

УДК 623.746

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ГРУППИРОВКИ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПРИ ПРЕДУПРЕЖДЕНИИ И ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Логинов Валерий Викторович, Вишняков Александр Валерьевич,
Зубарев Игорь Александрович

Уральский институт ГПС МЧС России, Екатеринбург, Россия

АННОТАЦИЯ

В связи с широким внедрением в сферу деятельности различных министерств и ведомств практики применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА) возникают вопросы оценки эффективности этого применения. При ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС) для решения комплекса задач защиты населения и территорий возможно создание группировки БЛА разных типов под единым управлением. Для оценки эффективности ее применения необходимо рассмотреть практикуемые методы оценки, в частности вероятностный как наиболее очевидный и другие. В статье на их основе предложен методический подход к оценке рационального создания группировки БЛА по количеству и типу для эффективного решения задачи ликвидации ЧС. Проводится анализ имеющихся данных для оценки эффективности действий группы (группировки) БЛА исходя из технических возможностей отдельных образцов. Определяются основные направления нахождения значений вероятностей выполнения отдельных задач как основы оценки группировки в целом. Предлагается для анализа эффективности функция распределения стоящих перед группировкой задач по типам образцов. Методический аппарат решения задачи, основанный на методе максимального элемента, подкреплен примером. Учет конкретной обстановки в зоне действия группировки БЛА: предложено учитывать применением коэффициентов, полученных экспертными методами и привязанных к вероятностям выполнения задач отдельными образцами.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, группировка БЛА, оценка эффективности, вероятностные методы, метод максимального элемента

ASSESSING THE EFFECTIVENESS OF USING A GROUP OF UAVS IN EMERGENCY PREVENTION AND RESPONSE

Valery V. Loginov, Alexander V. Vishnyakov, Igor A. Zubarev

The Ural Institute of State Firefighting Service EMERCOM of Russia, Yekaterinburg, Russian Federation

ABSTRACT

In connection with the widespread introduction of the practice of using unmanned aerial vehicles (UAVs) into the activities of various ministries and departments, questions arise

about assessing the effectiveness of this application. When liquidating emergency situations (ES), to solve a complex of problems of protecting the population and territories, it is possible to create a group of UAVs of different types under a single control. To assess the effectiveness of its application, it is necessary to consider the practiced assessment methods, in particular probabilistic as the most obvious and others. Based on them, the article proposes a methodological approach to assessing the rational creation of a grouping of UAVs by number and type to effectively solve the problem of emergency response. An analysis of the available data is carried out to assess the effectiveness of the actions of a group (group) of UAVs, based on the technical capabilities of individual samples. The main directions for finding the probabilities of completing individual tasks are determined as the basis for assessing the grouping as a whole. For efficiency analysis, a function of distribution of tasks facing grouping according to sample types is proposed. The methodological apparatus for solving the problem, based on the maximum element method, is supported by an example. It is proposed to take into account the specific situation in the area of operation of the UAV grouping by using coefficients obtained by expert methods and tied to the probabilities of completing tasks by individual samples.

Keywords: unmanned aerial vehicle, UAV grouping, efficiency assessment, probabilistic methods, maximum element method

Введение

В настоящее время наблюдается рост сфер и областей применения беспилотных летательных аппаратов (БЛА). Применение БЛА способно существенно расширить возможности подразделений МЧС России при предупреждении и ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС). Спектр задач выполняемых БЛА заявляется достаточно большой [1]. Как показала практика применения БЛА в ходе специальной военной операции, они способны выполнять трудно решаемые задачи в интересах подразделений, оставаясь относительно дешевым средством, не требующим длительной подготовки оператора.

Анализируя спектр задач, предполагаемых к решению применением БЛА, можно сделать вывод о том, что их использование будет эффективно, по сравнению с существующими средствами, при применении на большой площади и на тех ее участках, на которых невозможны или небезопасны действия подразделений спасателей или оператора.

Следует отметить, что при относительной универсальности задач разведки и мониторинга земной поверхности, выполняемых БЛА всех типов, для решения задач предупреждения и ликвидации ЧС необходимы БЛА для решения специфических задач с соответствующей аппаратурой — полезной нагрузкой (ПН).

Из перечня задач, соответствующих современному уровню развития технологий, решаемых в интересах подразделений МЧС России, можно выделить следующие:

- общий обзор территории с целью мониторинга изменения обстановки;
- разведка территории с целью поиска пострадавших;
- сброс груза пострадавшим и спасателям;
- оповещение об опасности людей, находящихся на угрожаемой территории.

