

УДК [504:005]:519.816

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ И УПРАВЛЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТЬЮ ПРЕДПРИЯТИЯ

М. Б. Гузаиров¹, М. А. Николаева², А. И. Агадуллина³

¹guzairovmb@mail.ru, ²marina_danicheva@mail.ru, ³aygul.agadullina@gmail.com,

ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

Поступила в редакцию 12.03.2014

Аннотация. Рассматривается экологический риск-ориентированный аудит как инструмент оценки и управления экологической эффективностью предприятия. В статье описано математическое обеспечение поддержки принятия решений для различных этапов проведения аудита, которое включает алгоритмы качественной и количественной оценки уровня экологической эффективности предприятия, метод оценки значимости экологических аспектов, метод оценки вероятности возникновения неблагоприятного события с помощью байесовской иерархической модели и логико-вероятностного метода, стохастическую модель и метод многокритериальной оценки для формирования набора контрмер, расчет капитала для покрытия катастрофических рисков.

Ключевые слова: экологическая эффективность предприятий; экологический риск-ориентированный аудит; алгоритм оценки уровня экологической эффективности; метод NAI/АДЕ; иерархическая байесовская модель; многокритериальные методы.

ВВЕДЕНИЕ

Современные промышленные предприятия являются объектами повышенной экологической опасности для человека и окружающей среды (ОС). Негативные воздействия связаны как со штатным функционированием предприятий, так и с возникновением чрезвычайных ситуаций и аварий на производствах, сопровождаемых сбросами загрязняющих веществ в ОС.

Согласно статистическим данным служб мониторинга природной среды Росгидромета, в 2012 г. зафиксировано 28 случаев аварийного и 2628 случаев экстремально высокого и высокого загрязнения водных объектов, 4 случая аварийного и 37 случаев экстремально высокого и высокого загрязнения атмосферного воздуха.

Обеспечение экологической безопасности на предприятии осуществляется с помощью системы экологического менеджмента (СЭМ).

СЭМ – это системный комплексный подход к управлению природоохранной деятельностью предприятия, включающий в том числе контроль и сокращение негативных воздействий на ОС, анализ и управление эколого-экономическими рисками с целью предотвращения развития аварийных ситуаций.

Одним из основных показателей результативности функционирования СЭМ является оценка экологической эффективности (ЭЭ) предприятия, процесс проведения которой регулируется стандартом ГОСТ Р ИСО 14031:2001 «Управление ОС. Оценивание эффективности. Общие требования».

Согласно данному стандарту, процесс оценки ЭЭ связан с принятием управленческих решений, относящихся к экологической эффективности, с методом выбора показателей, сбора и анализа данных, оценки информации по критериям экологической эффективности, составлением отчетности и распространением информации, периодическим пересмотром и улучшением этого процесса [1].

Среди рассмотренных в литературе подходов к оценке ЭЭ предприятия можно выделить следующие:

- в работах Б. В. Боравского, П. А. Короткова, Н. П. Коротковой, В. В. Жукова интегральный показатель ЭЭ оценивается с помощью модели «воздействие – состояние – отклик» [2, 3];
- в работах Е. В. Берстень, Т. А. Егоровой уровень ЭЭ также оценивается интегральным показателем, включающим групповые и индивидуальные показатели. Групповой показатель

рассчитывается как средневзвешенное геометрическое произведение значений индивидуальных показателей с учетом их значимости. Групповые показатели включают показатели технологической, экономической, организационной и экологической эффективности [4].

Анализ изученных подходов показал:

- многообразие методик оценки ЭЭ предприятия, как правило, содержащих прямые методы подсчета интегрального показателя;
- отсутствие элементов риск-анализа при оценке и принятии решений по повышению уровня ЭЭ;
- применение в некоторых методиках экологического аудита как инструмента оценки показателей ЭЭ.

Авторами статьи для оценки и управления показателями ЭЭ предприятия разработан прототип системы поддержки принятия решений. Новизна предлагаемого подхода, реализованного в нем, заключается в том, что в качестве инструмента оценки и управления уровнем ЭЭ предприятий рассматривается экологический аудит, основанный на технологии риск-анализа.

Содержание данной статьи связано с описанием основных этапов внешнего и внутреннего аудита, включающих процедуры анализа и управления эколого-экономическими рисками.

Предлагаемая методика экологического аудита включает в себя следующие этапы, задачи и методы (табл.).

Таблица

Этапы экологического аудита на основе риск-ориентированного подхода	Математические методы для этапов экологического аудита
<p>Этап планирования аудита связан</p> <ul style="list-style-type: none"> • с определением целей, структуры проведения аудита, объектов и субъектов, методов проведения; • с разработкой критериев аудита. 	
<p>Этап проведения экоаудита</p> <ul style="list-style-type: none"> • с проверкой на соответствие стандартам, с оценкой экологических показателей деятельности предприятия; • с качественной оценкой уровня ЭЭ предприятия; • с идентификацией и оценкой значимости экологических аспектов (ЭА); • с оценкой риска ЭА: <ul style="list-style-type: none"> • оценивается вероятность превышения нормативных показателей ЭА; • определяется размер возможного ущерба от превышения воздействия ЭА на ОС; • с определением наиболее вероятного источника загрязнения; • с количественной оценкой уровня ЭЭ предприятия. 	<ul style="list-style-type: none"> • шкалирование, скоринг; • ROC- анализ; • метод многокритериальной оценки NAIADE; • логико-вероятностный метод; • байесовская иерархическая модель; • байесовские сети доверия; • логико-вероятностный метод.
<p>Этап аудиторского отчета и заключения связан:</p> <ul style="list-style-type: none"> • с выводами о степени соответствия предприятия стандартам и требованиям природоохранного законодательства; • с выводами о качественной и количественной оценке уровня ЭЭ предприятия и способах повышения уровня ЭЭ; • с разработкой рекомендаций по снижению негативного воздействия на ОС: <ul style="list-style-type: none"> • разработкой модели страхования с учетом показателей риска ЭЭ; • формированием набора превентивных контрмер; • выбором инвестиционного проекта для повышения уровня ЭЭ; • расчетом капитала, необходимого для покрытия катастрофических убытков. 	<ul style="list-style-type: none"> • методика определения рисков составляющей брутто-премии; • модель стохастического программирования; • метод многокритериальной оценки; • вершина сверх порога.

