

## МЕТОДИКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В УСЛОВИЯХ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДЕРЕВА ОТКАЗОВ

**Максимов Александр Викторович<sup>1</sup>**  
**Игошин Дмитрий Дмитриевич<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, Санкт-Петербург, Россия

### АННОТАЦИЯ

Проблемы принятия решений при реагировании на чрезвычайные ситуации обычно сопряжены с риском и неопределенностью из-за ограниченности данных и достаточно большого количества возможных вариантов развития происшествия. Данные факторы оказывают влияние на лица, принимающие решения, в контексте выбора ответных действий или комплекса мероприятий при реагировании на чрезвычайные ситуации. Для решения этой проблемы предлагается методика, основанная на анализе дерева отказов, которое используется для описания логических связей между условиями и факторами, приводящими к возникновению и развитию ЧС. Использование данной методики позволяет рассматривать различные альтернативные действия по реагированию с учетом различных сценариев развития ЧС, проводить ранжирование возможных альтернативных действий и выбрать наиболее эффективное. Перспективным направлением для будущих исследований является реализация возможности использования предлагаемой методики, когда вероятности основных событий находятся в неопределенной форме или характеризуются нечеткими данными, что потребует использования лингвистических переменных при оценке и аппарата нечеткой логики.

**Ключевые слова:** чрезвычайная ситуация, принятие решений в условиях чрезвычайной ситуации, анализ дерева отказов, дерево отказов, реагирование.

## METHODOLOGY OF DECISION-MAKING IN EMERGENCY CONDITIONS BASED ON FAILURE TREE ANALYSIS

**Maksimov Alexander V.<sup>1</sup>**  
**Igoshin Dmitry D.<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> St. Petersburg University of the State Fire Service of EMERCOM of Russia named after Hero of the Russian Federation Army General E.N. Zinichev, St. Petersburg, Russia

### ABSTRACT

Decision-making problems in emergency response are usually fraught with risk and uncertainty due to limited data and a relatively large number of possible incident scenarios. These factors influence decision makers in the context of selecting a response or set of activities in emergency response. To solve this problem, we propose a methodology based on failure tree analysis, which is used to describe the logical relationships between the conditions and factors that lead to the occurrence and development of an emergency. The use of this methodology allows to consider different alternative response actions taking into account different scenarios of emergency development, to rank possible alternative actions and to choose the most effective one. A promising direction for future research is to realise the possibility of using the proposed methodology when the probabilities of the main events are in an uncertain form or are characterised by fuzzy data, which will require the use of linguistic variables in the assessment and the apparatus of fuzzy logic.

**Keywords:** emergency, emergency decision making, fault tree analysis, fault tree, response.

### Введение

Природные, техногенные, биолого-социальные чрезвычайные ситуации (ЧС) являются одними из ключевых проблем при обеспечении национальной безопасности, непрерывного социально-экономического роста государств или регионов. В мире, который стремительно развивается и меняется, угрозы, связанные с ЧС, становятся всё более сложными и многогранными. Предотвращение и смягчение последствий ЧС требует от государства создания эффективной

системы управления рисками, а также взаимодействия всех уровней власти и общества.

В условиях ЧС одной из ключевых задач является смягчение и минимизация их негативных проявлений. Это требует принятия решений в сжатые сроки, что зачастую осложняет процесс и требует высокой степени готовности и компетентности от всех задействованных структур. Лица, принимающие решения (ЛПР), в условиях возникновения ЧС должны реагировать незамедлительно, однако, им приходится действовать

зачастую в условиях информационной неопределенности, не позволяющей в полной мере оценить сценарии развития происшествия. Поэтому выбор эффективных решений, связанных с реагированием на ранней стадии ЧС является важной темой исследований в области управления в ЧС.

К настоящему моменту учеными проведено достаточно большое количество исследований по проблематике принятия решений при реагировании на ЧС. Так, авторами Заворотным А.Г. и Кострубицким А.А. был предложен алгоритм для выполнения задачи автоматизации оценки эффективности мероприятий при возникновении ЧС техногенного характера [1]; А.В. Калач и др. в своей работе [2] представили метод онтологического проектирования систем поддержки принятия решений для происшествий с применением технологий аналитического и ситуационного моделирования; Ляшенко Е.Н., Шерстюком В.Г. была решена задача поддержки целенаправленного кооперативного принятия решений ЧС [3]; в исследовании [4] Матвеевым А.В. и др. разработана математическая модель оценки технического обеспечения подразделений МЧС России, позволяющая определять их показатели готовности к реагированию; Матюшин А.В. и др. в своей научной работе [5] предложили методологию разработки автоматизированной геоинформационной системы формирования планов дислокаций пожарно-спасательных служб для поддержки принятия решений; Перевалов А.С. и Сугак В.П. разработали метод выбора плана проведения спасательных работ при ЧС на воде [6]; вопросы алгоритмизации ранжирования управленческих задач для повышения эффективности мероприятий проводимых спасательными службами были освещены в исследовании [7] Топольским Н.Г. и Таракановым Д.В.; возможности применения одновременно методов теории игр и теории перспектив при решении задач реагирования на ЧС, позволяющих учитывать ограниченную рациональность ЛПР, рассмотрены в работе Шофеева Т.Г. [8].

