

В. А. МИНАЕВ, д-р техн. наук, профессор, заслуженный работник высшей школы РФ, ведущий научный сотрудник Учебно-научного центра "Безопасность", МГТУ им. Н. Э. Баумана (Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1; e-mail: m1va@yandex.ru)

Н. Г. ТОПОЛЬСКИЙ, д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры информационных технологий, Академия ГПС МЧС России (Россия, 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина, 4; e-mail: ntopolskii@mail.ru)

Б. Н. КОРОБЕЦ, д-р техн. наук, доцент, проректор МГТУ им. Н. Э. Баумана (Россия, 105005, г. Москва, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1; e-mail: korobetz@mail.ru)

ДАО АНЬ ТУАН, заместитель начальника кафедры пожарной тактики, Институт пожарной безопасности Министерства общественной безопасности Социалистической Республики Вьетнам (Вьетнам, 100000, г. Ханой, р-н Тхань Суан, ул. Хуат Зую Тьен, 243; e-mail: tuan_pccc@yahoo.com)

УДК 004.02+614.8

МОДЕЛИ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КАДРОВЫХ РЕСУРСОВ ПРОТИВОПОЖАРНОЙ СЛУЖБЫ НА ОСНОВЕ ТИПОЛОГИЗАЦИИ ТЕРРИТОРИЙ ПО ПОЖАРНЫМ РИСКАМ

Рассматривается решение взаимосвязанных задач: оценка интегральных пожарных рисков; типологизация территорий по состоянию пожарной обстановки на основе кластерного анализа; оптимальное распределение кадровых ресурсов противопожарной службы по территориальным кластерам, которое базируется на принципах теории активных систем. Исследование проведено на материалах Вьетнама. При решении задачи типологизации учтен комплекс факторов, отражающих экономические, социальные, демографические, климатические показатели, а также показатели, учитывающие процессы урбанизации, электрификации, развития торговли и транспорта, обеспеченность противопожарных служб персоналом и техническими средствами, характеристики пожаров и борьбы с пожарами. Задача типологизации провинций Вьетнама по характеристикам пожарной опасности решалась с помощью статистического программного пакета Statistica 12. Исследованы удельные показатели деятельности противопожарной службы в зависимости от реальной нагрузки на пожарных. Сформирован комплексный удельный показатель, который учитывает число как погибших, так и травмированных на пожарах и на основе которого построена целевая функция территориальных противопожарных служб и системная целевая функция, отражающие эффективность использования кадровых ресурсов. Найдены аналитические зависимости для оптимального распределения кадровых ресурсов по кластерам.

Ключевые слова: управление; кадровые ресурсы; противопожарная служба; моделирование; оптимизация; типологизация; кластерный анализ; пожарный риск.

DOI: 10.18322/PVB.2018.27.06.18-30

Введение

Настоящая работа посвящена решению актуальных задач управления ресурсами противопожарной службы на основе комплекса современных математических методов и моделей. Базовыми при этом выступают модели теории активных систем и современные методы типологического анализа территорий. Обращение именно к такому сочетанию современных количественных инструментов анализа, прогнозирования и управления связано с новыми явлениями в развитии пожарной обстановки, возникновением новых и обострением существующих

пожарных рисков, особенно в быстроразвивающихся странах, к которым относится Социалистическая Республика Вьетнам (СРВ) [1, 2]. На материалах применительно к этой стране решена триединая задача управления ресурсами противопожарной службы, включающая:

- оценку территориальных различий пожарных рисков;
- типологизацию территорий по состоянию пожарных рисков на основе кластерного анализа;
- разработку модели оптимального распределения кадровых ресурсов противопожарной службы по территориальным кластерам.

Выбор материалов и страны исследования продиктован следующими обстоятельствами:

- во-первых, с начала XXI века во Вьетнаме наблюдается стабильно высокий экономический рост (ежегодно около 7–9 %), связанный с увеличением энергопотребления и скорости урбанизации территорий, ростом количества и масштабов промышленных площадок, зон переработки товаров и торговых центров [3];
- во-вторых, стремительное развитие экономики сопровождается негативными явлениями, в числе которых следует назвать рост числа пожаров на предприятиях, в учреждениях и жилом секторе страны. Так, в период 2001–2017 гг. во Вьетнаме произошло почти 38 тысяч пожаров, погибли 1216 и травмированы 3049 человек; материальные потери от пожаров достигли около 650 млн. долл., а косвенные потери превысили прямой ущерб в 5–6 раз [4].

Очевидно, что в современных условиях важнейшими задачами Главного управления пожарной охраны и аварийно-спасательной службы СРВ (ГУПО и АСС СРВ) является сокращение количества пожаров и ущерба от них за счет применения новых организационно-технических и информационно-технологических решений, новейших технологий профилактики пожаров и их тушения, управления пожарными рисками, включая использование современных математических моделей, методов и механизмов управления ресурсами противопожарной службы [5].

Методология оценки пожарных рисков и типологизации территорий

Методологической основой оценки пожарных рисков является теория интегральных пожарных рисков, интенсивно развивающаяся в последнее время [6–8].

Применительно к Вьетнаму наблюдается проявление следующих ситуаций, приводящих к возникновению пожаров в промышленных зонах и в определенной степени — в жилом секторе: нарушения технологии производства; ненадлежащее техническое обслуживание оборудования (в том числе противопожарного) и хозяйственных помещений; нарушения при сварочных и резочных работах; неисправное или неправильно работающее электрооборудование; нарушения в хранении упаковочных материалов, в том числе скопление чрезмерных запасов бумаги в производственных помещениях; ненадлежащее хранение и применение горючих жидкостей и/или газов; недостаточный контроль за пожарной безопасностью на рабочих местах и торговых площадях; недостаточное обеспечение пожарной безопасности в местах курения; излишнее накопле-

ние горючих отходов и ненадлежащий контроль за хранением веществ повышенной пожарной опасности; отсутствие противопожарных перекрытий и перегородок между производственными помещениями; повышенная горючесть стеновых и потолочных облицовочных материалов; плохое состояние оборудования, предназначенного для обнаружения пожара, автоматического пожаротушения и обеспечения пожарной вентиляции; неопытность и неумелые действия пожарной охраны.

