

УДК 332.012.2

DOI: [10.26102/2310-6018/2026.55.4.021](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2026.55.4.021)

Методика управления процессом ликвидации чрезвычайных ситуаций, основанная на методах многокритериальной оптимизации

С.А. Баркалов, О.Н. Бекирова, Я.А. Вторникова✉

*Воронежский государственный технический университет, Воронеж,
Российская Федерация*

Резюме. В современных условиях ввиду нестабильной экономической и политической ситуации во всем мире чрезвычайные ситуации различного характера становятся все более частыми и масштабными явлениями. Это обусловлено как природными факторами и техногенными причинами, так и умышленными действиями вследствие конфликтов и диверсий, что требует совершенствования методов оперативного реагирования. В связи с этим возрастает актуальность разработки автоматизированных систем поддержки принятия решений для эффективного противодействия современным вызовам и угрозам в сфере ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. В работе описана методика эффективного управления комплексом работ и мероприятий по ликвидации чрезвычайных ситуаций, которая базируется на методах многокритериальной оптимизации. В качестве критериев оптимизации выбраны оперативность или возможность выполнить поставленные задачи в кратчайшее время, обеспеченность или возможность обеспечения ресурсами всех реализуемых работ в необходимом объеме, и информативность или реализация мер для обеспечения актуальной и объективной информации об имеющейся ситуации. Рассмотрены три модели проведения оптимизации и получения Парето-оптимального решения: метод обобщенной целевой функции, метод критериальных ограничений и метод последовательных уступок. В статье проводится математическая формулировка и описание моделей, приведен алгоритм выбора модели для разных условий.

Ключевые слова: чрезвычайные ситуации, принятие решений, ликвидация угроз, многокритериальная оптимизация, математическое моделирование.

Для цитирования: Баркалов С.А., Бекирова О.Н., Вторникова Я.А. Методика управления процессом ликвидации чрезвычайных ситуаций, основанная на методах многокритериальной оптимизации. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2026;14(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2224> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.55.4.021

Methodology for managing the emergency response process based on multi-criteria optimization methods

S.A. Barkalov, O.N. Bekirova, Ya.A. Vtornikova✉

Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation

Abstract. In modern conditions, due to the unstable economic and political situation around the world, emergencies of various natures are becoming more frequent and large-scale phenomena. This is caused both by natural factors and man-made reasons, as well as by deliberate actions resulting from conflicts and sabotage, which necessitates the improvement of rapid response methods. Consequently, the relevance of developing automated decision support systems for effectively countering contemporary challenges and threats in the field of emergency consequence management is increasing. This paper describes a methodology for the effective management of a set of works and measures for emergency response, based on multi-criteria optimization methods. The following were chosen as optimization criteria: efficiency or the ability to complete assigned tasks in the shortest possible time, availability or

the ability to provide resources for all work being carried out in the required volume, and information content or the implementation of measures to ensure up-to-date and objective information about the current situation. Three models for conducting optimization and obtaining a Pareto-optimal solution are considered: the generalized objective function method, the criterion constraints method, and the method of successive concessions. The article provides the mathematical formulation and description of the models and presents an algorithm for selecting a model for different conditions.

Keywords: emergencies, decision making, threat response, multi-criteria optimization, mathematical modeling.

For citation: Barkalov S.A., Bekirova O.N., Vtornikova Ya.A. Methodology for managing the emergency response process based on multi-criteria optimization methods. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2026;14(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/article?id=2224> DOI: 10.26102/2310-6018/2026.55.4.021

Введение

В условиях глобальной экономической и политической нестабильности чрезвычайные ситуации (ЧС) происходят чаще и охватывают все большие масштабы. Их причинами выступают как природные и техногенные факторы, так и намеренные действия (диверсии, конфликты). Это настоятельно требует модернизации подходов к экстренному реагированию. Рост числа ЧС влечет за собой колоссальный экономический ущерб, а поскольку большинство аварий случается из-за ошибочных управленческих решений, особую остроту приобретает задача повышения качества подготовки профильных специалистов, внедрения систем автоматизации и поддержки принятия решений. Кроме того, развитие технологий диктует необходимость адаптации уже существующих методов и поиска принципиально новых алгоритмов для оперативной ликвидации последствий катастроф.

