

## Оптимизация управленческих решений при проведении поисково-спасательных операций

Наталья Владимировна Каменецкая ✉, Анатолий Павлович Корольков, Сергей Аркадьевич Нефедьев, Юрий Дмитриевич Моторыгин

Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, г. Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

**Введение.** Эффективное применение сил и средств МЧС России для решения широкого спектра задач по предназначению в значительной степени зависит от деятельности системы управления ведомства, связанной с разработкой оптимальных решений и планов. Руководитель соответствующего уровня управления МЧС России при выработке решения сталкивается с необходимостью разработки оптимальных в ожидаемых условиях обстановки способов действий подчиненных сил и средств. Использование методов теории принятия решений и исследования операций в таких условиях является наиболее прагматичным подходом.

**Цели и задачи.** Нахождение оптимального плана обнаружения потерпевшего катастрофу объекта в зоне ЧС в кратчайшие сроки и с минимальным количеством жертв — задача оптимизационная, которую следует решать с помощью известных математических методов (методов исследования операций). Эта задача может быть сформулирована так: определить оптимальную последовательность обхода участков района поиска объекта в зоне катастрофы в кратчайшие сроки.

**Методы.** Для решения поставленной задачи использованы два метода: метод динамического программирования (ДП) и приближенный метод, полученный экспериментально. С помощью составленного функционального уравнения Р. Беллмана построена математическая модель для прогнозирования различных вариантов развития событий и нахождения оптимального варианта решения задачи.

**Результаты и их обсуждение.** В статье рассмотрены методы оптимизации решений при проведении поисково-спасательных операций в зоне чрезвычайной ситуации с целью поддержки принятия управленческих решений в оперативной деятельности МЧС России. С использованием метода ДП предложен способ нахождения оптимального плана обследования участков района поиска объекта. Приведены расчеты с конкретными исходными данными для составления оптимального маршрута поиска объекта в кратчайшие сроки. Предложен приближенный способ отыскания оптимальной последовательности обхода участков поиска объекта при незначительном упрощении исходных данных, что доказано экспериментально на различных примерах и с различными исходными данными.

**Выводы.** Математическое моделирование успешно применяется в задачах оптимизации процессов управления силами и средствами МЧС России. Методы исследования операций используются также при решении задач оперативной деятельности министерства, которые используют ДП для пошагового нахождения оптимального варианта управленческого решения.

**Ключевые слова:** катастрофы; подразделение спасателей; исследование операций; метод динамического программирования; оптимизация поиска

**Для цитирования:** Каменецкая Н.В., Корольков А.П., Нефедьев С.А., Моторыгин Ю.Д. Оптимизация управленческих решений при проведении поисково-спасательных операций // Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety. 2023. Т. 32. № 4. С. 68–76. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.68-76

✉ Каменецкая Наталья Владимировна, e-mail: natkam53@mail.ru.

## Optimization of management decisions during search and rescue operations

Nataliya V. Kamenetskaya ✉, Anatoliy P. Korolkov, Sergey A. Nefedev, Yuriy D. Motorygin

Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Saint Petersburg, Russian Federation

### ABSTRACT

**Introduction.** Effective application of forces and means of the Ministry of Emergency Situations of Russia for solving a wide range of tasks according to the intended purpose to a great extent depends on the activity of

the management system of the department connected with the development of optimal decisions and plans. The head of the appropriate level of management of the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation when making a decision faces the need to develop optimal ways of action of subordinate forces and means in the expected conditions of the situation. The use of methods of decision-making theory and operations research in such conditions is the most pragmatic approach.

**Aims and purposes.** Finding the optimal plan for detecting the victim of a catastrophe object in the emergency zone in the shortest possible time and with a minimum number of casualties is an optimization problem, which should be solved using known mathematical methods (methods of operations research). This problem can be formulated as follows: to determine the optimal sequence of traversal of the search area of the object in the disaster zone in the shortest possible time.

**Methods.** Two methods were used to solve the problem: the method of dynamic programming (DP) and an approximate method obtained experimentally. Using the R. Bellman functional equation, a mathematical model for predicting different variants of event development and finding the optimal variant of the problem solution was constructed.

**Results and discussions.** The article considers the methods of optimization of decisions during search and rescue operations in the emergency zone in order to support managerial decision-making in the operational activity of the Ministry of Emergency Situations of Russia. The method of finding the optimal plan of surveying the areas of the search area of the object is proposed using the method of DP. Calculations with specific initial data for drawing up the optimal route of object search in the shortest possible time are given. The approximate method of finding the optimal sequence of detour of object search areas with a slight simplification of initial data is proposed, which is proved experimentally on different examples and with different initial data.

**Conclusions.** Mathematical modelling is successfully applied in tasks of optimization of processes of management of forces and means of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Methods of operations research are also used in solving the problems of operational activity of the Ministry, which use DP for step-by-step finding the optimal variant of management decision.

