



УДК 504.06, 620.3

Н. И. Куракина

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Комплексная оценка экологической ситуации в условиях развития нанотехнологий

Рассматриваются вопросы оценки экологической ситуации в местах расположения нанопроизводств. Предложен алгоритм построения модели комплексной оценки природно-техногенных объектов, основанный на методе анализа иерархий. Алгоритм позволяет учесть целевую функцию анализа, рассчитать весовые коэффициенты значимости показателей иерархии, определить достоверность получаемой оценки.

Комплексная оценка, иерархическая модель, метод анализа иерархий, наноматериалы, экологическая безопасность

Появление новых материалов и технологий нередко ведет за собой и новую угрозу окружающей среде. В частности, нарастающие объемы производства и использования наночастиц приводят к увеличению их содержания в окружающей среде. Использование нанотехнологий бесспорно является одним из самых перспективных направлений науки и техники, но вместе с этим первоочередной задачей становится изучение изменения экологии и потенциальных рисков использования наноматериалов.

Многочисленные исследования показали, что структура и свойства веществ в наноразмерном состоянии имеют существенные отличия от макрохарактеристик [1]. Например, инертный в обычной форме оксид железа при его преобразовании в наноформу приобретает выраженные нейротоксические свойства [1]. Опасность наноматериалов в первую очередь заключается в их микроскопических размерах. Во-первых, благодаря малым размерам, они химически более активны, в результате чего малотоксичное вещество может стать высокотоксичным. Во-вторых, химические свойства нановещества могут в значительной степени меняться из-за проявлений квантовых эффектов, что в итоге может сделать безопасное вещество очень опасным. В-третьих, в силу своих малых размеров наночастицы свободно проходят сквозь клеточные

мембраны, повреждая клеточные органеллы и нарушая работу клеток.

В настоящее время основные области применения наноматериалов – техника, микроэлектроника и оптика, энергетика, химическая технология, медицина и даже парфюмерно-косметическая промышленность. Недаром в России уже создана госкорпорация «Нанотех», которая должна стать локомотивом «прорыва» в области высоких технологий.

Несмотря на то, что наноматериалы в мире уже используются более десяти лет, ни один из их видов не изучен на безопасность в полном объеме ни в одной из стран мира [2]. Вещества наноразмерного уровня попадают в окружающую среду разными путями – при производстве, хранении, обработке, перевозке и утилизации. Наночастицы способны накапливаться в воздухе, почве, сточных водах. Наноматериалы, как правило, легче вступают в химические превращения, нежели более крупные объекты того же состава, и поэтому способны образовывать комплексные соединения с ранее неизвестными свойствами. Таким образом, помимо технологической перспективности нанотехнологий необходимо задуматься об увеличивающемся количестве поступающих в окружающую среду наночастиц, изучению их мутагенных свойств и оценке токсичности наноматериалов.

С ростом наукоемких производств, использующих нанотехнологии, необходимость всесторонних экологических исследований становится очевидной. При этом помимо стандартных методов оценки степени химического и физического загрязнения специфика наноразмерных объектов диктует необходимость разработки более быстрых и более развитых методов оценки токсичности, какими являются методы биологического контроля, а именно биотестирование. Совмещение результатов контрольных измерений загрязняющих веществ в различных средах с данными биологического анализа и экспертными оценками позволит комплексно оценить состояние сложных природно-техногенных объектов в условиях nanoиндустриализации.

Целью такой работы является создание теоретических основ и методического обеспечения комплексной оценки экологического воздействия наукоемких производств на окружающую среду с учетом токсикологических особенностей наноматериалов.

Формирование комплексных оценок с обеспечением метрологической сопоставимости разнородных данных обеспечат возможность объединения всей совокупности результатов традиционного химического анализа, интегральных оценок и экспертных сведений о состоянии окружающей среды для контроля и прогнозирования экологической ситуации. Полученные научные результаты послужат основой для обеспечения эффективной политики в области охраны окружающей среды и предотвращения чрезвычайных ситуаций, в том числе связанных с новыми наукоемкими производствами, экологические риски которых на сегодняшний день не поддаются точной оценке.