Далее подробнее рассмотрим этапы экологического аудита и задачи, возникающие на каждом этапе.

ЭТАП 1. ПЛАНИРОВАНИЕ АУДИТА

На данном этапе определяются цели и методы проведения экологического аудита, устанавливаются целевые экологические показатели, разрабатываются критерии проведения аудита.

При внутреннем аудите цели, объекты и методы проведения определяются специалистами предприятия, ответственными за организацию СЭМ, при внешнем аудите – совместно со сторонними организациями, проводящими экологический аудит.

Основой для разработки критериев аудита являются нормы и правила, регулирующие воздействие различных ЭА деятельности предприятия на ОС, и показатели, по которым оцениваются степень соответствия состояния ОС природоохранным нормативам.

ЭТАП 2. ПРОВЕДЕНИЕ АУДИТА

Задача качественной оценки уровня ЭЭ

Задача предложена для классификации предприятий по уровню ЭЭ в качестве инструмента сравнительного анализа для аудиторской компании при проведении внешнего экологического аудита.

Алгоритм:

Шаг 1. Проверка предприятия на соответствие требованиям природоохранного законодательства.

Интегральная оценка выполнения требований предприятием рассчитывается как

$$G = v_1 * \kappa_1 + \dots + v_z * \kappa_z,$$

где z – число требований; v_z – значимости требований; κ_z – степень выполнения требований предприятием.

Шаг 2. Классификация предприятия по уровню ЭЭ.

С помощью модифицированного метода ROC-анализа осуществляется классификация уровня ЭЭ предприятий по трем классам [5].

Шаг 2.1. Выбор критериев разделения предприятий на классы.

В качестве критерия принадлежности к классу предлагается использовать количество превышений предельно-допустимых концентраций (ПДК) или предельно-допустимых сбросов (ПДС) аспектов предприятия.

Шаг 2.2. Формирование гипотезы принадлежности предприятия к определенному классу.

Шаг 2.3. Проверка гипотезы и определение пороговых значений для классификации по уровню ЭЭ.

Проверяется гипотеза принадлежности к классу для всех пороговых значений из интервала $h_j \in [h_{\min}, h_{\max}]$, где h_j – пороговые значения, множество значений G_i (количество баллов, набранных i -м предприятием) для выборки из N предприятий, j – номер порогового значения, $h_{\min} = \min_{i=1, N} G_i$, $h_{\max} = \max_{i=1, N} G_i$.

Рассчитывается количество истинноположительных a_j , ложноположительных b_j , ложноотрицательных c_j , истинноотрицательных d_j прогнозов при классификации предприятий.

Определяется пороговое значение, при котором ошибка отнесения к классу по уровню ЭЭ будет минимальной:

$$s_l = \{h_j: \min_j (b_j + c_j)\},$$

где s_l – пороговое значение между первым и вторым классами.

Шаг 2.4. Построение ROC-кривой для иллюстрации качества шкалы скоринга и качества классификации.

Для построения ROC-кривой (рис. 1) используются показатели чувствительности и специфичности [5]:

$$\text{Sensitivity}_j = \frac{a_j}{a_j + c_j},$$

$$\text{Specificity}_j = \frac{d_j}{b_j + d_j}.$$

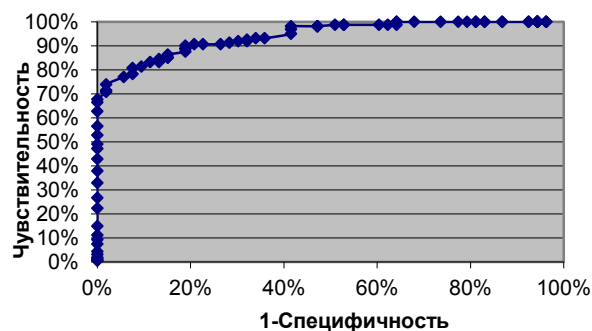


Рис. 1. График ROC-кривой

Чем ближе площадь под ROC-кривой к единице, тем качественнее используемая шкала G для скоринга.

Задача количественной оценки уровня ЭЭ

Задача предложена как инструмент анализа при проведении внешнего и внутреннего экологического аудита на основе риск-ориентированного подхода.

В работе уровень ЭЭ промышленного предприятия характеризуется значением эколого-экономического риска.

Совокупный эколого-экономический риск предприятия (системы) рассматривается как сумма рисков процессов предприятия [5, 6]:

$$R = \sum_{i=1}^n R_i, \quad (1)$$

где R_i – риск i -го процесса, n – количество процессов.

Под риском i -го процесса понимается сумма рисков, связанных с экологическими аспектами (ЭА) данного процесса. Под риском ЭА понимается математическое ожидание ущерба от превышения нормативного показателя воздействия ЭА на ОС.

