

# БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

УДК 004.94

## РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ И АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ РЕШЕНИЙ ПО ЭВАКУАЦИИ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Горлов Виталий Викторович, Меньших Валерий Владимирович, Никитенко Виталий Алексеевич  
Воронежский институт МВД России, г. Воронеж, Российская Федерация

**Аннотация.** Статья посвящена совершенствованию процессов организации эвакуации населения и материальных ценностей из зоны чрезвычайной ситуации техногенного характера на основе использования методов математического моделирования. С этой целью осуществлялась разработка математической модели и алгоритма поиска оптимального количества пунктов санитарной обработки, необходимых для эвакуации. В качестве целевой функции была выбрана стоимость развертывания пунктов санитарной обработки, а как ограничения — количество эвакуируемых и максимально допустимое время эвакуации. Для решения задачи предварительно осуществлялся анализ динамики развития чрезвычайных ситуаций, после чего на основе учета особенностей предметной области осуществлялись формализация поставленной оптимизационной задачи в терминах теории множеств и сведение ее к задаче дискретной оптимизации. Далее был разработан численный метод решения задачи, основанный на использовании ограниченного перебора возможных вариантов выбора мест развертывания пунктов санитарной обработки, что позволило сократить общее время решения задачи и используемый вычислительный ресурс. На основе численного метода был создан алгоритм решения поставленной задачи, позволяющий осуществить программную реализацию указанного численного метода. Для иллюстрации полученных результатов в статье рассмотрен численный пример расстановки пунктов санитарной обработки при возникновении чрезвычайной ситуации.

**Ключевые слова:** чрезвычайная ситуация, пункт санитарной обработки, эвакуация, математическое моделирование, задача оптимизации, численный метод и алгоритм оптимизации

**Для цитирования:** Горлов В. В., Меньших В. В., Никитенко В. А. Разработка модели и алгоритма оптимизации решений по эвакуации при чрезвычайных ситуациях // Техносферная безопасность. 2025. № 2 (47). С. 136–145.

## DEVELOPMENT OF A MODEL AND ALGORITHM FOR OPTIMIZING EVACUATION DECISIONS IN EMERGENCY SITUATIONS

Vitaly V. Gorlov, Valery V. Menshikh, Vitaly A. Nikitenko  
Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, Voronezh, Russian Federation

**Abstract.** The article is devoted to improving the processes of organizing the evacuation of the population and material assets from a man-made emergency zone based on the use of mathematical modeling methods. For this purpose, a mathematical model and an algorithm

for finding the optimal number of sanitary treatment points required for evacuation were developed. The cost of deploying sanitary treatment points was chosen as the target function, and the number of evacuees and the maximum allowable evacuation time were chosen as restrictions. To solve the problem, the dynamics of emergency situations development was analyzed in advance, after which, based on the specifics of the subject area, the formalization of the set optimization problem was carried out in terms of set theory and its reduction to a discrete optimization problem. Then, a numerical method for solving the problem was developed, based on the use of a limited enumeration of possible options for choosing the locations for deploying sanitary treatment points, which made it possible to reduce the overall time for solving the problem and the computing resource used. On the basis of the numerical method, an algorithm for solving the problem was created, allowing for the software implementation of the specified numerical method.

**Keywords:** emergency situation, sanitary treatment point, evacuation, mathematical modeling, optimization problem, numerical method and optimization algorithm

**For Citation:** Gorlov V. V., Menshikh V. V., Nikitenko V. A. Development of a model and algorithm for optimizing evacuation decisions in emergency situations // *Technosphere Safety*. 2025. № 2 (47). pp. 136–145.

### Введение

Анализ статистических данных [1–3] о ЧС на территории РФ за последние несколько лет (табл. 1) свидетельствует о постоянном увеличении количества погибших и пострадавших независимо от количества ЧС.

Поэтому при ликвидации ЧС большое внимание должно уделяться безопасности населения. Так, при организации эвакуации населения из зоны ЧС техногенного характера необходимо соблюсти одно из обязательных условий, а именно проведение санитарной обработки эвакуированного населения,

**Таблица 1**  
**Статистические данные о чрезвычайных ситуациях в РФ в 2022—2024 гг.**  
Table 1  
Statistical data on emergency situations in the Russian Federation in 2022–2024

Год Year	Количество ЧС Number of emergencies	Количество погибших Number of dead	Количество пострадавших Number of injured	Количество спасенных Number of rescued
2022	242	199	235274	789
2023	305	310	287595	7229
2024	272	494	696464	21411

имущества и техники [4]. Для этой процедуры создаются специальные пункты и выделяется ограниченное количество времени. Одним из факторов, влияющих на успешное проведение санитарной обработки, является количество выделяемых на нее ресурсов.

