

Научная статья

УДК 614.8-052, 551.557.61; DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-77-88

МЕТОДИКА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМОВ ОПЕРАТИВНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЗАЩИТЕ НАСЕЛЕНИЯ И ТЕРРИТОРИЙ ОТ ЗАТОПЛЕНИЙ

✉ Тимарин Алексей Николаевич;

Иванов Евгений Вячеславович;

Ткаченко Павел Николаевич.

Академия гражданской защиты МЧС России, г. Химки, Россия

✉ a.timarin@agz.50.mchs.gov.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке методики, направленной на минимизацию ущерба при затоплениях. Авторы ставят перед собой задачу рационального распределения объемов работ между участками, которым угрожает затопление, на основе метода ветвей и границ. Разработанная методика распределения объемов оперативных мероприятий по защите населения и территорий от затоплений в условиях ограниченного времени и ресурсов при проведении защитных мероприятий позволит рациональным образом распределить имеющиеся силы и средства по участкам работ. Предложенный подход направлен на повышение эффективности выполнения работ силами территориальной подсистемы единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Работа окажется востребованной среди представителей исполнительных органов субъектов Российской Федерации, а также лиц, отвечающих за разработку и внедрение мер по предотвращению и ликвидации последствий затоплений.

Ключевые слова: затопление, защита населения и территорий, чрезвычайная ситуация, метод ветвей и границ, оперативные мероприятия.

Для цитирования: Тимарин А.Н., Иванов Е.В., Ткаченко П.Н. Методика распределения объемов оперативных мероприятий по защите населения и территорий от затоплений // Проблемы управления рисками в техносфере. 2025. № 4 (76). С. 77–88. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-77-88.

Scientific article

METHODOLOGY FOR ALLOCATING THE VOLUME OF OPERATIONAL ACTIVITIES MINIMIZE DAMAGE FROM FLOODING

✉ Timarin Aleksey N.;

Ivanov Evgeniy V.;

Tkachenko Pavel N.

Civil defence academy of EMERCOM of Russia, Khimki, Russia

✉ a.timarin@agz.50.mchs.gov.ru

Abstract. The article is devoted to the development of a methodology aimed at minimizing damage caused by flooding. The authors set themselves the task of rational distribution of work volumes between threatened areas based on the branch-and-bound method. The developed methodology for distributing the volumes of operational measures to protect the population and territories from flooding under conditions of time and resource constraints during the implementation of protective measures will allow for a rational distribution of available forces

and resources among the work areas. The proposed approach aims to improve the efficiency of work carried out by the territorial subsystem of the unified state system for emergency prevention and response. The work will be in demand among representatives of the executive bodies of the constituent entities of the Russian Federation, as well as those responsible for developing and implementing measures to prevent and eliminate the consequences of floods.

Keywords: flooding, protection of population and territories, emergency, theory of schedules, operational measures

For citation: Timarin A.N., Ivanov E.V., Tkachenko P.N. Methodology for allocating the volume of operational activities minimize damage from flooding // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2025. № 4 (76). P. 77–88. DOI: 10.61260/1998-8990-2025-4-77-88.

Введение

Паводки являются одним из самых разрушительных природных явлений. В 2022 г. ущерб от паводков составил 79 % общего ущерба природных чрезвычайных ситуаций (ЧС)¹. Специалисты отмечают, что выполнение задач по защите населения и территорий от затоплений зависит как от выполненного комплекса мероприятий, направленных на уменьшение вероятности затопления [1, 2], так и от правильного выбора объектов защиты и направления действий сил и средств².

Мероприятия по защите населения и территории от затоплений разделяются на превентивные и оперативные [1]. Практика показывает, что ущерб от ЧС, связанных с затоплениями, продолжает расти [3]. В связи с этим существует необходимость выстраивания системы проведения превентивных и оперативных мероприятий в необходимых объемах.

В работе [4] показано, что в качестве показателя эффективности выполнения задачи стоит рассматривать объем предотвращенного ущерба, измеряемый в соответствии с действующими методиками в миллионах рублей³, по каждому из участков, на которых проводятся мероприятия. То есть необходимо решить следующую задачу (1):

$$Z_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m Z_i \rightarrow \min, \quad (1)$$

где Z_{Σ} – суммарный объем ущерба от затопления по участкам; m – число участков, подвергаемых затоплению; Z_i – объем ущерба от затоплений на i -том участке.