Стремительные социально-экономические изменения во Вьетнаме значительно повлияли на пожарную обстановку, для которой стало характерным распространение техногенных пожаров. Наблюдаемое в последнее десятилетие перемещение населения из сельской местности в городские районы, отход от традиционного землепользования в сельской среде, увеличение масштабов рекреационного использования лесных массивов, несовершенство системы управления лесным хозяйством стали ключевыми факторами, обуславливающими повышение пожарных рисков.

При анализе пожарной обстановки во Вьетнаме применялись следующие показатели интегральных пожарных рисков [7, 8]: R_1 — риск для человека оказаться в условиях пожара в единицу времени; R_2 — риск для человека погибнуть при пожаре (оказаться его жертвой); R_3 — риск для человека погибнуть от пожара за единицу времени. Риск R_1 характеризует возможность реализации пожарной опасности, а риски R_2 и R_3 — последствия этой реализации.

Результаты исследования пожарной обстановки и оценки основных пожарных рисков в округах Вьетнама представлены в таблице. Анализ данных таблицы показывает, что наименьшими являются пожарные риски R_1 в округах Дельта Хонгхи и Дельта Меконга, риски R_2 — в Центральном нагорье и Юго-Восточном округе, а риски R_3 — в Центральном нагорье. Указанные округа обозначены в таблице зеленым цветом.

Напротив, наиболее негативная пожарная обстановка по рискам R_1 отмечается в Северном Мидлендсе и горных провинциях, а также в Юго-Восточном округе, по рискам R_2 — в округах Дельта Хонгхи и Дельта Меконга, а по рискам R_3 — в округах Дельта Хонгхи, Дельта Меконга, Северном Мидлендсе и горных провинциях, где величина интегральных показателей рисков существенно превышает значения пожарных рисков в других округах СРВ. В таблице указанные округа выделены красным цветом.

Округа, характеризующиеся средними показателями по каждому из рисков, выделены в таблице желтым цветом.

Оценка пожарных рисков в округах Вьетнама / Fire risk assessment in the Vietnam's districts

Округ Вьетнама District of Vietnam	Численность населения, млн. чел. Population, million people	Доля в стране, % Country share, %	Число пожаров Number of fires	Доля в стране, % Country share, %	Число жертв пожаров Number of fires victims	Доля в стране, % Country share, %	$R_1 \cdot 10^5$	$R_2 \cdot 10^2$	$R_3 \cdot 10^7$
Дельта Хонгхи The Delta Honkhi	20,9	22,82	426	17,38	23	37,10	2,04	5,4	11
Северный Мидлендс и горные провинции The Northern Midlands and mountain provinces	11,8	12,87	429	17,50	8	12,90	3,63	1,87	6,8
Центральное побережье The Central coast	19,7	21,43	514	20,97	9	14,52	2,61	1,75	4,6
Центральное нагорье The Central highlands	5,6076	6,11	169	6,90	2	3,22	3,01	1,18	3,6
Юго-Восточный The South East	16,1295	17,59	611	24,93	7	11,29	3,79	1,15	4,3
Дельта Меконга The Mekong Delta	17,5897	19,18	302	12,32	13	20,97	1,72	4,3	7,4

Таким образом, по интегральным показателям пожарной обстановки на уровне округов состояние рискованного поля во Вьетнаме весьма неоднородно. Это свидетельствует о необходимости в целях повышения эффективности управления системой пожарной безопасности страны осуществить:

- уточнение и расширение спектра исследования конкретных детерминант пожарных рисков в каждом из округов страны;
- обоснование и поиск новых интегральных показателей риска;
- нахождение типологически более однородной картины в отношении пожарных рисков, включая (для более точной постановки и решения задач управления ресурсами службы пожарной безопасности страны) увеличение иерархии рассмотрения административных единиц территорий до уровня провинций.



Рис. 1. Факторный комплекс детерминации пожаров во Вьетнаме / Fig. 1. Factor complex of fire determination in Vietnam

Рассмотрим постановку задачи типологизации провинций Вьетнама по характеристикам пожарной опасности.

Пусть X — множество территорий (провинций) Вьетнама, Y — множество кластеров. Задана функция расстояния между территориями $\rho(x_i, x_j)$, где i, j — индексы территорий; $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, n$; n — количество территорий $X = \{x_i\}$.

Требуется разбить множество территорий X на непересекающиеся подмножества $Y^1 \cup Y^2 \cup \dots \cup Y^M$, называемые *кластерами* Y^m ($m = 1, \dots, M$), таким образом, чтобы каждый кластер состоял из объектов, близких по метрике Γ , а объекты разных кластеров существенно отличались по той же метрике. При этом каждому объекту $x_i \in X$ приписывается еще и номер кластера x_{im} , $m = 1, \dots, M$.

В работе применялись равнозначные весовые коэффициенты по каждому из показателей p_{ij} , использованных при кластеризации, а их стандартизация осуществлялась по формуле

$$Z_{ij} = \frac{p_{ij} - \bar{p}_j}{\sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^J (p_{ij} - \bar{p}_j)^2}}, \quad (1)$$

где $i = 1, \dots, n$; $j = 1, \dots, J$;

J — общее количество показателей, включенных в кластеризацию;

$\bar{p}_j$ — среднее значение j -го показателя по стране.

Решение задачи типологизации территорий Вьетнама по состоянию пожарной обстановки опиралось на следующую схему (рис. 1), отражающую факторный комплекс детерминации пожаров в стране [9]. С помощью корреляционного анализа были устранены сильно связанные показатели (коэффициент корреляции в абсолютном выражении был принят не менее 0,85). Конкретные показатели, отражающие пожарные риски в жилом секторе и секторе хозяйствующих субъектов, различаются, пересекаясь лишь в некоторой своей части. Рассмотрена динамика показателей по каждой провинции Вьетнама с 2006 по 2016 годы, а также их усредненный показатель за тот же период. Применительно к жилому сектору при решении задачи типологизации рассматривалась матрица размером в 63 провинции и 21 показатель; применительно к сектору хозяйствующих субъектов — матрица размером в 63 провинции и 14 показателей.

Общий алгоритм решения задачи типологизации состоял из девяти последовательных этапов (рис. 2), каждый из которых связан с предыдущими этапами обратными связями, позволяющими на любом из них проводить корректировку алгоритма.

