

*Д.т.н. Ю.А. Абрамов, д.т.н. В.И. Кривцова*

## **ОЦЕНКА ПОДХОДОВ К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ВЕЛИЧИНЫ РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ**

Проведена сравнительная оценка методов определения вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций. Даны рекомендации по их использованию для определения относительной опасности территорий.

**Постановка проблемы.** Количественная сравнительная оценка природной и техногенной безопасности регионов Европы необходима для управления безопасностью населения путем выдачи рекомендаций по распределению бюджетных средств между регионами на предотвращение чрезвычайных ситуаций и смягчение их последствий, разработки государственных и региональных программ, направленных на повышение безопасности жизнедеятельности в наиболее опасных регионах.

**Анализ последних достижений и публикаций.** Вопросам определения риска возникновения техногенных и природных катастроф в современной печати уделено достаточно много места [2-4]. В тоже время всестороннего анализа достоинств тех или иных методов в настоящее время не проведено. Данная статья является логическим продолжением материала, по этой проблематики, вошедшего в учебник «Мониторинг чрезвычайных ситуаций» [1].

**Постановка задачи и ее решение.** Рассмотрим основные положения по организации управления безопасностью населения:

- оперативная и долгосрочная оценка рисков ЧС как в масштабе всего Европейского региона, так и в рамках отдельно взятой страны;
- планирование на основе этих оценок мероприятий по снижению рисков и смягчению последствий ЧС;
- сравнительная оценка опасности регионов, их ранжирование и определение доли бюджетных ресурсов на снижение рисков и смягчение последствий ЧС в каждом регионе.

Для сравнительной оценки можно использовать следующие методы:

- статистический, основанный на анализе статистики ЧС по регионам за ряд лет и определении показателей опасности;
- вероятностный, основанный на применении математических моделей, связывающих предпосылки к ЧС с возможностью их проявления (например, вероятностный анализ безопасности ядерных реакторов);

– экспертный, основанный на экспертном оценивании в сочетании с теорией нечетких множеств.

Достоинством статистического метода является объективность. Вероятностный и экспертный методы позволяют учесть источники потенциальной опасности, которые проявляются в форме ЧС редко, но последствия от которых являются катастрофическими (например, авария на Чернобыльской АЭС, землетрясения и др.). Однако вероятностный метод чрезвычайно громоздок и трудоемок, требует большого числа исходных данных, что приводит к низкой точности получаемых результатов. При отсутствии апробированных математических моделей и достаточно достоверных исходных данных для них, влиянии на возможность реализации масштабных ЧС большого числа трудно формализуемых исходных данных целесообразно воспользоваться экспертным методом.

Проведем анализ известных экспертных методов.

Количественную оценку качественного признака, характеризующего опасность территории, можно получить на основе сравнения территорий друг с другом. Получаемые при этом оценки являются относительными, поскольку зависят от того, какие территории сравниваются.

Решая задачу получения относительных опасностей территорий по какому-либо признаку при их небольшом числе ( $m \leq 10$ ), эксперт может установить их интуитивно (говорят, что эксперт должен разделить единицу между  $m$  территориями). Устанавливая относительные веса элементов интуитивно, эксперт выставляет оценки такими, какими они ему представляются. При этом его суждения опираются на профессиональную подготовку, но не являются результатом каких-либо рассуждений или вычислений.

При большом ( $m > 10$ ) числе территорий определение относительных весов должно опираться на формализованную процедуру, основанную либо на попарных сравнениях территорий, либо на сравнениях одной территории с несколькими. Сравнивая между собой территории, эксперт отвечает на вопрос: у какой из сравниваемых территорий и насколько сильнее выражен рассматриваемый признак. Однако веса, полученные на основе интуитивного метода, характеризуются высокой субъективностью выставляемых оценок, поскольку при их выставлении эксперт, в сущности, производит оценку своих знаний по данной предметной области. Следовательно, применение этого метода получения относительных весов нецелесообразно.