Решению данной проблемы будет способствовать разработка автоматизированных систем поддержки принятия решений [1], создание методик прогнозирования развития ЧС, разработка алгоритмов анализа больших массивов данных [2], направленных на формирование баз знаний, способствующих оперативному и эффективному управлению, оптимизации распределения ресурсов при ликвидации последствий. В частности, перспективным направлением является применение методов нечеткого многокритериального группового принятия решений [3] и интеграция беспилотных летательных аппаратов в системы мониторинга [4].

Реализация перечисленных разработок позволит повысить эффективность оперативного реагирования на ЧС, минимизировать человеческие потери при катастрофах, снизить материальный ущерб от последствий ЧС, улучшить координацию сил и средств при ликвидации последствий [3].

Таким образом, актуальность исследований в данной области обусловлена необходимостью постоянного совершенствования методов принятия оперативных решений для эффективного противодействия современным вызовам и угрозам в сфере ликвидаций последствий ЧС.

Целью данного исследования является выделение и описание основных критериев, определяющих эффективность управления комплексом мероприятий по ликвидации последствий ЧС, и разработка методики нахождения Парето-оптимальных решений [5] при организации и управлении подобными мероприятиями методами многокритериальной оптимизации [6].

В соответствии с поставленной задачей авторами выделены три базовых критерия оптимизации процесса управления мероприятиями по ликвидации последствий ЧС. К ним относятся:

- *оперативность* – возможность осуществления мероприятий за минимальное время, не превышающее максимально допустимое значение;
- *обеспеченность* – достаточное или максимальное ресурсное обеспечение необходимых мероприятий, превышающее минимальный уровень для возможности их осуществления;
- *информативность* – надежность и полнота имеющейся информации, необходимой для возможности эффективного устранения последствий ЧС.

Очевидно, что указанные критерии оптимизации являются разнонаправленными, то есть образуют множество Парето. Для оперативного, минимального по времени успешного процесса ликвидации последствий ЧС необходимо с одной стороны использование достаточного количества ресурсов каждого типа и наличие максимально полной и достоверной информации о ЧС, с другой – эффективных способов её ликвидации. Для сбора и аккумуляции достаточного количества ресурсов, способных эффективно устранить дестабилизирующие факторы и их последствия, требуется время и максимально полная и объективная информация о ситуации. И, наконец, для получения необходимой информации о причинах, течении и возможных последствиях ЧС с целью разработки эффективных методов ее устранения, требуется время и достаточное ресурсное обеспечение.

Указанные критерии являются базовыми, но их важность для управления может быть разной в зависимости от поставленных задач, это нужно учитывать при нахождении компромиссного решения.

В общем виде задачу данного исследования можно сформулировать в следующем виде: разработать методику нахождения Парето-оптимального решения на множестве оптимизационных критериев {оперативность, обеспеченность, информативность}, учитывающую цели, задачи и особенности проведения мероприятий по ликвидации последствий ЧС.

Следует отметить, что подобные задачи решались в работе [7] при организации и контроле сетей связей при воздействии деструктивных факторов при ведении боевых действий. Задача нахождения Парето-оптимального решения на основе трех базовых критериев проиллюстрирована на Рисунке 1.



Рисунок 1 – Иллюстрация задачи нахождения компромиссного решения
Figure 1 – Illustration of the problem of finding a compromise solution

В следующем разделе представим общую методiku организации и управления мероприятиями по эффективному устранению последствий ЧС. Данная модель основана на методах многокритериальной оптимизации [5, 6]. Фундаментальные основы векторной оптимизации, позволяющие учитывать противоречивые критерии, подробно изложены в работах [8, 9].

Материалы и методы

Общая постановка задачи. Рассмотрим некоторый комплекс работ или мероприятий по устранению последствий ЧС, эффективность которого базируется на трех критериях: Оперативности (K1), Обеспеченности (K2) и Информативности (K3). Возможно наличие и иных критериев, но в большинстве случаев имеется возможность привязать их к трем базовым. Предположим, что для каждого критерия существует некоторый числовой показатель эффективности Q , который будет характеризовать, насколько успешным с точки зрения успешности по критерию будут осуществляться мероприятия по ликвидации последствий ЧС. Показателем эффективности может быть любой натуральный показатель, например, степень ликвидации рисков, последствий, время на ликвидацию, ущерб, ресурсоемкость мероприятий и иные показатели. Для построения моделей необходимо нормировать показатель эффективности на некоторую безразмерную шкалу, например, долю от планируемого или максимального результата. Обозначим показатели эффективности критериев K1, K2 и K3 как q_1 , q_2 , и q_3 . Показатель эффективности может быть направлен как на максимизацию – чем больше его значение, тем более успешным будет результат (например, объем восстановительных работ), так и на минимизацию, например, время проведения работ.

