

ТЕОРИЯ ВЕРОЯТНОСТЕЙ И МАТЕМАТИЧЕСКАЯ СТАТИСТИКА / PROBABILITY THEORY AND MATHEMATICAL STATISTICS

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.131>

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫПОЛНЕНИЯ ЗАДАЧ ГРУППИРОВКОЙ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ ПРИ ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ

Научная статья

Логинов В.В.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Уральский институт государственной противопожарной службы МЧС России, Екатеринбург, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (bazalt[at]mail.ru)

**Аннотация**

Целью данной статьи является теоретическое обоснование методики оценки рационального создания группировки робототехнических комплексов (РТК) для предупреждения и ликвидации чрезвычайной ситуации (ЧС).

При ликвидации ЧС или проведения мероприятий по её предупреждению возможно создание группировки РТК под единым управлением, состоящей из РТК нескольких типов, предназначенных для выполнения либо связанных, либо несвязанных между собой разнообразных задач с различной эффективностью выполнения.

Такая группировка РТК требует оценки эффективности её применения ещё на стадии создания, когда необходимо получение ответа на вопрос о её способности решения комплекса поставленных задач с заданными показателями.

**Ключевые слова:** роботизированный технический комплекс, группировка РТК, оценка эффективности, вероятностные методы, метод максимального элемента.

AN ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF TASK FULFILMENT BY A GROUPING OF ROBOTIC COMPLEXES DURING EMERGENCY RECOVERY

Research article

Loginov V.V.<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Ural Institute of State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Ekaterinburg, Russian Federation

\* Corresponding author (bazalt[at]mail.ru)

**Abstract**

The aim of this article is the theoretical substantiation of the methodology for evaluating the rational creation of a grouping of robotic complexes (RTC) for the prevention and elimination of emergency situations (ES).

In the course of emergency response or prevention activities, it is possible to create a grouping of RTCs under unified control, consisting of RTCs of several types designed to perform either related or unrelated various tasks with different performance efficiency.

Such grouping of RTC requires assessment of its application efficiency at the stage of its creation, when it is necessary to get an answer to the question about its ability to solve a set of set tasks with given indicators.

**Keywords:** robotic technical complex, RTC grouping, efficiency assessment, probabilistic methods, maximum element method.

**Введение**

В настоящее время наблюдается рост сфер и областей применения роботизированных технических комплексов (РТК). Применение РТК способно существенно расширить возможности подразделений МЧС России при предупреждении и ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС). Спектр задач выполняемых РТК заявляется достаточно большой [1]. В него, в частности входит:

- 1) разведка и мониторинг опасных зон (аварийных объектов);
- 2) проведение аварийно-спасательных работ (АСР);
- 3) локализация (подавление) источника аварии (ЧС);
- 4) тушение пожаров;
- 5) разборка завалов на аварийных объектах;
- 6) транспортирование и погрузка опасных предметов и материалов;
- 7) проведение дегазации и дезактивации;
- 8) разминирование территорий и объектов.

Анализируя его, можно сделать вывод, что при современном развитии технологий основное назначение РТК – обеспечение безопасности личного состава подразделения выполняющих задачи по пожаротушению или ведению (АСР). При этом важным преимуществом РТК по сравнению с имеющейся, непосредственно управляемой оператором, техникой является выигрыш в габаритах, поскольку РТК не нуждается в месте размещения оператора, в современные технологии позволяют сделать систему управления достаточно миниатюрной.

На эффективность выполнения РТК возложенных задач будут иметь их технические характеристики:

- 1) радиус действия (дальность связи с оператором), м;
- 2) время работы, до восстановления параметров источника энергии, час;
- 3) площадь полосы разведки, м<sup>2</sup>;
- 4) вес полезной нагрузки, обеспечивающей выполнение задач по назначению, кг;

5) габаритные характеристики (длина, высота, ширина, общий вес);

6) маневренные (скорость, время разворачивания, радиус поворота, высота преодолеваемого препятствия и т.д.).

Разнообразие технических характеристик не позволяет найти простые методики проведения оценки эффективности работы нескольких РТК в разных условиях численными методами.

Оценка эффективности применения РТК 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 РТК и принятием на вооружение подразделений МЧС России серийных образцов, появится возможность оценивания эффективности применения РТК 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 РТК

В случае оценки РТК этим методом предполагается, что имеющийся образец согласно опыту применения в сравнимых условиях имеет вероятность выполнения задачи  $P_{зад}$ . Под ней будем понимать отношение:

$$P_{зад} = \frac{\sum_{i=1} N_{вып}}{\sum_{i=1} N_{общ}} \quad (1)$$

где:

$N_{вып}$  – число выполненных задач отдельным образцом РТК с заданной степенью эффективности и примерно в одинаковых условиях;

$N_{общ}$  – общее число задач к выполнению которых привлекался образец РТК, примерно в одинаковых условиях.