Следует отметить, что выполнение мероприятий может быть затруднено вследствие плохих погодных условий (дождь, снег) или воздействия вторичных факторов при затоплениях в случаях попадания в зону затопления критически важных объектов и опасных производственных объектов.

¹ О состоянии защиты населения и территорий Российской Федерации от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в 2022 году: гос. доклад // МЧС России. URL: <https://mchs.gov.ru/deyatelnost/itogi-deyatelnosti-mchs-rossii/2022-god> (дата обращения: 27.06.2025)

² Методические рекомендации по организации подготовки и сопровождения паводкоопасного периода на территории субъекта Российской Федерации // МЧС России. URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/5741> (дата обращения: 30.06.2025).

³ Об утверждении Методики оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций: приказ МЧС России от 1 сент. 2020 г. № 631 // МЧС России. URL: <https://mchs.gov.ru/dokumenty/5065> (дата обращения: 27.06.2025).

В работах [3, 4] показано, что решение задачи минимизации ущерба может быть достигнуто за счет рационального распределения объемов оперативных мероприятий по защите населения и территории от затоплений. В свою очередь, применение сил и средств должно опираться на проработанный математический аппарат, реализация которого будет обеспечивать минимизацию функции (1).

Под применением сил и средств понимается рациональный способ распределения мероприятий по участкам, включающий алгоритм определения требуемых объемов мероприятий (оценка ожидаемого ущерба и объемов необходимых мероприятий), алгоритм оценки объемов мероприятий, которые могут быть выполнены силами территориальной подсистемы Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (РСЧС) в определенный отрезок времени (время определяется исходя из прогнозируемого времени прихода гребня волны паводка, объем выполняемых мероприятий зависит от численности и качественного состава сил и средств территориальной подсистемы РСЧС), алгоритм снижения ущерба от затоплений, с учетом ограничений на численность и качественный состав сил и средств территориальной подсистемы (ТП) РСЧС, а также время выполнения мероприятий на участках проведения работ.

В качестве исходных данных выступают:

- сценарий паводковой обстановки, включающий в себя такие сведения, как снегозапасы в водосборных бассейнах рек, глубины промерзания почвы, и др.;
- прогнозируемое время до наступления затопления на участке;
- сведения об имеющейся группировке сил и средств;
- значения трудозатрат на каждый вид мероприятий;
- ожидаемый ущерб на угрожаемых участках;
- факторы, оказывающие влияние на успешное выполнение задач, но на которые невозможно воздействовать.

Тогда задача рационального распределения объемов оперативных мероприятий по защите населения и территории от затопления может быть в формальном виде представлена следующим образом:

$$Z_{\Sigma} = \sum_{i=1}^m Z_i (R_{ij} = f(N; T_i^{\text{доп}})) | \theta \rightarrow \min_{R_{ij}}$$

где j – участок, следующий после выполнения работ на i -м участке; R_{ij} – объем распределенных работ, реализуемых на участках; N – силы и средства ТП РСЧС; $T_i^{\text{доп}}$ – время от момента получения информации о времени начала затопления до затопления i -го участка; θ – обстановка, сложившаяся на момент получения информации о начале затопления.

Теоретические основы и методы расчета

Рациональное распределение объема оперативных мероприятий планируется обеспечить за счет последовательного выполнения следующих операций:

- оценка требуемого объема мероприятий, исходя из сложившейся обстановки;
- определение объемов мероприятий, выполняемых силами и средствами;
- определение трудозатрат на выполнение каждого вида мероприятий;
- распределение сил и средств по участкам выполнения работ исходя из величины потенциального ущерба в условиях ограничений на перемещение и выполнение задач;
- перераспределение сил и средств после выполнения мероприятий на участках, угрожаемых затоплению, решение задачи минимизации ущерба с учетом ограничений на ресурсы и время.

В основе алгоритма обоснования рационального распределения объема мероприятий, обеспечивающих минимум целевой функции, предполагается использование метода последовательного анализа и отсея неперспективных вариантов (метод ветвей и границ) [5–8].

Метод подразумевает формирование древовидной структуры возможной последовательности выполнения операций, где каждая ветвь соответствует участку работ. Вершина, расположенная на более высоком уровне иерархии, выступает как «базовая» для связанных с ним вариантов, расположенных на нижних уровнях. Данный метод, в отличие от других методов, позволяет найти наилучшее решения в условиях жестких ограничений [9, 10].