Существующие научные работы внесли большой вклад в вопросах принятия решений при

реагировании на ЧС. В этих исследованиях предлагаются различные методы принятия решений в соответствии с характеристиками складывающихся негативных событий [9]. Но, например, в таких ЧС как лесные пожары или инфекционные заболевания (COVID-19) и т.д., проблемы принятия решений осложняются в их динамически меняющихся характеристиках и высоком риске. Это требует более детального рассмотрения проблемы принятия решений, учитывая динамический процесс развития ЧС, её множество возможных сценариев и влияние действий ЛПР по реагированию на каждый из возможных сценариев развития ЧС. Методы анализа возможных решений при различных сценариях развития ЧС в настоящее время не в полной мере реализованы. Поэтому необходимо проводить дальнейшее исследование вопросов принятия решений при реагировании на ЧС с учетом характеристик их динамического развития и множества видов сценариев.

#### Методы исследования

Анализ дерева отказов (АДО) является одним из наиболее распространенных инструментов для прогнозирования надежности сложной системы за счет установления логических связей между компонентами (подсистемами) в исследуемой системе. С помощью АДО аналитик или ЛПР имеет возможность детально изучить возможные сценарии, рассмотреть различные пути развития неблагоприятных событий, и выявить критические компоненты, сбой которых может привести к серьезным последствиям [10]. Процесс включает в себя идентификацию и структуризацию событий в виде дерева, где каждое узловое событие связано с одним или несколькими предшествующими событиями.

В данной работе предлагается применить метод АДО для анализа проблемы принятия решений при ликвидации ЧС. Произошедшее происшествие с несколькими сценариями рассматривается как «система», нежелательные сценарии ЧС рассматриваются как «опасные события системы», а условия и факторы, приводящие к

развитию ЧС, рассматриваются в качестве основных (начальных) событий. Соответственно, для описания логических связей между сценариями, условиями и факторами строится дерево отказов (ДО) ЧС. На основе построенного ДО можно оценить вероятности сценариев ЧС для каждого из возможных решений по реагированию. Кроме того, на основе полученных вероятностей сценариев ЧС можно применять классический метод принятия решений для расчета общей рейтинговой оценки каждого действия при реагировании.

Рассмотрим следующую постановку задачи. Пусть:

$A = (A_1, A_2, \dots, A_n)$  – возможные виды из  $n$  возможных действий (альтернатив) ЛПР по реагированию, где  $A_i$  обозначает  $i$ -е действие по реагированию,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;

$C = (C_1, C_2, \dots, C_n)$  – вектор затрат, где  $C_i$  обозначает стоимость действия ЛПР  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ . Как правило, в стоимость реагирования  $A_i$  входит сумма определенных мероприятий, например, таких как техническое обслуживание, товары первой помощи, возможные потери и т.д. Для дальнейшего удобства формализации задачи примем, что  $C_i$  обозначает общую стоимость  $A_i$ , состоящую из всех решений  $i = 1, 2, \dots, n$ , и имеет некий денежный эквивалент;

$S = (S_0, S_1, \dots, S_m)$  – вектор сценариев ЧС, где  $S_0$  обозначает текущий сценарий ЧС.  $S_j$  обозначает  $j$ -й потенциальный сценарий в процессе развития ЧС,  $j = 1, 2, \dots, m$ . Также примем, что результат ущерба по сценарию  $S_j$  является более существенным, чем по сценарию  $S_j$ , если  $j' > j$ ,  $\forall j, j' \in (0, 1, \dots, m)$ . Кроме того, мы предполагаем, что сценарии  $S_1, S_2, \dots, S_m$  являются последовательными, таким образом,  $S_j$  – может произойти только в том случае, если  $S_j$  уже произошел (если  $j' > j$ ). Вектор  $S$  может быть определен путем консультации с экспертами, сбора соответствующих статистических данных или при проведении исследований на конкретных случаях;

$D = (D_1, D_2, \dots, D_q)$  – набор из  $q$  критериев для описания результатов повреждений при ЧС, где  $D_l$  обозначает  $l$ -й критерий негативного воздействия

происшествия,  $l = 1, 2, \dots, q$ ;

$d_j = (d_{j1}, d_{j2}, \dots, d_{jq})$  – вектор результатов ущерба по возможным сценариям  $S_j$ , где  $d_{jl}$  – результат ущерба по критерию  $D_l$  и по сценарию  $S_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ ,  $l = 1, 2, \dots, q$ ;

$W^c$  – весовой коэффициент затрат,  $0 \leq W^c < 1$ ;

$W = (W_1, W_2, \dots, W_q)$  – весовой вектор критериев, где  $W_l$  – это вес критерия  $D_l$ ,  $0 \leq W_l \leq 1$ ,  $l = 1, 2, \dots, q$ . Здесь мы полагаем  $W^c + \sum_{l=1}^q W_l = 1$ . Обычно  $W^c$  и  $W_l$  могут быть получены с помощью существующих процедур, например методом анализа иерархий;

$P = [P_{ij}]_{n \times m}$  – матрица вероятностей, где  $P_{ij}$  обозначает вероятность сценария  $S_j$ , если принято ответное действие  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ .

Обычно на ранней стадии ЧС значения матрицы  $P$  неизвестны. Оценка значений матрицы  $P$  представляет собой научный интерес для принятия решений при реагировании на ЧС.