Оценка состояния природно-техногенных объектов носит комплексный характер, основанный на интеграции простых и сложных показателей, результатах измерений химических, биологических, радиационных, физических и др. факторов, обследований, опросов, данных экспертиз. Структура комплексной оценки представляет собой сложную иерархическую многоступенчатую модель. Для построения подобного рода оценок наиболее корректным и общепотребительным является метод анализа иерархий [3].

Рассмотрим задачу использования метода анализа иерархий (МАИ) для получения комплексной оценки состояния сложных природных объектов на основе разнородных данных.

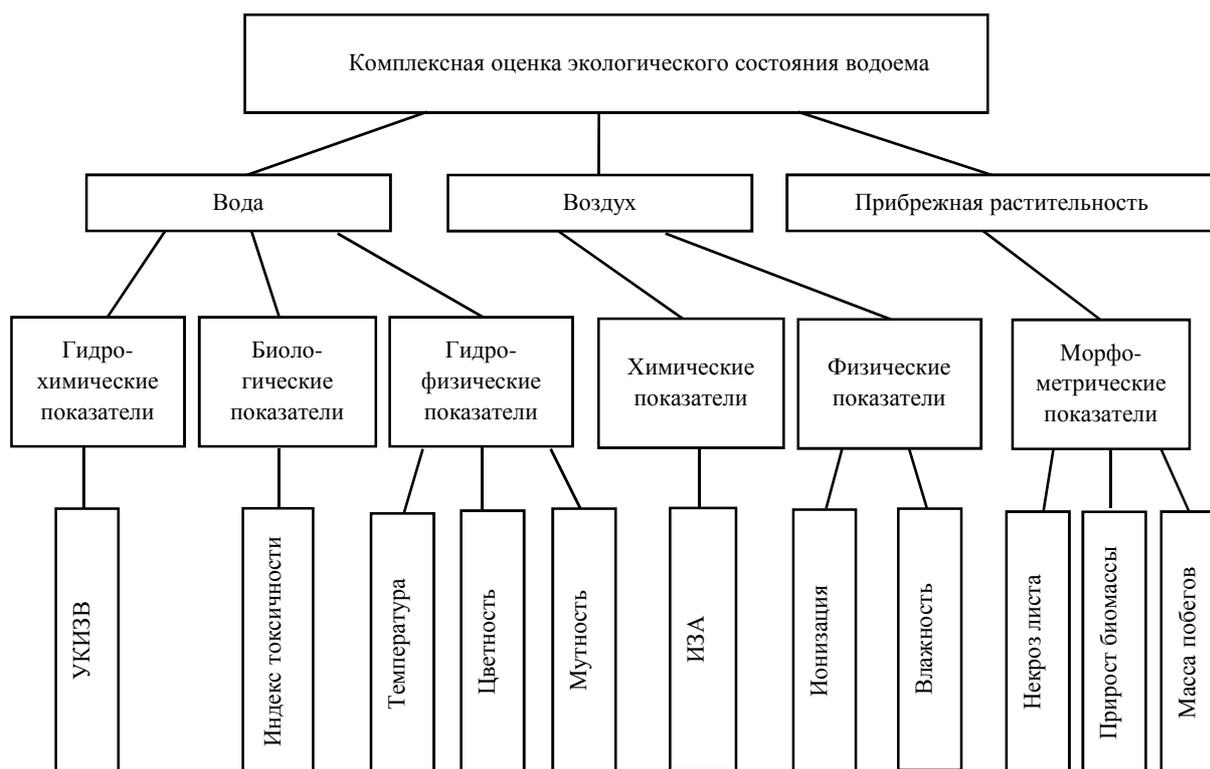
Предварительно уточним постановку задачи. Требуется определить перечень и приоритеты показателей, влияющих на состояние водоема, в прибрежной зоне которого располагаются наукоемкие производства, использующие наноматериалы. Необходимо измерить или рассчитать величины этих показателей и после этого, с учетом их весовых коэффициентов определить комплексную оценку для принятия решения о влиянии деятельности предприятий на окружающую среду.

