

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ ПРЕДПРИЯТИЙ ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

А. В. Хохряков, А. Ф. Фадеев, Е. М. Цейтлин

Обеспечение экологической безопасности горного производства становится все более актуальным. Решение сложных экологических проблем в современных условиях нарастающего ограничения ресурсов требует выявления приоритетных точек приложения финансовых, организационных и технических усилий, выбора оптимальных инженерно-технических решений, для чего необходимо иметь объективную оценку экологической опасности тех или иных технических решений, экологических ситуаций, предприятий в целом. Данная статья посвящена вопросам оценки экологической опасности. Проведен обзор существующих подходов, определены их преимущества и недостатки, предложен новый подход оценки экологической опасности, основанный на методе «интегрального критерия», который учитывает данные недостатки.

*Ключевые слова:* экологическая опасность; экологическая безопасность; негативное воздействие на окружающую среду; оценка экологической опасности; интегральный критерий.

Горнопромышленный комплекс является одним из основных источников воздействия на окружающую среду [1, 2]. Поэтому весьма актуальна задача разработки метода комплексной оценки экологической опасности горного производства с учетом уже имеющихся научных подходов.

Сегодня в законодательстве Российской Федерации или научно-технической литературе нет явных критериев, в соответствии с которыми можно оценить уровень экологической опасности. Существует три принципиально различных подхода для оценки экологической опасности или экологической безопасности [2–4]:

1. Оценка экологической безопасности, основанная на методе нормирования.
2. Оценка экологической безопасности, основанная на определении величины экологического риска.
3. Оценка экологической безопасности с помощью метода интегрального критерия.

Сущность первого метода заключается в необходимости учета допустимой нагрузки на экосистему, т. е. такой нагрузки, под воздействием которой отклонение от нормального состояния системы не превышает естественных изменений, следовательно, не вызывает нежелательных последствий у живых организмов и не ведет к ухудшению качества среды.

Принцип «экологического риска» выражает вероятность экологического бедствия, катастрофы, нарушения дальнейшего нормального функционирования и существования экологических систем и объектов в результате антропогенного вмешательства в природную среду или стихийного бедствия. Нежелательные события экологического риска могут проявляться как непосредственно в зонах вмешательства, так и за их пределами.

Метод интегрального критерия подразумевает под собой оценку экологической безопасности производства с помощью одного интегрального критерия, включающего несколько разнородных критериев, определенных экспертным путем.

Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки, которые сведены в табл. 1.

Главными недостатками существующих подходов являются:

- невозможность ранжирования предприятий по степени экологического воздействия на окружающую среду;
- невозможность учета специфики воздействий промышленных объектов;
- сложность в поиске приоритетных экологических задач для предприятия.

С целью совершенствования и унификации данных подходов предлагается универсальный критерий оценки экологической опас-

ности, основанный на комплексе разнокачественных экологических и технических показателей, которые могут учитывать как региональную специфику, так и специфические особенности горного производства. Предлагае-

мый критерий учитывает уже сложившуюся систему поресурсной оценки, основанной на принципе нормирования, и дополняет существующие на данный момент подходы, учитывая их недостатки.