В работах [5–7] рассматривалась задача построения оптимальной последовательности действий подразделений силовых ведомств в ходе ликвидации ЧС, однако в постановке этой задачи предполагалось, что ресурс уже распределен оптимально. Несмотря на это, указанные модели можно использовать для решения задачи оптимального распределения ресурсов.

В [8] рассматривалась задача оптимального распределения ресурсов, и в качестве целевой функции была взята прибыль организации (целевая функция максимизировалась). Ограничения были связаны с тем, что суммарный ресурс не должен превосходить имеющийся. Для решения задачи эвакуации максимизировать прибыль нецелесообразно. Также необходимо добавить условия, связанные с ограничениями по времени, количеством имеющихся подразделений и т. д.

### Постановка задачи

При возникновении ЧС необходимо за отведенное время эвакуировать население из зоны происшествия и организовать его санитарную обработку. Для этого необходимо создать пункты санитарной обработки (далее — ПуСО), количество которых ограничено и зависит от множества параметров: места развертывания, пропускной способности, времени и стоимости развертывания, количества зон обработки и т. д.

В связи с этим необходимо разработать математическую модель, которая учитывала бы основные особенности развертывания ПуСО.

В качестве ПуСО могут быть использованы стационарные помещения (банно-прачечные комплексы, автомойки и т. п.), имеющиеся на границе зоны ЧС, а при отсутствии таких помещений будут разворачиваться мобильные ПуСО.

В обозначенной задаче будем рассматривать виды ПуСО, различающиеся по времени и стоимости развертывания, пропускной способности.

Введем следующие обозначения:

$n$  — количество людей, подлежащих эвакуации;

$\Phi$  — максимально возможное количество потоков на ПуСО;

$M = \{M_j\}_{j=1}^{|M|}, M_j \in \{0, \dots, \Phi\}$  — виды ПуСО ( $M_j = 0$  — свидетельствует о том, что на данном месте ПуСО не развертывается);

$K$  — максимально возможное количество мест размещения ПуСО;

$S = \{S_i\}_{i=1}^{|S|}, S_i \in \{1, \dots, K\}$ ;

$T_{полн}$  — время, выделенное на полную эвакуацию людей из зоны ЧС;

$T_j$  — время развертывания  $M_j$  ПуСО;

$c_{ij}$  — стоимость развертывания на  $S_i$  месте  $M_j$  ПуСО ( $c_{0j} = 0$ );

$\tau_{ij}$  — время эвакуации за единицу времени через  $M_j$  ПуСО, размещенный на  $S_i$  месте ( $\tau_{0j} = 0$ );

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если } i\text{-м месте размещено } M_j \text{ ПуСО;} \\ 0, & \text{если иначе.} \end{cases}$$

$y_{ij}$  — количество эвакуированных через  $M_j$  ПуСО, размещенный на  $S_i$  месте ( $y_{0j} = 0$ );

Время, необходимое на эвакуацию людей с  $S_i$  места, вычисляется по формуле:

$$\theta_i = \sum_{j=1}^{|S|} T_j x_{ij} + x_{ij} y_{ij} \tau_{ij}.$$

Также будем предполагать, что все ПуСО развертываются параллельно.

Число эвакуированных вычисляется следующим образом:

$$N = \sum_{i=1}^{|S|} \sum_{j=0}^{|M|} y_{ij} x_{ij}. \tag{1}$$

Общая стоимость развертывания всех ПуСО представляет собой выражение:

$$C_i = \sum_{j=1}^{|S|} c_{ij} x_{ij}. \tag{2}$$

Таким образом, задача эвакуации из зоны ЧС представляет собой следующую оптимизационную задачу:

$$\sum_{i=0}^{|M|} C_i \rightarrow \min. \tag{3}$$

При следующих ограничениях:

$$\sum_{i=0}^{|M|} \theta_i \leq T_{\text{полн}}. \tag{4}$$

$$N = n. \tag{5}$$

**Численный метод решения задачи**

Обозначим следующее.