Процесс построения такого дерева относится к методам оптимизации, а общее число вариантов зависит от количества групп операций. Для сокращения вычислительной сложности используются специальные критерии и алгоритмы, ограничивающие ветвление в узлах или отсеивающие заведомо неэффективные варианты. При этом метод ветвей и границ позволяет сократить перебор за счет отбрасывания заведомо неперспективных ветвей, что особенно важно при большом количестве вариантов решений [11, 12].

Второй этап заключается в комбинировании вариантов из различных деревьев. Требуется подобрать комбинацию, где:

- пересечение вариантов дает пустое множество;
- объединение вариантов покрывает все операции множества [13].

Если найдено несколько таких наборов, то выбирается такой набор, для которого все работы будут выполнены с максимальным предотвращенным ущербом:

$$Z_{\Sigma} = \max(Z_1, Z_2, \dots, Z_k) \rightarrow \min ,$$

где Z_k – ущерб, предотвращенный проводимыми мероприятиями.

Для решения задачи необходимо дополнительно построить маршруты суммарных затрат времени T^a с учетом:

– времени выполнения мероприятий в пункте постоянной дислокации, в которое входит T_{i0} :

– время от момента получения прогноза о затоплении до подачи сигнала средствами КСЭОН $T^{сиг}$;

– время приведения сил и средств ТП РСЧС в готовность T^{pear} ;

– время выполнения работ на i -м участке T_i :

– время следования к месту проведения мероприятия $T^{трансп}$;

– время развертывания сил и средств $T^{разв}$;

– время проведения работ $T^{раб}$;

и время перемещения между местами выполнения работ $T_{ij}^{пер}$:

$$T^a = (T_i^{сиг} + T_i^{pear}) + (T_i^{трансп} + T_i^{разв} + T_i^{раб}) + T_{ij}^{пер} = T_{i0} + T_i + T_{ij}^{пер}$$

где a – номер подразделения, выполняющего работы; ij – перемещение между участками.

В качестве ограничений принимаем ограничение на время проведения работ для каждого из участков:

$$T_i^a \leq T_i^{\text{доп}} .$$

То есть, суммарные затраты времени, прогнозируемые для i -го участка, не должны принимать значения выше допустимых. В противном случае считаем, что вследствие затопления местности реализуется весь объем спрогнозированного ущерба для рассматриваемого участка.

Аналогично принимаем ограничения, связанные с численностью и качественным составом территориальной подсистемы РСЧС:

$$N = \text{const}$$

То есть привлечь к проведению работ на участках, угрожаемых затоплением, можно только те силы, которыми располагает территориальная подсистема РСЧС. В качестве допущения принимаем, что подразделения могут привлекаться только в полном составе без возможности разделения на параллельно работающие группы.

В качестве еще одного допущения принимаем, что выполнение мероприятий в пункте постоянной дислокации T_{i0} будет рассчитываться только для первого выбранного участка работ. Также принимаем, что после выполнения работ в допустимой вершине (не являющейся терминалльной) возвращение в пункт постоянной дислокации подразделениями при последовательном выполнении работ не осуществляется (обеспечение работы подразделений при ликвидации ЧС на территории субъекта Российской Федерации планируется за счет собственных средств субъекта).

Алгоритм реализации метода предполагает пошаговый анализ всех возможных вариантов выполнения работ каждым подразделением. При этом ключевыми критериями отбора являются временные и трудовые затраты, которые определяют возможность реализации того или иного варианта. Однако окончательный выбор оптимальной последовательности операций осуществляется на основе принципа максимизации предотвращенного ущерба, что является приоритетным фактором при принятии решения.

Рассмотрим решение сформулированной научной задачи на конкретном примере. Для подразделений, $N=2$ (с трудозатратами 3 чел./ч и 1,5 чел./ч), расположенным на территории субъекта Российской Федерации и входящим в сводную группировку ТП РСЧС, необходимо минимизировать ущерб на территории реки, предполагающей 6 участков, угрожаемых затоплению, $I=6$. Подразделения имеют возможность выполнения работ по возведению водозащитных дамб. Известен ожидаемый ущерб на каждом из участков, трудоемкость работ, а также время до затопления каждого участка (директивное время) (табл. 1).

