

УДК 504.05:519.816

Б. Х. Санжапов, Н. В. Стулова

МОДЕЛЬ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧЕ АНАЛИЗА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ ОБЪЕКТАМИ ТОПЛИВНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Рассмотрена схема оценки риска загрязнения окружающей среды промышленным предприятием на примере теплоэлектроцентрали. Представлен порядок формализации исходной качественной информации при использовании аппарата теории нечетких множеств. Нечеткий логический вывод производится по методу Мамдани.

К л ю ч е в ы е с л о в а: риск, экологический ущерб, модель принятия решений, нечеткий вывод, экспертная оценка.

The authors consider the estimation scheme of the environmental pollution risk by industrial enterprise in the case with thermal power stations. The procedure of original quality information formalization using the fuzzy sets apparatus theory is represented. The authors come to fuzzy logical conclusion by the Mamdani's method.

K e y w o r d s: risk, environmental damage, decision making model, fuzzy inference, expert evaluation.

В современном мире актуальным становится анализ и прогноз отрицательных, часто катастрофических, изменений качества окружающей среды из-за природных и антропогенных воздействий. При этом существует необходимость как количественной оценки вероятности возникновения явлений, ухудшающих качество окружающей среды, так и количественной оценки возможных ущербов от их проявления.

Для реализации стратегии экологической безопасности развития территорий необходима система взаимосвязанных процедур, позволяющая решать задачи классификации угроз, выявления и оценки рисков.

В законе «Об охране окружающей среды» от 10.01.2002 № 7-ФЗ экологический риск понимается как вероятность наступления события, имеющего неблагоприятные последствия для природной среды и вызванного негативным воздействием хозяйственной и иной деятельности, чрезвычайными ситуациями природного и техногенного характера.

Степень риска рассчитывается как средневзвешенное значение, посредством суммирования величин ущерба в стоимостном выражении, умноженных на вероятность их получения. То есть степень риска зависит от используемого закона распределения ущерба и представляет собой величину математического ожидания ущерба:

$$R = \sum_{i=0}^n P_i X_i, \quad (1)$$

где P_i — вероятность наступления события, которое повлечет за собой ущерб; X_i — величина ущерба в стоимостном выражении; R — количественная мера риска, выражаемая в тех же показателях, что и ущерб; n — число возможных вариантов ущербов, которые могут проявляться при наступлении неблагоприятного события.

Таким образом, для нахождения размера риска согласно (1) нужно иметь информацию, отражающую соответствие значений P_i и X_i , $i = 1, 2, \dots, n$. Такая информация и определяет закон распределения вероятностей в пространстве ущербов.

Если предположить непрерывную зависимость вероятности P_i от значений ущерба x , получаем $P_i = P(x)$, а формула (1) будет представлена в интегральном виде:

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} xP(x)dx. \quad (2)$$

Если ущерб наступает вследствие различных неблагоприятных событий, которые не зависят друг от друга, то формула риска приобретает следующий вид [1]:

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij} X_i, \quad (3)$$

где P_{ij} — вероятность получения ущерба X_i при наступлении события j -го типа; n — число возможных вариантов ущербов, которые могут проявляться при наступлении события i -го типа; m — общее число возможных негативных событий.

Вероятность получения ущерба из (3) можно определить как условную вероятность по формуле:

$$P_{ij} = P_j P_i(j), \quad (4)$$

где P_j — вероятность наступления неблагоприятного события j -го типа; $P_i(j)$ — вероятность получения ущерба X_i при наступлении события j -го типа.

При условии, что ущербы от различных событий измеряются в стоимостном выражении и с учетом (4) для определения величины риска вместо (1) можно использовать следующее выражение:

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_j P_i(j) X_i. \quad (5)$$

В выражении (5) P_j отражает закон распределения вероятностей проявления неблагоприятных событий, а $P_i(j)$ — законы распределения ущербов при наступлении каждого из таких событий.