**Keywords:** disaster; rescue units; operations research; method of dynamic programming; search optimization

**For citation:** Kamenetskaya N.V., Korolkov A.P., Nefedev S.A., Motorygin Yu.D. Optimization of management decisions during search and rescue operations. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2023; 32(4):68-76. DOI: 10.22227/0869-7493.2023.32.04.68-76 (rus).

✉ Nataliya Vladimirovna Kamenetskaya, e-mail: natkam53@mail.ru.

## Введение

Одной из актуальных проблем, возникающих в ходе предупреждения и ликвидации ЧС на объектах водного транспорта, является разрешение противоречия между объемом обрабатываемой информации, используемой информационной технологией и сложностью реализации процедуры принятия решений должностными лицами ЦУКС. Несмотря на то что в данном направлении проведено большое количество исследований, существующие противоречия в достаточной степени не разрешены. Выходом из существующего положения является автоматизация процедуры поддержки принятия решений по предупреждению и ликвидации ЧС на основе современных информационных технологий.

Неотъемлемой частью поисково-спасательных операций является комплекс организационных и технических мероприятий, обеспечивающих обнаружение и установление координат местоположения людей, которые терпят бедствие на море или на суше, и их последующее спасение.

Именно от эффективности функционирования системы управления зависит успешное проведение поисково-спасательной операции с применением сил и средств МЧС России.

Руководитель соответствующего уровня управления МЧС России при выработке решения сталкивается с необходимостью разработки оптимальных

в ожидаемых условиях обстановки способов действий подчиненных сил и средств. Использование методов теории принятия решений и исследования операций в этих условиях является наиболее прагматичным подходом [1–4].

## Цели и задачи исследования

С начала века возросли масштабность, частота и тяжесть катастроф как на суше, так и на море с увеличением числа пострадавших. Для своевременного оказания экстренной помощи терпящим бедствие в зоне ЧС, тем более если инцидент произошел в экстремальных условиях Арктики, требуется вовлечение значительных сил и средств спасения в предельно короткие сроки. Своевременное и квалифицированное оказание всесторонней помощи пострадавшим является необходимым условием сохранения жизни людей в зоне бедствия.

Результаты анализа статистических данных произошедших катастроф свидетельствуют, что фактор времени для спасения людей в зоне бедствия играет решающую роль. Обнаружение затонувшего судна или потерпевшего крушение лайнера в зоне катастрофы является одной из наисложнейших задач [5].

Таким образом, проблема поиска, спасения и оказания помощи пострадавшим в катастрофах в районах бедствия является актуальной. Необходима оптимизация использования всех средств поиска

и спасения (авиационных, морских, космических, радионавигационных) для минимизации времени поиска, количества погибших и пострадавших в зоне бедствия как на море, так и на суше.

### Постановка задачи

В качестве частной задачи оптимизации процесса принятия управленческого решения рассмотрим задачу о разработке оптимального плана обследования участков района поиска с целью обнаружения объекта, терпящего бедствие в труднодоступном районе, в кратчайшие сроки.

Нахождение оптимального плана обнаружения потерпевшего катастрофу объекта в зоне ЧС в кратчайшие сроки и с минимальным количеством жертв — задача оптимизационная, которую следует решать с помощью известных математических методов (методов исследования операций).

Решение данной задачи может быть осуществлено с помощью метода динамического программирования [1–4]. Наряду с этим возможно использование и приближенного способа отыскания оптимальной очередности обследования участков района поиска объекта, полученного экспериментально и дающего тот же самый результат.

Применение математического моделирования для прогнозирования различных вариантов развития событий в сложных условиях ликвидации последствий ЧС позволяет обеспечить высокую эффективность формирования оптимальных управленческих решений, что подтверждается многолетним зарубежным опытом [6–12]. Для решения ряда задач оперативной деятельности подразделений МЧС России используются методы теории принятия решений и исследования операций [13–18].

### Методы исследования

Для определения оптимальной последовательности обхода участков района поиска объекта в зоне бедствия в кратчайшие сроки применим метод ДП. Построим математическую модель для нахождения оптимального плана решения поставленной задачи.

Предположим, район, в котором с большой вероятностью находится объект поиска, например затонувшее судно или потерпевший крушение авиалайнер, состоит из пяти участков ( $N = 5$ ). Отряд спасателей, который занимается поиском объекта в зоне катастрофы, должен выполнить задачу в кратчайшие сроки. Исходными данными для отыскания оптимальной последовательности обхода участков, где возможно находится объект поиска, являются:

$p_i$  — вероятности нахождения объекта на  $i$ -м участке;

$T_{0i}$  — время перехода спасателя из исходного пункта к  $i$ -му участку;

$T_{ij}$  — время перехода спасателя из  $i$ -го участка в  $j$ -й;

$T_i$  — среднее время обхода  $i$ -го участка.