Решение задач предупреждения и особенно ликвидации носит комплекс-

ный характер и потребует применения разнородной группировки сил и средств различных ведомств. Это положение также будет касаться создания и применения группировки (группы) БЛА различных типов и разных характеристик.

На эффективность выполнения БЛА возложенных задач будут влиять их технические характеристики, из которых можно выделить основные:

- радиус действия (дальность связи с оператором), м;
- время работы, до восстановления параметров источника энергии, час;
- площадь полосы разведки, м²;
- вес полезной нагрузки, обеспечивающей выполнение задач по назначению, кг;
- габаритные характеристики (длина, высота, ширина, общий вес);
- маневренные (скорость, время развертывания и т. д.).

На БЛА, предназначенные для выполнения специфических задач, в качестве полезной нагрузки кроме видеокамер устанавливаются инфракрасные камеры, системы сброса грузов, громкоговорители и др. При ликвидации ЧС БЛА различных типов выполняющие разнородные задачи, должны действовать в составе единой группировки.

Оценки эффективности применения БЛА в составе группировки можно проводить экспертными методами, в том числе методом анализа иерархий [2] и по интегральному показателю технического уровня [3]. Между тем очевидно, что с обобщением опыта эксплуатации и применения БЛА и принятием на вооружение подразделений МЧС России серийных образцов появится возможность оценивания эффективности применения БЛА вероятностным методом, под которым понимают определение вероятности того, что случайный объект из заданного ряда удовлетворяет нужному условию [4].

Применение вероятностного метода для оценки эффективности применения БЛА

В случае оценки БЛА этим методом предполагается, что имеющийся образец согласно опыту применения в сравнимых условиях имеет вероятность выполнения задачи $P_{\text{зад}}$. Под вероятностью выполнения задачи будем понимать получение от БЛА в процессе его применения, ограниченном его техническими характеристиками, информации об объектах мониторинга с приемлемым качеством (разведка и мониторинг), вероятность обнаружения объекта с определением его координат (поиск пострадавших) или вероятность обнаружения объекта и воздействия на него с целью выполнения задачи (сброс грузов и оповещение).

В общем случае количество объектов, обнаруживаемых при разовом применении БЛА, может быть определено по формуле:

$$R = P_{\text{обн}} \cdot U_{\text{ПРО}} \cdot S_{\text{ПЗ}}, \quad (1)$$

где: R — количество обнаруженных объектов;

$P_{\text{обн}}$ — вероятность обнаружения объекта;

$U_{\text{ПРО}}$ — плотность распределения объектов в зоне поиска;

$S_{\text{ПЗ}}$ — площадь зоны поиска.

Количество объектов R будет также зависеть от обстановки применения БЛА (задымления, воздействия высоких или низких температур, других природных явлений, условий распространения сигнала и т. д.), ее можно учесть коэффициентом (или несколькими коэффициентами) обстановки $k_{\text{обс}}$ по формуле:

$$R_{\text{обс}} = k_{\text{обс}} \cdot R. \quad (2)$$

В случае использования в зоне действия ЧС нескольких однотипных БЛА для определения вероятности обнаружения объектов используется формула:

$$P_{\text{Нобн}} = 1 - (1 - P_{\text{обн}})^n \quad (3)$$

Плотность распределения объектов $U_{\text{ПРО}}$ в зоне ЧС может быть определена

[5] как отношение находящихся в зоне людей к общей площади зоны поиска, эти данные должны быть взяты из материалов расследования пожара или ликвидации ЧС:

$$U_{\text{ПРО}} = \frac{R_{\text{общ}}}{S_{\text{ПЗ}}}, \quad (4)$$

где $R_{\text{общ}}$ — общая численность людей в зоне поиска;

$S_{\text{ПЗ}}$ — общая площадь объекта.

Размер полосы разведки $S_{\text{ПР}}$ можно определить как:

$$S_{\text{ПР}} = L_{\text{марш}} \cdot B_{\text{кам}}, \quad (5)$$

где $L_{\text{марш}}$ — длина маршрута;

$B_{\text{кам}}$ — ширина эффективного поиска аппаратуры, установленной на БЛА.