В формуле риска также необходимо увязать вероятность ущерба $P_i(j)$ с произведенными затратами на его уменьшение (предотвращение). В таком случае (5) будет иметь следующий вид:

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_j P_i(j, z_j) X_i, \quad (6)$$

где $P_i(j, z_j)$ — условная вероятность возникновения ущерба X_i при наступлении неблагоприятного события j -го типа и осуществления защитных мероприятий от него с затратами z_j .

Сложная система нелинейных связей, определяющих взаимовлияние различных угроз и отсутствие необходимой информации для получения ста-

тистических оценок, значительно осложняют задачу оценки экологических рисков. Вероятностные или экспертные методы оценки показателей или процессов либо элиминируют неопределенность из модели оценки, что неправомерно, так как неопределенность является неотъемлемой характеристикой любого прогноза, либо неспособны формально описать и учесть все возможное разнообразие видов неопределенности [2].

При оценке величин элементов риска степень риска можно рассматривать как в количественных, так и качественных переменных. Использование аппарата нечетких множеств позволит включать в анализ качественные переменные, использовать стандартные правила преобразования нечетких данных в четкие и алгоритмы нечеткого вывода.

Рассмотрим пример функционирования топливно-энергетического комплекса, который является одним из основных источников загрязнения окружающей природной среды. Определим потенциальные угрозы экологической безопасности от деятельности ТЭЦ и опишем их следующими лингвистическими переменными: эмиссия соединений углерода, серы и азота (CO_x , NO_x , SO_x) T_1 ; эмиссия в воздушную среду соединений свинца, цинка, никеля, меди и кадмия (Pb, Zn, Ni, Cu, Cd) в виде аэрозолей T_2 ; эмиссия взвешенных веществ: частиц недогоревшей угольной пыли, золы, сажи T_3 ; выбросы в атмосферу водяного пара T_4 ; загрязнение поверхностного слоя почвы свинцом, цинком, никелем, медью и кадмием (Pb, Zn, Ni, Cu, Cd) и их соединениями T_5 ; сброс промышленных стоков, содержащих тяжелые металлы (Pb, Zn, Ni, Cu, Cd), мазут, его компоненты и продукты его потребления и разложения T_6 .

Характеристика загрязнения воздуха в санитарно-защитной зоне¹ теплоэлектроцентралей представлена в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

*Характеристика загрязнения воздуха
в санитарно-защитной зоне теплоэлектроцентралей*

Загрязняющее вещество	Среднее значение показателя в месяц, мг/м ³	ПДК, мг/м ³	
		Максимальная разовая	Среднесуточная
Оксид углерода	1,684	5	3
Оксид азота	0,007	0,6	0,06
Диоксид азота	0,063	0,085	0,04
Сернистый ангидрид	0,034	0,5	0,05
Свинец	0,009	0,001	0,0003
Цинк оксид (в пересчете на цинк)	0,11	—	0,05
Никель	0,0002	—	0,001
Медь оксид (в пересчете на медь)	0,001	—	0,002

¹ ГН 2.1.6.695-98 Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.gosthelp.ru/text/GN21669598Predelnodopusti.html>

Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) тяжелых металлов в почвах с различными физико-химическими свойствами [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.gidrogel.ru/ecol/hv_met.htm

Окончание табл. 1

Загрязняющее вещество	Среднее значение показателя в месяц, мг/м ³	ПДК, мг/м ³	
		Максимальная разовая	Среднесуточная
Кадмий оксид (в пересчете на кадмий)	0,0002	—	0,0003
Взвешенные вещества (пыль)	0,29	0,5	0,15

Из табл. 1 видно, что превышения максимально-разовой ПДК отсутствуют, но наблюдается превышение среднесуточной ПДК по диоксиду азота, свинцу, цинку и взвешенным веществам.

Характеристика загрязнения почвы в санитарно-защитной зоне теплоэлектроцентралей представлена в табл. 2.