Кластеризация провинций Вьетнама осуществлялась с помощью статистического программного



Рис. 2. Алгоритм типологизации провинций Вьетнама по комплексным характеристикам пожарной опасности

Fig. 2. Algorithm of the Vietnam's provinces typologization according to complex characteristics of fire danger

пакета Statistica 12. Затем с привлечением экспертов проводился анализ вариантов, среди которых выбирался тот, в котором выделенные кластеры отвечали трем условиям: компактности расположения на территории Вьетнама; схожести социально-экономических условий и состояния обстановки по линии противопожарных служб; схожести параметров их сил и средств.

Для исследования были взяты шесть включенных в указанный программный пакет вариантов метрик расстояния между кластерами: евклидово расстояние; квадрат евклидова расстояния; манхэттенское расстояние; расстояние Чебышева; расстояние Минковского; коэффициент корреляции Пирсона.

В качестве методов кластеризации применялись включенные в пакет иерархические (древовидные) процедуры кластерного анализа: правило одиночной



Fig. 3. Complex typologization of the Vietnam's provinces on fire danger

связи (ближайшего соседа); правило полных связей (наиболее удаленных соседей); правило невзвешенного попарного среднего; правило взвешенного попарного среднего; невзвешенный центроидный метод; взвешенный центроидный метод; правило Варда.

Выбор меры расстояния между кластерами и метода кластеризации провинций осуществлялся путем анализа всех вариантов, предусмотренных в пакете Statistica 12.

Экспертами было выбрано приведенное на рис. 3 распределение провинций Вьетнама по кластерам в результате решения задачи их совместной кластеризации по совокупности характеристик пожарной опасности сектора хозяйствующих субъектов и жилого сектора.

Результаты типологизации как задачи синтеза территорий Вьетнама в однородные группы по пожарной обстановке дали возможность более эффективно решать целый спектр частных задач, связанных с совершенствованием управления ресурсами противопожарной службы, организацией взаимодействия региональных оперативных служб, включая соседние округа, улучшением нормативно-правового обеспечения указанных служб, и другие важные задачи.

Методика и результаты оптимального распределения кадровых ресурсов

Эффективное решение задач управления ресурсами противопожарной службы связано с количественным исследованием зависимостей удельных показателей деятельности пожарной безопасности во времени и в территориальном аспекте [10].

Рассмотрим зависимость удельной нагрузки по числу погибших на пожарах (УНПП) d , удельной нагрузки по числу травмированных на пожарах (УНТП) w от удельной нагрузки по пожарам на одного пожарного (УНП) h на примере Вьетнама. На рис. 4 показаны эмпирические данные и теоретическое описание этой зависимости в период с 2006 по 2016 годы. Данная зависимость хорошо описывается следующей экспоненциальной кривой (объясняемость, равная квадрату корреляции R^2 , составляет 0,73):

$$d = 0,33 \exp(107,23h). \quad (2)$$

Примерно такой же объясняемостью (0,76) характеризуется зависимость удельного показателя по числу травмированных на пожарах от удельной нагрузки по пожарам, которая также описывается экспоненциальной кривой (рис. 5):

$$w = 0,31 \exp(90,3h). \quad (3)$$

На основе полученных закономерностей (2) и (3) сформирован комплексный удельный показатель s_i ,

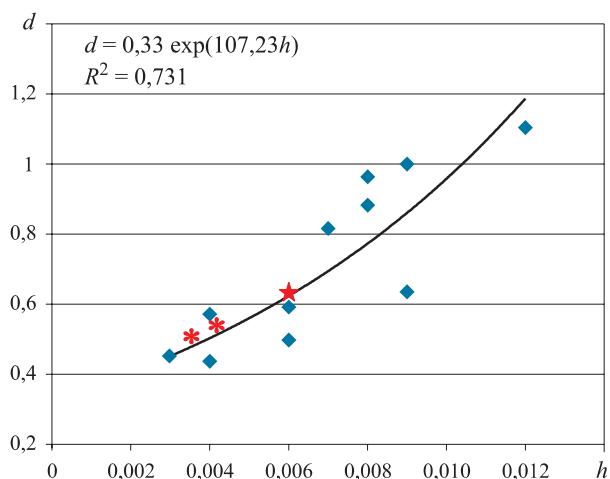


Рис. 4. Эмпирические данные (◆) и теоретическое описание (—) зависимости УНПП (d) от УНП (h) во Вьетнаме с 2006 по 2016 гг.: ★ — 2016 г.; * — прогноз на 2017–2018 гг.

Fig. 4. Empirical data (◆) and theoretical description (—) of the relation between the specific index for the number of people who died in fires (d) and SLP (h) in Vietnam from 2006 to 2016; ★ — 2016; * — forecast for 2017–2018

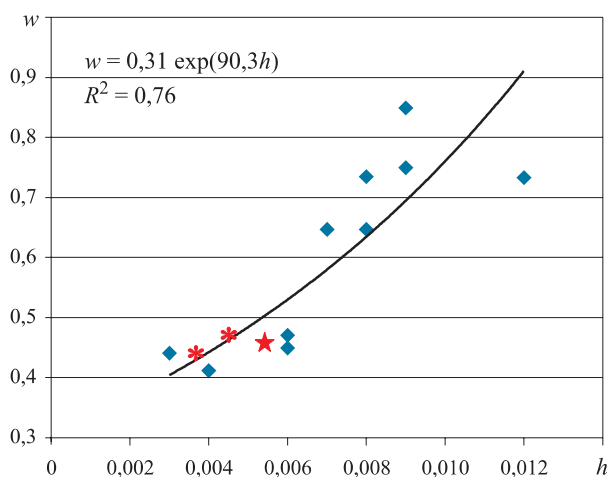


Рис. 5. Эмпирические данные (◆) и теоретическое описание (—) зависимости УНТП (w) от УНП (h) во Вьетнаме с 2006 по 2016 гг.: ★ — 2016 г.; * — прогноз на 2017–2018 гг.

Fig. 5. Empirical data (◆) and theoretical description (—) of the relation between the specific index on the number of injured in fires (w) and SLP (h) in Vietnam from 2006 to 2016; ★ — 2016; * — forecast for 2017–2018

учитывающий как погибших, так и травмированных на пожарах:

$$s_i = \alpha d_i + \beta w_i, \quad (4)$$

где i — номера точек наблюдения, годы; $i = 1, 2, \dots, I$;

I — общее число лет наблюдения;

α — вес удельного показателя d_i ;

β — вес удельного показателя w_i .