Участок считается обследованным в двух случаях: либо объект обнаружен на этом участке, либо установлен факт его отсутствия на нем.

Поставленную задачу можно решить методом ДП, который подразумевает пошаговый поиск оптимального плана [2–4]. Функциональное уравнение Р. Беллмана для данной задачи имеет вид [1, 3]:

$$f_n^{(b_n)}(a_1, \dots, a_n) = \min_{1 \leq k \leq n} \left\{ T_{a_k} + \left( 1 - \frac{p_{a_k}}{\sum_{i=1}^n p_{a_i}} \right) \times \left[ f_{n-1}^{(b_{n-1})}(a_1, a_2, \dots, a_{k-1}, a_{k+1}, \dots, a_n) + T_{a_k b_{n-1}} \right] \right\},$$

где  $a_k$  — номер участка, который обследуется первым в последовательности ( $a_1, a_2, \dots, a_{k-1}, a_k, a_{k+1}, \dots, a_n$ );  $T_{a_k}$  — среднее время, которое потребуется для обследования участка  $a_k$ ;

$1 - \frac{p_{a_k}}{\sum_{i=1}^n p_{a_i}}$  — вероятность того, что на участке  $a_k$  объекта не оказалось, значит, объект находится на одном из  $(n-1)$  участков  $a_1, a_2, \dots, a_{k-1}, a_{k+1}, \dots, a_n$ ;

$f_{n-1}^{(b_{n-1})}(a_1, a_2, \dots, a_{k-1}, a_{k+1}, \dots, a_n)$  — минимальное время обхода  $(n-1)$  участков в оптимальной последовательности, полученное на предыдущем этапе процесса ДП;

$T_{a_k, b_{n-1}}$  — время, которое потребуется для перехода от участка  $a_k$  к участку  $b_{n-1}$ , который в оптимальной последовательности обхода последних  $(n-1)$  участков должен обследоваться первым;

$f_n^{(b_n)}(a_1, a_2, \dots, a_{k-1}, a_k, a_{k+1}, \dots, a_n)$  — время обхода  $n$  участков в оптимальной очередности, обеспечивающей завершение их обследования за минимальное время (оптимальное время на  $n$ -м этапе);

$b_n$  — номер участка, который в оптимальной очередности должен быть обследован первым. Поскольку этот номер до составления плана неизвестен, то необходимо перебрать все  $n$  вариантов выбора одного из участков в качестве первого.

При этом  $b_n$  равно тому значению  $a_k$ , при котором достигается минимум.

Некоторые особенности существуют при  $n = 1$  и при  $n = N$ .

При  $n = 1$  имеется всего один вариант:

$$f_1^{(a_1)}(a_1) = T_{a_1}.$$

В случае  $n = N$  нужно еще учесть время прихода на участок, обследуемый первым.

Метод ДП позволяет ограничиться только  $n$  вариантами, отличающимися номером участка, обследуемого первым в последовательности  $a_1, a_2, \dots, a_{k-1}, a_k, a_{k+1}, \dots, a_n$ .

В динамическом программировании процесс нахождения оптимального плана разбивается на этапы, число которых в данной задаче равно числу участков  $N$ .

В процессе пошагового поиска оптимального плана для данной задачи сначала находится оптимальное решение для различных комбинаций, состоящих из двух участков. Согласно принципу оптимальности Беллмана, на следующем этапе ДП находится оптимальное решение для различных комбинаций, состоящих из трех участков с учетом оптимальных решений, полученных на предыдущем этапе. И так продолжается до последнего этапа. Таким образом, формируется «оптимальное управление» в терминах метода ДП, которое и является искомым решением: оптимальной последовательностью обхода участков в зоне катастрофы с целью поиска пропавшего объекта за минимальное время.

**Пример нахождения оптимальной последовательности обхода участков района поиска объекта в зоне ЧС в кратчайшее время методом ДП**

Исходные данные для примера приведены в табл. 1 и 2.

Если на  $i$ -м участке обнаружен объект или установлен факт его отсутствия на нем, то этот участок считается обследованным. Время обследования двух последних, трех последних, четырех последних и всех участков приведено в табл. 3–6, в которых оптимальные последовательности обхода участков, полученные с помощью функционального уравнения Р. Беллмана и соответствующие минимальному времени  $f_n^{(b_n)}$ , выделены жирным шрифтом.

Продемонстрируем применение функционального уравнения Р. Беллмана при заполнении табл. 3–6. Покажем, как заполняется одна из строк в табл. 5. Для набора участков 1, 3, 4 и 5 первым может обследоваться любой из этих четырех участков. Пусть первым обследуется четвертый участок, на что требуется 10 ед. времени. Вероятность того, что на четвертом участке нет объекта поиска, равна:

$$1 - \frac{p_4}{p_1 + p_3 + p_4 + p_5} = 1 - \frac{0,2}{0,6} = 0,67.$$

Эта вероятность получилась из условия, что остальные участки, не входящие в данный набор (второй участок), уже обследованы, и объекта на них не оказалось.