Эффективность выполнения мероприятий и работ определяется набором некоторых управляемых эндогенных показателей, которые определяют эффективность по каждому критерию как каждого мероприятия, так и всего комплекса работ в целом. Эти показатели, которые в дальнейшем будем называть «Факторами» и число которых равно n , обозначим в виде вектора $\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Это управляемые параметры и показатели организации и выполнения мероприятий, значения которых нужно задавать при их планировании, но их возможные значения приводят к конфликту критериальных интересов, например, для одних критериев некоторый фактор должен быть максимальным, для других минимальным. Кроме того, в виду реальных условий проведения комплекса мероприятий, факторы можно менять в ограниченном диапазоне, то есть на значения факторов накладывается ограничение вида: $\vec{X} \in D$, где D – множество допустимых значений факторов.

Очевидно, что общий показатель эффективности Q , и показатели эффективности для каждого критерия являются функциями факторов: $Q(\vec{X})$, $q_1(\vec{X})$, $q_2(\vec{X})$, $q_3(\vec{X})$.

Ставится задача найти такие значения факторов, чтобы показатель эффективности был максимальным в зависимости от решаемой задачи и от требований к осуществлению спасательных и восстановительных мероприятий.

В результате получаем задачу трехкритериальной оптимизации для выбора рационального варианта управления мероприятиями по ликвидации последствий ЧС:

$$Q(\vec{X}) = \{q_1(\vec{X}), q_2(\vec{X}), q_3(\vec{X})\} \rightarrow \max, \vec{X} \in D, \quad (1)$$

где \vec{X} – допустимый вектор факторов, который определяет вариант стратегии по организации и реализации комплекса работ и мероприятий.

Одной из проблем решения оптимизационной задачи (1) является то, что она является многокритериальной [6], причем ее критерии составляют множество Парето,

что не позволяет одновременно улучшать все три критерия. Учитывая, что приходится находить Парето-оптимальное решение, для оценки общей эффективности стратегии проведения комплекса работ рационально оценить важность каждого критерия с точки зрения поставленных целей и задач. Обозначим через W_1, W_2, W_3 веса или степень приоритетности, важности критериев K_1, K_2 и K_3 в общем критерии успешности проводимых мероприятий.

Далее, рассмотрим три метода для решения задачи многокритериальной оптимизации (1) подробно.

Метод обобщенной целевой функции. Первым из рассматриваемых методов является метод обобщенной целевой функции [6]. Его идея заключается в том, что формируется некоторый интегральный критерий осуществления мероприятия по ликвидации последствий ЧС $Q(\vec{X})$, направленный на максимизацию и зависящий от критериев эффективности частных критериев $q_1(\vec{X}), q_2(\vec{X}), q_3(\vec{X})$ таким образом, что их улучшение будет приводить к максимизации интегрального критерия эффективности.

Зависимость интегрального критерия от частных можно представить в виде следующих двух моделей.

1. Интегральный показатель эффективности может быть *аддитивного типа*:

$$Q(\vec{X}) = W_1q_1(\vec{X}) + W_2q_2(\vec{X}) + W_3q_3(\vec{X}),$$

где параметры W_1, W_2, W_3 по величине равны весам критериев, но по знаку учитывают направленности частных критериев эффективности: если критерий направлен на максимизацию, то его вес будет положительным, если направление критерия на минимизацию, то вес будет отрицательным.