В качестве объекта исследования была выбрана часть акватории Финского залива и прибрежная полоса в районе п. Стрельна Петродворцового района г. Санкт-Петербурга. В п. Стрельна в настоящее время располагается особая экономическая зона «Нойдорф» на территории которой работает 36 компаний приоритетных направлений (информационные технологии и телекоммуникации; фармацевтика и медицинские технологии; точное приборостроение), использующие наноматериалы.

Алгоритм построения модели комплексной оценки на основе МАИ включает следующие этапы:

1. Определение целевой функции анализа и построение иерархии, начиная с вершины (цели анализа), через промежуточные уровни к самому нижнему уровню показателей оценки.
2. Вычисление весовых коэффициентов показателей для каждого уровня иерархии и проверка согласованности суждений экспертов.
3. Синтез весовых коэффициентов и определение согласованности всей иерархии.
4. Оценка показателей нижнего уровня иерархии и их объединение с учетом весовых коэффициентов.

Этап 1. Анализ задачи и построение иерархии. Построение иерархической структуры оценки осуществляется экспертами в соответствии с их пониманием целей, ограничений (например, финансовых средств) и существующими нормативными требованиями. На основании выполненного ранее анализа факторов, определяющих состояние водоемов [4], сделаны выводы, что на комплексную оценку будут влиять три группы показателей: оценка качества воды, оценка качества воздуха и состояние прибрежной растительности. В свою очередь состояние водной среды также является сложной оценкой, включающей гидрохимические, гидрофизические, биологические показатели качества воды. Состояние возду-



ха определяется химическими и физическими показателями. Состояние прибрежной растительности определяется морфометрическими показателями.

Для химических и биологических показателей в качестве факторов нижнего уровня выбраны интегральные оценки: удельный комбинаторный индекс загрязнения воды (УКИЗВ); индекс загрязнения атмосферы (ИЗА); индекс токсичности, определяемый методом биотестирования. Схема иерархической модели комплексной оценки состояния водоема представлена на рисунке.

Этап 2. Вычисление весовых коэффициентов и проверка согласованности суждений экспертов. После построения иерархической модели комплексной оценки возникает проблема определения важности элементов, находящихся на различных уровнях иерархии.

Для вычисления весовых коэффициентов используем метод парных сравнений как наиболее подходящий для решения поставленной задачи. Метод парных сравнений является методом относительных измерений. Элементы x_i сравниваются попарно в отношении уровня значимости (вклада) в показатель, выраженный элементом h . В результате формируется квадратная матрица $A=[a_{ij}]$ порядка n , называемая матрицей парных

сравнений, где a_{ij} – оценка степени важности элемента x_i над элементом x_j относительно показателя h [3].

Вычисление весов с использованием матрицы парных сравнений осуществляется на основе метода собственного вектора, являющегося наиболее математически обоснованным [5], по формуле

$$w_i = \frac{1}{n} \sqrt{\prod_{l=1}^n a_{il}} ,$$

где n – размерность матрицы; a_{il} – элемент i -й строки матрицы.

Нормирование компонент осуществляется делением каждой компоненты вектора w_i на сумму всех компонент этого вектора:

$$W_i = \frac{w_i}{\sum_j w_j} .$$

Нормированный вектор W соответствует весовым коэффициентам дуг, соединяющих элемент предыдущего уровня со всеми элементами следующего уровня.

В качестве показателя меры согласованности элементов матрицы A в МАИ используется индекс согласованности IC [3]:

$$IC = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1),$$

который характеризует степень нарушения численной (кардинальной, $a_{ij}a_{jk} = a_{ik}$) и транзитивной (порядковой) согласованностей. Наибольшее собственное значение матрицы суждений определяется по формуле

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n W_i \sum_{j=1}^n a_{ij}.$$

Для оценки приемлемости степени согласованности элементов матрицы парных сравнений используется отношение согласованности, задаваемое в виде

$$OC = \frac{IC}{CIC},$$

где CIC – средние значения индекса согласованности, полученные экспериментально обработкой большого количества сгенерированных случайным образом матриц парных сравнений [3].