(Метод фон Неймана-Моргенштерна).

Для того чтобы оценить степень предпочтения одной территории другой, вводятся количественные оценки предпочтительности территорий  $h_1, \dots, h_m$ . Наиболее предпочтительной по сравниваемому признаку ( $m$ -й) территории присваивается оценка  $h_m = 1$ . Затем экс-

перт выбирает такие значения величин  $e_i$  ( $i = 1, \dots, m-1$ ),  $e_i \in [0, 1]$ , при которых будут справедливы соотношения  $e_i \cdot h_i = h_m$ , откуда  $h_i = h_m/e_i$ . После этого эксперт должен определить значения  $e_{ij}$  ( $i = 1, \dots, m-2; j = 2, \dots, m-1, j > i$ ), удовлетворяющие условию  $e_{ij} \cdot h_i = h_j$ . Оценки предпочтительности территорий, выставленные экспертом, считаются согласованными, если имеет место равенство  $e_{ij} = e_i/e_j$ . В противном случае нужно установить новые значения  $e_i$  ( $i = 1, \dots, m-1$ ).

Общее число оценок, которые должен установить эксперт, составляет  $m(m-1)/2$ . Квадратичная зависимость числа оценок от числа сравниваемых территорий делает этот метод трудоемким. Эксперт сравнивает попарно все территории и дает количественную оценку каждому такому сравнению, после чего может возникнуть необходимость в многочисленных корректировках. Для получения относительных весов территорий по рассматриваемому признаку вычисляют оценки  $q_i = h_i / \sum_{i=1}^m h_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ). Трудоемкость получения весов делает использование этого метода также нецелесообразным, поскольку основные затраты сил и средств приходится на этап экспертного оценивания, а не на этап обработки его результатов.

(Метод попарных сравнений).

Эксперту поочередно предъявляются все пары территорий, и он каждый раз устанавливает, какой из элементов предпочтительнее по рассматриваемому признаку. При этом он заполняет матрицу попарных сравнений  $W$ , элементы которой

$$w_{ij} = \begin{cases} 2, & \text{если } \theta_i > \theta_j; \\ 1, & \text{если } \theta_i \approx \theta_j; \quad (i, j = 1, \dots, m). \\ 0, & \text{если } \theta_i < \theta_j; \end{cases}$$

Элементы матрицы обладают свойствами: 1) при  $i = j$   $w_{ij} = 1$ ; 2)  $w_{ij} + w_{ji} = 2$ . В качестве относительных весов территорий принимают компоненты нормированного собственного вектора матрицы  $W$  на  $k$ -м шаге итераций:

$$q_i^{(k)} = \frac{1}{\lambda^{(k)}} \sum_{j=1}^m w_{ij} q_j^{(k-1)}$$

$$\lambda^{(k)} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} \hat{q}_j^{(k-1)}$$

Требуемую точность вычислений  $\varepsilon$  компонент собственного вектора устанавливают заранее, останавливая расчеты на шаге  $k$  в случае выполнения  $m$  условий  $\left| \hat{q}_i^{(k-1)} - \hat{q}_i^{(k)} \right| \leq \varepsilon, \forall i$ . Данный метод полу-

чения весов элементов обладает рядом достоинств: достаточно простая процедура выставления оценок и формализованное вычисление весов. Однако необходимо отметить недостаток, состоящий в том, что преимущество одной территории над другой может быть как угодно большим, а оценка для этого случая всего одна – 2.

(Метод попарных сравнений с количественной оценкой предпочтения).

Эксперт в процессе попарных сравнений не только выбирает в каждой паре предпочтительную территорию, но и указывает, во сколько раз эта территория предпочтительнее по рассматриваемому признаку, чем другая территория пары. Заполняя матрицу попарных сравнений  $W$ , эксперт, как правило, пользуется шкалой попарных сравнений. Примером подобной шкалы может служить шкала Т. Саати, согласно которой территориям могут быть выставлены оценки от 1 (территории одинаково опасные или безопасные) до 9 (первая территория пары абсолютно опаснее второй).