С вероятностью 0,67 нет объекта и на четвертом участке, и тогда нужно обследовать другие

**Таблица 1.** Исходные данные по  $p_i, T_{0i}$  и  $T_i$   
**Table 1.** Initial data for  $p_i, T_{0i}$  and  $T_i$

Номер участка $i$ Number of section $i$	1	2	3	4	5
$p_i$	0,1	0,4	0,2	0,2	0,1
$T_{0i}$	2	2,5	2,8	2,5	3
$T_i$	7	5	4	10	2

**Таблица 2.** Исходные данные по времени перехода спасателя из  $i$ -го участка в  $j$ -й  
**Table 2.** Initial data on the time of the rescuer's transition from the  $i$ -th section to the  $j$ -th

$j$ -й участок $j$ -th section	$i$ -й участок $i$ -th section				
	1	2	3	4	5
1	–	0,5	1	0,5	0,8
2	0,5	–	0,3	1,2	0,8
3	1	0,3	–	1,5	0,6
4	0,5	1,2	1,5	–	0,5
5	0,8	0,8	0,6	0,5	–

**Таблица 3.** Оптимальные решения для двух участков  
**Table 3.** Optimal solutions for two sections

Участки ( $a_1, a_2$ ) Sections ( $a_1, a_2$ )	Последовательность обхода участков The sequence of traversing sections	$\tau_{k,2}$	Участки ( $a_1, a_2$ ) Sections ( $a_1, a_2$ )	Последовательность обхода участков The sequence of traversing sections	$\tau_{k,2}$
1 и 2 1 and 2	1, 2 <b>2, 1</b>	11,4 <b>6,5</b>	2 и 4 2 and 4	2, 4 4, 2	<b>8,73</b> 14,13
1 и 3 1 and 3	1, 3 <b>3, 1</b>	10,33 <b>6,67</b>	2 и 5 2 and 5	2, 5 5, 2	<b>5,56</b> 6,64
1 и 4 1 and 4	1, 4 <b>4, 1</b>	14,0 <b>13,5</b>	3 и 4 3 and 4	3, 4 4, 3	<b>9,75</b> 12,75
1 и 5 1 and 5	1, 5 <b>5, 1</b>	8,4 <b>5,9</b>	3 и 5 3 and 5	3, 5 5, 3	<b>4,87</b> 5,07
2 и 3 2 and 3	2, 3 3, 2	<b>6,43</b> 7,53	4 и 5 4 and 5	4, 5 <b>5, 4</b>	10,83 <b>9,0</b>

три участка, 1, 3 и 5. Оптимальная последовательность обхода участков 1, 3 и 5 приведена в табл. 4. Это последовательность **3, (5, 1)**, а минимальное время обхода равно  $f_4^{(3)}(1, 3, 5) = 7,25$ . При этом будет затрачено на переход с четвертого участка на третий  $T_{4,3} = 1,5$  ед. времени. Таким образом, для обхода участков 1, 3,

**Таблица 4.** Оптимальные решения для трех участков  
**Table 4.** Optimal solutions for three sections

Участки ( $a_1, a_2, a_3$ ) Sections ( $a_1, a_2, a_3$ )	Последовательность обхода участков The sequence of traversing sections	$\tau_{k,3}$	Участки ( $a_1, a_2, a_3$ ) Sections ( $a_1, a_2, a_3$ )	Последовательность обхода участков The sequence of traversing sections	$\tau_{k,3}$
1, 2 и 3 1, 2 and 3	1, (2, 3) <b>2, (3, 1)</b> 3, (2, 1)	12,94 <b>7,99</b> 8,86	1, 4 и 5 1, 4 and 5	1, (5, 4) 4, (5, 1) <b>5, (4, 1)</b>	14,35 13,2 <b>12,5</b>
1, 2 и 4 1, 2 and 4	1, (2, 4) <b>2, (4, 1)</b> 4, (2, 1)	14,91 <b>11,3</b> 15,5	2, 3 и 4 2, 3 and 4	<b>2, (3, 4)</b> 3, (2, 4) 4, (2, 3)	<b>10,02</b> 10,76 15,72
1, 2 и 5 1, 2 and 5	1, (2, 5) <b>2, (5, 1)</b> 5, (2, 1)	12,05 <b>7,23</b> 8,83	2, 3 и 5 2, 3 and 5	<b>2, (3, 5)</b> 3, (2, 5) 5, (2, 3)	<b>7,22</b> 8,19 8,20
1, 3 и 4 1, 3 and 4	1, (3, 4) <b>3, (4, 1)</b> 4, (3, 1)	15,6 <b>13,0</b> 14,9	2, 4 и 5 2, 4 and 5	<b>2, (5, 4)</b> 4, (2, 5) 5, (2, 4)	<b>9,20</b> 14,83 10,17
1, 3 и 5 1, 3 and 5	1, (3, 5) <b>3, (5, 1)</b> 5, (3, 1)	11,4 <b>7,25</b> 7,45	3, 4 и 5 3, 4 and 5	<b>3, (5, 4)</b> 4, (3, 5) 5, (3, 4)	<b>9,76</b> 13,82 10,28