Таблица 1

**Преимущества и недостатки существующих подходов для оценки экологической опасности горных предприятий**

Метод оценки экологической опасности	Преимущества	Недостатки
Метод нормирования	Утвержден законодательно Разработано множество методик и критериев Налажена работа контролирующих органов и предприятий Создано необходимое программное обеспечение	Невозможен учет всех критериев (их слишком много) Трудоёмкость получения необходимой информации Не в полной мере учитывается комплексное воздействие на окружающую среду Не учитывается специфика производства Неоднозначность нормативов ПДК химических элементов относительно воздействия источников загрязнения на окружающую среду Отсутствие утвержденных нормативов для всех источников загрязнения окружающей среды Отсутствие возможности поиска приоритетных экологических задач для предприятия Невозможность ранжирования предприятий по степени экологического воздействия на окружающую среду
Метод экологического риска	Не требует большого количества исходной информации Высокая степень достоверности	Сложность в поиске экспертов Отсутствие гарантий достоверности полученных оценок Отсутствие учета специфики воздействий горных предприятий Отсутствие возможности поиска приоритетных экологических задач для предприятия Невозможность ранжирования предприятий по степени экологического воздействия на окружающую среду
Метод интегрального критерия	Простота оценки Оригинальность метода Возможность автоматизации данного процесса	Неточность оценки Сложность в поиске экспертов Отсутствие гарантий достоверности полученных оценок Отсутствие учета специфики воздействий горных предприятий Отсутствие возможности поиска приоритетных экологических задач для предприятия Невозможность ранжирования предприятий по степени экологического воздействия на окружающую среду

Для определения степени экологической опасности необходимо комплексно оценить негативное воздействие горного предприятия на окружающую среду. При этом степень экологического воздействия тесно связана со степенью экологической опасности. Чем выше

экологическое воздействие, тем выше экологическая опасность.

Оценка экологического воздействия предприятия на окружающую среду подразумевает проведение оценки его воздействия на все элементы биосферы: литосферу, атмосферу,

гидросферу, биоценозы и зооценозы.

Оценку экологической опасности производства предлагается производить по четырем базовым факторам: выброс, сброс, отходы, нарушенные земли. Важно заметить, что количественная оценка фактора воздействия может быть выражена по-разному. Так, количественная оценка выброса в атмосферный воздух может быть выражена через объем выброса или концентрацию загрязняющих веществ на границе санитарно-защитной зоны (СЗЗ), сброс – через объем сброса или концентрацию загрязняющих веществ в контрольном створе, отходы – через объем размещаемых или образующихся отходов, нарушенные земли – через площадь нарушенных земель, отданных под объекты размещения отходов или добычи полезных ископаемых. Критерием выбора в данном случае преимущественно служит наличие достоверной информации по конкретному фактору воздействия. Так, например, при отсутствии информации о концентрации основных загрязняющих веществ на границе СЗЗ ее можно заменить объемом выброса данных веществ в атмосферный воздух.

Все показатели имеют разные шкалы оценки и разный физический смысл, с одной стороны, и требуют сравнения друг с другом, с другой. Фактически мерой каждого показателя на начальном уровне является его качественное или векторное описание [5]. Для оценки степени экологической опасности горного производства необходимо преобразовать векторное описание системы со многими показателями в скалярное (метод разнокачественных показателей). Скалярное описание системы, которое используется для принятия решения, называется целевой функцией. Согласно [5], существует множество способов, посредством которых показатели или связанная с ними оценка полезности рабочих характеристик системы могут быть объединены в одну целевую функцию. Так, целевую функцию  $N$  можно представить в виде:

$$N_{ij} = \sum_{i=1}^m \lambda_{ij} \cdot \varphi_{ij}, \quad (1)$$

где  $N_{ij}$  – интегральный показатель экологической опасности горного производства;  $\lambda$  – ко-

эффициент весомости показателя воздействия для элемента биосферы;  $\Phi$  – коэффициент уровня влияния показателя воздействия на элемент биосферы;  $i$  – количество показателей (базовых), определяющих экологическую опасность предприятия;  $j$  – элемент биосферы (атмосфера, гидросфера, литосфера);  $m$  – количество базовых факторов воздействия.

Интегральный показатель  $N$  является безразмерной величиной и может принимать значения от 0 до 1 (в отдельных случаях при превышении фактического загрязнения окружающей среды нормативов предельно допустимого загрязнения может быть больше 1). Чем ближе данный показатель к единице – тем более высокое экологическое воздействие оказывает горное предприятие на окружающую среду.

Функция  $N$  является скалярным произведением вектора  $\lambda$  на вектор  $\varphi$ . При этом скалярное произведение вектора  $\lambda$  на вектор  $\varphi$  необходимо рассчитывать для каждого фактора воздействия отдельно. В соответствии с этой формулой предполагается, что полная полезность системы может быть представлена в виде линейной суммы взвешенных оценок полезности отдельных рабочих характеристик.