Если ЭА процессов несовместны, то:

$$R_i = \sum_{j=1}^{L_i} r_{ij}, \quad (2)$$

где r_{ij} – риск j -го ЭА i -го процесса, $j = \overline{1, L_i}$; L_i – количество ЭА i -го процесса.

Риск ЭА рассчитывается по формуле:

$$r_{ij} = p_{ij} * u_{ij}, \quad (3)$$

где p_{ij} – оценка вероятности превышения нормативного показателя для j -го ЭА i -го процесса; u_{ij} – оценка ущерба от превышения нормативного показателя воздействия j -го ЭА i -го процесса.

При одновременном воздействии на ОС нескольких загрязняющих веществ, необходимо учитывать возможность проявления синергетического эффекта. В этом случае вероятность превышения нормативного показателя для двух совместных ЭА можно рассчитать по следующей формуле:

$$P_{ij} = P_{i1} + P_{i2} - P_{i1} * P_{i2}. \quad (4)$$

Алгоритм:

Шаг 1. Идентификация и оценка значимости ЭА.

В соответствии с требованиями стандарта ISO 14001-2005 об идентификации и определении наиболее важных ЭА, перед предприятием возникает задача оценки степени значимости ЭА и построения рейтинга ЭА.

Входные данные:

L_i – число ЭА i -го процесса, оказывающих негативное влияние на ОС,

K – количество критериев для сравнения ЭА.

Выходные данные: рейтинг ЭА по степени значимости.

Рассматривается многокритериальная задача оценки степени значимости ЭА с помощью метода NAIADE, которая включает следующие процедуры [7, 8]:

1) Определение для каждого критерия ЭА:

- порогового значения (фиксированного значения, определяющего условия, при которых один ЭА превосходит другой);

- типа переменной (четкий количественный, нечеткий количественный, лингвистический);

- цели (максимизация – большие значения критерия лучше меньших, минимизация – меньшие значения лучше больших);

2) Вычисление семантического расстояния (разницы между значениями альтернатив);

3) Расчет индексов интенсивности предпочтений (степени предпочтения одного ЭА над другим по каждому критерию):

$$\mu_{>|<}(\delta) = \begin{cases} 0, & \text{если } \delta \leq 0, \\ \frac{1}{1 + \frac{t_j^2}{\delta^2}}, & \text{если } \delta > 0, \end{cases}$$

где $\mu_j^i(\delta) = \mu_j^i(A, B) = \mu_j^i(S_\delta(A_i, B_i))$ – индекс отношения предпочтения для j -го отношения предпочтения между аспектами A и B по i -му критерию; δ – семантическое расстояние между аспектами A и B ; t_j – пороговое значение для j -го отношения предпочтения;

4) Расчет совокупного отношения предпочтения (степени предпочтения одного ЭА над другим по всем критериям):

$$\mu_j(A, B) = \frac{\sum_{i=1}^n \max\{\mu_j^i(A, B) - \alpha, 0\}}{\sum_{i=1}^n |\mu_j^i(A, B) - \alpha|},$$

где α – мера консервативности, которая говорит о том, что рассматриваются только те отношения предпочтения, индекс которых больше, чем α ; n – количество критериев;

5) Расчет энтропии:

$$H_j(A, B) = -\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \mu_{j,H}^i(A, B) \log_2 \mu_{j,H}^i(A, B) + (1 - \mu_{j,H}^i(A, B)) \log_2 (1 - \mu_{j,H}^i(A, B)),$$

где

$$\mu_{j,H}(A, B) = \begin{cases} 0, & \text{если } \mu_j(A, B) - \alpha \leq 0, \\ \mu_j(A, B), & \text{в остальных случаях;} \end{cases}$$

$\mu_j^i(A, B)$ – индекс интенсивности предпочтений i -го критерия;

б) Расчет положительного и отрицательного потоков (определение итогового ранжирования ЭА):

$$\Phi^+(A) = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \min\{\mu_{\geq}(A, i), C_{\geq}(A, i)\} + \min\{\mu_{>}(A, i), C_{>}(A, i)\}}{\sum_{i=1}^{N-1} C_{\geq}(A, i) + C_{>}(A, i)},$$

$$\Phi^-(A) = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} \min\{\mu_{\leq}(A, i), C_{\leq}(A, i)\} + \min\{\mu_{<}(A, i), C_{<}(A, i)\}}{\sum_{i=1}^{N-1} C_{\leq}(A, i) + C_{<}(A, i)},$$

где $C_{\geq}(A, i) = 1 - H_{\geq}(A, i)$.

При оценке степени значимости ЭА предлагается использовать, например, следующие критерии: масштаб экологического воздействия, продолжительность воздействия, серьезность последствий для ОС, соответствие требованиям законодательства в области охраны ОС, соответствие требованиям заинтересованных сторон в области охраны ОС и т. д.

Порог значимости для ЭА определяют аудиторы совместно со специалистами предприятия, ответственными за организацию СЭМ.

Шаг 2. Оценка рисков наиболее значимых ЭА.

После оценки степени значимости ЭА становится понятно, какие аспекты требуют дальнейшего анализа с точки зрения уточнения вероятности их реализации и размера ущерба.

Для анализа значимых ЭА предлагается провести опрос специалистов предприятия. Выявляются причины и источники возникновения превышения нормативных значений аспектов, а также последствия или неблагоприятные события, к которым они могут привести.