**Таблица 5.** Оптимальные решения для четырех участков  
**Table 5.** Optimal solutions for four sections

Участки ( $a_1, a_2, a_3, a_4$ ) Sections ( $a_1, a_2, a_3, a_4$ )	Последовательность обхода участков The sequence of traversing sections	$\tau_{k,4}$	Участки ( $a_1, a_2, a_3, a_4$ ) Sections ( $a_1, a_2, a_3, a_4$ )	Последовательность обхода участков The sequence of traversing sections	$\tau_{k,4}$
1, 2, 3 и 4 1, 2, 3 and 4	1, (2, 3, 4) <b>2, (3, 4, 1)</b> 3, (2, 4, 1) 4, (2, 3, 1)	16,35 <b>12,39</b> 12,81 17,15	1, 2, 4 и 5 1, 2, 4 and 5	4, (2, 5, 1) 5, (4, 1, 2)	16,32 12,59
1, 2, 3 и 5 1, 2, 3 and 5	1, (2, 3, 5) <b>2, (3, 5, 1)</b> 3, (2, 5, 1) 5, (2, 3, 1)	13,76 8,78 9,65 9,69	1, 3, 4 и 5 1, 3, 4 and 5	1, (3, 5, 4) <b>3, (5, 4, 1)</b> 4, (3, 5, 1) 5, (3, 4, 1)	15,97 <b>12,73</b> 15,86 13,33
1, 2, 4 и 5 1, 2, 4 and 5	1, (2, 5, 4) <b>2, (5, 4, 1)</b>	15,49 <b>11,65</b>	2, 3, 4 и 5 2, 3, 4 and 5	<b>2, (3, 5, 4)</b> 3, (2, 5, 4) 4, (2, 3, 5) 5, (2, 3, 4)	<b>10,59</b> 11,39 16,55 11,62

**Таблица 6.** Оптимальные решения для пяти участков  
**Table 6.** Optimal solutions for five sections

Участки ( $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ ) Sections ( $a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$ )	Последовательность обхода участков The sequence of traversing sections	$\tau_{k,5} + T_{0,a_k}$
1, 2, 3, 4 и 5 1, 2, 3, 4 and 5	1, (2, 3, 5, 4) <b>2, (3, 5, 4, 1)</b> 3, (2, 5, 4, 1) 4, (2, 3, 5, 1) 5, (2, 3, 4, 1)	18,98 <b>15,32</b> 16,36 20,48 16,87

4 и 5, если начать с четвертого, а остальные обойти в оптимальной последовательности, потребуется затратить  $10 + 0,67(7,25 + 1,5) = 15,86$  ед. времени.

На последнем этапе процесса динамического программирования получается так называемое «оптимальное управление» в терминах метода ДП на основе пошагового применения функционального уравнения Р. Беллмана. Таким образом, оптимальная последовательность обхода для всех пяти участков **(2, 3, 5, 4, 1)** обеспечивает обнаружение объекта в кратчайшее время **15,32** ед. времени.

**Пример определения оптимальной последовательности обхода участков района поиска объекта приближенным способом в кратчайшее время**

Рассмотрим приближенный способ отыскания последовательности обхода участков района поиска объекта, который является более простым и не требует долгих вычислений.

Экспериментально, на различных примерах и с разными исходными данными, можно показать, что если пренебречь временем перехода из исходного пункта на тот или иной участок и временем перехода из одного участка в другой и считать главными параметрами вероятности  $p_i$  пребывания объекта на  $i$ -м участке и время  $T_i$  обследования  $i$ -го участка, то первым в оптимальной последовательности обхода участков должен быть участок, для которого отношение  $p_i/T_i$  имеет наибольшее значение [1, 3].

Таким образом, при несущественном упрощении исходных данных, можно предложить более простой способ определения оптимальной последовательности обхода участков, который дает значительное сокращение времени поиска объекта по сравнению с полным перебором методом ДП, что очень важно в экстремальных условиях.