Значение показателя  $\varphi$  определяется следующим образом:

$$\varphi_{ij} = 1 - \frac{k_{ij\max} - k_{ij}}{k_{ij\max}}, \quad (2)$$

где  $\varphi_{ij}$  – показатель уровня влияния фактора воздействия на окружающую среду;  $k_{ij}$  – значение интенсивности воздействия фактора на элемент биосферы;  $k_{ij\max}$  – максимально возможный уровень воздействия фактора на окружающую среду.

Для оценки степени воздействия предприятия в целом на окружающую среду предлагается для каждого объекта предприятия оценить весомость источников воздействия с помощью коэффициента весомости  $\lambda_{ij}$ , где  $\lambda$  – коэффициент весомости фактора воздействия  $i$  для  $j$ -го элемента биосферы;  $i$  может принимать значения от 1 до  $n$ ,  $j$  – от 1 до 3 (1 – атмосфера, 2 – гидросфера, 3 – литосфера).

Значения коэффициента весомости показателя воздействия для каждого из видов воз-

действия могут принимать значения от 0 до 1. Для наиболее значимого фактора воздействия коэффициент весомости принимает значение 1, для наименее значимого – 0. При этом суммарная весомость каждого показателя, влияющего на экологическую опасность производства, для всех элементов биосферы не превышает 1:

$$\lambda_{1j} + \lambda_{2j} + \dots + \lambda_{nj} = 1, \quad (3)$$

где  $n$  – количество факторов воздействия;  $j$  – элемент биосферы.

Значения коэффициента весомости вида воздействия определяется экспертным методом. В соответствии с [7] метод экспертных оценок предпочтительно применять для сравнительных оценок при решении сложно формулируемых задач, когда неполнота и недостоверность информации не позволяют использовать другие методы.

При оценке уровня влияния источника воздействия для увеличения точности полученных результатов было решено ввести следующее ограничение. Оценку уровня воздействия горного предприятия предлагается проводить за определенный промежуток, который можно считать достаточным для достоверной оценки воздействия горного производства на окружающую среду, определяемый сроком в 5 лет. За это время необходимо составить динамику воздействия предприятия на окружающую среду (по годам). В результате фактическим воздействием горного предприятия на окружающую среду будет то, которое являлось средним воздействием за этот временной интервал. За максимальное влияние факторов воздействия на окружающую среду предлагается принимать нормативное воздействие данных факторов (для выброса, сброса и отходов) или площадь земельного отвода, выделенного на нужды предприятия для фактора «нарушенные земли».

Другой, не менее важной проблемой, возникающей при оценке экологической опасности горного производства, является учет воздействия основных загрязняющих веществ и основных видов отходов (или основных загрязнителей).

Основные загрязнители – это авторский термин, под которым подразумеваются основные загрязняющие вещества или размещае-

мые отходы, характерные для конкретного производства, или те загрязнители, по которым наблюдаются превышения по ограничивающему показателю воздействия. В качестве ограничивающего показателя воздействия может выступать предельно допустимая концентрация вещества, лимит на размещение отходов, предельно допустимый выброс, норматив предельно допустимого сброса, ориентировочно безопасный уровень воздействия и другие подобные ограничивающие показатели. Таких загрязнителей может быть несколько, при этом необходимо оценить их комплексный вклад в воздействие на окружающую среду. Для этого предлагается ввести термин «приведенный интегральный показатель воздействия». Под этим термином понимается совокупная величина воздействия данных веществ на окружающую среду.