$\Psi^c = (c_{ij})_{i=1, j=0}^{|S|, |M|}$  — матрица стоимостей развертывания  $M_j$  ПуСО на  $S_i$  месте;

$\Psi^t = (T_{ij})_{i=1, j=0}^{|S|, |M|}$  — матрица времени развертывания  $M_j$  ПуСО на  $S_i$  месте.

$\Psi^N = (y_{ij})_{i=1, j=0}^{|S|, |M|}$  — матрица количества эвакуированных в единицу времени через  $M_j$  ПуСО, размещенный на  $S_i$  месте.

Решением оптимизационной задачи (3)–(5) является матрица  $X = (x_{ij})_{i=1, j=0}^{|S|, |M|}$ , такая что  $\sum_j x_{ij} = 1$  для любых  $i, j \in \{0, 1\}$ .

Матрица может быть получена методом полного перебора. При этом необходимо рассмотреть  $|S|^{|M|}$  вариантов матриц  $x$ . Задача имеет экспоненциальную сложность, однако современные ЭВМ позволяют реализовать этот процесс за разумное время. Основная проблема заключается в хранении значений  $\Psi^c$ ,  $\Psi^t$  и  $\Psi^N$ , поэтому при реализации алгоритма необходимо отбра-

сывать те значения, которые не удовлетворяют условиям (4) и (5).

Проверку условий (4) и (5) можно свести к проверке одного условия, а именно:

$$sum\left(\left(M(T_{полн}) - \Psi^t\right)\Psi^N X\right) \geq n, \tag{6}$$

где  $sum(\square)$  — сумма элементов матрицы;  $M(T_{полн})$  — матрица размера  $|S| \times |M|$ , элементы которой равны  $T_{полн}$ . В этой записи умножение матриц воспринимается как поэлементное умножение.

Также каждое значение выражения (6) сопоставляется со значением стоимости развертывания всех ПуСО в зависимости от количества зон пропуска и мест их расположения (7).

Выражение (6) описывает количество эвакуированных за отведенное время.

Таким образом, алгоритм решения задачи (3)–(4) имеет следующий вид (рис. 1).

$$sum(\Psi^c X). \tag{7}$$

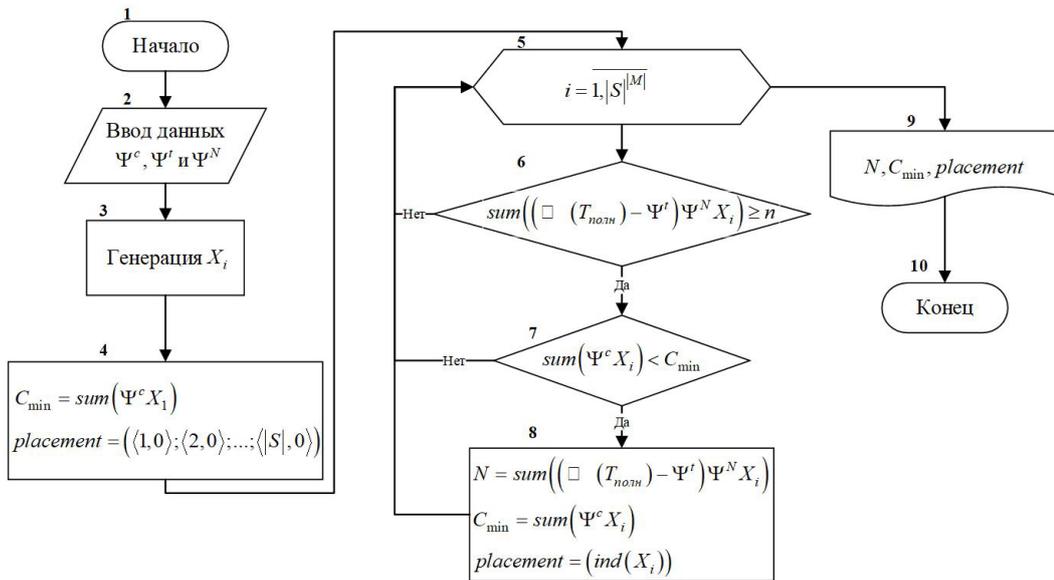


Рис. 1. Алгоритм решения задачи (3)–(4)  
Fig. 1. The algorithm for solving the problem (3)–(4)

Блок 1. Начало работы программы.