Этой оптимальной последовательности соответствует расположение в убывающем порядке отношений  $p_i/T_i$ . В рассмотренном выше примере эти отношения равны:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{0,1}{7} = 0,014;$$

$$\frac{p_2}{T_2} = \frac{0,4}{5} = 0,08;$$

$$\frac{p_3}{T_3} = \frac{0,2}{4} = 0,05;$$

$$\frac{p_4}{T_4} = \frac{0,2}{10} = 0,02;$$

$$\frac{p_5}{T_5} = \frac{0,1}{2} = 0,05.$$

Отсюда получаются две оптимальные последовательности обхода участков района поиска объекта в зоне чрезвычайной ситуации: **2, 3, 5, 4, 1** или **2, 5, 3, 4, 1**. Первая последовательность совпадает с най-

денной оптимальной последовательностью обхода участков, полученной методом ДП и учитывающей различие в величинах  $T_{0i}$  и  $T_{ij}$  для разных  $i$  и  $j$ .

Вторая оптимальная последовательность по времени, затрачиваемому на обнаружение объекта, будет лишь незначительно уступать первой оптимальной последовательности (**15,98** ед. времени вместо **15,32** ед.). Наличие двух оптимальных последовательностей связано с тем, что на одном из шагов процесса ДП решения данной задачи возникло два равнозначных значения, из которых можно было выбрать любое. Наличие двух оптимальных равнозначных решений в методе ДП встречается довольно часто, но на окончательный результат никак не влияет.

**Результаты и их обсуждение**

Метод ДП позволяет значительно сократить количество вариантов (в данном примере 75) по сравнению с полным перебором всех возможных последовательностей обхода, число которых равно  $5! = 120$  при  $N = 5$ . С увеличением числа участков  $N$  количество переборов резко возрастает. Можно показать, что при  $N = 20$  потребуется перебрать девятизначное число вариантов и только семизначное число в методе ДП.

Приближенный способ отыскания оптимальной последовательности обхода участков при несущественном упрощении исходных данных доказан экспериментально на различных примерах и с различными исходными данными [1, 3]. Этот метод не требует перебора всех вариантов методом ДП, что значительно сократит время поиска в экстремальных условиях, и дает тот же самый результат.

**Выводы**

Математическое моделирование широко применяется с целью поддержки принятия управленческих решений в оперативной деятельности подразделений МЧС России [19, 20].

Анализ применения метода ДП и предложенного в статье приближенного способа для решения сформулированной задачи показал возможность их использования для нахождения оптимального плана обследования участков района поиска объекта в зоне ЧС в труднодоступном районе в кратчайшие сроки.

**СПИСОК ИСТОЧНИКОВ**

1. *Каменецкая Н.В., Медведева О.М., Шинеев Б.С.* Методика разработки оптимального плана обследования участков района поиска объектов в зоне чрезвычайной ситуации // Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты). 2020. № 3 (35). С. 30–36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44070963>
2. *Вентцель Е.С.* Исследование операций. Задачи, принципы, методология. М. : Наука, 2009. 207 с.
3. *Динер И.Я.* Исследование операций. Л. : ВМА, 1969. 605 с.
4. *Вагнер Г.* Основы исследования операций / пер. с англ. М. : Мир, 1973. Т. 3. 504 с.