Для того чтобы вычислить данную величину, предлагается сделать следующее. Как было показано, у каждого загрязнителя есть свой ограничивающий показатель воздействия. Предположим, предприятие загрязняет окружающую среду  $n$ -м количеством основных загрязнителей. Каждый загрязнитель имеет свое значение. Приведенный интегральный показатель воздействия в этом случае предлагается рассчитать в соответствии с [8]:

$$C_p = \sum_1^n C_1 + \frac{C_{o1}C_2}{C_{o2}} + \dots + \frac{C_{o1}C_n}{C_{on}}, \quad (4)$$

где  $C_p$  – приведенный интегральный показатель воздействия;  $C_{o1}$  – величина ограничивающего показателя воздействия загрязнителя № 1, относительно которого пересчитывают остальные загрязнители;  $C_1$  – фактическое значение воздействия загрязнителя, относительно которого пересчитывают остальные основные загрязнители;  $C_2$  – фактическое значение воздействия основного загрязнителя № 2;  $C_{o2}$  – величина ограничивающего показателя воздействия основного загрязнителя № 2;  $C_n$  – фактическое значение воздействия основного загрязнителя  $n$ ;  $C_{on}$  – величина ограничивающего показателя воздействия основного загрязнителя  $n$ ,  $n$  – количество основных загрязнителей

Данный метод позволяет выразить кон-

центрацию всех загрязнителей через один условный наиболее значимый загрязнитель, что позволяет комплексно оценить их воздействие на окружающую среду. При этом расчет приведенного интегрального показателя воздействия требуется для расчета интенсивности фактора воздействия.

При этом ограничивающий показатель воздействия при оценке экологической опасности предприятия также подлежит пересчету. Его пересчет необходимо проводить следующим образом:

$$C_{op} = mC_{o1}, \quad (5)$$

где  $C_{op}$  – приведенный интегральный ограничивающий показатель воздействия;  $C_{o1}$  – значение приведенного воздействия загрязнителя 1;  $m$  – количество основных загрязнителей

Важно заметить, что при оценке экологической опасности предприятия необходимо учесть специфику Уральского региона. Основным источником загрязнения окружающей среды в регионе является горнопромышленный комплекс, воздействие которого весьма специфично.

Из всех факторов воздействия горнопромышленного комплекса на окружающую среду ведущим является вид полезного ископаемого. Он определяет:

- технологию добычи и переработки минерального сырья;
- объемы производства;
- химический состав и объемы выбросов в атмосферу и сбросов в гидросферу;
- применяемые реагенты и их количество;
- характер и количество выделяемых отходов;
- воздействие на литосферу: недра, земли, почвы;
- основные загрязнители и класс их опасности.

Кроме того, важными параметрами, учитываемыми специфическое воздействие горнопромышленного комплекса, являются способ разработки, используемый при добыче полезного ископаемого, и способ обогащения.

Для учета специфического воздействия горного производства на окружающую среду было решено ввести поправочный коэффициент  $\mu$ , который рассчитывается следующим

образом:

$$\mu_{nj} = 1 - \left( \left( \sum_{t=1}^n \frac{P_{tj\max} - P_{tj}}{P_{tj\max}} \right) / n \right), \quad (6)$$

где  $\mu_{nj}$  – поправочный показатель, учитывающий специфику горного производства;  $P_{tj\max}$  – максимальная величина интенсивности воздействия фактора, учитывающего специфику горного производства;  $P_{tj}$  – величина интенсивности воздействия фактора, учитывающего специфику горного производства, на  $j$ -й элемент биосферы, определенная экспертным методом;  $t$  – фактор воздействия, учитывающий специфику горного производства;  $n$  – количество факторов воздействия, учитывающих специфику горного производства.

Данный коэффициент рассчитывается для каждого из элементов биосферы и в дальнейшем учитывается при поиске приоритетных экологических задач для горного предприятия.

С учетом изложенного поиск приоритетных экологических задач для горного предприятия сводится к расчету интегрального показателя экологической опасности для горного предприятия, а учет специфики горного производства производится с помощью поправочного коэффициента  $\mu_{nj}$ .