### Результаты исследования и их обсуждение

Проблема, которая в основном рассматривается в данной работе, заключается в том, как оценить  $P$  и выбрать наиболее желательную альтернативу среди множества  $A$  на основе  $C, d_j, W^c, W$  и полученной матрицы  $P$ .

Из рисунка 1 видно, что существует два возможных результата сценария  $S_0$  при выполнении ответных действий ЛПР  $A_i$ , т.е. либо ЧС перейдет в сценарий  $S_1$  с вероятностью  $p_{i1}$ , либо её ликвидация  $\emptyset$  с вероятностью  $(1 - p_{i1})$ . Более того, если ЧС развивается по сценарию  $S_1$ , то также возможны два результата: сценарий  $S_2$  с вероятностью  $p_{i2}$  или её ликвидация  $\emptyset$  с вероятностью  $(p_{i1} - p_{i2})$ . Аналогичны рассуждения для перехода ЧС из сценария  $S_{m-1}$ : сценарий  $S_m$  с вероятностью  $p_{im}$  или её окончание  $\emptyset$  с вероятностью  $(p_{i(m-1)} - p_{im})$ . Если ЧС заканчивается после наступления сценария  $S_j$ , то вектор результатов ущерба принимается как  $d_j = (d_{j1}, d_{j2}, \dots, d_{jq})$ . Далее отметим, что  $p_{ij}$  – это не условные вероятности ЧС развивающейся по сценарию  $S_j$  после наступления сценария  $S_{j-1}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$ , а вероятность сценария  $S_j$  при ответной реакции на него ЛПР  $A_i$ .

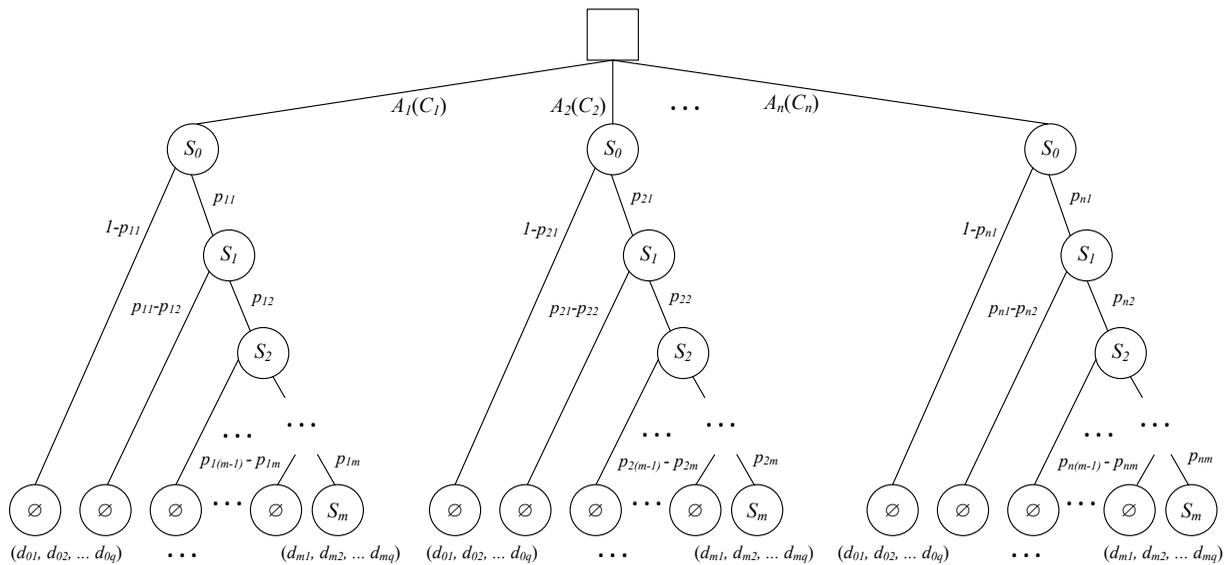


Рисунок 1 – Дерево отказов для принятия решений при реагировании на ЧС

Таким образом, сначала строится дерево отказов для отображения логических связей между условиями и факторами, приводящими к развитию ЧС. Затем, на основе построенного ДО, рассчитываются вероятности различных сценариев при альтернативных действиях ЛППР по реагированию на негативно складывающуюся ситуацию. На основе уже полученных вероятностей также определяется общее значение рейтинга каждого действия ЛППР для возможного ранжирования мероприятий ЛППР по борьбе с ЧС.

*Построение ДО при возникновении ЧС*

АДО является удобным методом для проведения анализа и определении первопричин нежелательных событий при отказе системы, а также для изображения логических связей между компонентами, производственными процессами и подсистемами [10, 11]. В настоящее время АДО широко используется во многих областях, таких как безопасность функционирования предприятий [12], оценка электроэнергетических систем [13], травматизм на предприятиях [14] и др. В данной работе метод АДО используется для оценки вероятностей сценариев ЧС. Таким образом, построение АДО необходимо для того, чтобы отобразить логические связи между условиями и факторами, определяющими развитие возможных сценариев ЧС.

Далее представим основные составляющие ДО, а затем приведем шаги по построению ДО для ЧС.