Также необходимо учитывать то, что решение должно не выходить за область допустимых значений D , что позволит сформулировать однокритериальную оптимизационную задачу вида:

$$Q(\vec{X}) = W_1q_1(\vec{X}) + W_2q_2(\vec{X}) + W_3q_3(\vec{X}) \rightarrow \max, \vec{X} \in D. \quad (2)$$

2. Интегральный показатель эффективности может быть *мультипликативного типа*, с критерием эффективности (целевой функцией) вида: $Q(\vec{X}) = q_1(\vec{X})^{W_1} \times q_2(\vec{X})^{W_2} \cdot q_3(\vec{X})^{W_3}$, что предполагает однокритериальную оптимизационную задачу:

$$Q(\vec{X}) = q_1(\vec{X})^{W_1} \cdot q_2(\vec{X})^{W_2} \cdot q_3(\vec{X})^{W_3} \rightarrow \max, \vec{X} \in D. \quad (3)$$

Описанный подход, основанный на обобщенной целевой функции $Q(\vec{X})$, достаточно прост в реализации и дает адекватные решения, особенно, если правильно выбрать вид целевой функции критерия эффективности. Однако он имеет достаточно значимый недостаток, заключающийся в том, что решение будет сильно зависеть от весовых множителей, которые являются неявными, латентными показателями, которые, как правило определяются на основе экспертного оценивания по поставленным целям и задачам, и их численные значения субъективны. Таким образом, полученное решение характеризуется невысокими показателями устойчивости к изменению факторов и весов критериев, он может сильно меняться с малыми изменениями параметров управления. Из преимуществ следует отметить простоту реализации и возможностью применения широкого спектра численных методов для поиска решений.

Такой подход стоит рекомендовать для принятия решений в автоматизированных системах поддержки принятия решений при управлении комплексом мероприятий по ликвидации последствий ЧС при небольших размерностях вектора \vec{X} . Для

нивелирования указанных выше недостатков метода обобщенной целевой функции, предлагается использовать иной подход, который описан ниже.

Метод последовательных уступок. Метод последовательных уступок [5, 8] основан на последовательной оптимизации по всем критериям и в какой-то мере сглаживает недостатки метода обобщенной целевой функции, который описан выше, хотя и более сложный в вычислительном плане.

Рассмотрим алгоритм реализации данного метода. На предварительном этапе проводится ранжирование важностей частных критериев эффективности по убыванию их весов W_i . Самым первым и самым важным считается критерий эффективности с максимальным весом, далее следующий по весу т. д.

Возвращаясь к задаче многокритериальной оптимизации в общей постановке (1), отметим, что в идеальном случае можно вести поиск такого решения, которое принадлежит пересечению множеств оптимальных решений всех однокритериальных задач, которые представляют собой частные критерии эффективности. Однако такое пересечение обычно оказывается пустым множеством, поэтому приходится рассматривать так называемое «переговорное» множество эффективных решений, оптимальных по Парето [8]. В условиях динамически меняющейся обстановки при ЧС особую значимость приобретают методы, учитывающие неопределенность и гетерогенность информации [2].

Алгоритм состоит из нескольких этапов, число которых равно числу частных критериев эффективности (в нашем случае их три). Также для определенности будем считать, что все критерии эффективности направлены на максимизацию, если это не так, обращаем критерии, умножая их на множитель «-1».

Предположим, что частные критерии эффективности ранжированы по убыванию весов в виде последовательности q_1, q_2, q_3 . На первом этапе находим максимальное значение q_1^* первого по важности критерия в области допустимых значений факторов D путем решения однокритериальной задачи:

$$q_1(\vec{X}) \rightarrow \max, \vec{X} \in D. \quad (4)$$

Затем, исходя из практических соображений и принятой точности, назначается величина допустимого отклонения $\delta_1 > 0$ критерия q_1 от максимального значения (рационально оправданной уступки), и находится максимальное значение второго критерия q_2^* при условии, что значение первого критерия не должно отклоняться от своего максимального значения более чем на величину допустимой уступки, т. е. решается задача:

$$q_2(\vec{X}) \rightarrow \max, q_1(\vec{X}) \geq q_1^* - \delta_1, \vec{X} \in Q. \quad (5)$$

Снова назначается величина уступки $\delta_2 > 0$ по второму критерию, которая вместе с первой уступкой используется для нахождения условного максимума третьего частного критерия, что приведет к решению третьей однокритериальной задачи:

$$q_3(\vec{X}) \rightarrow \max, q_2(\vec{X}) \geq q_2^* - \delta_2; q_1(\vec{X}) \geq q_1^* - \delta_1, \vec{X} \in Q. \quad (6)$$

Если критериев больше, например m , то аналогичные процедуры повторяются до тех пор, пока не будет выявлено максимальное значение последнего по важности критерия q_m при условии, что значение каждого из предыдущих $(m-1)$ частных критериев эффективности отличается от соответствующего условного максимума не более чем на величину допустимой уступки по данному критерию. Полученное на последнем этапе решение считается Парето-оптимальным.