Таблица 1

Таблица исходных данных

Участок	1	2	3	4	5	6
Ожидаемый ущерб, млн	15	20	10	45	50	60
Трудоемкость, чел./ч	30	45	54	30	75	60
Время до затопления, ч	42	72	100	124	148	172

Время работ на участках подразделениями представлены в табл. 2.

Таблица 2

Время проведения работ на каждом участке

№ подразделения	Время работ на участках, ч					
	1	2	3	4	5	6
1	10	15	18	10	25	20
2	20	30	36	20	50	40

Время на перемещение между участками представлено в табл. 3, 4.

Таблица 3

Время перемещения между участками первым подразделением

	0	1	2	3	4	5	6
0	∞						
1	28	∞					
2	28	28	∞				
3	52	76	76	∞			
4	4	28	52	4	∞		
5	4	28	52	28	4	∞	
6	76	76	52	4	4	28	∞

Таблица 4

Время перемещения между участками вторым подразделением

	0	1	2	3	4	5	6
0	∞						
1	76	∞					
2	52	28	∞				
3	28	76	52	∞			
4	28	76	52	28	∞		
5	52	52	52	52	4	∞	
6	4	100	76	4	4	28	∞

Суммарные затраты времени T^1 и T^2 с учетом времени выполнения работ и времени перемещения между местами выполнения работ представлены в табл. 5, 6.

Таблица 5

Суммарные затраты T^1

	0	1	2	3	4	5	6
0	∞	38	43	70	14	29	96
1	28	∞	81	132	76	91	134
2	28	81	∞	137	105	120	115

3	52	156	161	∞	84	123	94
4	4	52	81	36	∞	43	38
5	4	67	96	75	43	∞	77
6	76	182	163	118	110	149	∞

Таблица 6

Суммарные затраты T^2

	0	1	2	3	4	5	6
0	∞	96	82	64	48	102	44
1	76	∞	96	150	134	140	178
2	52	91	∞	131	115	145	159
3	28	156	137	∞	118	172	114
4	28	100	81	60	∞	68	58
5	52	91	96	99	43	∞	97
6	4	206	187	118	110	149	∞

Построение дерева последовательностей видов работ начинается с построения корневой вершины C_0 , когда каждое подразделение находится в пункте дислокации. Время работы при этом равно нулю, предотвращенный ущерб равен нулю.

В процессе формирования возможных вариантов выполнения задач используется древовидная структура, где каждый новый узел создается путем добавления очередной операции к существующей цепочке. После включения новой операции выполняется расчет времени ее завершения, а также общего времени выполнения всей последовательности. Затем рассчитывается общий предотвращенный ущерб исходя из того, работы на каких участках были выполнены.

Если полученное значение продолжительности последовательности превышает установленный директивный срок для последней добавленной операции, данный вариант признается недопустимым. В этом случае дальнейшее развитие ветви дерева прекращается, что позволяет сократить перебор возможных комбинаций и оптимизировать вычислительный процесс.

На рисунке приведен фрагмент дерева последовательностей выполнения работ для первого подразделения. Аналогичные деревья строятся для всех подразделений, участвующих в ликвидации последствий ЧС.