Блок 2. Ввод данных. Вводятся матрицы стоимости развертывания  $\Psi^c$ , времени развертывания  $\Psi^t$  и пропускной способности  $\Psi^N$  ПуСО.

Блок 3. Генерируются все возможные варианты конфигураций ПуСО.

Блок 4. Инициализируются переменные  $C_{min}$  и  $placement$ . В переменной  $C_{min}$  хранится значение минимальной стоимости развер-

тивания, в переменной *placement* хранится конфигурация ПУСО. Вектор  $(\langle 1, 0 \rangle; \langle 2, 0 \rangle; \dots; \langle |S|, 0 \rangle)$  показывает, сколько зон пропуска необходимо на  $S_j$  месте.

Блок 5. Запуск цикла по всех конфигурациям ПУСО.

Блок 6. Если количество эвакуированных больше или равно количеству людей, которых необходимо эвакуировать, то переход к блоку 7 или 5.

Блок 7. Если стоимость развертывания при  $X_i$  конфигурации ПУСО меньше, чем полученное ранее значение  $C_{min}$ , то переход к блоку 8 или 5.

Блок 8. В переменную  $N$  записывается количество эвакуированных при  $X_i$  конфигурации ПУСО, в переменную  $C_{min}$  — стоимость развертывания при  $X_i$  конфигурации ПУСО; в *placement* — значения функции *ind* ( $X_i$ ). Функция *ind* ( $X$ ) возвращает вектор вида  $(\langle 1, j_1 \rangle; \langle 2, j_2 \rangle; \dots; \langle |S|, j_{|S|} \rangle)$ ,

кортеж  $\langle k, j_k \rangle$  соответствует индексу ненулевого элемента  $k$ -ой строки матрицы  $X_i$ .

Блок 9. Вывод значений  $N$ ,  $C_{mi}$  и *placement*.

Блок 10. Окончание программы.

### Численный пример

В результате аварии на радиационно-опасном объекте необходимо эвакуировать населенный пункт численностью 1 тыс. чел. Время на эвакуацию составляет 2 часа. Для организации санитарной обработки эвакуированного населения может быть развернуто не более 3 ПУСО. Исходя из численности сотрудников на каждом ПУСО может быть не более чем 4 потока. Пропускная способность каждого ПУСО, время развертывания и стоимость приведены в табл. 2, 3, 4 соответственно.

**Таблица 2**  
**Пропускная способность ПУСО**

Table 2  
Capacity of sanitary treatment points

Место развертывания ПУСО Deployment location of sanitary treatment points	Количество зон пропуска Number of pass zones		
	1	2	3
1	1	2	3
2	2	3	4
3	3	4	5

**Таблица 3**  
**Время развертывания ПУСО**

Table 3  
Deployment time of sanitary treatment points

Место развертывания ПУСО Deployment location of sanitary treatment points	Количество зон пропуска Number of pass zones		
	1	2	3
1	2	1	1
2	5	3	1
3	4	2	1

**Таблица 4**  
**Стоимость развертывания ПуСО**

Table 4  
Deployment cost of sanitation treatment points

Место развертывания ПуСО Deployment location of sanitary treatment points	Количество зон пропуска Number of pass zones		
	1	2	3
1	2	3	3
2	1	3	4
3	2	3	4

Необходимо рассчитать количество ПуСО для эвакуации людей из населенного пункта за отведенное время с минималь-

ными затратами на их развертывание. Исходя из условия задачи, модель имеет следующие параметры:

$$n = 1000; \Psi^c = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 3 & 3 \\ 0 & 1 & 3 & 4 \\ 0 & 2 & 3 & 4 \end{pmatrix}; \Psi^t = \begin{pmatrix} 0 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 5 & 3 & 1 \\ 0 & 4 & 2 & 1 \end{pmatrix}; \Psi^N = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 2 & 3 & 4 \\ 0 & 3 & 4 & 5 \end{pmatrix}.$$

В силу небольшой размерности задачи приведем графики зависимости значений и от конфигурации ПуСО (рис. 2). На ука-

занном графике значения отсортированы по возрастанию, а также каждое значение поделено на 100 для масштабирования.