Метод критериальных ограничений. Метод критериальных ограничений [9] отличается от рассмотренных ранее методов тем, что он позволяет проводить оптимизацию по одному, самому важному критерию, проводя контроль за другими частными критериями. Данный метод применяют в тех случаях, когда базовым является один из критериев, который по практическим соображениям должен достигнуть абсолютно оптимального значения. Остальные критерии не являются столь важными, проводить оптимизацию по ним проводить нецелесообразно, однако нельзя допустить, чтобы они ухудшились при этом настолько, что выполнение поставленных задач станет невозможным.

Математически такая ситуация описывается моделью, в которой решается однокритериальная задача с наиболее важным критерием в качестве целевой функции, остальные контролируются так, чтобы их значения не ухудшились ниже некоторых пороговых допустимых значений.

Результаты и обсуждение

Рассмотренные методы многокритериальной оптимизации позволяют перейти от абстрактной постановки задачи к конкретному решению.

Постановка задачи. Рассматривается чрезвычайная ситуация – наводнение в населенном пункте. Есть два управляемых фактора:

x_1 – количество спасательных групп (от 1 до 3);

x_2 – количество плавательных средств (от 1 до 3).

Критерии q_1, q_2, q_3 описаны в Таблице 1.

Таблица 1 – Критерии эффективности

Table 1 – Performance criteria

Критерий	Целевая функция
Оперативность q_1	$q_1 = 2x_1 + x_2$
Обеспеченность q_2	$q_2 = 10 - x_2 - 2 $
Информативность q_3	$q_3 = 10 - x_1 - 2 \cdot 2$

В Таблице 2 рассмотрим все возможные варианты распределения ресурсов для ликвидации последствий наводнения методом перебора.

Таблица 2 – Результаты распределения ресурсов

Table 2 – Resource allocation results

№ плана	x_1	x_2	q_1	q_2	q_3
1	1	1	3	9	8
2	1	2	4	10	8
3	1	3	5	9	8
4	2	1	5	9	10
5	2	2	6	10	10
6	2	3	7	9	10
7	3	1	7	9	8
8	3	2	8	10	8
9	3	3	9	9	8

Исходя из результатов Таблицы 2, план №9 с максимальной оперативностью (9) дает низкую информативность (8). План (№5) с максимальной обеспеченностью (10) и информативностью (10) дает низкую оперативность (6). Есть третий компромиссный

план (№8): $q_1 = 9, q_2 = 9, q_3 = 8$. С целью определения наиболее рациональной стратегии проведения комплекса работ проведем практическую реализацию трех моделей многокритериальной оптимизации.

Решение методом обобщенной целевой функции. Для выбора типа интегрального критерия в методе обобщенной целевой функции были проведены вычислительные эксперименты, включающие расчет разных критериев эффективности с различными параметрами, и сравнение результатов расчетов для обеих типов модели. В результате, можно дать некоторые рекомендации, которые приведены на Рисунке 2.



Рисунок 2 – Сравнение аддитивного и мультипликативного интегрального показателя эффективности

Figure 2 – Comparison of additive and multiplicative integral performance indicators

На основании проведенного анализа, можно сделать вывод, что при наличии достаточных вычислительных возможностей рационально использование мультипликативной целевой функции для практических расчетов. Для текущих оценок возможно использование аддитивного показателя эффективности.

Назначаем веса (важность) для возникшей ЧС – наводнение: оперативность – 0,5, обеспеченность – 0,3, информативность – 0,2.

В Таблице 3 считаем общий балл $Q = 0,5q_1 + 0,3q_2 + 0,2q_3$ для всех 9 планов.

Максимум $Q = 8,8$ в точке $x_1 = 3, x_2 = 3$ (три спасательные группы, 3 плавательных средства).

Результат метода обобщенной целевой функции: план № 9 – максимальная оперативность, но обеспеченность – 9, информативность – 8.