На сумму весовых коэффициентов налагается ограничение:

$$\alpha + \beta = 1. \quad (5)$$

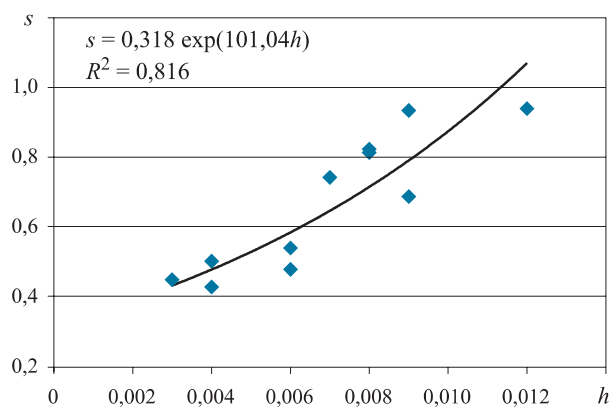


Рис. 6. Эмпирические данные (◆) и теоретическое описание (—) зависимости комплексного удельного показателя s от УНП во Вьетнаме в период 2006–2016 гг.

Fig. 6. Empirical data (◆) and theoretical description (—) of the relation between the complex specific indicator s and SLP in Vietnam from 2006 to 2016

Расчеты, проведенные на реальных исходных данных, показали, что наилучшей для Вьетнама является модель вида:

$$s = (0,555d + 0,445w) = 0,318 \exp(101,04h). \quad (6)$$

На рис. 6 приведены эмпирические данные и теоретическое описание зависимости комплексного удельного показателя s от УНП во Вьетнаме в период 2006–2016 гг. ($R^2 = 0,816$).

На основе найденной зависимости (6) решим задачу оптимального территориального распределения кадровых ресурсов противопожарной службы, занимающую важное место в общем спектре ее управленческих задач [10].

Пусть общая зависимость вектора выходных переменных $\vec{V}$ от вектора входных переменных и вектора кадровых ресурсов имеет вид:

$$\vec{V} = \vec{V}(\vec{R}, \vec{X}). \quad (7)$$

При этом выполняется условие:

$$\sum_{k=1}^K R_k = R_0, \quad (8)$$

где K — общее число территориальных кластеров с разной пожарной обстановкой, противопожарная служба которых подчинена единому государственному Центру [11, 12];

R_k — кадровый ресурс в k -м кластере,

$k = 1, 2, \dots, K$;

R_0 — общий кадровый ресурс во всех K кластерах.

Для построения критерия оптимальности распределения кадровых ресурсов противопожарной службы в территориальном аспекте введем целевую функцию φ_k , которая отражает эффективность использования кадрового ресурса противопожарной

службы. Применительно к k -му кластеру Вьетнама запишем ее в следующем виде:

$$\varphi_k = \varphi_k(F_k, R_k, \bar{\gamma}_k), \quad (9)$$

где F_k — число пожаров в k -м территориальном кластере;

R_k — количество пожарных в k -м кластере;

$\bar{\gamma}_k$ — вектор параметров целевой функции в k -м кластере.

В приложениях теории активных систем [13] принято предполагать, что целевая функция (8) монотонно возрастает в области $0 < R_k < \infty$:

$$\varphi_k(F_k, \infty, \bar{\gamma}_k) = A_k = \text{const} \quad (10)$$

и ограничена сверху.

Целевая функция общей системы противопожарной службы Вьетнама $\Phi_{\text{ц}}$ определяется целевыми функциями ее подразделений в кластерах и представляется в виде их суммы:

$$\Phi_{\text{ц}} = \sum_{k=1}^{k=K} \varphi_k. \quad (11)$$

Центр, располагая ограниченными ресурсами, стремится достичь некоторого оптимального значения своей системной цели (общей целевой функции) путем выбора такого распределения кадровых ресурсов, которое бы стимулировало территориальные противопожарные службы к совершенствованию форм и методов оперативно-служебной деятельности при тушении пожаров, интенсификации использования наличных ресурсов.

Задача распределения кадровых ресурсов при известной зависимости $\varphi_k(F_k, R_k, \bar{\gamma}_k)$ и известных параметрах γ_k ставится как следующая задача оптимизации:

$$\Phi_{\text{ц}} = \sum_{k=1}^{k=K} \varphi_k(F_k, R_k, \bar{\gamma}_k) \rightarrow \max(\bar{R}) \quad (12)$$

при ограничении на количество кадровых ресурсов, которыми располагает Центр:

$$\sum_{k=1}^{k=K} R_k = R. \quad (13)$$

Рассмотрим для формирования целевой функции аналитическую зависимость (6), отражающую связь удельной нагрузки по пожарам с комплексным удельным показателем по взвешенному числу погибших и травмированных на пожарах:

$$s_k = 0,318 \exp(101,04h_k), \quad (14)$$

где h_k — количество пожаров, приходящееся на одного пожарного в k -м кластере.

Задача оптимального распределения кадровых ресурсов по кластерам ставится так, чтобы минимизировать сумму величин из формулы (14) по всем кла-

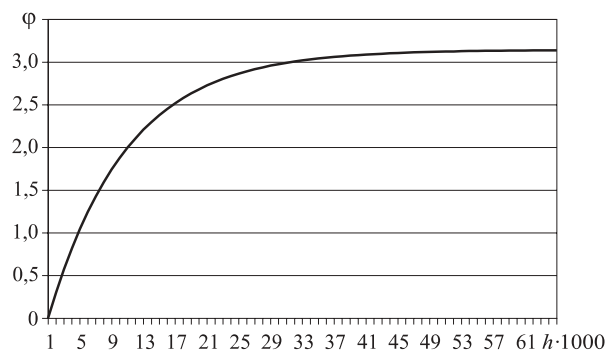


Рис. 7. Зависимость целевой функции от комплексного удельного показателя

Fig. 7. Dependence of the target function on the complex specific index

стерам $k = 1, \dots, K$ либо максимизировать сумму обратных величин:

$$1/s_k = 3,145 \exp(-101,04h_k). \quad (15)$$

Далее определим целевую функцию:

$$\begin{aligned} \varphi_k &= 3,145 [1 - \exp(-101,04h_k)] \approx \\ &\approx 3,2 [1 - \exp(-100h_k)], \end{aligned} \quad (16)$$

которая имеет следующий графический вид (рис. 7).

Функция (16) является монотонно возрастающей, и при $h_k \rightarrow \infty$ $\varphi_k \rightarrow 3,2$.