Метод попарных сравнений с количественной оценкой предпочтения наиболее приемлем для определения относительных опасностей территорий, поскольку не требует обязательной транзитивности предпочтений эксперта, а обработка матриц попарных сравнений легко реализуема на ЭВМ.

Анализ методом вычисления относительных весов показывает, что наиболее приемлемым для определения относительных опасностей территорий является метод попарных сравнений с количественной оценкой предпочтения.

Для повышения достоверности вычисляемых относительных весов территорий могут быть использованы следующие способы:

1. Привлечение к выставлению оценок группы экспертов. Относительные веса территорий, полученные одним экспертом, часто не могут быть приняты как достоверные вследствие высокой субъективности выставленных оценок. Поэтому к оцениванию целесообразно привлекать группу экспертов, каждый член которой проводит попарные сравнения территорий. Тогда в качестве относительных весов территорий по рассматриваемому признаку, полученных группой экспертов, принимаются усредненные или вычисленные с учетом компе-

тентности экспертов относительные веса территорий, полученные каждым из членов группы;

2. Оценка согласованности мнений экспертов. При реализации метода попарных сравнений рекомендуется проверять согласованность мнений экспертов группы с целью определения возможности использования результатов для получения относительной информации. Для этого вычисляют коэффициенты вариации

$$g_{ij} = \frac{\sqrt{\frac{1}{z-1} \sum_{k=1}^z (w_{ij}(k) - w_{ij})^2}}{w_{ij}},$$

где  $w_{ij}(k)$  - элементы матрицы  $W(k)$ , полученной от  $k$ -го из  $z$  экспертов;  $w_{ij}$  - их усредненные значения. Согласованность считают удовлетворительной при всех  $g_{ij} \leq 0,3$ , хорошей - при всех  $g_{ij} \leq 0,2$ . В случае неудовлетворительной согласованности экспертам предлагается критически оценить результаты сравнений территории и, при необходимости, внести коррективы. После этого повторяется обработка вновь заполненных матриц попарных сравнений и проводится оценка согласованности.

(Нечеткая модель для получения относительной информации)

Относительная информация об опасности территорий может быть получена на основе теории нечетких множеств с привлечением методов экспертного оценивания. Для получения относительной информации выберем нечеткую переменную, которая описывала бы опасность территорий, и построим функцию принадлежности территорий нечеткому множеству, смысл которого формализован выбранной нечеткой переменной. В качестве таких переменных целесообразно использовать "наиболее опасная территория" и "опасная территория".

Для определения количественных оценок степени опасности территорий введем нечеткую переменную "опасная территория", определенную на дискретном множестве  $\Theta = \{\theta\}$  из  $m$  территорий. Нечеткое множество  $\tilde{A}$  на множестве  $\Theta$  представляет собой совокупность пар  $\tilde{A} = \{\langle \mu_A(\theta)/\theta \rangle\}$ , где  $\mu_A(\theta)$  - степень принадлежности территории  $\theta \in \Theta$  к множеству  $\tilde{A}$ . Большие значения  $\mu_A(\theta)$  соответствуют территориям, в большей степени отвечающим смыслу нечеткой переменной "опасная территория".

Для вычисления степеней принадлежности территорий нечеткому множеству  $\tilde{A}$  воспользуемся методом попарных сравнений по качественному признаку с количественной оценкой предпочтения.

Для получения матриц попарных сравнений проводят опрос  $z$  экспертов относительно того, насколько, по их мнению, территория  $\theta_i$  более соответствует смыслу нечеткой переменной "опасная территория", чем территория  $\theta_j$ . Для выставления оценок  $w_{ij}$  эксперт с помощью шкалы Т. Саати (табл. 1) сравнивает предполагаемые им опасности пары территорий.