Таблица 3 – Решение методом обобщенной целевой функции
Table 3 – Solution by the generalized objective function method

x_1	x_2	q_1	q_2	q_3	Q
1	1	3	9	8	5,8
1	2	4	10	8	6,6
1	3	5	9	8	6,8
2	1	5	9	10	7,2
2	2	6	10	10	8
2	3	7	9	10	8,2
3	1	7	9	8	7,8
3	2	8	10	8	8,6
3	3	9	9	8	8,8

Решение методом последовательных уступок. Ранжируем критерии: 1 – оперативность; 2 – обеспеченность; 3 – информативность.

Шаг 1. Максимизируем q_1 . Максимум – 9 (при $x_1 = 3, x_2 = 3$). $q_1^* = 9$.

Шаг 2. Назначаем уступку $\delta_1 = 1$ балл (можно снизить оперативность до 8). Теперь рассматриваем планы с $q_1 \geq 8$. Из Таблицы 2 это планы № 9, 8. Среди данных планов максимизируем $q_2 = 10$. Теперь $q_2^* = 10$.

Шаг 3. Уступка по q_2 $\delta_2 = 1$ балл (можно снизить обеспеченность до 9). Ищем планы с $q_1 \geq 8, q_2 \geq 9$ – планы № 9 и 8. Среди них максимизируем q_3 . Он одинаковый для всех выбранных планов $q_3 = 8$.

Результат метода последовательных уступок: $x_1 = 3, x_2 = 3$ (три спасательные группы, 3 плавательных средства).

Метод последовательных уступок, примененный для оценки параметров эффективности мероприятий по ликвидации последствий ЧС, позволяет получать Парето-оптимальные решения по всей области допустимых значений факторов. Кроме того, вычислительные эксперименты показали, что данный метод достаточно устойчив к изменению внешних условий, показатели устойчивости более высокие, чем для метода обобщенной целевой функции, и он позволяет провести оптимизацию всех целевых функций, что позволит учитывать все имеющиеся частные критерии оптимизации. Однако, применение именно этого подхода является более объемным в вычислительном плане, требует применение численных методов, алгоритмы которых имеют достаточно высокую сложность.

Оба описанных выше метода проводят оптимизацию критерием эффективности мероприятий по ликвидации последствий ЧС в общей совокупности, что позволяет находить Парето-оптимальное решение для интегрального критерия эффективности. Однако, могут возникать ситуации, когда необходимо оптимизировать показатели для одного, конкретного частного критерия эффективности, но не допустить ухудшения ниже заданных значений для всех остальных частных критериев. Для этой задачи рационально использовать описанный ниже метод.

Решение задачи по методу критериальных ограничений. Отгалкиваясь от рассмотренного выше примера, необходимо выполнить планируемый комплекс мероприятий по ликвидации последствий ЧС в кратчайшее время, то есть критерий эффективности $q_1(\vec{X})$ должен достигнуть максимального значения. При этом нельзя допустить, чтобы ресурсное обеспечение не позволит выполнить запланированные работы, а информации достаточно для их эффективного выполнения.

Шаг 1. Отбираем планы, где $q_2 \geq 9$ и $q_3 \geq 9$ из Таблицы 2:

План № 6 – $q_2 = 9, q_3 = 10$ – подходит;

План №5 – $q_2 = 10, q_3 = 10$ – подходит;

План № 4 – $q_2 = 9, q_3 = 10$ – подходит.

Подходящие планы имеют значения q_1 : №6 – 7, №5 – 6, №4 – 5. Максимум $q_1 = 7$.

Результат метода: $x_1 = 2, x_2 = 3$ (две спасательные группы, 3 плавательных средства). Значения $q_1 = 7, q_2 = 9, q_3 = 10$.

Вычислительные эксперименты показали, что данный метод имеет самую высокую устойчивость к изменениям параметров задачи и низкую сложность организации численных расчетов. В ряде случаев, при линейной целевой функции, возможно аналитическое решение. Однако ввиду того, что оптимизация проводится только по одному частному критерию эффективности проведения мероприятий, направленных на ликвидацию последствий ЧС, для остальных критериев производится лишь контроль за нахождением показателей эффективности на определенном, приемлемом для эффективного решения задачи уровне.

Сравнение результатов. Остается открытым вопрос о выборе модели для расчета оптимальных показателей эффективности при планировании мероприятий в зависимости от решения конкретных задач. Как сказано выше, наиболее точной и устойчивой к изменению условий моделирования, является модель, основанная на методе последовательных уступок. Однако она достаточно сложная в вычислительном плане и в ряде случаев, вполне достаточным будет использование других моделей, например, если необходимо провести быстрое экспресс-оценивание или параметры модели стабильные и характеристики устойчивости результатов моделирования для них несущественны.