Выполним расчет весовых коэффициентов показателей иерархии комплексной оценки состояния водоема. Для этого построим необходимые матрицы парных сравнений и для каждой матрицы рассчитаем нормализованный вектор приоритетов (W), максимальное собственное число (λ_{\max}) и отношение согласованности (OC).

Приведем матрицу парных сравнений степени важности групповых показателей качества воды, воздуха и прибрежной растительности и полученные на ее основе весовые коэффициенты влияния на комплексную оценку:

	Вода	Воздух	Растительность	W
Вода	1.00	5	9	0.75
Воздух	0.20	1	3	0.18
Растительность	0.11	0.33	1	0.07

$$\lambda_{\max} = 3.03; IC = 0.02; OC = 0.03$$

В этой матрице элемент a_{12} означает, что качество воды имеет существенное превосходство над состоянием воздушной среды при формировании комплексной оценки, элемент a_{23} означает, что качество воздуха существенно важнее состояния прибрежной растительности. Построенная матрица имеет уровень согласованности ее элементов, равный 3 %, что согласно Т. Саати считается приемлемым [3]. Таким образом, $W^{0.1} = (0.75; 0.18; 0.07)$, $IC^0 = 0.02$.

Рассчитаем весовые коэффициенты влияния показателей второго уровня иерархии на групповые оценки качества воды, воздуха и растительности. Качество воды определяется гидрохимическими (ГХП), биологическими показателями (БП) и гидрофизическими показателями (ГФП). Сравнительная оценка важности показателей качества воды в матричной форме выглядит следующим образом:

	ГХП	БП	ГФП	W
ГХП	1.00	2	5	0.57
БП	0.50	1	4	0.33
ГФП	0.20	0.25	1	0.10

$\lambda_{\max} = 3.04; IC = 0.02; OC = 0.03$

Из матрицы парных сравнений следует, что на оценку качества воды наибольшее влияние оказывают гидрохимические показатели, которые имеют лишь умеренное превосходство над биологическими показателями (связано с выявлением токсичности наноразмерных отходов производства). В свою очередь биологические показатели имеют большое превосходство над гидрофизическими показателями. Значение показателя OC говорит о том, что уровень согласованности ее элементов является достаточным.

Качество воздуха определяется химическими (ХПВ) и физическими показателями (ФПВ), причем химические показатели имеют большое превосходство над физическими (климатом). Матрица парных сравнений размерности 2 свертранзитивна по определению:

	ХПВ	ФПВ	W
ХПВ	1.00	5	0.83
ФПВ	0.20	1	0.17

$\lambda_{\max} = 2.00; IC = 0.00; OC = 0.00$

На основе полученных значений можно сформировать общую матрицу W^{12} весовых коэффициентов параметров второго уровня относительно элементов первого уровня иерархической модели комплексной оценки:

	ГХП	БП	ГФП	ХПВ	ФПВ	МП
Вода	0.57	0.33	0.10	0.00	0.00	0.00
Воздух	0.00	0.00	0.00	0.83	0.17	0.00
Растительность	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00

Вектор индексов согласованностей будет иметь вид

$$IC^1 = (0.02 \ 0.00 \ 0.00).$$

Матрицы парных сравнений факторов нижнего уровня иерархии и их нормализованные векторы весовых коэффициентов приведены далее. Для химических и биологических показателей в качестве факторов нижнего уровня выбраны интегральные оценки, позволяющие по комплексу величин судить о степени загрязнения. Как единственным факторам им присвоены весовые коэффициенты, равные 1.

Из гидрофизических показателей цветность и мутность имеют большое и умеренное превосходство над температурой, в свою очередь цветность имеет слабое превосходство над мутностью:

	Температура	Цветность	Мутность	W
Температура	1.00	0.20	0.33	0.11
Цветность	5.00	1.00	2.00	0.58
Мутность	3.00	0.50	1.00	0.31

$\lambda_{\max} = 3.01; IC = 0.004; OC = 0.01$

Из физических показателей воздуха ионизация имеет умеренное превосходство над влажностью:

	Ионизация	Влажность	W
Ионизация	1.00	3.00	0.75
Влажность	0.33	1.00	0.25

$\lambda_{\max} = 2.00; IC = 0.00; OC = 0.00$

На морфометрические показатели оказывает влияние некроз листа, имеющий существенное превосходство над массой побегов и слабое превосходство над приростом биомассы (табл. 1).