Вероятность пропуска объектов (необнаружения) во время поиска можно оценить по формуле:

$$P_{\text{необр}} = 1 - P_{\text{обн}}. \quad (6)$$

Из анализа формул (1–6) можно сделать вывод, что корректное применение вероятностного метода возможно только при наличии большого количества статистических данных о ходе и результатах применения БЛА в ходе ликвидации ЧС. В этом случае для каждого БЛА можно определить вероятность выполнения задачи $P_{\text{зад}}$ как отношение:

$$P_{\text{зад}} = \frac{N_{\text{вып}}}{N_{\text{общ}}}, \quad (7)$$

где $N_{\text{вып}}$ — число обнаруженных объектов или выполненных задач;

$N_{\text{общ}}$ — общее число объектов, находящихся в зоне ЧС, или общее число объектов необходимых для действий по ликвидации задач.

Нахождение величины $P_{\text{зад}}$ не представляет особого труда, и принципиально им можно объективно оценить эффективность применения нескольких однотипных

БЛА в примерно одинаковых условиях обстановки, но при этом необходим стандартизированный учет величин $N_{\text{вып}}$ и $N_{\text{общ}}$ с исключением влияния субъективного фактора при сборе статистики и учете влияния условий обстановки.

Оценка эффективности применения группировки БЛА

При оценке эффективности применения группировки БЛА при ликвидации ЧС предполагается использование не только однотипных образцов для решения определенных задач, но и БЛА разных типов, действующих для решения различных задач или обеспечивающих их выполнение.

В этих условиях возникает необходимость оценки действий группы разнородных БЛА, действующих в условиях различной обстановки.

В связи с этим возникает задача оценки эффективности действий группы (группировки) БЛА в различных условиях обстановки исходя из возможностей отдельных образцов, характеризующая величиной $P_{\text{зад}i}$.

Для оценки эффективности группового применения БЛА, для решения определенных задач на основе вероятностных методов анализа необходимо определить матрицу распределения вероятностей выполнения i задачи каждым j типом БЛА:

$$A = |p_{ji}|, \quad (8)$$

а также матрицу количества j типов БЛА, определенных для выполнения i задачи:

$$B = |n_{ji}|. \quad (9)$$

Имея данные о количестве задач S и количестве типов БЛА m , участвующих в ликвидации ЧС, можно составить матрицу распределения БЛА на выполнение задач

$$C = |p_{ji}|_{mS}. \quad (10)$$

Принимая во внимание методику [6], можно определить максимум функции, определяющий полноту решения $P(C)$, стоящего перед группировкой БЛА задач:

$$P(C) = \sum_{i=1}^S \{1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_{ji})^{n_{ji}}\}, \quad (11)$$

при линейном ограничении на переменные

$$\sum_{i=1}^S n_{ji} \ll N_j, \quad j = 1, \dots, m. \quad (12)$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^S n_{ji} = N, \quad (13)$$

а также при условиях

$$\left. \begin{aligned} n_{ji} \in \{0, 1, \dots, N_j\}, \\ 0 \leq p_{ji} \leq 1 \end{aligned} \right\} \quad j = 1, \dots, m; i = 1, \dots, S,$$

где S — количество задач, выполняемых группировкой БЛА;

N — численность БЛА в группировке;

N_j — количество БЛА j -го типа в группировке, $j = 1, \dots, m$;

p_{ji} — вероятность выполнения i задачи БЛА j -го типа;

n_{ji} — количество БЛА j -го типа, предназначенных для выполнения i задачи.

Решение данной задачи, согласно [6] представляется по методу максимального элемента. Его суть заключается в решении задачи с большим числом переменных n с переходом к последовательному решению n задач с одной переменной.

Решение задачи выполняется по следующей схеме: составляется таблица, в которой приводятся задачи и соответствующее им количество БЛА, способных их решить, с соответствующей заданной вероятностью.

Зная вероятность выполнения задачи каждым образцом БЛА p_{ji} , можно определить общую вероятность выполнения отдельной задачи всей группировкой БЛА:

$$p_i = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_{ji})^{n_{ji}}. \quad (14)$$

В дальнейшем, суммируя несовместные вероятности выполнения задач,

можно найти максимум функции $P(C)$ по формуле (11).

По данному значению можно судить об эффективности всей группировки БЛА по выполнению всего спектра стоящих перед ней задач.

Вариант примера решения подобной задачи приведен ниже. Пусть группировкой БЛА требуется в процессе ликвидации ЧС выполнить задачи 1–4 из таблицы 1. В составе группировки имеются БЛА: тип 1 (осмотр территории, поиск пострадавших), тип 2 (поиск пострадавших, осмотр территории), тип 3 (сброс грузов, ограниченный осмотр территории), тип 4 (оповещение, ограниченный осмотр территории). Считаем, что в группировке имеется по два БЛА каждого типа. Требуется оценить эффективность применения группировки с условием выполнения каждой задачи с вероятностью не ниже 0,8.