В целях получения аналитических зависимостей для оптимального распределения кадровых ресурсов упростим выражение (16), разложив экспоненту в ряд Макларена. Тогда:

$$\varphi_k = 160(2h_k - 10^2 h_k^2 + \dots), \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (17)$$

Целевая функция Центра в этом случае представляется в виде:

$$\Phi_{\text{ц}} \approx \sum_{k=1}^{k=K} 320h_k(1 - 50h_k). \quad (18)$$

Таким образом, задача оптимального распределения кадровых ресурсов между K кластерами ставится в виде:

$$\Phi_{\text{ц}} \vec{R} \rightarrow \min; \quad (19)$$

$$\sum_{k=1}^{k=K} R_k = R. \quad (20)$$

Задача (19)–(20) решена методом Лагранжа. Функция Лагранжа записывается в виде:

$$\begin{aligned} L(\Phi_{\text{ц}}) &= \sum_{k=1}^{k=K} [320h_k(1 - 50h_k)] - \\ &- \lambda \left(\sum_{k=1}^{k=K} R_k - R \right), \end{aligned} \quad (21)$$

где λ — множитель Лагранжа.

Условный экстремум выражения (21) находится из соотношений:

$$\frac{\partial L(\vec{R}, \vec{\lambda})}{\partial R_k} = \frac{\partial L(\vec{R}, \vec{\lambda})}{\partial \lambda} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (22)$$

Подставляя выражение для $h_k = F_k/R_k$, имеем:

$$\frac{\partial L}{\partial R_k} = -320 \frac{F_k}{R_k^2} + 3 \cdot 320 \cdot 50 \frac{F_k^2}{R_k^3} - \lambda = 0; \quad (23)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{k=1}^{k=K} R_k - R = 0. \quad (24)$$

Решая кубическое нормированное уравнение (23) относительно R_k

$$R_k^3 + 320 \frac{F_k}{\lambda} R_k - 150 \frac{320}{\lambda} F_k^2 = 0, \quad (25)$$

находим единственный вещественный корень с помощью формулы Кардано:

$$\begin{aligned} R_k &= \sqrt[3]{\frac{150 \cdot 160}{\lambda} F_k^2 + \frac{320}{\lambda} F_k \sqrt{\frac{320 F_k}{27\lambda} + \left(\frac{150 F_k}{2}\right)^2}} + \\ &+ \sqrt[3]{\frac{150 \cdot 160}{\lambda} F_k^2 + \frac{320}{\lambda} F_k \sqrt{\frac{320 F_k}{27\lambda} + \left(\frac{150 F_k}{2}\right)^2}}. \end{aligned} \quad (26)$$

С учетом того что первый член в корнях квадратных выражения (26) пренебрежимо мал по сравнению со вторым, оптимальное решение представляется в виде:

$$R_{k(\text{опт})} = R \frac{\sqrt[3]{F_k^2}}{\sum_{k=1}^{k=K} \sqrt[3]{F_k^2}}, \quad k = 1, 2, \dots, K. \quad (27)$$

Вычислительные эксперименты показали, что использование методики оптимального распределения кадровых ресурсов в соответствии с (27) позволило бы сократить комплексный удельный показатель примерно на 10–12 % по сравнению с реально существующей ситуацией их распределения по кластерам.

Выводы

1. Территории Вьетнама (провинции и города республиканского подчинения) из шести округов страны в результате решения задачи кластерного анализа распределились по пяти кластерам, достаточно однородным по пожарной обстановке. Распределение по кластерам представляется логичным, достаточно хорошо интерпретируемым и компактным.

2. Полученная типология провинций Вьетнама должна быть положена в основу определения стратегии территориального управления ресурсами

противопожарной службы, прогнозирования перспектив ее кластерного развития, решения основных региональных задач служебно-боевой деятельности пожарных подразделений.

3. Одно из центральных мест среди задач, связанных с управлением противопожарной службой Вьетнама, занимает задача их оптимального обеспечения кадровыми ресурсами. Весьма конструктивным для решения названной задачи является представление процесса оперативно-служебной деятельности кадровых подсистем противопожарной службы в кластерах в терминах “вход – ресурсы – выход” и формальное описание ее “оперативно-служебной технологии”.

4. Вычислительные эксперименты показали, что использование методики оптимального распределения кадровых ресурсов позволило бы сокра-

тить удельный комплексный показатель числа погибших и травмированных на пожарах примерно на 10–12 % по сравнению с реальной ситуацией их распределения по кластерам Вьетнама.

5. Полученные результаты имеют перспективы своего развития, связанные с детализацией пожарных рисков и ресурсов противопожарной службы по провинциям Вьетнама, моделированием иерархии ее управленческой структуры, учетом дополнительных факторов, определяющих пожарную обстановку в кластерах, а также учетом более сложных взаимодействий комплекса “пожарные риски – пожары – ресурсы противопожарной службы” в математических моделях анализа, прогнозирования и оптимального управления, активно развиваемых как в России, так и за рубежом [14–33].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Негреева В. В., Чан Тхань Туан. Экономическое развитие Вьетнама // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия: Экономика и экологический менеджмент. — 2017. — № 1. — С. 15–20. DOI: 10.17586/2310-1172-2017-10-1-15-20.
2. Нгок Чан Тхи Бич. Инновационные проблемы в экономике Вьетнама // Вестник Международной академии системных исследований. Информатика, экология, экономика. — 2012. — Т. 14, № 2. — С. 11–16.
3. Дао Ань Туан. Анализ пожарной обстановки во Вьетнаме в 2001–2015 годах // Технологии техносферной безопасности. — 2016. — № 5(69). — С. 24–30. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-5/29-05-16.ttb.pdf> (дата обращения: 27.04.2018).
4. Минаев В. А., Топольский Н. Г., Дао Ань Туан. Типологизация провинций Вьетнама по характеристикам пожарной опасности // Пожары и чрезвычайные ситуации : предотвращение, ликвидация. — 2018. — Вып. 1. — С. 72–76. DOI: 10.25257/FE.2018.1.72-76.
5. Минаев В. А., Топольский Н. Г., Чу Куок Минь. Оптимальное территориальное распределение кадровых ресурсов противопожарной службы Вьетнама // Технологии техносферной безопасности. — 2015. — № 3(61). — С. 19–27. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_25101385_71628854.pdf (дата обращения: 27.04.2018).
6. Benichou N., Kashef A. H., Reid I., Hadjisophocleous G. V., Torvi D. A., Morinville G. FIERASystem: a fire risk assessment tool to evaluate fire safety in industrial buildings and large spaces // Journal of Fire Protection Engineering. — 2005. — Vol. 15, No. 3. — P. 145–172. DOI: 10.1177/1042391505049437.
7. Пожарные риски. Вып. 4. Управление пожарными рисками / Под ред. Н. Н. Брушлинского, Ю. Н. Шебеко. — М. : ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2006. — 148 с.
8. Брушлинский Н. Н., Клепко Е. А. К вопросу о локальных и интегральных рисках // Вестник Академии Государственной противопожарной службы МЧС России. — 2007. — № 6. — С. 93–96.
9. Минаев В. А., Топольский Н. Г., Дао Ань Туан. Информационное обеспечение задачи типологизации территорий Вьетнама по пожарной обстановке // Технологии техносферной безопасности. — 2017. — № 1(71). — С. 17–26. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-1/41-01-17.ttb.pdf> (дата обращения: 27.04.2018).
10. Чу Куок Минь. Управление пожарными рисками на основе методов и моделей теории активных систем : дис. ... канд. техн. наук. — М., 2015. — 215 с.
11. Бурков В. Н., Кондратьев В. В. Механизмы функционирования организационных систем. — М. : Наука, 1981. — 384 с.
12. Кондратьева Т. В., Константинова Н. В. Учет активности человека в организационных системах // Механизмы функционирования организационных систем. Теория и приложения : сб. тр. — М. : Институт проблем управления АН СССР, 1982. — Вып. 29. — С. 98–103.
13. Бурков В. Н., Новиков Д. А. Теория активных систем: состояние и перспективы. — М. : Синтег, 1999. — 128 с.