Нахождение величины  $P_{зад}$  не представляет особого труда и принципиально им можно объективно оценить эффективность применения нескольких однотипных РТК  $P_{пзад}$  в примерно одинаковых условиях обстановки по формуле:

$$P_{пзад} = 1 - (1 - P_{зад})^n \quad (2)$$

где:

$n$  – число однотипных РТК, задействованных в решении задачи.

Для нахождения  $P_{зад}$  необходим стандартизированный учет величин  $N_{вып}$  и  $N_{общ}$  с исключением влияния субъективного фактора при сборе статистики и учета влияния условий обстановки.

Методика определения возможностей отдельного образца, дистанционно управляемого человеком по вероятности выполнения задачи приведена в работах [4], [5].

Из анализа методики можно сделать вывод, что корректное применение вероятностного метода возможно только при наличии большого количества статистических данных о ходе и результатах применения РТК в ходе ликвидации ЧС.

### Основные результаты

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

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 РТК по решению требуемых задач и последующей обработке.

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 её 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 РТК можно воспользоваться формулой (10), изменяя в соответствии с коэффициентом обстановки значения вероятностей выполнения задач [9].

При анализе влияния  $k_i$  на значение эффективности П(С) можно сделать вывод, о необходимости модульной конструкции РТК 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 РТК, в зависимости от обстановки задач, можно найти оптимальный объем типов и количества РТК, участвующей в группировке.

Главное отличие предлагаемой методики от аналогичных [7], возможность быстрой оценки эффективности группировки РТК, разных типов и характеристик, по вероятности выполнения задачи в зоне, ограниченной техническими характеристиками и условиями выполнения. Используемый математический аппарат для решения такой задачи представляется предельно простым и может быть реализован использованием общеиспользуемых программ (Microsoft Excel) и калькуляторов, что является важным при принятии решений на ликвидацию ЧС.

### Оценка эффективности применения группировки РТК

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

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

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

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

$$A = |p_{ji}| \quad (3)$$

а также матрицу количества  $j$  типов РТК, определенных для выполнения  $i$  задачи

$$B = |n_{ji}| \quad (4)$$

Имея данные о количестве задач  $S$  и количестве типов РТК  $m$  участвующей в ликвидации ЧС, можно составить матрицу распределения РТК на выполнение задач

$$C = |p_{ji}|_{ms} \quad (5)$$

Принимая во внимание методику [6] можно определить максимум функции, определяющей полноту решения  $\Pi(C)$  стоящей перед группировкой РТК задач:

$$\Pi(C) = \sum_{i=1}^S \left\{ 1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_{ji})^{n_{ji}} \right\} \quad (6)$$

при линейном ограничении на переменные

$$\sum_{i=1}^S n_{ji} \ll N_j, j = 1, \dots, m. \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^S n_{ji} = N \quad (8)$$

а также при условиях

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

где:

$S$  – количество задач, выполняемых группировкой РТК;

$N$  – численность РТК в группировке;

$N_j$  – количество РТК  $j$  – го типа в группировке,  $j = 1, \dots, m$ ;

$p_{ji}$  – вероятность выполнения  $i$  задачи, РТК  $j$  – го типа;

$n_{ji}$  – количество РТК  $j$  – го типа, предназначенных на выполнение  $i$  задачи.

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

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

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

$$p_i = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_{ji})^{n_{ji}} \quad (9)$$

В дальнейшем суммируя несовместные вероятности выполнения задач можно найти максимум функции  $\Pi(C)$  по формуле (6).

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

Вариант примера решения подобной задачи приведен ниже. Пусть группировкой РТК требуется в процессе ликвидации ЧС выполнить задачи 1-4 из таблицы 1. В составе группировки имеются РТК тип 1 (разведка и мониторинг территории), тип 2 (проведение АСР), тип 3 (транспортировка и погрузка опасных предметов), тип 4 (локализация (подавление) источника аварии). Считаем, что в группировке имеется по 2 РТК каждого типа. Требуется оценить эффективность применения группировки, по условию выполнения каждой задачи с вероятностью не ниже 0,8.

Матрица распределения вероятностей решения задач разными типами РТК приведена в таблице 1.