Входные данные: V_i – число значимых ЭА i -го процесса, оказывающих негативное воздействие на ОС.

Выходные данные:

- Z_j – тип воздействия j -го ЭА на ОС, $j = \overline{1, V_i}$;

- инициирующие события, которые приводят к превышению нормативных показателей ЭА.

Шаг 2.1. Оценка вероятности превышения нормативных значений ЭА с помощью логико-вероятностного метода [5, 6].

На основе данных, полученных в результате скоринга, строятся сценарии, отражающие причинно-следственные связи между превышениями нормативного показателя ЭА, источниками и инициирующими событиями (рис. 2).

Входные данные:

Для j -го ЭА:

- q_m – вероятности инициирующих событий, $m = \overline{1, M}$, M – количество инициирующих событий;
- сценарии превышения нормативного показателя воздействий ЭА.

Выходные данные:

- p_{ij} – вероятности превышения нормативного показателя воздействия j -го ЭА i -го процесса предприятия на ОС.

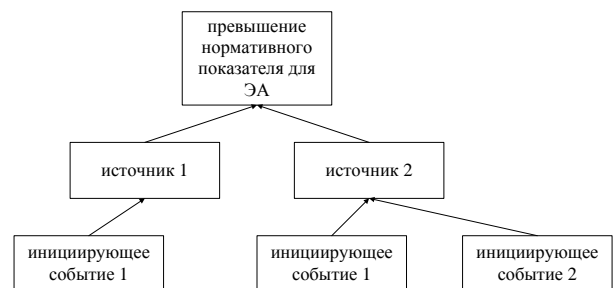


Рис. 2. Пример сценария реализации неблагоприятного события

Оценка вероятности превышения нормативного ЭА рассчитывается с помощью логико-вероятностного метода [5, 6], который включает следующие этапы:

1) построение функции алгебры логики с использованием операций конъюнкции и дизъюнкции на основе сценариев превышения воздействий ЭА;

2) построение вероятностной функции на основе функции алгебры логики;

3) расчет вероятности p_{ij} превышения нормативного показателя воздействия на ОС с помощью вероятностной функции.

Шаг 2.2. Оценка вероятности превышения нормативных значений ЭА на основе байесовской иерархической модели.

Байесовская иерархическая модель позволяет оценить значимость и меру влияния неблагоприятного события (превышения норматива воздействия ЭА) на общий риск предприятия, учитывая полученные оценки параметров апостериорного распределения.

Входные данные:

- данные мониторинга X_{ij}^d , где $d = \overline{1, D}, j = \overline{1, L_i}, i = \overline{1, n}$, D – количество наблюдений; L_i – количество аспектов i -го процесса;
- Y_j – рекомендованный уровень (нормативный показатель) воздействия j -го ЭА на ОС;
- априорная информация для оценивания вероятности θ превышения нормативного значения.

Выходные данные:

- p_{ij} – апостериорные вероятности превышения нормативного значения ЭА;
- T – период возврата (частота возникновения) превышения норматива ЭА.

Алгоритм реализации байесовской иерархической модели включает следующие этапы [9]:

1. Определение количества уровней в байесовской иерархической модели;
2. Сбор априорных сведений о параметре θ и выбор априорного распределения $p(\theta)$;
3. Получение исходных статистических данных X_{ij}^d ;
4. Проверку гипотезы о законе распределения статических данных X_{ij}^d ;
5. Вычисление функции правдоподобия $p(X_{ij}^1, \dots, X_{ij}^D | \theta)$;
6. Вычисление апостериорного распределения $p(\theta | X_{ij}^1, \dots, X_{ij}^D)$ параметра θ ;
7. Оценку вероятности превышения нормативных значений на основе параметров апостериорного распределения.

Для оценки вероятности превышения нормативных значений ЭА предлагается использовать *общую байесовскую иерархическую модель* (с двумя вероятностными уровнями) [9]:

$$p(\theta, a | x) \propto p(x | \theta) p(\theta | a),$$

где $\theta \in \Theta$ (Θ – область возможных значений параметра θ , который определяется видом закона распределения);

- Распределение $p(\theta/a)$ – априорное распределение вероятностей возможных значений θ , при условии, что θ является случайной величиной, которая зависит от гиперпараметров a ;

- Распределение $p(\theta, a/x)$ – апостериорное распределение значений θ при условии, что θ зависит от гиперпараметров a и наблюдались данные x ;

- $p(x/\theta)$ – правдоподобие модели.

Шаг 2.3. Оценка ущерба от превышения воздействия ЭА на ОС.

Оценка ущерба от превышения рассчитывается как сумма ущерба окружающей среде. Общий ожидаемый ущерб EU определяется по формуле

$$EU = \sum_{j=1}^V EU_j,$$

где EU – математическое ожидание общего эколого-экономического ущерба; EU_j – математическое ожидание экологического ущерба по риску j -го ЭА.

В зависимости от вида ЭА предлагается несколько вариантов оценки воздействия на ОС. Превышение нормативных показателей может быть связано с загрязнением атмосферы, водных ресурсов, почвы, биологических (в том числе лесных массивов) ресурсов.

Шаг 3. Оценка совокупного риска, выводы об уровне ЭЭ предприятия.

Оценка совокупного риска рассчитывается согласно формулам (1)–(4).

В зависимости от значения совокупного эколого-экономического риска определяется количественный уровень и способы повышения уровня ЭЭ предприятия. При этом шкала значений совокупного риска выбирается аудитором исходя из региона и отрасли, к которой относится предприятие и т. п.