На основании этого, можно рекомендовать следующий алгоритм выбора модели, который приведен на Рисунке 4.

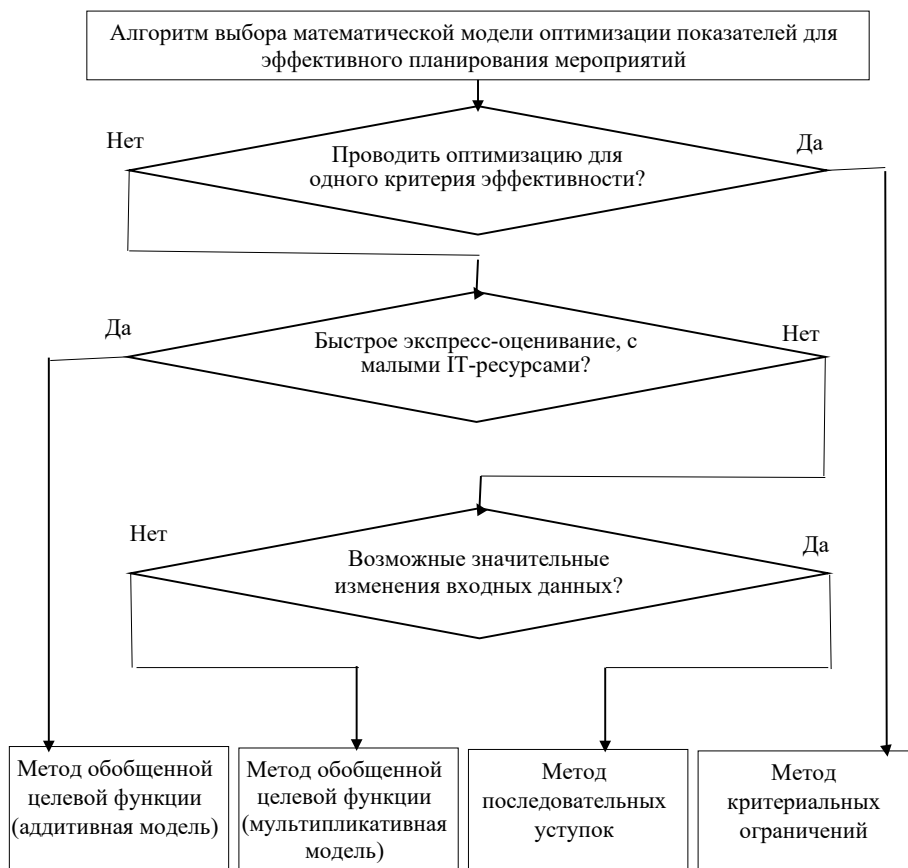


Рисунок 4 – Алгоритм выбора модели для расчетов
 Figure 4 – Algorithm for selecting a model for calculations

Вернемся к практической реализации поставленной задачи. Какой метод выбрать по алгоритму?

1. Оптимизация одного критерия? Нет.
2. Быстрая оценка с малыми ИТ-ресурсами? Да (полевой штаб) → выбираем метод обобщенной функции (аддитивная модель) → решение: три спасательные группы, 3 плавательных средства.

В случае наличия значительных вычислительных ресурсов и нестабильности данных (например, при растущем уровне воды) алгоритм выбрал бы метод последовательных уступок, который при том же решении (3,3) характеризуется более высокой устойчивостью.

При жесткой приоритизации критериев, когда оперативность имеет высший приоритет, но информативность не должна опускаться ниже 9, алгоритм использовал бы метод критериальных ограничений, дающий результат (2,3).

При наличии времени и при осуществлении значимых комплексов работ по ликвидации последствий ЧС с большим возможным ущербом рационально применять одновременно несколько методов и при разных их результатах принимать коллективные решения на основе методов экспертного оценивания и групповых дискуссий [10].

Заключение

Таким образом, были рассмотрены подходы, позволяющие на основе методов многокритериальной оптимизации, осуществлять эффективное управление комплексом мероприятий, направленных на ликвидацию последствий ЧС. В качестве базовых критериев выбраны: оперативность (возможность выполнить задачи в кратчайшее время), обеспеченность (ресурсное обеспечение работ) и информативность (реализация мер для получения актуальной информации).