Таблица 2

*Характеристика загрязнения почвы
в санитарно-защитной зоне теплоэлектроцентралей*

Загрязняющее вещество	Среднее значение показателя в месяц, мг/м ³	ОДК, мг/м ³
Свинец	27,26	32,0
Цинк	19,17	55,0
Никель	17,0	20,0
Медь	2,99	33,0
Кадмий	0,4	0,5

Из табл. 2 видно, что в санитарно-защитной зоне теплоэлектроцентралей отсутствует превышение ОДК тяжелых металлов.

Каждая угроза экологической безопасности от деятельности ТЭЦ описывается двумя параметрами: вероятность реализации (P) и величина ущерба (X), и оценивается по шкале от 0 до 1. Соответственно, для качественных переменных $T_1, \dots, T_6$ терм-множество $P = \{\text{Низкая, Средняя, Высокая}\}$, терм-множество $X = \{\text{Низкая, Умеренная, Высокая, Очень высокая}\}$. Интегральная оценка ожидаемого ущерба (риска) описывается лингвистической переменной R с термами: «Незначительный», «Умеренный», «Высокий», «Очень высокий».

Нечеткий логический вывод для оценки экологических рисков включает в себя следующие основные этапы. При заполнении базы правил выполняется формализация эмпирических данных о предмете исследования в виде нечетких продукционных правил. На этапе фаззификации для всех входных переменных строятся соответствующие функции принадлежности. Затем, после фаззификации находится степень истинности условий по каждому из правил и определяется степень истинности каждого из подзаключений. Полученные функции принадлежности объединяются по всем правилам, и выполняется дефаззификация: находится количественное значение для выходной переменной.

Для построения функций принадлежности каждый эксперт заполняет анкету, в которой указывает свое мнение о наличии у элементов u_i ($i = \overline{1, n}$) свойств нечеткого множества l_j ($j = \overline{1, m}$). В результате анкетирования степень принадлежности нечеткому множеству l_j рассчитывается следующим образом [3]:

$$\mu_{l_j}(u_i) = \frac{1}{K} \sum_{k=\overline{1, K}} b_{i,j}^k, \quad i = \overline{1, n}. \quad (7)$$

где K — количество экспертов; $b_{i,j}^k$ — мнение k -го эксперта о наличии у элемента u_i свойств нечеткого множества l_j , $k = \overline{1, K}$.

Экспертные оценки бинарные, т. е. $b_{i,j}^k \in \{0, 1\}$, где 1 указывает на наличие у элемента u_i свойств нечеткого множества l_j , а 0 — на их отсутствие.

Для предприятий топливно-энергетического комплекса целесообразно применение нечеткого логического вывода по алгоритму Мамдани, так как данный логический вывод осуществляется по нечеткой базе знаний, в которой все значения входных и выходных переменных заданы нечеткими множествами. Посредством дефаззификации определяется четкое значение выходной переменной. Нечеткой базой знаний называется совокупность нечетких правил <Если-то>, задающих взаимосвязь между входами и выходами исследуемого объекта.

Нечеткая база знаний алгоритма Мамдани записывается в виде следующих продукционных правил [4]:

ЕСЛИ $(x_1 = \tilde{a}_{1,j1})$ И $(x_2 = \tilde{a}_{2,j1})$ И...И $(x_n = \tilde{a}_{n,j1})$ с весом w_{j1} ,
 ИЛИ $(x_1 = \tilde{a}_{1,j2})$ И $(x_2 = \tilde{a}_{2,j2})$ И...И $(x_n = \tilde{a}_{n,j2})$ с весом w_{j2} ,
 ...
 ИЛИ $(x_1 = \tilde{a}_{1,kj})$ И $(x_2 = \tilde{a}_{2,kj})$ И...И $(x_n = \tilde{a}_{n,kj})$ с весом w_{kj} ,
 ТО $y = \tilde{d}_j$,

где x_i — численные значения входных переменных, $i = \overline{1, n}$; $\tilde{a}_{ijp}$ — значения нечеткого термина в строке p из соответствующего терм-множества ($p = \overline{1, k_j}$); $\tilde{d}_j$ — заключение j -го правила, $j = \overline{1, m}$; w_{jl} — вес предпосылки в правиле j , $l = \overline{1, k_j}$, принимающий значение из отрезка $[0, 1]$; k_j — количество предпосылок в правиле с номером j ; m — количество термов-значений выходной переменной y .