14. Минаев В. А., Топольский Н. Г., Симаков В. В., Тетерин И. М., Дао Ань Туан. Результаты типологизации территорий Вьетнама по характеристикам пожарной обстановки // Технологии технологической безопасности. — 2017. — № 4(74). — С. 16–26. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-4/05-04-17.ttb.pdf> (дата обращения: 27.04.2018).
15. Beck V. R., Yung D. The development of a risk-cost assessment model for the evaluation of fire safety in buildings // Fire Safety Science. — 1994. — Vol. 4. — P. 817–828. DOI: 10.3801/iafss.fss.4-817.
16. Beck V. R., Yung D. T., He Y., Sumathipala K. Experimental validation of a fire growth model // Interflam'96 : 7th International Fire Science and Engineering Conference (Cambridge, England, 26 March 1996) / Franks C. (ed.). — London : Interscience Communications, Ltd., 1996. — P. 653–662.
17. Chuzel D., Sarrat P. Methode ERIC. Evaluation du risque incendie par le calcul // Proceedings of CIB Symposium on Systems Approach to Fire Safety in Buildings. — 1979. — Vol. I. — P. II-37–II-58.
18. Chu G., Sun J. Decision analysis on fire safety design based on evaluating building fire risk to life // Safety Science. — 2008. — Vol. 46, Issue 7. — P. 1125–1136. DOI: 10.1016/j.ssci.2007.06.011.
19. Hall J. R. Overview of standards for fire risk assessment // Fire Science and Technology. — 2006. — Vol. 25, No. 2. — P. 55–61. DOI: 10.3210/fst.25.55.
20. Hall J. R., Watts J. M. Fire risk analysis // Fire Protection Handbook / Cote A. E. (ed.). — 20th ed. — Quincy, Massachusetts : National Fire Protection Association (NFPA), 2008. — Ch. 8. — P. 135–143.
21. Hasofer A. M., Beck V. R., Bennetts I. D. Risk analysis in building fire safety engineering. — Burlington : Butterworth-Heinemann, 2007. — 189 p.
22. Hurley M. J., Bukowski R. W. Fire hazard analysis techniques // Fire Protection Handbook / Cote A. E. (ed.). — 20th ed. — Quincy, Massachusetts : National Fire Protection Association (NFPA), 2008. — Ch. 7. — P. 3-121–3-134.
23. Kaiser J. Experiences of the Gretener method // Fire Safety Journal. — 1979/80. — Vol. 2, Issue 3. — P. 213–222. DOI: 10.1016/0379-7112(79)90021-3.
24. Kumamoto H. Satisfying safety goals by probabilistic risk assessment. — Berlin : Springer, 2007. — 253 p. DOI: 10.1007/978-1-84628-682-7.
25. Meacham B. J. Understanding risk: quantification, perceptions, and characterization // Journal of Fire Protection Engineering. — 2004. — Vol. 14, Issue 3. — P. 199–227. DOI: 10.1177/1042391504042454.
26. Minaev V. A., Topolsky N. G., Đào Anh Tuấn. Phân kiểu lãnh thổ Việt Nam theo đặc điểm nguy hiểm cháy theo phương pháp phân cụm thứ bậc // Tạp chí “Phòng cháy và chữa cháy”. — Bộ Công an, Việt Nam. — 2017. — No. 96. — P. 30–33 (in Vietnamese).
27. Minaev V. A., Topolsky N. G., Đào Anh Tuấn. Phân tích kết quả phân kiểu lãnh thổ Việt Nam theo đặc điểm nguy hiểm cháy // Tạp chí “Phòng cháy và chữa cháy”. — Bộ Công an, Việt Nam. — 2017. — No. 97. — P. 28–31 (in Vietnamese).
28. Minaev V. A., Topolsky N. G., Đào Anh Tuấn. Thống kê, tính toán và đánh giá rủi ro cháy ở Việt Nam // Tạp chí “Phòng cháy và chữa cháy”. — Bộ Công an, Việt Nam. — 2016. — No. 89. — P. 28–30 (in Vietnamese).
29. Nystedt F. A. Quantified fire risk design method // Journal of Fire Protection Engineering. — 2001. — No. 10. — P. 41–45.
30. Rasbash D., Ramachandran G., Kandola B., Watts J., Law M. Evaluation of fire safety. — N. Y. : John Wiley & Sons, Ltd., 2004. — 479 p. DOI: 10.1002/0470020083.
31. Wolski A. The importance of risk perceptions in building and fire safety codes // Journal of Fire Protection Engineering. — 2001. — No. 10. — P. 27–33.
32. Yung D., Hadjisophocleous G. V., Proulx G. A Description of the Probabilistic and Deterministic Modeling Used in FiRECAMTM // International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes. — 1999. — Vol. 1, No. 1. — P. 18–26.
33. Yung D. Principles of fire risk assessment in buildings. — N. Y. : John Wiley & Sons, Ltd., 2008. — 227 p. DOI: 10.1002/9780470714065.

