Н., Семиков В.Л., Попков С.Ю., Клепко Е.А., Присяжнюк Н.Л., Орлова О.Н., Измаилов Р.А.-Х., Ломаева Т.А., Сидоркин В.А., Морозов В.И. Организация и управление в области обеспечения пожарной безопасности. Учебное пособие / М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. 392 с.
10. Брушлинский Н.Н., Соколов С.В. Современные проблемы обеспечения пожарной безопасности в России. Монография. М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. 178 с.
11. Авдеенко А.М., Лахвицкий Г.Н., Нгуен Вьонг Ань, Сатин А.П., Бурлаченко К.Г. Некоторые особенности исследования многомерной базы пожаров с использованием инструментария кластерного анализа // Сборник материалов XVII Международная научно-практическая конференция «Пожарная и аварийная безопасность» Иваново, 2022 г. С. 4-8.
12. Нгуен Вьонг Ань, Авдеенко А.М. Реализации системы поддержки принятия решений на основе многослойных нейронных сетей обратного распространения // Сборник материалов XII Международной научно-практической конференции молодых учёных и специалистов «Проблемы техносферной безопасности — 2023». М.: Академия ГПС МЧС России, 2023. С. 159–163.
13. Нгуен Вьонг Ань. Методы искусственного интеллекта для прогнозирования эффективности профилактических мероприятий во Вьетнаме // Сборник материалов 32 Международной научно-практической конференции «Системы безопасности — 2023». М.: Академия ГПС МЧС России, 2023. С. 130–133.
14. Нгуен Вьонг Ань. Применение нейронных сетей обратного распространения для прогнозирования эффективности профилактических мероприятий по предотвращению пожаров в Социалистической Республике Вьетнам // Сборник материалов XV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием «Робототехника и искусственный интеллект». М.: Сибирский федеральный университет, 2023. С. 109–113.
15. Чьонг, В.Х. Оценка пожарной опасности административно-территориальных единиц Вьетнама / В.Х. Чьонг, Н.Л. Присяжнюк // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2022. — № 3. — С. 90–98. — DOI 10.25257/FE.2022.3.90-98. — EDN BMTWCT.
16. Куватов В.И., Колеров Д.А. Алгоритм интеллектуальной поддержки принятия решений при прогнозировании ущерба от пожаров // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». — 2022. — № 3. — С. 119–127.
17. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Учеб. пособие для вузов. М., «Высшая школа», 1977.

© Нгуен Вьонг Ань (vuonganh2709@gmail.com)

Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»