5. Дунаевский Е.Я., Жбанов А.В. Спасение на море. М. : Транспорт, 1991. 143 с.
6. Batkovskiy A.M., Semenova E.G., Trofimets E.N., Trofimets V.Ya., Fomina A.V. Method for adjusting current appropriations under irregular funding conditions // *Journal of Applied Economic Sciences, Romania: European Research Centre of Managerial Studies in Business Administration*. 2016. Vol. XI. Issue 5 (43). Pp. 828–841.
7. Balychev S.Yu., Batkovskiy A.M., Kravchuk P.V., Trofimets E.N., Trofimets V.Ya. Situational modeling of transportation problems: applied and didactic aspects // *Espacios*. 2018. Vol. 39. Issue 10. P. 27.
8. Modeling and simulation in engineering sciences / Akbar N.S., Beg O.A. (eds.). New York : iTexLi, 2016. 289 p. DOI: 10.5772/62109
9. Modeling, simulation and optimization for science and technology / Fitzgibbon W., Kuznetsov Yu.A., Neittaanmäki P., Pironneau O. (eds.). Amsterdam : Springer, 2014. 248 p. DOI: 10.1007/978-94-017-9054-3
10. Siddiqi A.H., Manchanda P., Bhardwaj R. Mathematical models, methods and applications. New York : Springer, 2015. 309 p. DOI: 10.1007/978-981-287-973-8
11. Empirical modeling and its applications / Habib M. (ed.). New York : ExLi4EvA, 2016. 146 p. DOI: 10.5772/61406
12. Meerschaert M.M. Mathematical modeling. 4th ed. New York : Academic Press, 2013. 368 p.
13. Каменецкая Н.В., Медведева О.М., Хитов С.Б., Сильников М.В. Методика обоснования резерва запасных частей для работы специальной техники в ходе ликвидации чрезвычайной ситуации // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2019. Т. 28. № 3. С. 6–13. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.6-13
14. Каменецкая Н.В., Медведева О.М., Хитов С.Б., Маслаков М.Д. Методика оценки риска отказа в работе специальной техники в ходе ликвидации чрезвычайной ситуации // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2018. Т. 27. № 2–3. С. 5–13. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.5-13
15. Каменецкая Н.В., Медведева О.М., Хитов С.Б., Громов В.Н. Математическое моделирование сравнительного анализа двух тактических приемов по тушению пожаров и проведению аварийно-спасательных работ подразделениями МЧС России // *Пожаровзрывобезопасность/Fire and Explosion Safety*. 2017. Т. 26. № 10. С. 20–26.
16. Matrokhina K.V., Trofimets V.Y., Mazakov E.B., Makhovikov A.B., Khaykin M.M. Development of methodology for scenario analysis of investment projects of enterprises of the mineral resource complex // *Journal of Mining Institute* 2023. Vol. 259. Pp. 112–124. DOI: 10.31897/PMI.2023.3
17. Mazakov E.B., Matrokhina K.V., Trofimets V.Y. Traffic management at the enterprises of the mineral industry // *Advances in raw material industries for sustainable development goals*. London : CRC Press, 2021. Pp. 397–405.
18. Trofimets E.N., Trofimets V.Ya. Computer modelling of physical processes described by parabolic type equations // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1047 (1). P. 012140. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012140
19. Каменецкая Н.В., Медведева О.М., Хитов С.Б. Математическое моделирование при планировании мероприятий на проведение взрывных работ на реках в паводковый период // *Современные тенденции развития науки и технологий*. 2016. № 6–1. С. 22–27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26301006>
20. Каменецкая Н.В., Медведева О.М., Хитов С.Б. Моделирование процесса распределения финансовых средств в интересах эффективной организации радиосвязи в МЧС России // *Природные и техногенные риски (физико-математические и прикладные аспекты)*. 2018. № 1 (25). С. 22–28. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36317957>

## REFERENCES

1. Kamenetskaya N.V., Medvedeva O.M., Shepeev B.C. Technique for developing an optimal survey plan for areas of the search area of the object in the emergency zone. *Natural and technogenic risks (physical, mathematical and applied aspects)*. 2020; 3(35):30-36. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=44070963> (rus).
2. Wentzel E.S. *Operations research. Tasks, principles, methodology*. Moscow, Nauka Publ., 2009; 207. (rus).
3. Diener I.Ya. *Operations research*. Leningrad, Military Medical Academy, 1969; 605. (rus).
4. Wagner H.M. *Principles of operations research: With applications to managerial decisions*. New Jersey, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, 1969.
5. Dunaevsky E.Ya. *Rescue at sea*. Moscow, Transport Publ., 1991; 143. (rus).
6. Batkovskiy A.M., Semenova E.G., Trofimets E.N., Trofimets V.Ya., Fomina A.V. Method for adjusting current appropriations under irregular funding conditions. *Journal of Applied Economic Sciences, Romania: European Research Centre of Managerial Studies in Business Administration*. 2016; 5(XI):828-841.
7. Balychev S.Yu., Batkovskiy A.M., Kravchuk P.V., Trofimets E.N., Trofimets V.Ya. Situational modeling of transportation problems: applied and didactic aspects. *Espacios*. 2018; 39(10):27.
8. *Modeling and simulation in engineering sciences*. Akbar N.S., Beg O.A. (eds.). New York, iTexLi, 2016; 289. DOI: 10.5772/62109