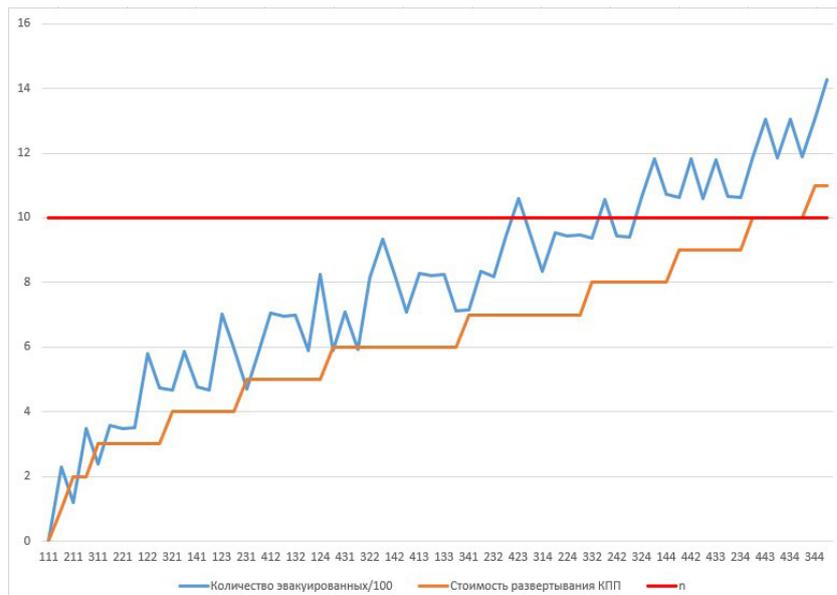


Рис. 2. Графики зависимости  $N_i$  и  $C_i$  от конфигурации ПуСО

Fig. 2. Graphs of the dependence of  $N_i$  and  $C_i$  on the configuration of the deploying sanitation treatment points

Таким образом, оптимальная конфигурация развертывания ПуСО имеет следующий вид. На месте 1 необходимо развернуть ПуСО с 3 зонами пропуска, на месте 2 — с 2 зонами пропуска, на месте 3 — с 3 зонами пропуска. При этом количество эвакуированных — 1 059 чел., а стоимость — 7 у. е.

### Выводы

В статье было приведено формальное описание задачи об оптимальной расстановке ПуСО различного вида. Также разработан численный метод, позволяющий определить оптимальный набор ПуСО, учитывающий ограничения местности, функ-

циональных возможностей ПуСО и т. д. Приведен численный пример расстановки ПуСО на местности.

При постановке задачи был допущен ряд упрощений, таких как ограниченное число людей, которых необходимо эвакуировать, также задача решалась при условии, что все люди должны быть эвакуированы. На практике картина другая: поток людей может быть неограниченным, время пропуска и прибытия людей может иметь произвольное распределение. К тому же не все люди могут быть эвакуированы за отведенное время. Таким образом, необходимо разработать математическую модель, которая учитывала бы все эти факторы, чему будут посвящены следующие работы.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий российской федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2022 году» // МЧС России : офиц. сайт. URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/2022-god> (дата обращения: 13.06.2025).
2. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий российской федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2023 году» // МЧС России : офиц. сайт. URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/7343> (дата обращения: 13.06.2025).
3. Государственный доклад «О состоянии защиты населения и территорий российской федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2024 году» // МЧС России : офиц. сайт. URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/7807> (дата обращения: 13.06.2025).
4. Математическое моделирование действий органов внутренних дел в чрезвычайных обстоятельствах / В. В. Меньших [и др.]. Воронеж : Воронежский институт МВД России, 2016. 187 с.
5. Меньших В. В., Никитенко В. А. Численный метод агрегирования автоматных моделей с использованием алгебраических операций над автоматами // Проблемы управления. 2023. № 6. С. 66–75.
6. Меньших В. В., Горлов В. В., Никитенко В. А. Учет синергетических эффектов при композиции автоматных моделей действий подразделений силовых ведомств, участвующих в ликвидации чрезвычайных обстоятельств // Вестник Воронежского института МВД России. 2023. № 2. С. 60–68.