Задача определения наиболее вероятного источника загрязнения ОС с помощью байесовских сетей доверия (БСД)

При проведении экологического аудита данные экологического мониторинга также используются для определения наиболее вероятного источника загрязнения ОС предприятием.

Входные данные:

- данные мониторинга X_{ij}^d , где $d = \overline{1, D}, j = \overline{1, L_i}, i = \overline{1, n}$, (в контексте данной за-

дачи n – количество источников загрязнения ОС);

- Z_j – тип воздействия j -го ЭА на ОС;
- Y_j – рекомендованный уровень (нормативный показатель) воздействия j -го ЭА на ОС.

Выходные данные:

- наиболее вероятный источник загрязнения ОС на предприятии с помощью БСД.

Алгоритм [10]:

Шаг 1. Построение БСД для определения наиболее вероятного источника загрязнения.

Предлагается следующая схема БСД, состоящая из трех уровней (рис. 3). На первом уровне располагаются источники загрязнения – оборудования или установки. На втором уровне располагаются причины негативного воздействия на ОС – ЭА предприятия. На третьем уровне находится пост наблюдения за негативным воздействием на ОС, который фиксирует наступление неблагоприятного события – загрязнения ОС.

Шаг 2. Оценка априорных вероятностей превышения рекомендованного уровня выбросов ЭА для всех уровней БСД.

На первом уровне оценивается вероятность выброса источником загрязняющих веществ (для каждого источника по всем аспектам). На втором уровне – вероятность превышения рекомендованного уровня выбросов ЭА (по каждому аспекту для каждого источника). На третьем – вероятность наступления неблагоприятного события – загрязнения ОС (по каждому аспекту по всем источникам).

Шаг 3. Определение наиболее вероятного источника негативного воздействия.

Апостериорные вероятности инициирующих событий (источников загрязнения) определяются на основе информации о превышении рекомендованного уровня выбросов одного или нескольких загрязняющих веществ с помощью формулы Байеса [11].

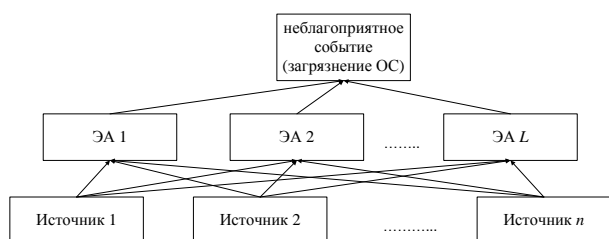


Рис. 3. Сценарий построения БСД

ЭТАП 3. АУДИТОРСКИЙ ОТЧЕТ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

По результатам проведения экологического аудита формируются отчеты, которые включают следующую информацию:

- степень соответствия предприятия стандартам и требованиям природоохранного законодательства;
- рейтинг значимых ЭА;
- выводы о качественной и количественной оценке уровня ЭЭ предприятия;
- разработку рекомендаций по снижению негативного воздействия на ОС.

ЭТАП 4. ВНЕДРЕНИЕ РЕКОМЕНДАЦИЙ

Целью данного этапа является повышение уровня ЭЭ предприятия за счет внедрения рекомендаций на основе результатов проведенного аудита.

Способ управления ЭЭ определяется значением совокупного риска предприятия R или рисков отдельных ЭА r_{ij} . На рис. 4 приведены основные способы управления риском.

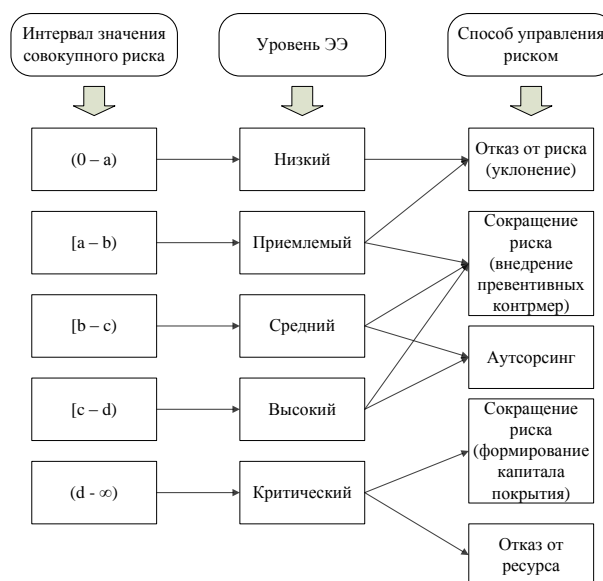


Рис. 4. Уровень ЭЭ предприятия

В статье рассмотрены два способа управления риском: снижение риска за счет внедрений превентивных мероприятий и определение капитала покрытия.

Если в качестве способа повышения уровня ЭЭ выбирается снижение риска, то возникает задача о формировании и выборе такого набора контрмер или мероприятий, которые будут обеспечивать максимальную эффективность.

Оценка потенциального ущерба и расчет капитала связана с возникновением крупных (катастрофических) потерь в результате аварийного загрязнения ОС [12].

Задача формирования оптимального набора контрмер на основе многокритериальной оценки

Для повышения уровня ЭЭ предприятия обычно проводятся мероприятия: технические, организационные, специальные и т. д., которые можно назвать общим термином «контрмеры».

Конкретный набор контрмер можно рассматривать как инвестиционный проект.

Задача выбора оптимального набора контрмер сводится к задаче выбора лучшего инвестиционного проекта. Сами проекты предлагается сравнивать с использованием многокритериальной оценки [5].