Экспертные знания в области оценки риска деятельности ТЭЦ можно формализовать в виде системы нечетких продукционных правил. Например:

ЕСЛИ [Вероятность реализации угрозы — Низкая] И [Величина ущерба — Низкая] ТО [Риск — Незначительный];

ЕСЛИ [Вероятность реализации угрозы — Средняя] И [Величина ущерба — Умеренная] ТО [Риск — Умеренный] и т. д.

Функцию принадлежности входа $x_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i]$ нечеткому терму $\tilde{a}_{ij}$ обозначим $\mu_j(x_i)$, тогда нечеткое множество будет выглядеть как $\tilde{a}_{ij} = \int_{x_i \in [\underline{x}_i, \overline{x}_i]} \mu_j \frac{(x_i)}{x_i}$;
 функцию принадлежности выхода $y \in [\underline{y}, \overline{y}]$ нечеткому терму $\tilde{d}_j$ обозначим $\mu_{d_i}(y)$, и нечеткое множество будет выглядеть как $\tilde{d}_j = \int_{y_i \in [\underline{y}, \overline{y}]} \mu_j \frac{(y)}{y}$.

Степень истинности условий для каждого правила системы нечеткого вывода определяется как минимальное значение каждого из подусловий, входящих в это правило. В результате применения правил получим набор нечетких множеств, объединив которые определим функции принадлежности выходных переменных. Вычислим дефаззификацию методом центра тяжести. Реализация системы нечеткого вывода осуществляется средствами пакета Fuzzy Logic Toolbox вычислительной среды MATLAB.

Так, в качестве входных переменных для оценки угрозы увеличения эмиссии оксида углерода (CO) рассматриваются терм-множество P (вероятность возникновения ущерба) = {Низкая, Средняя, Высокая}, терм-множество X (величина ущерба) = {Низкая, Умеренная, Высокая, Очень высокая}. Для построения функций принадлежности воспользуемся оценками экспертов. В табл. 3 представлен результат опроса экспертов относительно вероятности увеличения эмиссии оксида углерода (CO).

Таблица 3

Результаты опроса экспертов относительно вероятности увеличения эмиссии оксида углерода (CO)

Эксперты	Терм	Вероятность реализации угрозы			
		[0; 0,25)	[0,25; 0,5)	[0,5; 0,75)	[0,75; 1]
1	Низкая	1	0	0	0
	Средняя	0	1	0	0
	Высокая	0	0	1	1
2	Низкая	1	1	0	0
	Средняя	0	1	1	0
	Высокая	0	0	0	1
3	Низкая	1	0	0	0
	Средняя	1	1	0	0
	Высокая	0	1	1	1
4	Низкая	1	0	0	0
	Средняя	0	1	1	0
	Высокая				

Результаты обработки мнений экспертов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты обработки мнений экспертов относительно вероятности увеличения эмиссии оксида углерода (CO)

Терм	Вероятность реализации угрозы			
	[0; 0,25)	[0,25; 0,5)	[0,5; 0,75)	[0,75; 1]
Низкая	4	1	0	0
	1	0,25	0	0
Средняя	1	4	2	0
	0,25	1	0,5	0
Высокая	0	1	3	4
	0	0,25	0,75	1

Для терм-множества X (величина ущерба) результаты обработки мнений экспертов представлены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Результаты обработки мнений экспертов относительно величины ущерба от увеличения эмиссии оксида углерода (CO)

Терм	Величина ущерба, тыс. р.			
	[0, 100)	[100, 1000)	[1000, 10000)	[10000, 20000)
Низкая	4	2	0	0
	1	0,5	0	0
Умеренная	2	4	0	0
	0,5	1	0	0
Высокая	0	1	4	1
	0	0,25	1	0,25
Очень высокая	0	0	2	4
	0	0	0,5	1

На основании полученных данных в вычислительной среде MATLAB строим функции принадлежности, вводим нечеткие продукционные правила.