*Основные компоненты ДО*

Обычно ДО состоит из возможных событий и соединяющих их логических условий. К основным событиям в данном исследовании будут относиться:

- событие верхнего уровня: является наиболее нежелательным событием отказа системы в целом и объектом анализа, обозначается  $\square$ .
- событие среднего уровня: является событием отказа подсистемы или её компонента и причиной события верхнего уровня, обозначается  $\square$ .
- событие начального уровня: является основным событием отказа и причиной события верхнего или среднего уровня, обозначается  $\circ$ .

К основным логическим условиям относятся:

- логическое «ИЛИ» ( $\oplus$ ): применяется в том случае, если при генерировании выходного события происходит хотя бы одно из входящих в нее событий, обозначается  $\triangle$ .
- логическое «И» ( $\otimes$ ): используется при выполнении всех входных событий, обозначается  $\square$ .

*Этапы построения ДО ЧС*

Построение ДО ЧС представляет собой дедуктивную процедуру, где основной идеей является определение условий и факторов, при которых ЧС может перейти из одного состояния в другое (перейти из сценария  $S_{j-1}$  в сценарий  $S_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ ). ДО должно строиться последовательно от уровня к уровню, с условием того, что каждый уровень должен быть завершен до рас-

смотрения следующего. Успешное построение ДО ЧС предполагает выполнения следующих этапов:

Этап 1. Выявить наиболее нежелательный сценарий  $S_m$  и задать его как верхнее событие.

Этап 2. Определить условия для анализа, которые включают:

- определение факторов и состояний аварийного сценария, которые будут включены в ДО как события;
- определение внешних воздействий окружающей среды (например, изменение погодных условий), которые должны быть включены в ДО как события;
- определение степени детализации рассмотрения потенциальных причин и событий.

Шаг 3. Классифицировать все события на события начального и среднего уровня. Если событие представляет собой первичный фактор, который может привести к развитию ЧС, оно классифицируется как начальное (основное) событие; если событие представляет собой вторичный фактор, который может привести к развитию ЧС, оно классифицируется как событие среднего уровня, которое требует дальнейшего рассмотрения для выявления основных причин.

Шаг 4. Задать логические отношения. Если событие верхнего уровня произойдет при условии, что произойдет хотя бы одно событие нижнего уровня, то события должны быть связаны с помощью логического «ИЛИ»; если событие верхнего уровня произойдет только в том случае, если два или более событий нижнего уровня произойдут одновременно, то события должны быть связаны с помощью логического «И».

Используя описанные выше шаги, можно построить ДО ЧС.

*Вычисление вероятностей сценариев*

На основе построенного ДО можно сформулировать логическое выражение каждого сценария. Затем, оценив вероятности основных событий, можно рассчитать вероятности сценариев для различных ответных мероприятий ЛПР.

Предположим, что существует  $k$  основных событий в ДО ЧС, обозначаемых как  $X_1, X_2, \dots, X_k$  соответственно. Согласно построенному ДО,

логическое выражение сценария  $S_j$  примет вид:

$$F_{S_j} = F_j(X_1, X_2, \dots, X_k), j = 1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

Далее для анализа решений требуется оценить вероятности основных событий путем опроса экспертов. В виду того, что при проведении экспертной оценки для определения вероятностей основных событий требуется учитывать много факторов, то в этой ситуации можно воспользоваться методом косвенного опроса [15], методом Делфи [16] или методом номинальных групп [17]. При использовании метода косвенного опроса экспертам предоставляется ряд данных (сведений) о ранее произошедших аналогичных событиях. Затем эксперты сравнивают вероятности основных событий с вероятностями аналогичных событий, определяя тем самым личное решение о допустимой вероятности основных событий. Далее, на основе личных решений экспертов, применяется метод Делфи [16] и метод номинальных групп [17] для определения согласованного коллективного решения о вероятностях основных событий. Таким образом, может быть получена матрица вероятностей основных событий, которая примет следующий вид:

$$\tilde{P} = [\tilde{P}_{ih}]_{n \times k} = \begin{matrix} & X_1 & X_2 & \dots & X_k \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} \tilde{P}_{11} & \tilde{P}_{12} & \dots & \tilde{P}_{1k} \\ \tilde{P}_{21} & \tilde{P}_{22} & \dots & \tilde{P}_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{P}_{n1} & \tilde{P}_{n2} & \dots & \tilde{P}_{nk} \end{bmatrix} \end{matrix}, \quad (2)$$

где  $\tilde{P}_{ih}$  обозначает вероятность основного события  $X_k$  при выполнении ответных действий ЛПР  $A_i, i = 1, 2, \dots, n, h = 1, 2, \dots, k$ .

Кроме того, согласно (1) и (2), вероятность сценария  $S_j$  с учетом реагирования на них ЛПР  $A_i$  может быть получена следующим образом:

$$p_{ij} = f_j(\tilde{P}_{i1}, \tilde{P}_{i2}, \dots, \tilde{P}_{ik}), \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m, \quad (3)$$

где  $f_j(\cdot)$  – функция, соответствующая  $F_j(\cdot)$ . В  $f_j(\cdot)$  логическая операция  $X_h \oplus X_{h'}$  в  $F_j(\cdot)$  заменяется вероятностной операцией  $\tilde{P}_{ih} + \tilde{P}_{ih'} - \tilde{P}_{ih} \cdot \tilde{P}_{ih'}$ ; логическая операция  $X_h \otimes X_{h'}$  в  $F_j(\cdot)$  заменяется  $\tilde{P}_{ih} \cdot \tilde{P}_{ih'}$ .