	Некроз листа	Прирост биомассы	Масса побегов	W
Некроз листа	1.00	2.00	4.00	0.56
Прирост биомассы	0.50	1.00	3.00	0.32
Масса побегов	0.25	0.33	1.00	0.12

$\lambda_{\max} = 3.02; IC = 0.008; OC = 0.01$

Как видно, все матрицы парных сравнений имеют достаточную степень согласованности.

Общая матрица W^{23} весовых коэффициентов факторов нижнего уровня иерархии относительно параметров второго уровня иерархической модели комплексной оценки приведена табл. 1.

Вектор индексов согласованностей имеет вид $IC^2 = (0.00 \ 0.00 \ 0.004 \ 0.00 \ 0.00 \ 0.008)$.

Этап 3. Синтез весовых коэффициентов и оценка согласованности иерархии. Коэффициенты значимости синтезируются после того, как для всех элементов иерархии вычислены весовые коэффициенты дочерних показателей.

Цель этого этапа – вычисление весов элементов относительно вышестоящих уровней вплоть до целевой комплексной оценки. Получаемые в результате значения относительных весов показателей нижнего уровня иерархии относительно главной цели комплексной оценки представляют собой интегральные оценки их важности (глобальная значимость). Расчет глобальных весовых коэффициентов осуществляется согласно формуле $V = W^{0.1} \cdot W^{1.2} \cdot W^{2.3}$ [2].

Подставляя в эту формулу соответствующие матрицы собственных векторов [6], получим значения глобальных весовых коэффициентов, приведенных в табл. 2. Таким образом, в рассматриваемой иерархической модели комплексной оценки состояния водоема наиболее важными являются интегральные оценки, основанные на результатах химического анализа водной и воздушной сред и индекс токсичности воды [4], [7].

Оценки по комплексу показателей позволяют наилучшим образом определить степень и характер загрязнения, пути его распространения, дать количественную характеристику влияния деятельности наукоемкого предприятия на окружающую среду.

Таблица 1

	УКИЗВ	Индекс токсичности	Температура	Цветность	Мутность	ИЗА	Ионизация	Влажность	Некроз листа	Прирост биомассы	Масса побегов
ГХП	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
БП	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ГФП	0	0	0.11	0.58	0.31	0	0	0	0	0	0
ХПВ	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
ФПВ	0	0	0	0	0	0	0.75	0.25	0	0	0
МП	0	0	0	0	0	0	0	0	0.56	0.32	0.12

Таблица 2

Показатель	Вес
УКИЗВ	0.428
Индекс токсичности	0.248
Цветность	0.008
Мутность	0.044
Запах	0.023
ИЗА	0.149
Ионизация	0.023
Влажность	0.008
Некроз листа	0.039
Прирост биомассы	0.022
Масса побегов	0.008
Сумма	1.00

Оценка согласованности всей иерархии необходима для определения общей несогласованности информации в построенной иерархической модели вследствие накопления погрешности, связанной с несогласованностью локальных суждений. Согласованность всей иерархии можно найти, перемножая каждый индекс согласованности на глобальный вес элемента иерархии, для которого он был рассчитан, и суммируя полученные числа [3].

Глобальный индекс согласованности в этом случае определяется по формуле

$$GIC = IC^0 + W^{0.1} \cdot IC^1 + W^{0.2} \cdot IC^2. \quad (1)$$

Подставив в формулу (1) соответствующие значения, получим: $GIC = 0.041$.

Аналогичным образом рассчитывается среднее значение глобального индекса согласованности как случайной величины:

$$GCIC = CIC^0 + W^{0.1} \cdot CIC^1 + W^{0.2} \cdot CIC^2. \quad (2)$$

Подставив в формулу (2) соответствующие значения и учитывая, что для матриц парных сравнений размерности 1 и 2 значение CIC равно нулю, получим: $GCIC = 1.099$.