Матрица распределения вероятностей решения задач разными типами БЛА приведена в табл. 1.

По условию задачи можно составить матрицу количества БЛА для выполнения стоящих задач согласно табл. 2.

Решение данной задачи приведено на рис. 1.

Анализируя решение, нетрудно увидеть, что с заданной вероятностью не выполнена только задача оповещения. Увеличивая число типов БЛА для выполнения этой задачи с 2 до 5, можно добиться увеличения эффективности группировки и требуемой вероятности выполнения задачи рис. 2.

В некоторых работах [7] для оценки эффективности группы разнородных средств функцию (11) записывают в виде:

$$P(C) = \sum_{i=1}^S k_i \{1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_{ji})^{n_{ji}}\}, \quad (15)$$

где k_i — коэффициент важности задачи, при этом он удовлетворяет условию

$$k_i > 0; \sum_{i=1}^S k_i = 1.$$

Таблица 1

Распределение вероятностей выполнения задач БЛА по условию

Table 1

Probability distribution of UAV task completion according to condition

	Тип 1 Type 1	Тип 2 Type 2	Тип 3 Type 3	Тип 4 Type 4
Задача 1 Problem 1	0,6	0,4	0,1	0,1
Задача 2 Problem 2	0,1	0,6	0	0
Задача 3 Problem 3	0	0	0,6	0
Задача 4 Problem 4	0	0	0	0,3

Таблица 2

Распределение типов БЛА для решения задач по условию

Table 1

Distribution of UAV types for solving problems by condition

	Тип 1 Type 1	Тип 2 Type 2	Тип 3 Type 3	Тип 4 Type 4
Задача 1 Problem 1	2	2	2	2
Задача 2 Problem 2	2	2	0	0
Задача 3 Problem 3	0	0	2	0
Задача 4 Problem 4	0	0	0	2