Таким образом, по  $p_{ij}$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ , строится матрица вероятностей сценариев, а именно,

$$P = [p_{ij}]_{n \times m} = \begin{matrix} & S_1 & S_2 & \dots & S_m \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{matrix} & \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nm} \end{bmatrix} \end{matrix}. \quad (4)$$

где  $p_{ij}$  обозначает вероятность сценария  $S_j$  при реагировании ЛПР  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ .

Для более наглядной иллюстрации описанной выше процедуры вычислений ниже приведен простой числовой пример.

*Пример.* На рисунке 2 представлена иллюстрация ДО гипотетической ЧС.

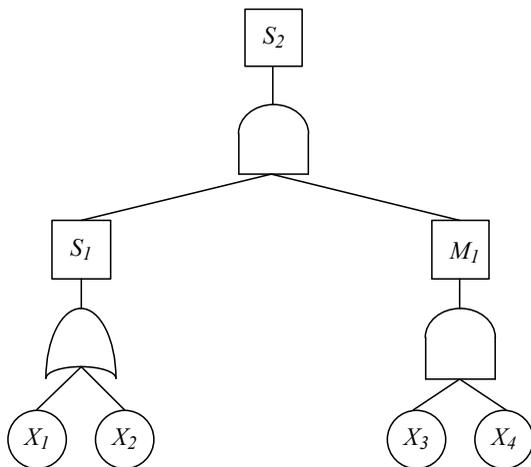


Рисунок 2 – Дерево отказов гипотетической чрезвычайной ситуации

В данном случае  $S_2$  – самый нежелательный сценарий ЧС (событие верхнего уровня);  $S_1$  – нежелательный сценарий на нижнем уровне  $S_2$ , а  $M_1$  – событие на среднем уровне;  $X_1, X_2, X_3$  и  $X_4$  – четыре основных события.  $X_1, X_2$  и  $S_1$  связаны между собой  $\bigwedge$ . Это означает, что  $S_1$  происходит в том случае, если происходит хотя бы одно из событий  $X_1$  или  $X_2$ .  $X_3, X_4$  и  $M_1$  связаны  $\bigwedge$ . Это означает, что  $M_1$  происходит только в том случае, если события  $X_3$  и  $X_4$  происходят одновременно. Аналогично,  $S_2$  возникает только в том случае, если  $S_1$  и  $M_1$  возникают одновременно.

Согласно этому, логические выражения для  $S_1$  и  $S_2$  могут быть сформулированы соответствующим образом:

$$F_{S_1} = X_1 \oplus X_2,$$

$$F_{S_2} = X_1 \otimes M_1 = (X_1 \oplus X_2) \otimes (X_3 \oplus X_4).$$

Предположим, что при реагировании на ЧС рассматриваются два возможных варианта действий (или альтернативы)  $A_1$  и  $A_2$ .

Матрица вероятностей основных событий, определенных с помощью косвенного опроса и метода Делфи, примет вид:

$$\tilde{P} = [\tilde{p}_{ih}]_{2 \times 4} = \begin{matrix} & X_1 & X_2 & X_3 & X_4 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.7 & 0.5 & 0.3 & 0.1 \\ 0.6 & 0.4 & 0.4 & 0.3 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Затем, согласно уравнению (3) и матрице вероятностей основных событий, можно рассчитать вероятность  $S_1$  при действии  $A_1$  или  $A_2$ . Таким образом:

$$p_{11} = 0.7 + 0.5 - 0.7 \cdot 0.5 = 0.85,$$

$$p_{21} = 0.6 + 0.4 - 0.4 \cdot 0.4 = 0.84.$$

Аналогично, согласно уравнению (4) и матрице вероятностей основных событий, можно рассчитать вероятность  $S_2$  при действии  $A_1$  или  $A_2$ :

$$p_{12} = (0.7 + 0.5 - 0.7 \cdot 0.5) \cdot 0.3 \cdot 0.1 = 0.0255,$$

$$p_{22} = (0.6 + 0.4 - 0.4 \cdot 0.4) \cdot 0.4 \cdot 0.3 = 0.1008.$$

Таким образом, мы можем построить матрицу вероятностей сценариев:

$$P = [p_{ij}]_{2 \times 2} = \begin{matrix} & S_1 & S_2 \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0.85 & 0.0255 \\ 0.84 & 0.1008 \end{bmatrix} \end{matrix}.$$

Ранжирование осуществимых действий при реагировании на ЧС

На основе выражения (4) можно определить значения рейтинга альтернативных действий ЛПР и провести их ранжирование.