7. Меньших В. В., Никитенко В. А. Оптимизация последовательности действий при совместном функционировании объектов или систем с учетом синергетических эффектов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математика. Механика. Физика. 2024. Т. 16, № 1. С. 32–38.
8. Ульянкина Е. Н., Гаджиев Г. О., Глубоков Ю. А. Решение задачи оптимального распределения ресурсов в военной сфере // Вестник науки. 2024. Т. 1, № 8 (77). С. 204–211.

## REFERENCES

1. State report “On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2022” // Ministry of Emergency Situations of Russia : official website. URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/2022-god> (date of application: 13.06.2025).
2. State report “On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2023” // Ministry of Emergency Situations of Russia : official website. URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/7343> (date of application: 13.06.2025).
3. State report “On the state of protection of the population and territories of the Russian Federation from natural and man-made emergencies in 2024” // Ministry of Emergency Situations of Russia : official website. URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/7807> (date of application: 13.06.2025).
4. Mathematical modeling of actions of internal affairs bodies in emergency circumstances / V. V. Menshikh et al. Voronezh : Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2016. 187 p.
5. Menshikh V. V., Nikitenko V. A. Numerical method of automata model aggregation using algebraic operations over automata // Management Problems. 2023. № 6. pp. 66–75.
6. Menshikh V. V., Gorlov V. V., Nikitenko V. A. Accounting for synergetic effects in the composition of automata models of actions of units of law enforcement agencies involved in the elimination of emergency circumstances // Bulletin of the Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2023. № 2. pp. 60–68.
7. Menshikh V. V., Nikitenko V. A. Optimization of the sequence of actions at joint functioning of objects or systems taking into account synergetic effects // Bulletin of South Ural State University. Series: Mathematics. Mechanics. Physics. 2024. Т. 16, № 1. pp. 32–38.
8. Ulyankina E. N., Gadzhiev G. O., Glubokov Yu. A. Solution of the problem of optimal resource allocation in the military sphere // Vestnik nauki. 2024. Т. 1, № 8 (77). pp. 204–211.

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Горлов Виталий Викторович**, канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры тактико-специальной подготовки Воронежского института МВД России (394065, Российская

Федерация, г. Воронеж, проспект Патриотов, д. 53); РИНЦ ID: 554810; ORCID: 0009-0002-7926-1651; e-mail: gorlovvv@mail.ru

**Меньших Валерий Владимирович**, д-р физ.-мат. наук, проф., профессор кафедры математики и моделирования систем Воронежского института МВД России, (394065, Российская Федерация, г. Воронеж, проспект Патриотов, д. 53); РИНЦ ID: 382426; Scopus Author ID: 6603470623; ResearcherID: AAZ-6806-2021; ORCID: 0000-0001-9235-4997; e-mail: menshikh@list.ru

**Никитенко Виталий Алексеевич**, канд. техн. наук, преподаватель кафедры математики и моделирования систем Воронежского института МВД России (394065, Российская Федерация, г. Воронеж, проспект Патриотов, д. 53); РИНЦ ID: 1129459; ORCID: 0009-0006-1948-3817; e-mail: vitalijnikitenko82043@gmail.com

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Vitaly V. Gorlov**, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Department of Tactical and Specialized Training Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (53 Patriotov Avenue, Voronezh, 394065, Russian Federation); RSC ID: 554810; ORCID: 0009-0002-7926-1651; e-mail: gorlovvv@mail.ru

**Valery V. Menshikh**, Dr. Sci. (Phys.-Math), Professor, Professor, Department of Mathematics and Systems Modeling Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (53 Patriotov Avenue, Voronezh, 394065, Russian Federation); RSC ID: 382426; Scopus Author ID: 6603470623; ResearcherID: AAZ-6806-2021; ORCID: 0000-0001-9235-4997; e-mail: menshikh@list.ru

**Vitaly A. Nikitenko**, Cand. Sci. (Eng.), Lecturer, Department of Mathematics and Systems Modeling Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (53 Patriotov Avenue, Voronezh, 394065, Russian Federation); RSC ID: 1129459; ORCID: 0009-0006-1948-3817; e-mail: vitalijnikitenko82043@gmail.com

Поступила в редакцию 22.04.2025  
Одобрено после рецензирования 05.05.2025  
Принята к публикации 15.06.2025