**Таблица 1 – Шкала попарных сравнений Т. Саати**

Значение $w_{ij}$	Определение	Пояснение
1	Территории одинаково опасны (безопасны)	Территории обладают примерно одинаковой опасностью
2	Промежуточное значение	
3	Слабое превосходство	Эксперт считает, что опасность первой территории пары несколько выше, чем второй
4	Промежуточное значение	
5	Сильное превосходство	Эксперт считает, что опасность первой территории пары определено выше, чем второй
6	Промежуточное значение	
7	Явное превосходство	Эксперт считает, что опасность первой территории пары явно выше, чем второй, и статистика это подтверждает
8	Промежуточное значение	
9	Абсолютное превосходство	У эксперта нет никаких сомнений относительно того, что опасность первой территории пары значительно выше, чем второй

Элементы матрицы попарных сравнений рис. 1 обладают следующими свойствами: при  $i = j$   $w_{ij} = 1$ ;  $w_{ji} = 1/w_{ij}$ .

	1 терр.	2 терр.	...	$m$ терр.
1 терр.	1	$w_{12}$	...	$w_{1m}$
2 терр.	$1/w_{12}$	1	...	$w_{2m}$
...	...	...	...	...
$m$ терр.	$1/w_{1m}$	$1/w_{2m}$	...	1

**Рис. 1 – Матрица попарных сравнений территорий по опасности**

В результате экспертного оценивания получим  $n$  матриц попарных сравнений, которые в общем случае не являются транзитивными.

В качестве весов, полученных в результате экспертного оценивания, принимают компоненты максимального собственного вектора матрицы попарных сравнений  $W$ , для вычисления которых возможно использование двух способов – точного и приближенного.

Точный способ. Пусть  $r$  – максимальный собственный вектор матрицы  $W$ . С целью вычисления его компонент решим уравнение

$$W \cdot r = \lambda \cdot r,$$

где  $\lambda$  – собственное число матрицы  $W$ .

Перепишем в координатной форме:

$$\begin{cases} w_{11} \cdot r_1 + w_{12} \cdot r_2 + \dots + w_{1m} \cdot r_m = \lambda \cdot r_1 \\ w_{21} \cdot r_1 + w_{22} \cdot r_2 + \dots + w_{2m} \cdot r_m = \lambda \cdot r_2 \\ \dots \\ w_{m1} \cdot r_1 + w_{m2} \cdot r_2 + \dots + w_{mm} \cdot r_m = \lambda \cdot r_m \end{cases}.$$

С учетом того, что при  $i = j$   $w_{ij} = 1$ , подставим в виде системы однородных уравнений:

$$\begin{cases} (1-\lambda) \cdot r_1 + w_{12} \cdot r_2 + \dots + w_{1m} \cdot r_m = 0 \\ w_{21} \cdot r_1 + (1-\lambda) \cdot r_2 + \dots + w_{2m} \cdot r_m = 0 \\ \dots \\ w_{m1} \cdot r_1 + w_{m2} \cdot r_2 + \dots + (1-\lambda) \cdot r_m = 0 \end{cases},$$

или, в матричной форме,  $(W - \lambda \cdot E)r = 0$ , где  $E$  – единичная матрица  $m$ -го порядка. Известно, что система однородных линейных уравнений имеет ненулевое решение только в случае, когда определитель соответствующей матрицы равен нулю:

$$\det(W - \lambda \cdot E)r = 0$$

Разложив этот определитель, получим характеристическое уравнение  $m$ -й степени относительно  $\lambda$ . Решение этого уравнения даст  $m$  значений  $\lambda$ . Затем необходимо найти компоненты собственного вектора матрицы  $W$ , соответствующего  $\lambda_{\max}$ , для чего требуется решение системы однородных уравнений  $(W - \lambda_{\max} \cdot E)r = 0$ .