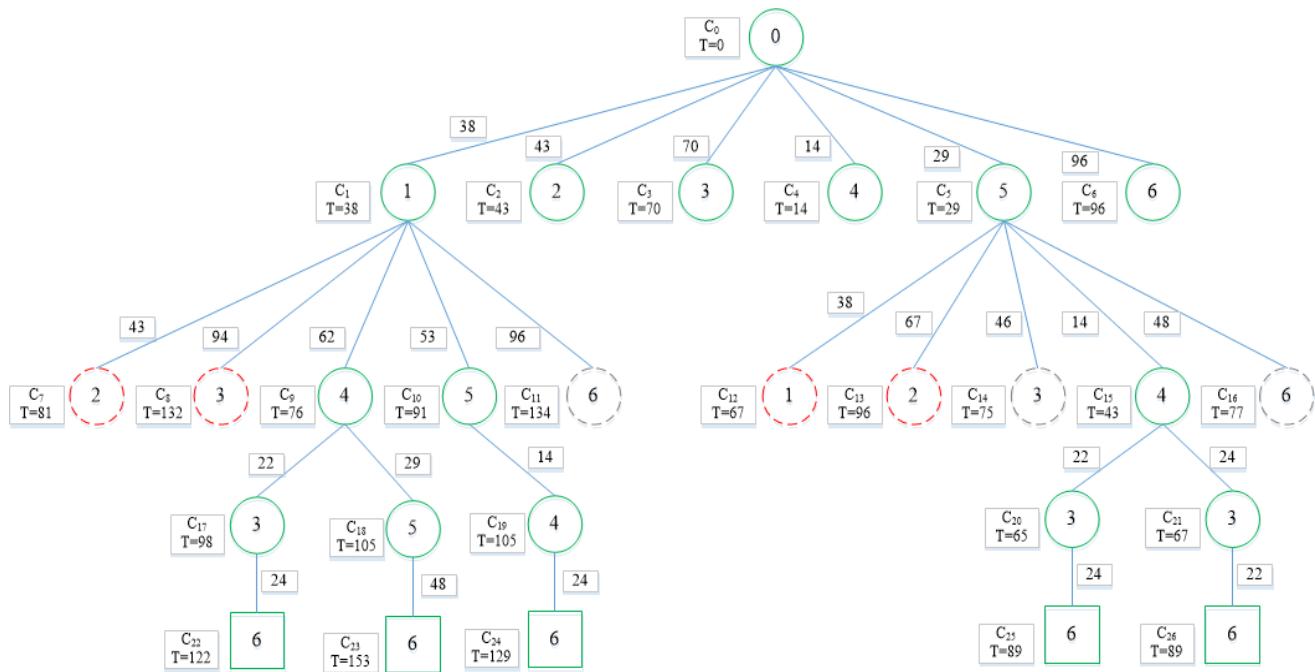


Рис. Фрагмент дерева последовательностей выполнения работ

В ходе анализа дерева решений производится распределение всех ветвей на два класса: соответствующие и не соответствующие временным нормативным требованиям. Критерием разделения выступает соблюдение временных рамок выполнения работ.

Также в качестве критерия допустимости ветвей выступает возможность выполнения всех работ в последовательности без превышения предельного допустимого времени выполнения всех работ. Такие ветви считаются допустимыми.

Недопустимые ветви представляют собой последовательности, при которых время завершения работ превышает установленное предельно допустимое время выполнения работ.

Дополнительно ветви разделяются на перспективные и неперспективные. Перспективные последовательности демонстрируют оптимальные значения по заданным параметрам. Неперспективные последовательности уступают альтернативным решениям по искомым либо известным показателям.

В качестве критерия отсева может использоваться следующее правило: если для двух последовательностей $\{c_0^2, c_1^2, c_2^2, \dots, c_p^2\}$ выполняются условия:

$$c_l^1 = c_p^2, \mathbb{C}^1 \subseteq \mathbb{C}^2 \text{ и } T^1 \geq T^2,$$

где l и p – номера ветвей в последовательности; то последовательность C^1 считается неперспективной. Здесь T^1 и T^2 соответствуют времени выполнения первой и второй последовательности соответственно.

Результаты исследования и их обсуждение

В неперспективных ветвях ветвление может останавливаться.

Корневой ветви дерева соответствует последовательность $c_0:\{0\}$, то есть все работы начинаются с мест расположения подразделений в субъекте. Эта ветвь является допустимой и перспективной.

Ветви $c_1:\{0,1\}$ соответствует допустимая перспективная последовательность (обозначается зеленой окружностью). После этой ветви ветвление продолжается.

Ветви $c_7:\{0,1,2\}$ соответствует недопустимая последовательность (обозначается красной пунктирной окружностью), поскольку время завершения последовательности превышает директивное время выполнения последней, третьей, работы:

$$t_{01}^1 + t_{12}^1 > t_2, 38 + 43 = 81 > 72.$$

Ветви $c_{16}:\{0,5,6\}$ соответствует неперспективная последовательность (обозначается серой пунктирной окружностью), поскольку существует конкурирующая последовательность $c_{21}:\{0,5,4,6\}$ и выполняются условия (7): $c_3^1 = c_4^2 = 4$, $\{0,5,6\} \subseteq \{0,5,4,6\}$ и $T^1 = 106 \geq T^2 = 67$.

Ветви $c_{22}:\{0,1,4,3,6\}$, $c_{23}:\{0,1,4,5,6\}$ являются терминальными (концевыми) (обозначены квадратом). Данный класс ветвей формально удовлетворяет условиям допустимости, однако дальнейшее ветвление прекращается в силу объективных причин: рассматриваемая последовательность уже содержит весь перечень предусмотренных работ, что делает невозможным добавление новых элементов или продолжительность выполнения работ при включении дополнительных операций превышает установленный нормативный срок их реализации.