В первую очередь, для приведения критериев к одинаковому диапазону необходимо провести их нормирование. Пусть  $\bar{C} = (\bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_m)$  – нормированный вектор затрат, где  $c_i$  – нормированная стоимость реагирования ЛПР  $A_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  $\bar{d}_j = (\bar{d}_{j1}, \bar{d}_{j2}, \dots, \bar{d}_{jq})$  – нормированный вектор потенциального ущерба ЧС, где  $\bar{d}_{jl}$  – нормированное значение критерия относительно  $D_l$  в отношении сценария  $S_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ ,  $l = 1, 2, \dots, q$ . При нормировке  $c_i$  и  $\bar{d}_{jl}$  могут быть рассчитаны следующим образом:

$$\bar{c}_i = \frac{c_{\max} - c_i}{c_{\max} - c_{\min}}, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (5)$$

$$\overline{d}_{jl} = \frac{d_l^{\max} - d_{jl}}{d_l^{\max} - d_l^{\min}}, j = 1, 2, \dots, m, l = 1, 2, \dots, q, (6)$$

где  $c_{\max} = \max(c_1, c_2, \dots, c_n)$ ,

$$c_{\min} = \min(c_1, c_2, \dots, c_n),$$

$$d_l^{\max} = \max(d_{0l}, d_{1l}, \dots, d_{ml}),$$

$$d_l^{\min} = \min(d_{0l}, d_{1l}, \dots, d_{ml}).$$

Согласно уравнениям (5) и (6), затраты и значения критериев объединяются, таким образом, чем больше  $\overline{c}_i$ , тем результативнее будет реагирование ЛПР  $A_i$ , аналогично, чем больше  $\overline{d}_{jl}$ , тем более разрушительным будет ущерб относительно  $D_k$  по сценарию  $S_j$ .

Из рисунка 1 видно, что существует  $(n + 1)$  возможных результатов ущерба, т.е. ЧС заканчивается после наступления сценария  $S_0, S_1, \dots, S_m$ . Вероятности  $(n + 1)$  результатов ущерба равны  $1 - p_{i1}, p_{i1} - p_{i2}, \dots, p_{im}$ , если реализуется ответное действие ЛПР  $A_i$ . Пусть  $a_{il}$  обозначает ожидаемое критериальное значение реакции ЛПР  $A_i$  относительно  $D_p, i = 1, 2, \dots, n, l = 1, 2, \dots, q$ . Согласно  $\overline{d}_j = (\overline{d}_{j1}, \overline{d}_{j2}, \dots, \overline{d}_{jq})$  и (4)  $a_{il}$  можно представить в виде:

$$a_{il} = (1 - p_{i1})\overline{d}_{0l} + \sum_{j=1}^{m-1} (p_{ij} - p_{i(j+1)})\overline{d}_{jl} + p_{im}\overline{d}_{ml},$$

$$i = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, q. (7)$$

Пусть  $a_i$  обозначает общее значение рейтинга действия ЛПР по ликвидации ЧС  $A_i$ , которое может быть представлено следующим образом:

$$a_i = W^c \overline{c}_i + \sum_{l=1}^q W_l a_{il}, i = 1, 2, \dots, n. (8)$$

Чем больше значение  $a_i$ , тем эффективнее будет ответная реакция ЛПР  $A_i$ . Таким образом, по общим значениям  $a_1, a_2, \dots, a_n$  мы можем провести ранжирование всех альтернативных действий ЛПР при ЧС и выбрать наиболее эффективное.

### Выводы

В данном исследовании представлена методика принятия решений при реагировании ЧС на основе использования метода анализа дерева отказов. При построении ДО описываются логические отношения между условиями и факторами,

определяющими развитие ЧС, оцениваются вероятности сценариев ЧС при каждом из возможных альтернативных действий ЛПР. В соответствии с полученными вероятностями проводится ранжирование мероприятий по реагированию.

Ключевым моментом предлагаемой методики является оценка вероятностей сценариев с учетом каждого возможного действия по реагированию ЛПР. Для этого используется метод АДО, который декомпозирован на конкретные шаги по построению ДО при ЧС. Использование АДО в принятии решений позволяет учитывать динамичность в процессе развития ЧС и оценить вероятности сценариев ЧС до того, как будут реализованы мероприятия ЛПР по реагированию.

Используя предложенную методику можно не только оценить рейтинг возможных альтернативных действий ЛПР при реагировании на ЧС, но и провести анализ их чувствительности. Данные, полученные в результате анализа чувствительности, служат дополнением и стимулом для ЛПР, что важно для поддержки принятия решений в процессе ликвидации ЧС.

Предлагаемая методика может помочь дать экспертам или ЛПР количественное обоснование для определения подходящего способа для решения проблемы принятия решений при ЧС.

Перспективным направлением для будущих исследований является реализация возможности использования предлагаемой методики, когда возможности основных событий находятся в неопределенной форме или характеризуются нечеткими данными, что потребует использования интервальных чисел или лингвистических переменных при оценке.

### Список литературы

1. Заворотный А.Г., Кострубицкий А.А. Алгоритмизация и программная реализация модели управления системой защиты населения в чрезвычайных ситуациях техногенного характера // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2021. – № 4. – С. 112-124. – DOI 10.36535/0869-4179-2021-04-10. – EDN RMULXX.