Таблица 1 - Распределение вероятностей выполнения задач РТК по условию

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.131.1>

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

По условию задачи можно составить матрицу количества РТК для выполнения стоящих задач, согласно таблице 2.

Таблица 2 - Распределение типов РТК для решения задач по условию

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.131.2>

	Тип 1	Тип 2	Тип 3	Тип 4
Задача 1	2	0	0	0
Задача 2	0	2	2	2
Задача 3	0	2	2	2
Задача 4	0	2	2	2

Решение данной задачи приведено на рисунке 1.

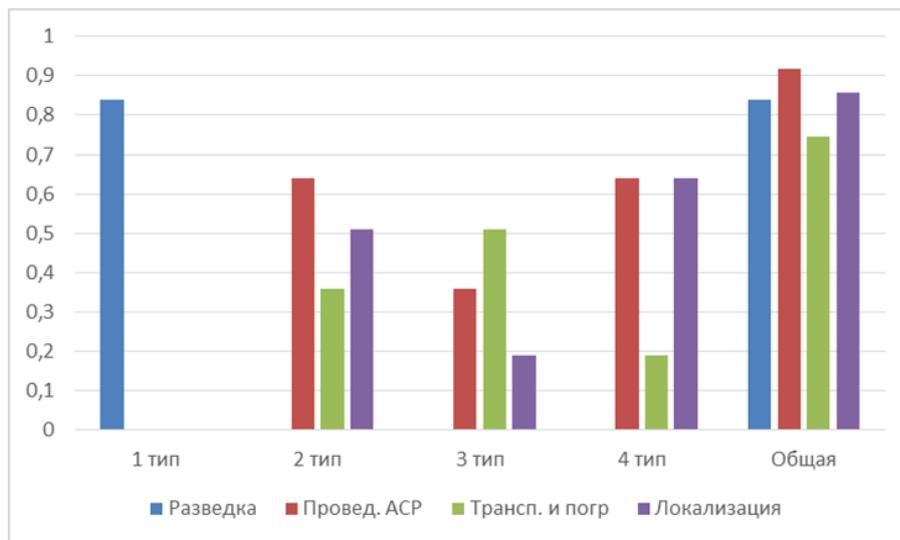


Рисунок 1 - Оценка эффективности группировки РТК

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.131.3>

Анализируя решение нетрудно увидеть, что с заданной вероятностью не выполнена только задача транспортировки и погрузки опасных грузов. Увеличивая количество РТК профильного типа 3 с 2 до 3 можно добиться увеличения эффективности группировки и требуемой вероятности выполнения задачи – рисунок 2. Также нетрудно увидеть, что требуемый результат достигается увеличением числа РТК 2 типа с 2 до 3, при этом увеличивается эффективность проведения АСР рисунок 3.

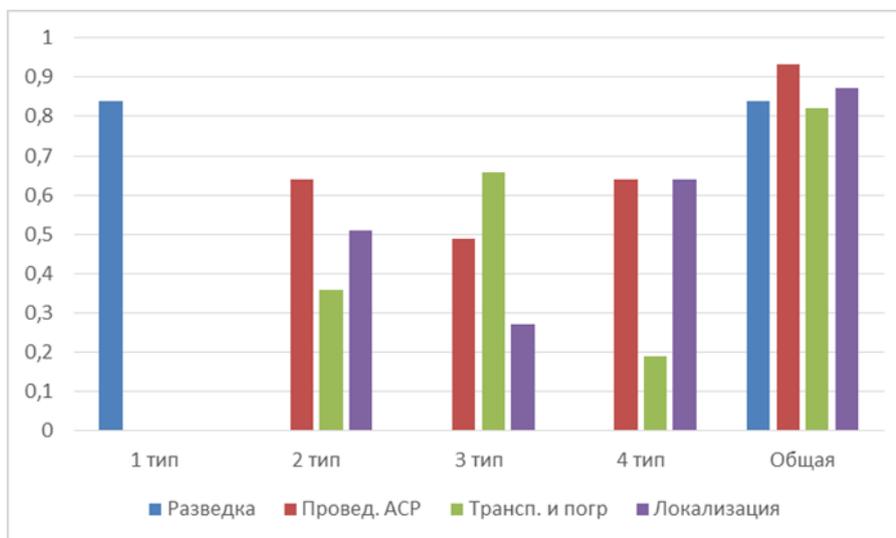


Рисунок 2 - Оценка эффективности группировки после увеличения численности  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.131.4>