Внедрение предлагаемой методики в систему управления чрезвычайными ситуациями, а также ее развитие позволит разработать и реализовать автоматизированные системы поддержки принятия решений, создать единые центры управления с современным оборудованием, развивать систему мониторинга и прогнозирования развития ЧС, в том числе с использованием беспилотных летательных аппаратов [4], внедрять цифровые технологии для оценки параметров состояния объектов, оснащать силы реагирования современной техникой и оборудованием. Реализация этих направлений позволит значительно повысить эффективность оперативного управления при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, сократить время реагирования и минимизировать последствия ЧС.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ / REFERENCES

1. Суханов В.О., Кузьмин А.И., Скороходов Д.В. Геоинформационная система поддержки принятия решений на эвакуацию населения. *Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций*. 2019;(1):411–413.
Sukhanov V.O., Kuzmin A.I., Skorokhodov D.V. Geoinformation system support decision-making on evacuation of the population. *Modern Technologies for Civil Defense and Emergency Response*. 2019;(1):411–413. (In Russ.).
2. Li T., Sun J., Fei L. Application of Multiple-Criteria Decision-Making Technology in Emergency Decision-Making: Uncertainty, Heterogeneity, Dynamicity, and Interaction. *Mathematics*. 2025;13(5). <https://doi.org/10.3390/math13050731>
3. Родзин С.И., Боженюк А.В., Кравченко Ю.А., Родзина О.Н. Методы нечеткого многокритериального группового принятия решений для задач эвакуации при

- чрезвычайных ситуациях. *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2023;(2):186–200. <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-2-186-200>
- Rodzin S.I., Bozhenyuk A.V., Kravchenko Yu.A., Rodzina O.N. Methods of fuzzy multicriteria group decision-making for evacuation tasks in emergency situations. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2023;(2):186–200. (In Russ.). <https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-2-186-200>
4. Bakir M.E., Kasimoglu F. An integrated multi-criteria decision-making model for long-term planning of UAVs in disaster management. *PLoS One*. 2026;21(1). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0340303>
 5. Подиновский В.В., Ногин В.Д. *Парето-оптимальные решения многокритериальных задач*. Москва: Наука; 1982. 256 с.
 6. Хоменюк В.В. *Элементы теории многоцелевой оптимизации*. Москва: Наука; 1983. 124 с.
 7. Ananев A.V., Ivannikov K.S. Risk-model for communication networks operation stability assessment. In: *International Conference "Applied Mathematics, Computational Science and Mechanics: Current Problems" (AMCSM 2020): Journal of Physics: Conference Series: Volume 1902, 07–09 December 2020, Voronezh, Russia*. IOP Publishing Ltd; 2021. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1902/1/012028>
 8. Машунин Ю.К. *Методы и модели векторной оптимизации*. Москва: Наука; 1986. 140 с.
 9. Штойер Р. *Многокритериальная оптимизация: теория, вычисления и приложения*. Москва: Радио и связь; 1992. 504 с.
Steuer R.E. *Multiple Criteria Optimization: Theory Computation, and Application*. Moscow: Radio i svyaz; 1992. 504 p. (In Russ.).
 10. Семенов С.С., Воронов Е.М., Полтавский А.В., Крянев А.В. *Методы принятия решений в задачах оценки качества и технического уровня сложных технических систем*. Москва: URSS, Ленанд; 2016. 517 с.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Баркалов Сергей Алексеевич, доктор технических наук, профессор, профессор Воронежского государственного технического университета, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: sbarkalov@cchgeu.ru

Sergey A. Barkalov, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Professor at Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

Бекирова Ольга Николаевна, кандидат экономических наук, доцент, доцент кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: obekirova@cchgeu.ru

Olga N. Bekirova, Candidate of Economic Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

Вторникова Яна Андреевна, ассистент кафедры управления, Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация.
e-mail: yana-elfimova@mail.ru

Yana A. Vtornikova, Assistant at the Department of Management, Voronezh State Technical University, Voronezh, the Russian Federation.

*Статья поступила в редакцию 10.03.2026; одобрена после рецензирования 09.04.2026;
принята к публикации 14.04.2026.*

*The article was submitted 10.03.2026; approved after reviewing 09.04.2026;
accepted for publication 14.04.2026.*