2. Калач А.В., Ничепорчук В.В., Калач Е.В., Кубасов И.А. Проектирование систем поддержки управления природно-техногенной безопасностью территорий с использованием онтологий // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. – 2021. – № 3. – С. 95-105. – DOI 10.17308/sait.2021.3/3739. – EDN LUZTCZ.
3. Ляшенко Е.Н., Шерстюк В.Г. Разработка модели координации сил и средств в иерархической системе гражданской защиты населения // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – Т. 4, № 2(24). – С. 4-10. – DOI 10.15587/2312-8372.2015.47180. – EDN UDXIIR.
4. Матвеев А.В., Максимов А.В., Воднев С.А. Модель комплексной оценки процесса технического обеспечения аварийно-спасательных средств подразделений МЧС России // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2018. – № 2(46). – С. 73-80. – EDN YLLCZN.
5. Матюшин А.В., Порошин А.А., Бобринев Е.В., Кондашов А.А., Матюшин Ю.А., Терехов А.В. Современные геоинформационные технологии в проектировании гарнизонов пожарной охраны // Пожарная безопасность. – 2012. – № 3. – С. 107-119. – EDN PHSLGR.
6. Перевалов А.С., Сугак В.П. Игровые методы выбора оптимального плана проведения поисково-спасательных работ // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2013. – № 3. – С. 8-12. – EDN RSMMEI.
7. Топольский Н.Г., Тараканов Д.В. Алгоритм ранжирования управленческих задач в системе поддержки принятия решений по ликвидации чрезвычайных ситуаций // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 2(54). – С. 27. – EDN TGSMCR.
8. Шофеев Т.Г. Модель принятия решений при реагировании на чрезвычайные ситуации в условиях неопределенности // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2023. – № 1. – С. 190-203. – EDN HCRSUA.
9. Максимов А.В. Методы поддержки принятия решений в оперативном управлении при чрезвычайных ситуациях: обзор исследований // Национальная безопасность и стратегическое планирование. – 2023. – № 2(42). – С. 91-102. – DOI 10.37468/2307-1400-2023-2-91-102. – EDN CJCPWN.
10. Викторова В.С., Степанянц А.С. Динамические деревья отказов // Надежность. – 2011. – № 3(38). – С. 20-32. – EDN OSKKBL.
11. Бутырский Е.Ю., Матвеев А.В. Математическое моделирование систем и процессов. – СПб: Информационный издательский учебно-научный центр «Стратегия будущего», 2022. – 733 с. – ISBN 978-5-4268-0064-9. – DOI 10.37468/book\_011222. – EDN CCRIRT.
12. Днекешев А.А. Динамическое дерево отказов для анализа аварийных ситуаций нефтеперерабатывающих предприятий // Вестник науки. – 2022. – Т. 3, № 8(53). – С. 19-30. – EDN DXDFRN.
13. Колосок И.Н., Коркина Е.С., Тихонов А.В. Анализ надежности программно-вычислительного комплекса оценивания состояния на основе технологии дерева отказов // Электричество. – 2018. – № 6. – С. 24-34. – DOI 10.24160/0013-5380-2018-6-24-34. – EDN XOTSLR.
14. Мурадов А.В., Волохина А.Т., Глебова Е.В., Иванова М.В. Аварийность магистральных газопроводов с учетом человеческого фактора // Безопасность жизнедеятельности. – 2009. – № 12(108). – С. 37-40. – EDN KXYVJH.
15. Nowak M. Aspiration level approach in stochastic MCDM problems // European Journal of Operational Research. – 2007. – Vol. 177. – No 3. – P. 1626-1640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.10.003>
16. Сологубова Л.А., Трунькина О.В., Байбекова Ф.Н., Кулаков А.А. Принятие решений с помощью метода анализа иерархий // Инновации в науке. – 2018. – № 4(80). – С. 11-14. – EDN WBWTQT.

17. *Кнышов А.В.* Применение групповых методов при принятии незапрограммированных управленческих решений // Вестник Российской таможенной академии. – 2018. – № 4. – С. 95-102. – EDN VNXNDG.

### References

1. *Zavorotny A.G., Kostrubitsky A.A.* Algorithmization and software implementation of the management model for the population protection system in man-made emergencies // Problems of security and emergencies. – 2021. – No. 4. – P. 112-124. – DOI 10.36535/0869-4179-2021-04-10. – EDN RMULXX.

2. *Kalach A.V., Nicheporchuk V.V., Kalach E.V., Kubasov I.A.* Design of support systems for the management of natural and man-made safety of territories using ontologies // Bulletin of the Voronezh State University. Series: Systems Analysis and Information Technology. – 2021. – No. 3. – P. 95-105. – DOI 10.17308/sait.2021.3/3739. – EDN LUZTCZ.

3. *Lyashenko E.N., Sherstyuk V.G.* Development of a model for coordinating forces and means in a hierarchical system of civil protection of the population // Technological audit and production reserves. – 2015. – Vol. 4, No. 2(24). – P. 4-10. – DOI 10.15587/2312-8372.2015.47180. – EDN UDXIIR.

4. *Matveev A.V., Maksimov A.V., Vodnev S.A.* Model for a comprehensive assessment of the process of technical support of emergency rescue equipment of the EMERCOM of Russia // Problems of risk management in the technosphere. – 2018. – No. 2(46). – P. 73-80. – EDN YLLCZN.

5. *Matyushin A.V., Poroshin A.A., Bobrinev E.V., Kondashov A.A., Matyushin Yu.A., Terekhov A.V.* Modern geoinformation technologies in designing fire protection garrisons // Fire safety. – 2012. – No. 3. – P. 107-119. – EDN PHSLGR.