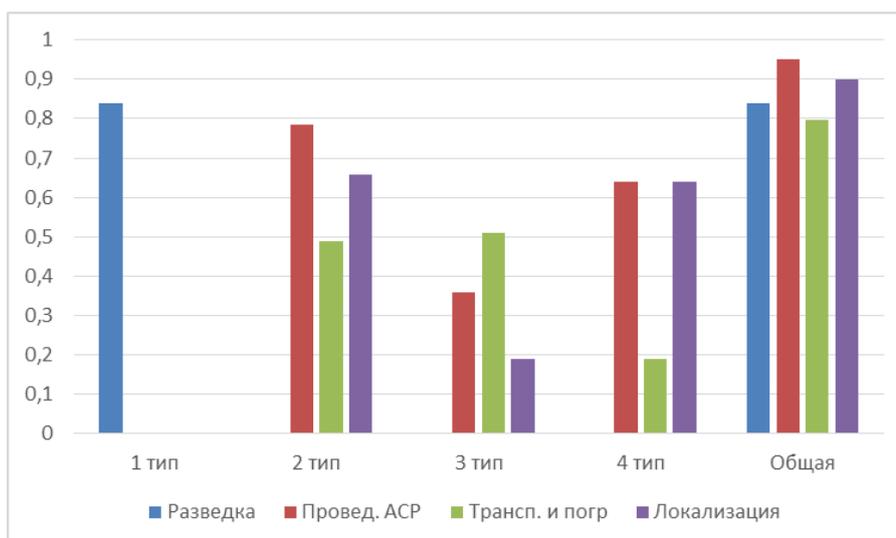


Рисунок 3 - Оптимальное увеличение состава группировки  
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2024.143.131.5>

В некоторых работах [7] для оценки эффективности группы разнородных средств функцию (6) записывают в виде:

$$\Pi(C) = \sum_{i=1}^S k_i \left\{ 1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_{ji})^{n_{ji}} \right\} \quad (10)$$

где  $k_i$  – коэффициент важности задачи, при этом он удовлетворяет условию  $k_i > 0$ ;  $\sum_{i=1}^S k_i = 1$

### Основные результаты

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

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 РТК по решению требуемых задач и последующей обработке.

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 её 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 РТК можно воспользоваться формулой (10), 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 РТК 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 РТК, в зависимости от обстановки задач, можно найти оптимальный объем типов и количества РТК, участвующей в группировке.

Главное отличие предлагаемой методики от аналогичных [7], возможность быстрой оценки эффективности группировки РТК, разных типов и характеристик, по вероятности выполнения задачи в зоне, ограниченной техническими характеристиками и условиями выполнения. Используемый математический аппарат для решения такой задачи представляется предельно простым и может быть реализован использованием общеиспользуемых программ (Microsoft Excel) и калькуляторов, что является важным при принятии решений на ликвидацию ЧС.

### Заключение

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

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Асхадеев А. И. Система робототехники МЧС России. Состояние и перспективы развития / А. И. Асхадеев, Е. В. Павлов, А. Ю. Баранник [и др.] // Технологии гражданской безопасности. — 2022. — Том 19. — № 2(72).
2. Саати Т. Принятие решений при зависимостях и обратных связях: аналитические сети / Т. Саати. — Москва : ЛКИ, 2008. — 360 с.
3. Найденов Д. С. Математическое обоснование выбора РТС в зоне ЧС / Д. С. Найденов, Д. С. Ремнев, А. И. Прокопенко // Применение робототехнических комплексов специального назначения : сборник трудов секции № 5 XXVIII Международной научно-практической конференции «Предотвращение. Спасение. Помощь», 22 марта 2018 года. — ФГБВОУ ВО АГЗ МЧС России, 2018. — 125 с.
4. Алон Н. Вероятностный метод: учебное пособие / Н. Алон, Дж. Спенсер. — Москва : Лаборатория знаний, 2020. — 323 с.
5. Логинов А. А. Оценка разведывательных возможностей БЛА / А. А. Логинов // Доклады и статьи ежегодной научно-практической конференции «Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами». — Коломна, 2016. — 274 с.
6. Березин Е. А. Оптимальное распределение ресурсов и элементы синтеза систем / Е. А. Березин. — Москва : Сов. радио, 1974. — 304 с.
7. Свиридов В. В. Применение робототехнических комплексов охраны и обороны критически важных объектов Ракетных войск стратегического назначения / В. В. Свиридов // Военная Мысль. — 2021. — № 6.
8. Логинов В. В. Оценка образцов робототехнических комплексов пожаротушения методом анализа иерархий / В. В. Логинов, А. В. Вишняков, И. А. Зубарев // Техносферная безопасность. — 2023. — № 2.
9. Лисиенко В. Г. Моделирование сложных вероятностных систем: учеб. пособие / В. Г. Лисиенко, О. Г. Трофимова, С. П. Трофимов [и др.] — Екатеринбург : УРФУ, 2011. — 200 с.
10. Пшихопов В. Х. Концептуальные подходы к формированию сценариев боевого применения групп робототехнических комплексов / В. Х. Пшихопов, Д. Н. Гонтарь, О. В. Мартыанов // Системы управления, связи и безопасности. — 2022. — № 3. — С. 138–182. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-138-182