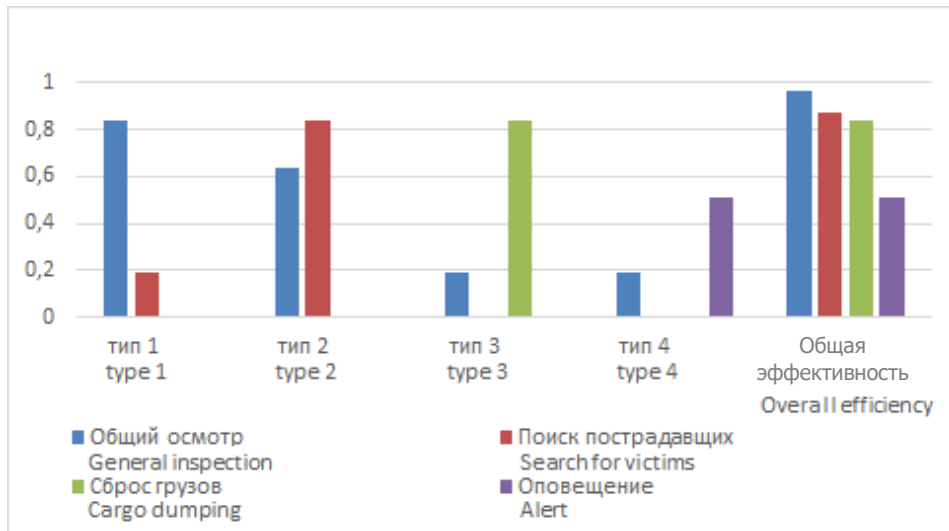


Рисунок 1. Оценка эффективности группировки БЛА

Figure 1. Assessing the effectiveness of a UAV constellation

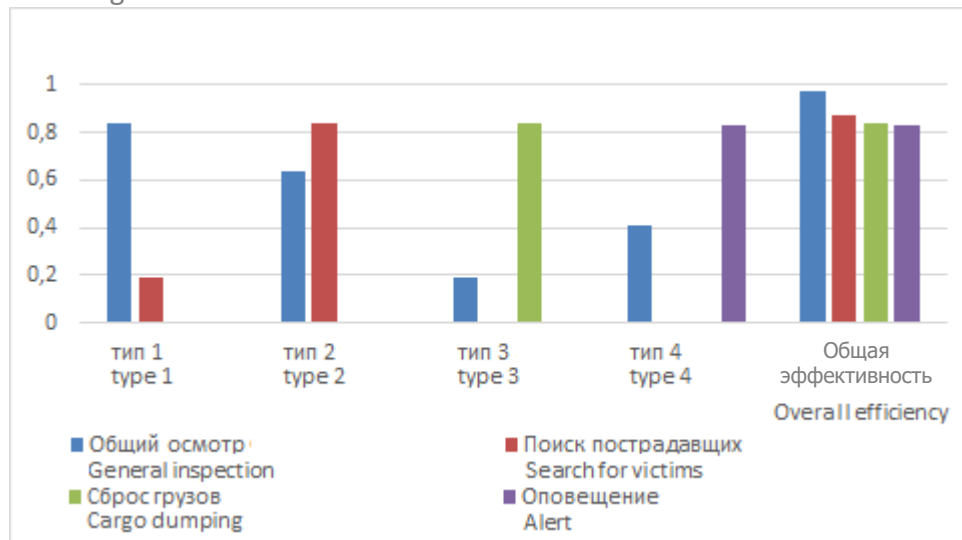


Рисунок 2. Оценка эффективности группировки после увеличения численности

Figure 2. Assessing the effectiveness of the group after increasing the number

Определение коэффициента k_i требует учета обстановки в районе ликвидации ЧС, его значение может быть определено фактически только экспертными методами, наиболее приемлемым из которых является метод анализа иерархий [2], когда важность решения задачи увязывается с ее условиями, в которых она решается. Пример использования данного метода при комплексной оценке сложной системы приведен в работе [8]. Для упрощения учета обстановки в зоне действия группировки БЛА можно воспользоваться формулой (2), изменяя в соответствии

с коэффициентом обстановки значения вероятностей выполнения задач [9].

При анализе влияния k_i на значение эффективности $P(C)$ можно сделать вывод о необходимости модульной конструкции БЛА и набора сменной полезной нагрузки для их оснащения в зависимости от условий применения и важности решаемых задач.

Как было показано, вышеописанный метод без существенных изменений может быть применен для решения обратной задачи, когда по заданным вероятностям выполнения задачи отдельными БЛА, в зависимости от обстановки и стоящих

задач, можно найти оптимальный объем типов и количество БЛА, участвующих в группировке, и определить сценарии применения при ликвидации ЧС [10].

Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о приемлемости использования предложенной методики для оценки эффективности выполнения спектра задач разнородной группировкой БЛА.

Необходимо отметить, что для успешного применения метода и получения достоверных результатов необходимо иметь значения вероятностей выполнения конкретной задачи отдельным типом БЛА

p_{ji} . Для получения требуемых результатов необходим сбор большого количества статистических данных о результатах применения отдельных образцов БЛА по решению требуемых задач и последующей обработкой.

Также важным представляется определение экспертными методами коэффициентов k_i , учитывающих условия применения и важность отдельных задач, выполняемых группировкой БЛА. При их определении кроме сбора статистических данных возникает необходимость проведения исследований, связанных с опросом экспертных групп, сравнения их результатов и выбора приемлемого.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Беспилотная авиация // МЧС России. Главное управление по Архангельской области : офиц. сайт. URL: <https://29.mchs.gov.ru/glavnoe-upravlenie/sily-i-sredstva/federalnye-sily-i-sredstva/bespilotnaya-aviaciya> (дата обращения: 11.03.2024).
2. Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях. Аналитические сети / пер. с англ. ; науч. ред. А. В. Андрейчиков, О. Н. Андрейчикова. М. : ЛКИ, 2008. 360 с.
3. Найдёнов Д. С., Ремнёв Д. С., Прокопенко А. И. Математическое обоснование выбора РТС в зоне ЧС // Применение робототехнических комплексов специального назначения : сб. тр. секции № 5 XXVIII Междунар. науч.-практ. конф. «Предотвращение. Спасение. Помощь», 22 марта 2018 г. ФГБВОУ ВО АГЗ МЧС России, 2018. 125 с.
4. Спенсер Н. Алон, Дж. Вероятностный метод : учебное пособие. 4-е изд., электрон. М. : Лаборатория знаний, 2020. 323 с.
5. Логинов А. А. Оценка разведывательных возможностей БЛА // Доклады и статьи ежегодной науч.-практ. конф. «Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами». Коломна, 2016. 274 с.
6. Березин Е. А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем / под ред. Е. В. Золотова. М. : Сов. радио, 1974. 304 с.
7. Свиридов В. В. Применение робототехнических комплексов охраны и обороны критически важных объектов Ракетных войск стратегического назначения // Военная Мысль. 2021. № 6. 57-64 с.
8. Логинов В. В., Вишняков А. В., Зубарев И. А. Оценка образцов робототехнических комплексов пожаротушения методом анализа иерархий // Техносферная безопасность : науч. интернет-журнал. 2023. № 2. 91-100 с.
9. Моделирование сложных вероятностных систем : учеб. пособие / В. Г. Лисиенко [и др.]. Екатеринбург : изд-во УРФУ, 2011. 200 с.
10. Пшихопов В. Х., Гонтарь Д. Н., Мартьянов О. В. Концептуальные подходы к формированию сценариев боевого применения групп робототехнических комплексов // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 3. С. 138–182.