6. *Perevalov A.S., Sugak V.P.* Game methods for selecting the optimal plan for conducting search and rescue operations // Scientific and analytical journal «Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia». – 2013. – No. 3. – P. 8-12. –

EDN RSMMEI.

7. *Topolsky N.G., Tarakanov D.V.* Algorithm for ranking management tasks in the decision-making support system for emergency response // Technologies of technosphere safety. – 2014. – No. 2 (54). – P. 27. – EDN TGSMCR.

8. *Shofeev T.G.* Model of decision-making in responding to emergencies under uncertainty // Scientific and analytical journal “Bulletin of the St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia”. – 2023. – No. 1. – P. 190-203. – EDN HCRSUA.

9. *Maksimov A.V.* Methods of decision support in operational management of emergency situations: a research review // National security and strategic planning. – 2023. – No. 2 (42). – P. 91-102. – DOI 10.37468/2307-1400-2023-2-91-102. – EDN CJCPWN.

10. *Viktorova V.S., Stepanyants A.S.* Dynamic Fault Trees // Reliability. – 2011. – No. 3(38). – P. 20-32. – EDN OSKKBL.

11. *Butyrsky E.Yu., Matveev A.V.* Mathematical Modeling of Systems and Processes. – St. Petersburg: Information Publishing Educational and Scientific Center «Strategy of the Future», 2022. – 733 p. – ISBN 978-5-4268-0064-9. – DOI 10.37468/book\_011222. – EDN CCRIRT.

12. *Dnekeshev A.A.* Dynamic fault tree for the analysis of emergency situations at oil refineries // Science Bulletin. – 2022. – Vol. 3, No. 8(53). – P. 19-30. – EDN DXDFRN.

13. *Kolosok I.N., Korkina E.S., Tikhonov A.V.* Reliability analysis of a software and computing complex for state assessment based on fault tree technology // Electricity. – 2018. – No. 6. – P. 24-34. – DOI 10.24160/0013-5380-2018-6-24-34. – EDN XOTSLR.

14. *Muradov A.V., Volokhina A.T., Glebova E.V., Ivanova M.V.* Accident Rate of Main Gas Pipelines Taking into Account the Human Factor // Life Safety. – 2009. – No. 12 (108). – P. 37-40. – EDN KXYVJH.

15. *Nowak M.* Aspiration level approach in stochastic MCDM problems // European Journal of Operational Research. – 2007. – Vol. 177. – No. 3. – P. 1626-1640. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.10.003>

16. *Sologubova L.A., Trunkina O.V., Baibekova F.N., Kulakov A.A.* Decision Making Using the Analytic Hierarchy Process // *Innovations in Science*. – 2018. -- No. 4 (80). – P. 11-14. – EDN WBWTQT.

17. *Knyshov A.V.* Application of group methods in making unprogrammed management decisions // *Bulletin of the Russian Customs Academy*. – 2018. – No. 4. – P. 95-102. – EDN VNXNDG.

*Статья поступила в редакцию 22 апреля 2024 г.*

*Принята к публикации 21 июня 2024 г.*

**Ссылка для цитирования:** Максимов А.В., Игошин Д.Д. Методика принятия решений в условиях чрезвычайной ситуации на основе анализа дерева отказов // *Национальная безопасность и стратегическое планирование*. 2024. № 2(46). С. 75-84. DOI: <https://doi.org/10.37468/2307-1400-2024-2-75-84>

**For citation:** Maksimov A.V., Igoshin D.D. Methodology of decision-making in emergency conditions based on failure tree analysis // *National security and strategic planning*. 2024. № 2(46). pp. 75-84. DOI: <https://doi.org/10.37468/2307-1400-2024-2-75-84>.

#### Сведения об авторах:

**МАКСИМОВ АЛЕКСАНДР ВИКТОРОВИЧ** – кандидат технических наук, доцент, заместитель начальника кафедры прикладной математики и информационных технологий, Санкт-Петербургский университет Государственной противопожарной службы МЧС России имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, г. Санкт-Петербург, Россия

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4607-7519>

SPIN-код: 6109-6682

e-mail: [he1nze@mail.ru](mailto:he1nze@mail.ru)

**ИГОШИН ДМИТРИЙ ДМИТРИЕВИЧ** – Главное управление МЧС России по Нижегородской области, Центр управления в кризисных ситуациях главного управления МЧС России по Нижегородской области, адъюнкт Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России имени Героя Российской Федерации генерала армии Е.Н. Зиничева, г. Нижний Новгород, Россия

SPIN-код: 4163-4335

e-mail: [d\\_igoshin@bk.ru](mailto:d_igoshin@bk.ru)

#### Information about authors:

**MAKIMOV ALEXANDER V.** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Deputy head of the department of applied mathematics and information technologies, St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia named after Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev, St. Petersburg, Russia

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4607-7519>

SPIN: 6109-6682

e-mail: [he1nze@mail.ru](mailto:he1nze@mail.ru)

**IGOSHIN DMITRY D.** – Central control center of the Main directorate of the Ministry of emergency situations of Russia for the Nizhny Novgorod region, Adjunct of St. Petersburg University of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia named after Hero of the Russian Federation, Army General E.N. Zinichev, Nizhny Novgorod, Russia

SPIN: 4163-4335

e-mail: [d\\_igoshin@bk.ru](mailto:d_igoshin@bk.ru)