Входные данные:

- K – количество контрмер, характеризующихся стоимостью $c_k, k = \overline{1, K}$;
- T – количество критериев для сравнения наборов контрмер;
- M – количество иницирующих событий;
- информация о влиянии контрмеры на значимость ЭА (Δq_{km} – снижение вероятности (в %) m -го иницирующего события в результате внедрения k -й контрмеры);
- β_0 – бюджетное ограничение.

Выходные данные: выбор лучшего проекта или упорядочение проектов.

Алгоритм:

Шаг 1. Формирование инвестиционных проектов I из наборов контрмер K с учетом бюджетного ограничения β_0 .

Шаг 2. Выбор основных критериев T для оценки инвестиционных проектов.

В работе под расходами проекта понимаются расходы на повышение уровня ЭЭ, то есть суммарная стоимость контрмер, входящих в проект, а под доходами – изменение риска ЭА в результате внедрения контрмер, входящих в проект.

Изменение риска вычисляется как разность между базовым эколого-экономическим риском предприятия (1)–(4) (риском до внедрения контрмер) и остаточным риском (оценкой риска, полученной с учетом внедрения контрмер).

Шаг 3. Выбор лучшего инвестиционного проекта на основе многокритериальной оценки.

Шаг 3.1. Ранжирование критериев по степени важности $R_j, j = \overline{1, T}$.

Шаг 3.2. Расчет нормированных значений весовых коэффициентов по каждому критерию \tilde{w}_j :

$$\tilde{w}_j = \frac{1 - \frac{R_j - 1}{T}}{\sum_{t=1}^T (1 - \frac{R_t - 1}{T})}, j = \overline{1, T}.$$

Шаг 3.3. Ранжирование проектов по степени важности, $R_{ji}, i = \overline{1, I}; j = \overline{1, T}$ – ранги проектов по критериям.

Шаг 3.4. Определение нормированных значений весовых коэффициентов каждого проекта по каждому критерию \tilde{Z}_{ji} :

$$\tilde{Z}_{ji} = \frac{1 - \frac{R_{ji} - 1}{I}}{\sum_{n=1}^I (1 - \frac{R_{jn} - 1}{I})}.$$

Шаг 3.5. Расчет обобщенного критерия для каждого проекта Z_i :

$$Z_i = \sum_{j=1}^T \tilde{w}_j * \tilde{Z}_{ji}.$$

Шаг 3.6. Построение рейтинга проектов в соответствии со значениями обобщенных критериев и/или выбор лучшего проекта.

Задача формирования оптимального набора контрмер на основе модели стохастического программирования

Задача формирования оптимального набора контрмер для повышения уровня ЭЭ предприятия может быть также решена с помощью адаптированной модели стохастического программирования [13].

Входные данные:

- K – количество контрмер, характеризующихся стоимостью $c_k, k = \overline{1, K}$;
- M – количество иницирующих событий;
- Δq_{km} – мера влияния контрмеры k на значимость иницирующего события m , (изменение частоты (в долях) возникновения иници-

рующего события m в результате включения контрмеры k в перечень контрмер для реализации);

- $w(q_m)$ – значимость иницирующего события с учетом его вклада в превышение нормативного показателя воздействия ЭА на окружающую среду (мера влияния иницирующего события на вероятность превышения нормативного показателя).

- β_0 – бюджетное ограничение.

Выходные данные: набор наиболее эффективных контрмер.

Если считать, что c_j – стоимость контрмеры и β_0 – бюджетное ограничение, непрерывные случайные величины, принимающие значения из соответствующих интервалов, тогда данная задача сводится к задаче стохастического программирования, представляющая М-модель с построчными вероятностными ограничениями (5), (6).

Целевой функции соответствует максимальное изменение совокупного риска системы ЭЭ. Под совокупным риском понимается математическое ожидание ущерба от реализации неблагоприятного события (1)–(4) (изменение совокупного риска – математическое ожидание изменения ущерба при включении контрмеры в перечень контрмер для реализации) [13].

Задача формирования перечня наиболее эффективных контрмер сводится к поиску оптимального вектора: $(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_K)^K$:

$$\Delta R = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^{L_i} \Delta p_{ij} * u_{ij} \right) \rightarrow \max \quad (5)$$

при

$$P \left\{ \sum_{k=1}^K c_k \zeta_k \leq \beta_0 \right\} \geq \alpha, \quad \zeta_k \in \{0,1\},$$

$$k = \overline{1, K}, \quad m = \overline{1, M}, \quad (6)$$

где α – вероятность соблюдения условий (непревышение определенного порога); p_{ij} – оценка вероятности возникновения неблагоприятного события (превышения норматива воздействия ЭА на окружающую среду); Δp_{ij} – изменение вероятности возникновения неблагоприятного события; u_{ij} – оценка ущерба от реализации неблагоприятного события.

Эффективность контрмеры оценивается мерой влияния данной контрмеры на вероятность возникновения неблагоприятного события или на величину ущерба от реализации неблагоприятного события:

$$\sum_{m=k=1}^M \sum^K w(q_m) * \Delta q_{km}.$$

Задача формирования перечня наиболее эффективных контрмер в стохастической постановке сводится к детерминированной задаче линейного программирования, которая решается полным перебором на множестве бинарных векторов длины K .

Задача определения капитала покрытия катастрофических убытков

Для оценки возможного ущерба и определения капитала покрытия в случае возникновения непредвиденных и катастрофических потерь в результате аварийного загрязнения ОС, адаптирован метод «Вершина сверх порога» [12].