Таким образом, для каждого подразделения формируется дерево последовательностей. Для первого подразделения получено дерево, содержащее 31 последовательность. У второго подразделения дерево содержит 11 последовательностей. Все последовательности приведены в табл. 7.

Таблица 7

Допустимые последовательности выполнения работ

Подразделение № 1, $n = 1$			Подразделение № 2, $n = 2$		
1	{0}, 0	17	{0,1,5,4}, 105	1	{0}, 0
2	{0,1}, 38	18	{0,2,4,5}, 134	2	{0,3}, 64
3	{0,2}, 43	19	{0,2,4,6}, 129	3	{0,4}, 48
4	{0,4}, 14	20	{0,2,5,6}, 168	4	{0,3,4}, 112
5	{0,5}, 29	21	{0,4,3,6}, 60	5	{0,3,6}, 108
6	{0,1,4}, 76	22	{0,4,6,3}, 60	6	{0,4,3}, 112
7	{0,1,5}, 91	23	{0,5,4,6}, 67	7	{0,4,5}, 102
8	{0,2,4}, 105	24	{0,5,4,3}, 67	8	{0,4,6}, 92
9	{0,2,5}, 120	25	{0,1,4,3,6}, 122	9	{0,3,4,6}, 156
10	{0,2,6}, 115	26	{0,1,4,5,6}, 153	10	{0,4,3,6}, 156
11	{0,4,3}, 36	27	{0,1,5,4,6}, 129	11	{0,4,5,6}, 170
12	{0,4,6}, 38	28	{0,4,3,6,5}, 113		
13	{0,5,4}, 43	29	{0,4,6,3,5}, 113		
14	{0,1,4,3}, 98	30	{0,5,4,3,6}, 89		
15	{0,1,4,5}, 105	31	{0,5,4,6,3}, 89		
16	{0,1,4,6}, 100				

Далее необходимо объединить последовательности выполнения работ разных подразделений таким образом, чтобы у двух последовательностей не было одинаковых работ (кроме «нулевой работы») и чтобы работы были выполнены с учетом получения наибольшей величины предотвращенного ущерба.

Результат объединения последовательностей представлен в табл. 8.

Таблица 8

Допустимые объединения последовательностей

№ п/п	Последовательность, B_n		Время, T_n		Предотвращенный ущерб, U		T_{max}	Z_{max}
	$n = 1$	$n = 2$	$n = 1$	$n = 2$	$n = 1$	$n = 2$		
1	{0,1,5,4,6}	{0,3}	129	64	170	10	129	180
2	{0,1,4,5,6}	{0,3}	153	64	170	10	153	180
3	{0,2,5,6}	{0,3,4}	168	112	130	55	168	185
4	{0,1,5,4}	{0,3,6}	105	108	110	70	108	180
5	{0,2,5,6}	{0,4,3}	168	112	130	55	168	185
6	{0,2,5}	{0,3,4,6}	134	156	70	115	156	185
7	{0,1,5}	{0,3,4,6}	91	156	65	115	156	180
8	{0,2,5}	{0,4,3,6}	134	156	70	115	156	185
9	{0,1,5}	{0,4,3,6}	91	156	65	115	156	180

Таким образом, оптимальное распределение и последовательность выполнения работ подразделениями ТП РСЧС соответствует шестой и восьмой строкам табл. 8. Для того чтобы достичь целевой функции, необходимо исключить участок 1 из всех возможных вариантов распределения объемов работ. При этом необходимо учесть, что наилучшим вариантом при равном количестве ущерба необходимо считать тот вариант, при котором время будет наименьшим.

Заключение

Полученный результат свидетельствует о том, что разработанный научно-методический аппарат может быть успешно использован для решения задачи рационального распределения объемов работ по участкам.

В отличие от существующих, он предусматривает учет динамики развития складывающейся обстановки в зоне ЧС, в частности, специфику подъема уровня паводковых вод для участков реки, которым угрожает затопление, в разные периоды времени. Метод ветвей и границ позволяет спланировать такую очередь распределения подразделений по участкам работ, которое будет обеспечивать минимизацию функции суммарного ущерба при ограничениях на время выполнения работ и перемещение между участками.