Степень принадлежности измеренного вектора значений $X^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_n^*)$ значениям y_i рассчитывается следующим образом:

$$\mu_j(X^*) = w_j(\mu_j(x_1^*)\chi_j\mu_j(x_2^*)\chi_j, \dots, \chi_j\mu_j(x_n^*)), \quad j = \overline{1, m}, \quad (8)$$

где w_j — весовой коэффициент j -го правила из отрезка $[0, 1]$; χ_j — t -норма, если в j -м правиле базы знаний используется логическая операция И, и соответствует s -норме, при ИЛИ. В качестве t -нормы используем пересечение по Заде $T(a, b) = \min(a, b)$, $a, b \in [0, 1]$, в качестве s -нормы используем объединение по Заде $S(a, b) = \max(a, b)$, $a, b \in [0, 1]$.

В результате вычислений получается нечеткое множество:

$$\tilde{y}^* = \left(\frac{\mu_1(X^*)}{d_1}, \frac{\mu_2(X^*)}{d_2}, \dots, \frac{\mu_n(X^*)}{d_n} \right). \quad (9)$$

Для принятия решения об экологическом риске необходимо рассчитать четкое значение выхода y (дефаззификация), соответствующее входному вектору X^* :

$$y = \frac{\sum_{j=1}^m \mu_{y_j}(x^*) y_j}{\sum_{j=1}^m \mu_{y_j}(x^*)}. \quad (10)$$

Вычислив дефаззификацию нечеткого множества $\tilde{y}$ методом центра тяжести, получаем количественное значение интегрального показателя риска.

В рассматриваемом примере, на основании данных табл. 4 в вычислительной среде MATLAB, пользуясь пакетом Fuzzy Logic Toolbox, строим функции принадлежности для вероятности возникновения ущерба $(P) = \{\text{Низкая}, \text{Средняя}, \text{Высокая}\}$ (рис. 1).



Рис. 1. Функции принадлежности для переменной вероятности возникновения ущерба

На основании данных табл. 5 в вычислительной среде MATLAB, пользуясь пакетом Fuzzy Logic Toolbox, строим функции принадлежности для величины ущерба (X) = {Низкая, Умеренная, Высокая, Очень высокая} (рис. 2).

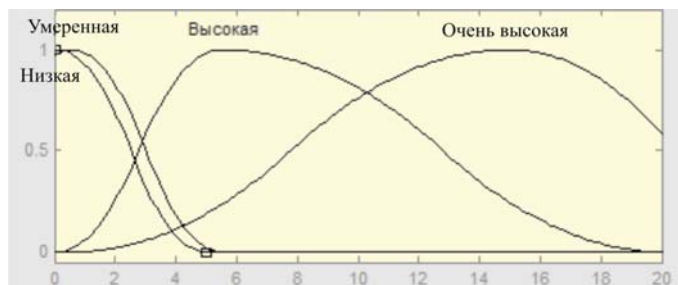


Рис. 2. Функции принадлежности для переменной величины ущерба

Экспертами заданы следующие значения входных переменных: вероятность реализации угрозы равна 0,2; величина ущерба составляет 100 тыс. р. Для данных значений вероятности реализации угрозы и величины ущерба работают следующие правила:

ЕСЛИ [Вероятность реализации угрозы — Низкая] И [Величина ущерба — Низкая] ТО [Риск — Незначительный];

ЕСЛИ [Вероятность реализации угрозы — Средняя] И [Величина ущерба — Умеренная] ТО [Риск — Умеренный].