Алгоритм:

Шаг 1. Подбор распределения, описывающего экстремальные потери, то есть катастрофические потери, которые превышают некоторый заданный уровень.

Шаг 1.1. Подбор распределения на основе теории экстремальных значений.

Компонента потерь в подходе «Вершина сверх порога» основана на обобщенном распределении Парето, так как согласно теореме Балкемы-де-Хаана и Пикэндса, распределение превышений некоторого достаточно высокого порога u описывается обобщенным распределением Парето [14]:

$$GPD_{\xi, \beta}(x) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \xi \frac{x}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\xi}}, & \xi \neq 0; \\ 1 - e^{-\frac{x}{\beta}}, & \xi = 0, \end{cases}$$

где X_1, \dots, X_n – последовательность независимых одинаково распределенных случайных величин, характеризующих значения ущербов; ξ – параметр формы, β – параметр масштаба обобщенного распределения Парето.

Шаг 1.2. Оценка параметров подобранного распределения.

Шаг 1.3. Определение порога, характеризующего начало катастрофических потерь.

Выбор порогового значения, индексирующего катастрофические потери, осуществляется с помощью диаграммы средних остатков:

$$\text{SMEF}(u) = \frac{\sum_{i \leq n} x_i - u}{\sum_{i \leq n} 1_{\{x_i > u\}}}.$$

Шаг 2. Оценка ожидаемых крупных потерь.

Для оценки потенциального размера катастрофических потерь предлагается использовать медиану превышений порогового значения, которая отражает степень тяжести превышений:

$$\text{GPD}_{\text{MEDEF}}(u) = \frac{\beta}{\xi} (2^\xi - 1),$$

где $\text{MEDEF}(u)$ – функция медианного избытка (медиана избытков свыше порога u).

Шаг 3. Определение распределения частоты крупных потерь.

Число превышений порога подчиняется пуассоновскому процессу с интенсивностью, отражающей среднее число превышений за определенный интервал времени [12, 14]:

$$\lambda_u = (1 + \xi \frac{u - \mu}{\beta}),$$

λ_u – интенсивность (частота) превышающих u значений в единицу времени; ξ – параметр формы, β – параметр масштаба, μ – параметр положения обобщенного распределения Парето.

Шаг 4. Расчет капитала, необходимого для покрытия возможных крупных потерь.

Таким образом, капитал, необходимый для покрытия катастрофических потерь, может быть вычислен на основе размера и частоты потерь сверх выбранного порога, полученных с помощью метода «Вершина сверх порога»:

$$C = \lambda_u (u + \text{GPD}_{\text{MEDEF}}(u)) = \lambda_u (u + \frac{\beta}{\xi} [2^\xi - 1]).$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрены основные этапы риск-ориентированного экологического аудита, алгоритмы качественной и количественной оценки уровня экологической эффективности, а также способы ее управления экологической эффективностью предприятия

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ Р ИСО 14031-2001.** Управление окружающей средой. Оценивание экологической эффективности. Общие требования. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001. 26 с. [*Environmental management. Environmental performance evaluation. Guidelines*, (in Russian), Federal standard R ISO 14031-2001, Moscow, IPK, Publisher of standards, 2001.]

2. **Жуков В. В.** Разработка критериев и методики оценки экологической эффективности предприятий, системы экологического рейтингования, отвечающего задачам объективного отражения экологической ситуации // Экологический вестник России. 2013. № 3. С. 43–49. [V. V. Zhukov, «The development of criteria and methodology for assessment of environmental performance of enterprises and environmental rating system for objective reflection of environmental situation,» (in Russian), *Environmental Vestnik of Russia*, no. 3, pp. 43-49, 2013.]

3. **Боравский Б. В., Коротков П. А., Короткова Н. П.** Методические подходы к оценке экологической эффективности предприятий нефтедобывающей промышленности // Минеральные ресурсы России. Экономика и управление. 2013. № 3. С. 49–55. [B. V. Boravskiy, P. A. Korotkov, N. P. Korotkova, «Methodological approaches to the assessment of environmental efficiency of oil industry companies,» (in Russian), in *Mineral resources of Russia. Economics and management*, no. 3, pp. 49-55, 2013.]

4. **Берстен Е. В., Егорова Т. А.** Оценка экологической эффективности организационной структуры промышленного предприятия // Российский экономический интернет-журнал. 2007. № 4. [Электронный ресурс]. URL: http://e-rej.ru/Articles/2007/Bersten_Yegorova.pdf (дата обращения 05.12.2013) [E.V. Bersten, T.A. Yegorova. (2013, Dec. 5). Environmental assessment of the effectiveness of the organizational structure of industrial organizations [Online], (in Russian) in *Russian Economic online magazine*, no. 4, 2007. Available: http://e-rej.ru/Articles/2007/Bersten_Yegorova.pdf]

5. **Николаева М. А., Зотова О. Ф.** Методы и алгоритмы принятия решений в примерах и задачах: учебное пособие / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа, 2010. 110 с. [M. A. Nikolaeva, O. F. Zotova, *Methods and algorithms for decision making in the examples and problems: a manual*, (in Russian). Ufa: Ufa State Aviation Technical University, 2010.]

6. **Кустов Г. А.** Задача управления информационными рисками компании добровольного медицинского страхования // Вестник УГАТУ. 2007. Т. 9, № 4 (22). С. 77–84. [G. A. Kustov, «Information risks management of insurance company with using of the logic and probabilistic method,» (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 9, no. 4 (22), pp. 77-84, 2007.]