Вычислим глобальный показатель согласованности:

$$GOC = \frac{GIC}{GCIC} = \frac{0.041}{1.099} = 0.037.$$

Поскольку эта величина не превышает 5 %, можно сделать вывод об общей согласованности иерархической модели комплексной оценки.

Этап 4. Определение значений показателей нижнего уровня иерархии и расчет комплексной оценки. В соответствии с исследованиями акватории Финского залива в районе п. Стрельна

[5] были определены значения показателей x_i комплексной оценки h (табл. 3).

Оценка загрязнения дана в принятой нормированной шкале [5]: 0–1 – значительно ниже нормы; 1–2 – ниже нормы; 2–3 – в пределах нормы; 3–4 – выше нормы; 4–5 – значительно выше нормы. Комплексная оценка в этом случае примет значение

$$h = V X = 3.56.$$

Таким образом, экологическая оценка состояния акватории Финского залива в районе п. Стрельна превышает норму, что означает необходимость ограничения воздействия наукоемких производств на окружающую среду на территории свободной экономической зоны.

Таблица 3

Показатель	Оценка
УКИЗВ	4
Индекс токсичности	4
Температура	3
Цветность	3
Мутность	3
ИЗА	2
Ионизация	3
Влажность	3
Некроз листа	4
Прирост биомассы	4
Масса побегов	4

Полученные научные результаты позволят создать интеллектуальную систему предупреждения развития опасных ситуаций, позволяющую реализовать комплексный подход к оценке состояния наукоемких производств с учетом токсикологических особенностей наноматериалов. Создание такой системы обеспечит поддержку принятия управляющих решений при проектировании территорий, квотировании нагрузки на природные объекты, взаимодействию и координации действий по рациональному природопользованию, охране природных ресурсов и предотвращению ЧС. Передовые инструменты и современные технологии оценки экологической безопасности нанопроизводств могут быть использованы при анализе состояния объектов Минприроды, в рамках реализации программ международного сотрудничества IEEE, российско-финляндско-эстонского сотрудничества, выполнения плана действий ХЕЛКОМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жолдакова, З. И., Сеницына О. О., Харчевникова Н. В. Общие и специфические аспекты токсических свойств наночастиц и других химических веществ с позиций классической токсикологии // Гигиена и санитария. 2008. № 6. С. 12–16.

2. Онищенко Г. Г. Обеспечение санитарно-эпидемиологического благополучия населения в условиях расширенного использования наноматериалов и нанотехнологий // Гигиена и санитария. 2010. № 2. С. 4–7.

3. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий / пер. с англ. Р. Г. Вачнадзе. М.: Радио и связь, 1993.

4. Куракина Н. И. Геоинформационная система мониторинга, оперативного контроля и пространственного загрязнения Финского залива // День Балтийского моря: сб. материалов XVI Междунар. эколог. фор., СПб., 20–22 марта 2015 г. СПб.: Человек, 2015. С. 157–159.

5. Кернс К., Саати Т. Аналитическое планирование. Организация систем. М.: Радио и связь, 1991.

6. Куракина Н. И. Геоинформационные системы в экологии. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015.

7. Куракина Н. И., Молнар М. О повышении качества питьевого водоснабжения в Северо-Западном регионе России // Метеорология и гидрология. 2014. № 8. С. 44–54.

N. I. Kurakina

Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

COMPLEX ASSESSMENT OF THE ECOLOGICAL SITUATION IN THE CONDITIONS OF NANOTECHNOLOGIES DEVELOPMENT

Questions of an assessment ecological situation development in the locations of nanoproductions are considered. The algorithm of creation complex assessment model of natural and technogenic objects based on a method of the hierarchies analysis of is offered. The algorithm allows to consider target functions of the analysis, to calculate weight coefficients of the importance of hierarchy indicators, to define reliability of the received assessment.

Complex assessment, hierarchical model, method of the analysis of hierarchies, nanomaterials, ecological safety