Материал поступил в редакцию 5 мая 2018 г.

Для цитирования: Минаев В. А., Топольский Н. Г., Коробец Б. Н., Дао Ань Туан. Модели оптимального распределения кадровых ресурсов противопожарной службы на основе типологизации территорий по пожарным рискам // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. — 2018. — Т. 27, № 6. — С. 18–30. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.06.18-30.

MODELS OF OPTIMAL ALLOCATION OF FIRE SERVICE HUMAN RESOURCES ON THE BASIS OF TERRITORIES FIRE RISKS TYPOLOGY

MINAEV V. A., Doctor of Technical Sciences, Professor, Honoured Worker of Higher School of Russian Federation, Leading Researcher of Educational and Scientific Center "Security", Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya St., 5/1, Moscow, 105005, Russian Federation; e-mail: m1va@yandex.ru)

TOPOLSKIY N. G., Doctor of Technical Sciences, Professor, Honoured Scientist of Russian Federation, Professor of Information Technologies Department, State Fire Academy of Emercom of Russia (Borisa Galushkina St., 4, Moscow, 129366, Russian Federation; e-mail: ntopolskii@mail.ru)

KOROBETS B. N., Doctor of Technical Sciences, Docent, Vice-Rector of Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya St., 5/1, Moscow, 105005, Russian Federation; e-mail: korobetz@mail.ru)

DAO ANH TUAN, Deputy Chief of the Fire Tactics Department, Fire Safety Institute of the Public Safety, Ministry of the Socialist Republic of Vietnam (Huat Zuyu Tyen St., 243, Tkhon Suan Area, Hanoi, 100000, Vietnam, e-mail: tuan_pccc@yahoo.com)

ABSTRACT

Introduction. The article is devoted to solving the interrelated problems of assessing the territorial situation of fires based on the approaches of the integral fire risks theory, the typology of territories on fire situation based on cluster analysis, the optimal distribution of human resources of the fire service in territorial clusters. The optimal distribution is based on the principles of the active systems theory.

Methods. The study was conducted on the materials of Vietnam as a rapidly developing country with a fire situation that is complicated over time and has significant territorial differences. When solving the problem of typology takes into account the complex of factors reflecting economic, social, demographic, climatic indicators as well as indicators that account for the processes of urbanization, electrification, the development of trade and transport, provision of fire services personnel and technical means, characteristics of fires and fire fighting. The problem of typologization of Vietnam's provinces on characteristics of fire danger is given and its solution with the help of statistical software package Statistica 12 is found. An algorithm for solving the problem of territories typology by complex characteristics of fire danger is presented.

Results. The selected clusters satisfy three conditions: compact location in Vietnam; similarity of socio-economic conditions and fire situation; similarity of their forces and means parameters. Specific performance indicators of fire service depending on the actual load on firefighter were investigated.

Discussion. The complex specific indicator is formed, taking into account both the dead and injured in fires, which explains 82 % of the statistical data. Based on this indicator the goal function of territorial fire services and system target function that reflect efficiency of use of human resources is offered. Analytical dependences for the optimal distribution of human resources in clusters are found.

Conclusions. Computational experiments have shown that the use of the human resources optimal allocation method developed in the article would reduce the complex specific indicator of the number of deaths and injuries in fires by about 10–12 % compared to the real situation.

Keywords: management; human resources; fire service; modeling; optimization; typology; cluster analysis; fire risk.

REFERENCES

1. Negreeva V. V., Tran Thanh Tuan. The economic development of Vietnam. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya: Ekonomika i ekologicheskiy menedzhment / Scientific Journal of National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (NRUITMO). Series: Economics and Environmental Management*, 2017, no. 1, pp. 15–20 (in Russian). DOI: 10.17586/2310-1172-2017-10-1-15-20.