7. **Munda G.** Social multi-criteria evaluation for a sustainable economy. Berlin: Springer Verlag, 2008. [G. Munda, *Social multi-criteria evaluation for a sustainable economy*. Berlin: Springer Verlag, 2008.]

8. **Křehlík T.** Unorthodox measures of economic performance. Prague, 2011. Bachelor's thesis, Charles University, Faculty of Social Sciences, Institute of Economic Studies. [T. Křehlík, *Unorthodox measures of economic performance*. Prague, 2011. Bachelor's thesis, Charles University, Faculty of Social Sciences, Institute of Economic Studies.]

9. **Ntzoufras I.** Bayesian Modelling using WinBUGS. John Wiley & Sons, Inc, 2009. [I. Ntzoufras, *Bayesian Modelling using WinBUGS*. John Wiley & Sons, Inc, 2009.]

10. **Волков В.Ю., Мансур Али** Применение байесовских технологий в системах экологического мониторинга предприятий химической промышленности // Известия высших учебных заведений. Серия: химия и химическая технология. 2009. Т. 52, № 6. С. 120–123. [V. Yu. Volkov, Ali Mansoor, «Application of Bayesian technologies in systems of ecological monitoring of chemical enterprises,» (in Russian),

Journal of higher education institutions. Series: chemistry and chemical technology, vol. 52, no. 6, pp. 120-123, 2009.]

11. **Юсупова Н. И., Шахмаметова Г. Р., Еникеева К. Р.** Модели представления знаний для идентификации опасностей промышленного объекта // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 11, № 1 (58). С. 91–100. [N. I. Yusupova, G. R. Shakhmametova, and K. R. Enikeeva, «Knowledge representation models for identification of dangers of industrial objects,» (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 11, no. 1 (58), pp. 91-100, 2008.]

12. **Лакман И. А., Гареева И. Ю., Курбангалеева Д. М., Агадуллина А. И.** Модели и алгоритмы идентификации и оценки эколого-экономических рисков // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 5 (58). С. 115–121. [I. A. Lackman, I. Yu. Gareeva, D. M. Kurbangaleeva, A. I. Agadullina, «Models and algorithms for identification and estimation of ecological and economic risks,» (in Russian), *Vestnik UGATU*, vol. 17, no. 5 (58), pp. 115-121, 2013.]

13. **Кустов Г. А., Николаева М. А., Зотова О. Ф., Шаропов Р. А.** Алгоритмы выбора превентивных мер снижения рисков // Информационные технологии. 2010. № 4. С. 22–27. [G. A. Kustov, M. A. Nikolaeva, O. F. Zotova, and R. A. Sharapov, «Algorithms of risk decrease preventive measures selection,» (in Russian), *Informacionnye Tekhnologii*, no. 4. pp. 22-27, 2010.]

14. **McNeil A. J., Saladin T.** The peaks over thresholds method for estimating high quantiles of loss distributions // Proc. 28th Int. ASTIN Colloquium. Zurich, 1997. [A. J. McNeil, T. Saladin, «The peaks over thresholds method for estimating high quantiles of loss distributions,» in *Proc. 28th Int. ASTIN Colloquium*, Zurich, 1997.]

ОБ АВТОРАХ

ГУЗАИРОВ Мурат Бакеевич, ректор, проф. каф. выч. техники и защиты информации. Дипл. инж.-электромех. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по упр. в соц. и экон. системах. Иссл. в обл. сист. анализа, упр. в соц. и экон. системах.

НИКОЛАЕВА Марина Анатольевна, доц. каф. выч. мат. и кибернетики. Дипл. спец.-мат. (РГПУ им. А. И. Герцена, 1978). Канд. техн. наук (УГАТУ, 1993). Иссл. в обл. управления рисками.

АГАДУЛЛИНА Айгуль Ильдаровна, асс. каф. выч. мат. и кибернет. Дипл. экон.-матем. (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. экон. безопасн., упр. экон.-экон. рисками.

METADATA

Title: Mathematical software of decision support system for assessment and management of environmental performance for companies.

Authors: M. B. Guzairov, M. A. Nikolaeva, A. I. Agadullina

Affiliation:

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

Email: aygul.agadullina@gmail.com.

Language: Russian.

Source: Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 18, no. 1 (62), pp. 95-105, 2014. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

Abstract: The environmental risk-based audit as a tool to assess and manage the environmental performance of enterprise is considered. The article describes the mathematical software of decision support system for audit stages includes algorithms for the qualitative and quantitative assessment of environmental efficiency level, method to assess the environmental aspects significance, method for probability estimation of adverse events using Bayesian hierarchical model and logical-probabilistic method, stochastic model and method of multicriteria evaluation to generate a set of countermeasures, capital calculation to cover the catastrophic risks.

Key words: environmental performance of enterprises, environmental risk-based audit, estimation algorithm of environmental performance level, method NAI/DE, hierarchical Bayesian model, multicriteria methods.

About authors:

GUZAIROV, Murat Bakeevich, Rector, Prof., Dept. of Computer facilities and information protection. Dipl. Eng.-Electromechanic (UAI, 1973). Dr. (Habil.) Tech. Sci. (1998).

NIKOLAEVA, Marina Anatolevna, Associate prof., Dept. of Computer Science. Cand. of Tech. Sci. (UGATU, 1993).

AGADULLINA, Aygul Ildarovna, Ass., Dept. of Computational Mathematics and Cybernetics. Dipl. Economist-mathematician (UGATU, 2009).