Приближенный способ. Введем вектор  $q^{(k)}$ , компоненты которого характеризуют вес территорий, где  $k$  — номер шага алгоритма:

$$q^{(k)} = W \cdot q^{(k-1)}$$

Тогда нормированный вектор  $\hat{q}^{(k)}$  определяется по формуле

$$\hat{q}^{(k)} = \frac{W}{\lambda^{(k)}} \hat{q}^{(k-1)}$$

где  $\lambda^{(k)}$  – сумма компонент вектора  $W \cdot \hat{q}^{(k-1)}$ .

Если  $W$  – неразложимая матрица, то процедура сходится, так как при  $k \rightarrow \infty$   $\lambda^{(k)} \rightarrow \lambda_{\max}$ , а  $\hat{q}^{(k)} \rightarrow \hat{q}_{\max}^{(k)}$ . Вычисление компонент максимального собственного вектора осуществляют до достижения заданной точности  $\varepsilon$ .

В случае, когда число сравниваемых территорий велико, предлагается использовать двухступенчатую процедуру экспертного оценивания.

На первом этапе территории объединяются по выбранному признаку в группы территорий (регионы), которые сравниваются между собой по выбранному качественному признаку. Для оценивания назначается эксперт-специалист (группа экспертов) по опасности регионов. Итогом работы эксперта (экспертов) на первом этапе оценивания являются относительные веса регионов  $q_{pj}$  ( $j = 1, \dots, g$ ), где  $g$  – число

регионов. На втором этапе специалистами по территориям соответствующих регионов проводятся попарные сравнения территорий внутри регионов. Итогом работы экспертов на втором этапе являются относительные веса территорий  $q_{Tij}$  ( $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, g$ ) внутри регионов. Тогда относительные веса территорий, полученные с помощью двухступенчатой процедуры экспертного оценивания, вычисляются по формуле

$$q_{Tk} = q_{Tij} \cdot q_{pj} \quad (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, m; k = 1, \dots, \sum_{j=1}^m m_j),$$

где  $m_j$  – число территорий в  $j$ -м регионе.

В качестве показателей опасности могут быть использованы абсолютные и относительные показатели. К абсолютным показателям относятся:

- число ЧС ( $N$ ) природного, техногенного и биологосоциального характера в год;
- число пострадавших (погибших) в ЧС (коллективный риск) в год;
- число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности (отражает снижение качества жизни в результате ЧС);
- материальный ущерб  $C_{ЧС}$  от ЧС в год (отражает возможности регионов по ликвидации последствий ЧС и поддержанию качества жизни населения);
- число радиационно-, химически и взрывопожароопасных объектов, гидротехнических сооружений, создающих угрозу затоплению;
- площади  $S_{нф}$  зон, в которых возможно действие поражающих, вредных и опасных факторов ЧС (сейсмоопасных зон с заданным уровнем балльности, зон возможного затопления в случае разрушения гидротехнических сооружений, возможных наводнений в период весеннего половодья, возможного радиоактивного загрязнения в результате радиационных аварий, возможного химического заражения, зон поражения взрывопожароопасных объектов и т.д.);
- численность  $M_{нф}$  населения, проживающего в указанных зонах.

Последние три группы показателей характеризуют потенциальную опасность территорий.

Для выявления опасных регионов больше подходят относительные показатели:

- средний индивидуальный риск  $q$  смерти в год в ЧС природного и техногенного характера;

- сокращение ожидаемой средней продолжительности жизни (ССПЖ) в результате ЧС;
- доля  $\alpha_c$  материального ущерба от ЧС в бюджете соответствующего региона;
- доля  $\alpha_{n\phi s}$ , потенциально опасной территории, на которой возможно действие поражающих, вредных и опасных факторов ЧС, от общей площади региона;
- доля  $\alpha_{n\phi m}$  населения региона, проживающего в зонах возможно действие поражающих, вредных и опасных факторов и т.д.