2. Ngoc Tran Thi Bich. Innovative problems in Vietnam's economy. *Vestnik Mezhdunarodnoy akademii sistemnykh issledovaniy. Informatika, ekologiya, ekonomika / Bulletin of International Academy of System Studies. Computer Science, Ecology, Economics*, 2012, vol. 14, no 2, pp. 11–16 (in Russian).
3. Dao Anh Tuan. Analysis of fire incidents in Vietnam in period 2001–2015. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2016, no. 5(69), pp. 24–30 (in Russian). Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2016-5/29-05-16.ttb.pdf> (Accessed 27 April 2018).
4. Minaev V. A., Topolsky N. G., Dao Anh Tuan. Classification of provinces in Vietnam on fire hazard characteristics. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya / Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, 2018, issue 1, pp. 72–76 (in Russian). DOI: 10.25257/FE.2018.1.72-76.
5. Minaev V. A., Topolsky N. G., Chu Quoc Minh. Optimal territorial distribution of Vietnam fire service staff resources. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2015, no. 3(61), pp. 19–27 (in Russian). Available at: https://elibrary.ru/download/elibrary_25101385_71628854.pdf (Accessed 27 April 2018).
6. Benichou N., Kashef A. H., Reid I., Hadjisophocleous G. V., Torvi D. A., Morinville G. FIERA system: a fire risk assessment tool to evaluate fire safety in industrial buildings and large spaces. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2005, vol. 15, no. 3, pp. 145–172. DOI: 10.1177/1042391505049437.
7. Brushlinskiy N. N., Shebeko Yu. N. (eds.). *Pozharnyye riski. Vypusk. 4. Upravleniye pozharnymi riskami* [Fire Risks. Issue 4. Fire Risk Management]. Moscow, VNIPO of Emercom of Russia Publ., 2006. 148 p. (in Russian).
8. Brushlinskiy N. N., Klepko E. A. To question of local and integral risks. *Vestnik Akademii Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii / Bulletin of the State Fire Academy of Emercom of Russia*, 2007, no. 6, pp. 93–96 (in Russian).
9. Minaev V. A., Topolsky N. G., Dao Anh Tuan. Information support of problem of Vietnam's territories fire situation typology. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti / Technology of Technosphere Safety*, 2017, no. 1(71), pp. 17–26 (in Russian). Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-1/41-01-17.ttb.pdf> (Accessed 27 April 2018).
10. Chu Quoc Minh. *Fire risk management based on methods and models of the theory of active systems*. Cand. tech. sci. diss. Moscow, 2015. 215 p. (in Russian).
11. Burkov V. N., Kondratiev V. V. *Mekhanizmy funktsionirovaniya organizatsionnykh sistem* [Mechanisms of organizational systems functioning]. Moscow, Nauka Publ., 1981. 384 p. (in Russian).
12. Kondratieva T. V., Konstantinova N. V. Accounting for activity of human in organizational systems. In: *Mekhanizmy funktsionirovaniya organizatsionnykh sistem. Teoriya i prilozheniya. Sbornik trudov* [Mechanisms of organizational systems functioning. Theory and applications. Collected papers]. Moscow, Institute of Control Sciences RAS Publ., 1982, issue 29, pp. 98–103 (in Russian).
13. Burkov V. N., Novikov D. A. *Teoriya aktivnykh sistem: sostoyaniye i perspektivy* [Theory of active systems: state and prospects]. Moscow, Sinteg Publ., 1999. 128 p. (in Russian).
14. Minaev V. A., Topolsky N. G., Simakov V. V., Teterin I. M., Dao Anh Tuan. Results of Vietnam's territories typology on fire situation characteristics. *Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti/Technology of Technosphere Safety*, 2017, no. 4(74), pp. 16–26 (in Russian). Available at: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2017-4/05-04-17.ttb.pdf> (Accessed 27 April 2018).
15. Beck V. R., Yung D. The development of a risk-cost assessment model for the evaluation of fire safety in buildings. *Fire Safety Science*, 1994, vol. 4, pp. 817–828. DOI: 10.3801/iafss.fss.4-817.
16. Beck V. R., Yung D. T., He Y., Sumathipala K. Experimental validation of a fire growth model. In: Franks C. (ed.). *Interflam '96. 7th International Fire Science and Engineering Conference* (Cambridge, England, 26 March 1996). London, Interscience Communications, Ltd., 1996, pp. 653–662.
17. Cluzel D., Sarraz P. Methode ERIC. Evaluation du risque incendie par le calcul. In: *Proceedings of CIB Symposium on Systems Approach to Fire Safety in Buildings*, 1979, vol. I, pp. II-37–II-58.
18. Chu G., Sun J. Decision analysis on fire safety design based on evaluating building fire risk to life. *Safety Science*, 2008, vol. 46, issue 7, pp. 1125–1136. DOI: 10.1016/j.ssci.2007.06.011.
19. Hall J. R. Overview of standards for fire risk assessment. *Fire Science and Technology*, 2006, vol. 25, no. 2, pp. 55–61. DOI: 10.3210/fst.25.55.
20. Hall J. R., Watts J. M. Fire Risk Analysis. In: Cote A. E. (ed.). *Fire Protection Handbook*. 20th ed. Quincy, Massachusetts, National Fire Protection Association (NFPA), 2008, ch. 8, pp. 135–143.
21. Hasofer A. M., Beck V. R., Bennetts I. D. *Risk analysis in building fire safety engineering*. Burlington, Butterworth-Heinemann, 2007. 189 p.

22. Hurley M. J., Bukowski R. W. Fire hazard analysis techniques. In: Cote A. E. (ed.). *Fire Protection Handbook*. 20th ed. Quincy, Massachusetts, National Fire Protection Association (NFPA), 2008, ch. 7, pp. 3-121–3-134.
23. Kaiser J. Experiences of the Gretener method. *Fire Safety Journal*, 1979/80, vol. 2, issue 3, pp. 213–222. DOI: 10.1016/0379-7112(79)90021-3.
24. Kumamoto H. *Satisfying safety goals by probabilistic risk assessment*. Berlin, Springer, 2007. 253 p. DOI: 10.1007/978-1-84628-682-7.
25. Meacham B. J. Understanding risk: quantification, perceptions, and characterization. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2004, vol. 14, issue 3, pp. 199–227. DOI: 10.1177/1042391504042454.
26. Minaev V.A., Topolsky N.G., Đào Anh Tuấn. Phân kiểu lãnh thổ Việt Nam theo đặc điểm nguy hiểm cháy theo phương pháp phân cụm thứ bậc. *Tạp chí “Phòng cháy và chữa cháy”*, Bộ Công an, Việt Nam, 2017, no. 96, pp. 30–33 (in Vietnamese).
27. Minaev V.A., Topolsky N.G., Đào Anh Tuấn. Phân tích kết quả phân kiểu lãnh thổ Việt Nam theo đặc điểm nguy hiểm cháy. *Tạp chí “Phòng cháy và chữa cháy”*, Bộ Công an, Việt Nam, 2017, no. 97, pp. 28–31 (in Vietnamese).
28. Minaev V.A., Topolsky N.G., Đào Anh Tuấn. Thống kê, tính toán và đánh giá rủi ro cháy ở Việt Nam. *Tạp chí “Phòng cháy và chữa cháy”*, Bộ Công an, Việt Nam, 2016, no. 89, pp. 28–30 (in Vietnamese).
29. Nystedt F. A. Quantified fire risk design method. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2001, no. 10, pp. 41–45.
30. Rasbash D., Ramachandran G., Kandola B., Watts J., Law M. *Evaluation of fire safety*. N. Y., John Wiley & Sons, Ltd., 2004. 479 p. DOI: 10.1002/0470020083.
31. Wolski A. The importance of risk perceptions in building and fire safety codes. *Journal of Fire Protection Engineering*, 2001, no. 10, pp. 27–33.
32. Yung D., Hadjisophocleous G. V., Proulx G. A Description of the Probabilistic and Deterministic Modeling Used in FIRECAMTM. *International Journal on Engineering Performance-Based Fire Codes*, 1999, vol. 1, no. 1, pp. 18–26.
33. Yung D. *Principles of fire risk assessment in buildings*. N. Y., John Wiley & Sons, Ltd., 2008. 227 p. DOI: 10.1002/9780470714065.

For citations: Minaev V. A., Topolskiy N. G., Korobets B. N., Dao Anh Tuan. Models of optimal allocation of fire service human resources on the basis of territories fire risks typology. *Pozharovzryvo-bezopasnost / Fire and Explosion Safety*, 2018, vol. 27, no. 6, pp. 18–30 (in Russian). DOI: 10.18322/PVB.2018.27.06.18-30.