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Askhadeev A. I. Sistema robototekhniki MChS Rossii. Sostojanie i perspektivy razvitija [The robotics system of the Ministry of Emergency Situations of Russia. State and prospects of development] / A. I. Askhadeev, E. V. Pavlov, A. Y. Barannik [et al.] // Tehnologii grazhdanskoj bezopasnosti [Technologies of civil security]. — 2022. — Vol. 19. — № 2(72). [in Russian]
2. Saati T. Prinjatije reshenij pri zavisimostjakh i obratnyh svyazjakh: analiticheskie seti [Decision-making with dependencies and feedbacks: analytical networks] / T. Saati. — Moscow : LKI, 2008. — 360 p. [in Russian]
3. Naydenov D. S. Matematicheskoe obosnovanie vybora RTS v zone ChS [Mathematical justification of the choice of RTS in the emergency zone] / D. S. Naydenov, D. S. Remnev, A. I. Prokopenko // Primenenie robototekhnicheskikh kompleksov special'nogo naznachenija [The use of special-purpose robotic systems] : proceedings of section No. 5 of the XXVIII International Scientific and Practical Conference "Prevention. Salvation. Help", March 22, 2018. — Federal State Budgetary Educational Institution of the Ministry of Emergency Situations of Russia, 2018. — 125 p. [in Russian]

4. Alon N. Veroyatnostnyj metod [Probabilistic method]: textbook / N. Alon, J. Spencer. — Moscow : Laboratory of Knowledge, 2020. — 323 p. [in Russian]
5. Loginov A. A. Ocenka razvedyvatel'nyh vozmozhnostej BLA [Evaluation of the reconnaissance capabilities of UAVs] / A. A. Loginov // Doklady i stat'i ezhegodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii «Perspektivy razvitija i primenenija kompleksov s bespilotnymi letatel'nymi apparatami» [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 p. [in Russian]
6. Berezin E. A. Optimal'noe raspredelenie resursov i jelementy sinteza sistem [Optimal resource allocation and elements of system synthesis] / E. A. Berezin. — Moscow : Soviet Radio, 1974. — 304 p. [in Russian]
7. Sviridov V. V. Primenenie robototekhnicheskikh kompleksov ohrany i oborony kriticheski vazhnyh ob#ektov Raketnyh vojsk strategicheskogo naznachenija [The use of robotic complexes for the protection and defense of critically important objects of strategic Missile forces] / V. V. Sviridov // Voennaja Mysl' [Military Thought]. — 2021. — № 6. [in Russian]
8. Loginov V. V. Ocenka obrazcov robototekhnicheskikh kompleksov pozharotushenija metodom analiza ierarhij [Evaluation of samples of robotic fire extinguishing complexes by the method of hierarchy analysis] / V. V. Loginov, A.V. Vishnyakov, I. A. Zubarev // Tehnosfernaja bezopasnost' [Technosphere safety]. — 2023. — № 2. [in Russian]
9. Lisienko V. G. Modelirovanie slozhnyh veroyatnostnyh sistem [Modeling of complex probabilistic systems]: textbook manual / V. G. Lisienko, O. G. Trofimova, S. P. Trofimov [et al.] — Yekaterinburg : URFU, 2011. — 200 p. [in Russian]
10. Pshikhopov V. H. Konceptual'nye podhody k formirovaniju scenarijev boevogo primenenija grupp robototekhnicheskikh kompleksov [Conceptual approaches to the formation of scenarios for the combat use of groups of robotic complexes] / V. H. Pshikhopov, D. N. Gontar, O. V. Martianov // Sistemy upravlenija, svjazi i bezopasnosti [Control systems, communications and security]. — 2022. — № 3. — P. 138–182. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-3-138-182 [in Russian]