Результат логического вывода по продукционным правилам находится агрегированием нечетких множеств, которое рассматривается как объединение нечетких множеств, полученных в результате нечеткого вывода (рис. 3).

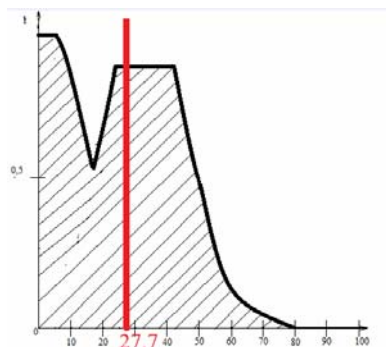


Рис. 3. Результирующее нечеткое множество и результат дефазификации по методу центра тяжести

Так, если вероятность возникновения угрозы увеличения эмиссии оксида углерода (CO) равна 0,2, а ущерб от реализации события составит 100 тыс. р., то ожидаемый ущерб (риск), в результате расчета в вычислительной среде MATLAB пакете Fuzzy Logic Toolbox, составит 27,7 тыс. р.

Величина приемлемого риска ограничена экспертами значением 45 тыс. р. Таким образом, величина риска, равная 27,7 тыс. р., попадает в категорию умеренного риска и является приемлемой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тихомиров Н. П., Потравный И. М., Тихомирова Т. М. Методы анализа и управления эколого-экономическими рисками. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 350 с.
2. Санжапов Б. Х., Копылов А. В., Копылов Д. А. Классификация методов оценки инновационного потенциала предприятия // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строит. информатика. 2012. Вып. 7(21). Режим доступа: www.vestnik.vgasu.ru.
3. Штовба С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. URL: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>. (дата обращения: 28.04.2014).
4. Санжапов Б. Х., Мурадов А. А., Санжапов Р. Б. Оценка экологической безопасности автотранспортной системы города // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политематическая. 2013. Вып. 2(27). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/SanzhapovMuradovSanzhapov-2013_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/SanzhapovMuradovSanzhapov-2013_2(27).pdf).
1. Tikhomirov N. P., Potravnyi I. M., Tikhomirova T. M. Metody analiza i upravleniya ekologo-ekonomicheskimi riskami. M.: YuNITI-DANA, 2003. 350 s.
2. Sanzhapov B. Kh., Kopylov A. V., Kopylov D. A. Klassifikatsiya metodov otsenki innovatsionnogo potentsiala predpriyatiya // Internet-Vestnik VolgGASU. 2012. Vyp. 7(21). Rezhim dostupa: www.vestnik.vgasu.ru.
3. Shtovba S. D. Vvedenie v teoriyu nechetkikh mnozhestv i nechetkuyu logiku. URL: <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php>. (data obrashcheniya: 28.04.2014).
4. Sanzhapov B. Kh., Muradov A. A., Sanzhapov R. B. Otsenka ekologicheskoi bezopasnosti avtotransportnoi sistemy goroda // Internet-Vestnik VolgGASU. 2013. Vyp. 2(27). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/SanzhapovMuradovSanzhapov-2013_2\(27\).pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/SanzhapovMuradovSanzhapov-2013_2(27).pdf).

© Санжапов Б. Х., Стулова Н. В., 2014

Поступила в редакцию
в мае 2014 г.

Ссылка для цитирования:

Санжапов Б. Х., Стулова Н. В. Модель поддержки принятия решений в задаче анализа экологического риска загрязнения городской среды объектами топливно-энергетического комплекса // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строительная информатика. 2014. Вып. 11(32). Ст. 1. Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>

For citation:

Sanzhapov B. Kh., Stulova N. V. [The decision support model in the analysis of environmental risk of urban pollution by fuel and energy complex objects]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2014, no. 11(32), paper 1. (In Russ.). Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>