9. *Modeling, simulation and optimization for science and technology*. Fitzgibbon W., Kuznetsov Yu.A., Neittaanmäki P., Pironneau O. (eds.). Amsterdam, Springer, 2014; 248. DOI: 10.1007/978-94-017-9054-3
10. Siddiqi A.H., Manchanda P., Bhardwaj R. *Mathematical models, methods and applications*. New York, Springer, 2015; 309. DOI: 10.1007/978-981-287-973-8
11. *Empirical modeling and its applications*. Habib M. (ed.). New York, ExLi4EvA, 2016; 146. DOI: 10.5772/61406
12. Meerschaert M.M. *Mathematical modeling*. 4th ed. New York, Academic Press, 2013; 368.
13. Kamenetskaya N.V., Medvedeva O.M., Khitov S.B., Silnikov M.V. Methodology for justifying of the spare parts reserve for the work of special technical means in the course of emergency response. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2019; 28(3):6-13. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.03.6-13 (rus).
14. Kamenetskaya N.V., Medvedeva O.M., Khitov S.B., Maslarov M.D. Methodology of estimation of the failures' risks in the work of special technical means in emergency situations. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2018; 27(2-3):5-13. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.02-03.5-13 (rus).
15. Kamenetskaya N.V., Medvedeva O.M., Khitov S.B., Gromov V.N. Comparative analysis of two tactical procedures of fire exercise and carrying out emergency rescue operations by the fire divisions of the MES of Russia. *Pozharovzryvobezopasnost/Fire and Explosion Safety*. 2017; 26(10):20-26. DOI: 10.18322/PVB.2017.26.10.20-26 (rus).
16. Matrokhina K.V., Trofimets V.Y., Mazakov E.B., Makhovikov A.B., Khaykin M.M. Development of methodology for scenario analysis of investment projects of enterprises of the mineral resource complex. *Journal of Mining Institute*. 2023; 259:112-124. DOI: 10.31897/PMI.2023.3
17. Mazakov E.B., Matrokhina K.V., Trofimets V.Y. Traffic management at the enterprises of the mineral industry. *Advances in Raw Material Industries for Sustainable Development Goals*. London, CRC Press, 2021; 397-405.
18. Trofimets E.N., Trofimets V.Ya. Computer modelling of physical processes described by parabolic type equations. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021; 1047(1):012140. DOI: 10.1088/1757-899X/1047/1/012140
19. Kamenetskaya N.V., Medvedeva O.M., Khitov S.B. Mathematical modeling in the planning of activities for carrying out blasting operations on rivers during the flood period. *Modern Trends in the Development of Science and Technology*. 2016; 6-1:22-27. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26301006> (rus).
20. Kamenetskaya N.V., Medvedeva O.M., Khitov S.B. Modeling of the financial resources distribution's process in the interests of efficient organization of radio communication in the Emercom of Russia. *Natural and Man-made Risks (physical, mathematical and applied aspects)*. 2018; 1(25):22-28. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=36317957> (rus).

Поступила 17.04.2023, после доработки 17.05.2023;

принята к публикации 01.06.2023

Received April 17, 2023; Received in revised form May 17, 2023;

Accepted June 1, 2023

### Информация об авторах

**КАМЕНЕЦКАЯ Наталия Владимировна**, канд. техн. наук, доцент кафедры высшей математики и системного моделирования сложных процессов, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; РИНЦ ID: 831852; ResearcherID: P-7170-2019; ORCID: 0000-0002-8575-4877; e-mail: natkam53@mail.ru

**КОРОЛЬКОВ Анатолий Павлович**, канд. техн. наук, профессор кафедры системного анализа и антикризисного управления, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; ORCID: 0009-0001-3707-448X; e-mail: akorolkov@ro.ru

**НЕФЕДЬЕВ Сергей Аркадьевич**, д-р воен. наук, профессор кафедры пожарной безопасности технологических процессов

### Information about the authors

**Nataliya V. KAMENETSKAYA**, Cand. Sci. (Eng.), Docent of Higher Math and System Modeling of Complex Processes Department, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 831852; ResearcherID: P-7170-2019; ORCID: 0000-0002-8575-4877; e-mail: natkam53@mail.ru

**Anatoliy P. KOROLKOV**, Cand. Sci. (Eng.), Professor of Department of System Analysis and Crisis Management, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ORCID: 0009-0001-3707-448X; e-mail: akorolkov@ro.ru

**Sergey A. NEFEDEV**, Doctor of Military Sciences, Professor of Department of Fire Safety of Technological Processes and

и производств, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; РИНЦ ID: 57200560462; ORCID: 0000-0002-2299-4638; e-mail: doktorsan@mail.ru

**МОТОРЫГИН Юрий Дмитриевич**, д-р техн. наук, профессор кафедры криминалистики и инженерно-технических экспертиз, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий, Россия, 196105, г. Санкт-Петербург, Московский пр-т, 149; РИНЦ ID: 57200562602; ORCID: 0000-0002-2407-5061; e-mail: fire-risk@mail.ru

**Вклад авторов:**

**Каменецкая Н.В.** — *написание статьи.*

**Корольков А.П.** — *научное редактирование текста.*

**Нефедьев С.А.** — *научное редактирование текста.*

**Моторыгин Ю.Д.** — *обработка материала.*

*Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.*

Production, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 57200560462; ORCID: 0000-0002-2299-4638; e-mail: doktorsan@mail.ru

**Yuriy D. MOTORYGIN**, Dr. Sci. (Eng.), Professor of Department of Criminalistics and Engineering Expertise, Saint-Petersburg University of State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination on Consequences of Natural Disasters, Moskovskiy Avenue, 149, Saint Petersburg, 196105, Russian Federation; ID RISC: 57200562602; ORCID: 0000-0002-2407-5061; e-mail: fire-risk@mail.ru

**Contribution of the authors:**

**Nataliya V. Kamenetskaya** — *writing an article.*

**Anatoliy P. Korolkov** — *scientific text editing.*

**Sergey A. Nefedev** — *scientific text editing.*

**Yuriy D. Motorygin** — *material processing.*

*The authors declare that there is no conflict of interest.*