REFERENCES

1. Unmanned aircraft // Russian Ministry of Emergency Situations. Headquarters in the Arkhangelsk region: [website]. URL: <https://29.mchs.gov.ru/glavnoe-upravlenie/sily-i-sredstva/federalnye-sily-i-sredstva/bespilotnaya-aviaciya> (date of access: 03/11/2024). (rus).
2. Saaty T. Decision making with dependencies and feedbacks: Analytical networks / T. Saaty; lane from English; scientific ed.: A.V. Andreychikov, O.N. Andreichikova. Moscow, LKI, 2008; 360. (rus).
3. Naydenov D.S., Remnev D.S. Prokopenko A.I., Mathematical justification for the choice of RTS in an emergency zone. Application of special-purpose robotic systems: collection of proceedings of section No. 5 of

the XXVIII International Scientific and Practical Conference "Prevention. The rescue. Help", March 22, 2018. FGBVOU VO AGZ EMERCOM of Russia. 2018; 125. (rus).

4. Probabilistic method: textbook / N. Alon, J. Spencer; 2nd Eng. ed. 4th ed., electronic. Moscow, Laboratory of Knowledge, 2020; 323. (rus).

5. Loginov A.A., Assessment of the reconnaissance capabilities of UAVs / Reports and articles of the annual scientific and practical conference "Prospects for the development and application of complexes with unmanned aerial vehicles", Kolomna, 2016; 274. (rus).

6. Berezin E.A. Optimal distribution of resources and elements of systems synthesis. E.V. Zolotova (ed.). Moscow, Sov. radio, 1974; 304. (rus).

7. Sviridov V.V. Application of robotic security and defense systems for critically important objects of the Strategic Missile Forces. Military Thought. 2021; 6. (rus).

8. Loginov V.V., Vishnyakov A.V., Zubarev I.A. Evaluation of samples of robotic fire extinguishing systems using the hierarchy analysis method. Technosphere Safety. 2023; No. 2. (rus).

9. Lisienko V. G., Trofimova O. G., Trofimov S. P., Druzhinina N. G., Dugay P. A. Modeling of complex probabilistic systems: textbook. allowance. Ekaterinburg, URFU, 2011; 200. (rus).

10. Pshikhopov V. Kh., Gontar D. N., Martyanov O. V. Conceptual approaches to the formation of scenarios for the combat use of groups of robotic complexes. Control, communication and security systems. 2022; 3: 138–182. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-138-182. (rus).

Информация об авторах

Логинов Валерий Викторович, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры безопасности в ЧС, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия. 620062, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID: 1103066; e-mail: bazalt@mail.ru

Вишняков Александр Валерьевич, кандидат биологических наук, доцент, профессор кафедры безопасности в ЧС, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID: 848624; e-mail: alexvish63@mail.ru

Зубарев Игорь Александрович, кандидат педагогических наук, доцент, начальник УНК, Уральский институт ГПС МЧС России, Россия, 620062, Свердловская область, г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 22; РИНЦ ID: 836075; e-mail: zubarev@mail.ru

Information about the authors

Valery V. Loginov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, associate Professor, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; RSCI ID: 1103066; e-mail: bazalt@mail.ru

Alexander V. Vishnyakov, Candidate of Biological Sciences, Associate Professor, Professor, Ural Institute of State Fire Service EMERCOM of Russia, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; RSCI ID: 848624; e-mail: alexvish63@mail.ru

Igor A. Zubarev, Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Head of the UNC, Ural Institute of State Fire Service of EMERCOM of Russia, Mira St., 22, Yekaterinburg, 620062, Russian Federation; RSCI ID: 836075; e-mail: zubarev@mail.ru