Выбор конкретного показателя или их совокупности зависит от цели оценки. Например, при оценке безопасности населения следует отдать предпочтение показателю  $\alpha_{n\phi m}$ , а при оценке экологической безопасности –  $\alpha_{n\phi s}$ .

Средний индивидуальный риск смерти в год в ЧС природного и техногенного характера для населения  $j$ -го региона вычисляется по формуле

$$q_j = \frac{n_j}{M_j};$$

где  $n_j$  – число погибших в ЧС на территории  $j$ -го региона,  $M_j$  – население региона. Этот показатель является наиболее важным показателем ущерба жизни и здоровью людей. Более общим показателем, учитывающим не только погибших, но и пострадавших в результате ЧС, является сокращение средней продолжительности жизни (ССПЖ).

Доля материального ущерба от ЧС в бюджете соответствующего региона вычисляется по формуле

$$\alpha_{чсji} = \frac{C_{чсj}}{C_j},$$

где  $C_{чсj}$  и  $C_j$  – материальный ущерб от ЧС и бюджет  $j$ -го региона соответственно.

Доля потенциально опасной территории, на которой возможно действие поражающих, вредных и опасных факторов ЧС, вычисляется по формуле

$$\alpha_{n\phi j} = \frac{S_{n\phi j}}{S_j},$$

где  $S_{n\phi j}$  и  $S_j$  – площадь потенциально опасной территории и общая площадь  $j$ -го региона соответственно.

Доля населения региона, проживающего в зонах возможного действия поражающих, вредных и опасных факторов, вычисляется по формуле

$$\alpha_{n\phi m j} = \frac{M_{n\phi j}}{M_j},$$

где  $M_{n\phi j}$  и  $M_j$  – численность населения, проживающего в зонах действия поражающих, вредных и опасных факторов ЧС, и численность всего населения  $j$ -го региона.

Определение результирующего показателя потенциальной опасности по ряду источников опасности (техногенных и природных) связано со значительными трудностями, так как эти источники имеют различные частотность проявления (причем для техногенных источников частотность зависит от состояния безопасности соответствующих объектов) и последствия. В качестве первых приближений может быть использовано среднее значение показателей по видам опасности либо отношение общей площади зон действия ЧС к площади региона (численности населения, проживающего в зонах возможных ЧС, к населению региона).

Наиболее полную и точную оценку риска от редких ЧС дает математическое ожидание ущерба в год

$$M[C_{\text{ЧС}}] = Q(T)C_{\text{ЧС}},$$

где  $C_{\text{ЧС}}$  – ущерб от ЧС,  $Q(T)$  – вероятность ее реализации в год.

Указанный показатель объединяет показатели ущерба и потенциальной опасности.

**Выводы:** как видим, существующий набор методов оценки риска может с достаточной точностью дать обобщенную оценку опасности территорий по ряду показателей. Для получения более точной оценки необходима разработка более точных и универсальных методов.

## ЛИТЕРАТУРА

1 Абрамов Ю.О., Грінченко Є.М., Кірючкін О.Ю., Коротинський П.А., Миронець С.М., Росоха В.О., Тютюник В.В., Чучковсь-

кий В.М., Шевченко Р.І. Моніторинг надзвичайних ситуацій – Харків: СПДФО Штрассер, 2005. – 530 с.

2 Акимов В.А., Гудыно П.В., Потапов Б.В., Радаев Н.Н. Расчет риска технологических катастроф, инициированных природными явлениями // ВИНТИ. Пробл. безоп. при чрезв. ситуациях. – 2000. – вып. 1. – С. 38 – 48.

3 Акимов В.А., Новиков В.Д., Радаев Н.Н. Природные и техногенные чрезвы чайные ситуации: опасности, угрозы, риски. – М.: «Деловой экспресс», 2001. – 304 с.

4 Акимов В.А., Радаев Н.Н., Сахаров М.В. Определение относительной опасности территории // ВИНТИ. Пробл. безоп. при чрезв. ситуациях. – 2000. – вып. 6. – С. 129 – 141.