Показано, что при одной и той же минимальной величине ожидаемого ущерба результат может быть достигнут разными путями при разных затратах времени (при соблюдении допустимых ограничений), то есть конечное решение о распределении объемов работ будет приниматься руководителем ликвидации ЧС.

В качестве направления дальнейшего исследования можно определить применение разработанного метода к решению задачи по распределению множества видов работ, которые могут одновременно выполняться одними и теми же подразделениями.

Список источников

- Масштабы и опасность наводнений в регионах России / В.В. Разумов [и др.]; под ред. В.В. Разумова. М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС. 2018. 363 с.
- О подходе к минимизации материального риска при чрезвычайных ситуациях (паводках), вызванных заторными явлениями / Е.В. Иванов [и др.] // Сибирский пожарно-спасательный вестник. 2022. № 4 (27). С. 92–97. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.44.95.015. EDN LFMECR.

3. О проблемной ситуации планирования мероприятий по уменьшению ущерба и реагированию на чрезвычайные ситуации в паводкоопасный период на территории субъекта Российской Федерации / А.В. Дмитриев [и др.] // Техносферная безопасность. 2024. № 4 (45). С. 132–138.

4. Постановка научной задачи минимизации ущерба при затоплениях / Е.В. Иванов [и др.] // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2025. № 1 (64). С. 42–50. EDN JMRJBM.

5. Зак Ю.А. Прикладные задачи теории расписаний и маршрутизации перевозок. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2018. 394 с.

6. Land, Ailsa H., Alison G. Doig an automatic method for solving discrete programming problems. 2009. P. 105–132. DOI: 10.1007/978-3-540-68279-0_5.

7. Deep Neural Network Approximated Dynamic Programming for Combinatorial Optimization / S. Xu [et al.] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2020. № 34 (02). P. 1684–1691. DOI: 10.1609/aaai.v34i02.5531.

8. Korte B., Vygen J. Combinatorial optimization // Theory and Algorithms. Berlin: Springer-Verlag, 2018. P. 698.

9. Publication, I. JR AS ET. Optimization Techniques to Solve Travelling Salesman Problem Using Machine Learning Algorithms // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). 2022. Vol. 10. № I. P. 274–279.

10. Мельников Б.Ф., Мельникова Е.А. О классической версии метода ветвей и границ // Компьютерные инструменты в образовании. 2021. № 1. С. 21–44. DOI 10.32603/2071-2340-2021-1-21-45. EDN GSXTQL.

11. Яцценко В.Н., Мазаник А.И. Научно-методический аппарат рационального распределения оперативных групп для проведения мониторинга ледовой обстановки // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». 2022. № 3. С. 50–57. EDN MTQBZN.

12. Dorigo M., Stützle T. Ant Colony Optimization: Overview and Recent Advances // Handbook of Metaheuristics, Springer Nature. 2018. P. 311–351. DOI: 10.1007/978-3-319-91086-4_10.

13. Ткаченко П.Н., Ткаченко Ю.А., Полевой Е.В. Подход к обоснованию мероприятий по предупреждению ледовых заторов // Технологии гражданской безопасности. 2024. Т. 21. № 3 (81). С. 26–35.

References

1. Masshtaby i opasnost' navodnenij v regionah Rossii / V.V. Razumov [i dr.]; pod red. V.V. Razumova. M.: FGBU VNII GOCHS. 2018. 363 s.

2. O podhode k minimizacii material'nogo riska pri chrezvychajnyh situaciyah (pavodkah), vyzvannyyh zatornymi yavleniyami / E.V. Ivanov [i dr.] // Sibirskij pozharno-spasatel'nyj vestnik. 2022. № 4 (27). S. 92–97. DOI: 10.34987/vestnik.sibpsa.2022.44.95.015. EDN LFMECR.

3. O probleminoj situacii planirovaniya meropriyatij po umen'sheniyu ushcherba i reagirovaniyu na chrezvychajnye situacii v pavodkoopasnyj period na territorii sub"ekta Rossijskoj Federacii / A.V. Dmitriev [i dr.] // Tekhnosfernaya bezopasnost'. 2024. № 4 (45). S. 132–138.

4. Postanovka nauchnoj zadachi minimizacii ushcherba pri zatopleniyah / E.V. Ivanov [i dr.] // Nauchnye i obrazovatel'nye problemy grazhdanskoy zashchity. 2025. № 1 (64). S. 42–50. EDN JMRJBM.