В общем случае с учетом формул (1)–(6) оценка экологической опасности  $i$ -го фактора воздействия для  $j$ -го элемента биосферы:

$$N_{ij} = \lambda_{ij} \left( 1 - \frac{k_{ij\max} - k_{ij}}{k_{ij\max}} \right) \times \left( 1 - \left( \sum_{t=1}^n \frac{P_{tj\max} - P_{tj}}{P_{tj\max}} \right) / n \right), \quad (7)$$

где  $\lambda_{ij}$  – показатель весомости влияния  $i$ -го фактора воздействия на  $j$ -й элемент биосферы;  $k_{ij\max}$  – максимально возможный уровень влияния фактора воздействия на окружающую среду;  $k_{ij}$  – значение интенсивности влияния фактора воздействия на элемент биосферы, при этом  $k_{ij}$  – значение интенсивности влияния  $i$ -го фактора воздействия на  $j$ -й элемент биосферы, которое рассчитывается по (4);  $k_{ij\max}$  – максимально возможный уровень влияния  $i$ -го фактора воздействия на  $j$ -й элемент биосферы, который рассчитывается по (5);  $P_{ti}$  –



величина интенсивности воздействия фактора, учитывающего специфику горного производства, на  $j$ -й элемент биосферы, которая определена экспертным методом;  $P_{i\max}$  – максимальная величина интенсивности воздействия фактора, учитывающего специфику горного производства, определенная экспертным методом;  $t$  – фактор воздействия, учитываю-

щих специфику горного производства.

Результаты расчета интегрального экологического показателя  $i$ -го фактора воздействия на  $j$ -й элемент биосферы сводятся в табл. 2. Затем рассчитывается интегральный показатель экологической опасности всех факторов воздействия на элемент биосферы, результаты которого сводятся в эту же таблицу.

Таблица 2

Результаты расчета интегрального экологического показателя  $i$ -го фактора воздействия на  $j$ -й элемент биосферы

Факторы воздействия/элемент биосферы	Фактор воздействия 1	Фактор воздействия 2	Фактор воздействия 3	Фактор воздействия $i$	Суммарное воздействие факторов на элемент биосферы
Атмосфера	$N_{11}$	$N_{21}$	$N_{31}$	$N_{i1}$	$N_{f1}$
Гидросфера	$N_{12}$	$N_{22}$	$N_{32}$	$N_{i2}$	$N_{f2}$
Литосфера	$N_{13}$	$N_{23}$	$N_{33}$	$N_{i3}$	$N_{f3}$

Расчет интегрального показателя экологической опасности суммарного воздействия для окружающей среды:

$$N_{fij} = N_{1j} + N_{2j} + N_{3j} + \dots + N_{ij}, \quad (8)$$

где  $N_{fij}$  – интегральный показатель экологической опасности суммарного воздействия на окружающую среду;  $N_{1j}$  – интегральный показатель экологической опасности фактора воздействия 1 для  $j$ -го элемента биосферы;  $N_{2j}$  – интегральный показатель экологической опасности фактора воздействия 2 для  $j$ -го элемента биосферы;  $N_{3j}$  – интегральный показатель экологической опасности фактора воздействия 3 для  $j$ -го элемента биосферы;  $N_{ij}$  – интегральный показатель экологической опасности фактора воздействия  $i$  для  $j$ -го элемента биосферы.

Интегральный показатель экологической опасности всех факторов воздействия является критерием выбора элемента биосферы, на который горное предприятие оказывает преимущественное воздействие (или приоритетный элемент биосферы). Интегральный показатель экологической опасности фактора воздействия для приоритетного элемента биосферы будет являться критерием выбора приоритетной экологической задачи для горного предприятия. Он определяется для всех базовых

факторов воздействия. Тот фактор воздействия, для которого данный показатель будет максимальным, и будет приоритетной экологической задачей для горного предприятия.

В общем случае требования к критерию выбора приоритетных экологических задач можно записать следующим образом:

$$N_{ij}(\lambda, \varphi, \mu) \rightarrow \max, \begin{cases} 0 \leq \lambda_{ij} \leq 1, \\ 0 \leq \varphi_{ij} \leq \infty, \\ 0 \leq \mu_{mj} \leq 1. \end{cases}$$

где  $N_{ij}$  – интегральный показатель экологической опасности  $i$ -го фактора воздействия на  $j$ -й элемент биосферы;  $\lambda_{ij}$  – показатель весомости  $i$ -го фактора воздействия на  $j$ -й элемент биосферы;  $\varphi$  – показатель уровня воздействия  $i$ -го фактора воздействия на  $j$ -й элемент биосферы;  $\mu_{mj}$  – поправочный коэффициент, учитывающий специфику воздействия горного производства, где  $t$  – фактор воздействия, учитывающий специфику производства,  $j$  – элемент биосферы.

Алгоритм оценки экологической опасности с помощью модели, основанной на разнокачественных экологических и технических показателях, примет следующий вид:

1. Сбор требуемой информации для определения приоритетных экологических задач предприятия:

- 1.1. Определение основных загрязнителей, характерных для конкретного предприятия;
- 1.2. Сбор информации по базовым показателям воздействия;
- 1.3. Сбор информации по дополнительным показателям воздействия, учитывающим специфику горнопромышленного комплекса;
2. Определение интегрального приведенного показателя воздействия для каждой из групп загрязнителей по (4);
3. Определение интегрального приведенного ограничивающего показателя воздействия для каждой из групп загрязнителей по (5);
4. Определение показателя весомости, для каждого из базовых факторов воздействия методом экспертных оценок;
5. Определение показателя уровня воздействия для каждого из базовых факторов

воздействия по (2);

6. Определение поправочного показателя для каждого из факторов воздействия, учитывающих специфику горного производства по (6);

7. Определение интегрального показателя экологической опасности для каждого фактора воздействия по всем компонентам окружающей среды по (7);

8. Определение приоритетных элементов биосферы для горного предприятия по (8);

9. Определение приоритетных экологических задач для горного предприятия.

Таким образом, разработан алгоритм оценки экологической опасности горных предприятий с помощью интегрального критерия, который позволяет комплексно оценить их экологическую опасность, а также повысить эффективность использования средств, выделяемых на охрану окружающей среды.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хохряков А. В., Фадеев А. Ф., Цейтлин Е. М. Динамика изменения воздействия ведущих горных предприятий Урала на окружающую среду // Изв. вузов. Горный журнал. № 8. 2011. С. 44–53.
2. Динамика негативного воздействия на окружающую среду на разных стадиях развития горного производства / А. Ф. Фадеев [и др.] // Изв. вузов. Горный журнал. 2012. № 1. С. 39–46.
3. Акимов В. А., Лесных В. В., Радаев Н. Н. Риски в природе, техносфере, обществе и экономике. М.: Деловой Экспресс, 2004. 352 с.
4. Гаспарский В. Праксеологический анализ проектно-конструкторских решений / пер. с польск. М.: Мир, 1978. 172 с.
5. Пэнтл Р. Методы системного анализа окружающей среды. М.: Мир, 1979. 213 с.
6. Астахов А. С., Диколенко Е. А., Харченко В. А. Экологическая безопасность и эффективность природопользования. М., 2009. 328 с.
7. Орлов А. И. Экспертные оценки: учеб. пособие. М., 2002. 31 с.
8. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий: ОНД-86, утв. Госкомгидрометом СССР 04.08.86, № 192. Л.: Гидрометеиздат, 1986.

Поступила в редакцию 27 марта 2013 г.

**Хохряков Александр Владимирович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой инженерной экологии. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: scarface2004@rambler.ru

**Фадеев Альфред Францевич** – кандидат геолого-минералогических наук, доцент кафедры инженерной экологии. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: Alfred.fadeichev@m.ursmu.ru

**Цейтлин Евгений Михайлович** – аспирант кафедры инженерной экологии. 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30, Уральский государственный горный университет. E-mail: tseitlin.e.m@gmail.com