5. Zak Yu.A. Prikladnye zadachi teorii raspisanij i marshrutizacii perevozok. M.: Knizhnyj dom «LIBROKOM», 2018. 394 s.

6. Land, Ailsa H., Alison G. Doig an automatic method for solving discrete programming problems. 2009. P. 105–132. DOI: 10.1007/978-3-540-68279-0_5.

7. Deep Neural Network Approximated Dynamic Programming for Combinatorial Optimization / S. Xu [et al.] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2020. № 34 (02). P. 1684–1691. DOI: 10.1609/aaai.v34i02.5531.

8. Korte B., Vygen J. Combinatorial optimization // Theory and Algorithms. Berlin: Springer-Verlag, 2018. P. 698.
9. Publication, I. JR AS ET. Optimization Techniques to Solve Travelling Salesman Problem Using Machine Learning Algorithms // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). 2022. Vol. 10. № 1. P. 274–279.
10. Mel'nikov B.F., Mel'nikova E.A. O klassicheskoy versii metoda vtevje i granic // Komp'yuternye instrumenty v obrazovanii. 2021. № 1. S. 21–44. DOI 10.32603/2071-2340-2021-1-21-45. EDN GSXTQL.
11. Yacucenko V.N., Mazanik A.I. Nauchno-metodicheskij apparat racional'nogo raspredeleniya operativnyh grupp dlya provedeniya monitoringa ledovoj obstanovki // Nauchno-analiticheskij zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoj protivopozharnoj sluzhby MCHS Rossii». 2022. № 3. S. 50–57. EDN MTQBZN.
12. Dorigo M., Stützle T. Ant Colony Optimization: Overview and Recent Advances // Handbook of Metaheuristics, Springer Nature. 2018. P. 311–351. DOI: 10.1007/978-3-319-91086-4_10.
14. Tkachenko P.N., Tkachenko Yu.A., Polevoj E.V. Podhod k obosnovaniyu meropriyatij po preduprezhdeniyu ledovyh zatorov // Tekhnologii grazhdanskoy bezopasnosti. 2024. Т. 21. № 3 (81). S. 26–35.

Информация о статье:

Статья поступила в редакцию: 29.08.2025; одобрена после рецензирования: 29.10.2025; принята к публикации: 17.11.2025

The information about article:

The article was submitted to the editorial office: 29.08.2025; approved after review: 29.10.2025; accepted for publication: 17.11.2025

Информация об авторах:

Тимарин Алексей Николаевич, преподаватель кафедры оперативного управления мероприятиями РСЧС и ГО, соискатель Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А), e-mail: a.timarin@agz.50.mchs.gov.ru, SPIN-код: 3242-5700

Иванов Евгений Вячеславович, доцент кафедры аварийно-спасательных работ Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А), кандидат технических наук, e-mail: e.ivanov@agz.50.mchs.gov.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9093-1559>, SPIN-код: 5470-1533

Tkachenko Pavel Nikolaevich, начальник кафедры оперативного управления мероприятиями РСЧС и ГО Академии гражданской защиты МЧС России (141435, Московская обл., г. Химки, мкр. Новогорск, ул. Соколовская, стр. 1А), кандидат технических наук, доцент, e-mail: p.tkachenko@agz.50.mchs.gov.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4102-346X>, SPIN-код: 5938-3220

Information about the authors:

Timarin Alexey N., lecturer at the department of operational management of emergency situations and civil defense, candidate of the Academy of civil protection of EMERCOM of Russia (141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya str., 1A), e-mail: a.timarin@agz.50.mchs.gov.ru, SPIN: 3242-5700

Ivanov Evgeny V., associate professor of the department of emergency rescue operations at the Academy of civil protection of EMERCOM of Russia (141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya str., 1A), candidate of technical sciences, e-mail: e.ivanov@agz.50.mchs.gov.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9093-1559>, SPIN: 5470-1533

Tkachenko Pavel N., head of the department (operational management of emergency management events and GO) of Academy of civil protection of EMERCOM of Russia (141435, Moscow region, Khimki, md. Novogorsk, Sokolovskaya str., 1A), candidate of technical sciences, associate professor, e-mail: p.tkachenko@agz.50.mchs.gov.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4102-346X>, SPIN: 5938-3220