



УДК: 621.039

DOI: 10.26277/SECNRS.2020.98.4.004

© 2020. Все права защищены.

ПРИМЕНЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ПРИ ВЫБОРЕ ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ОБРАЩЕНИЯ С РАДИОАКТИВНЫМИ ОТХОДАМИ

Бочкарёв В. В.* (bochkarev@secnrs.ru),
Бриллиантов Б. Д.* (brilliantov@secnrs.ru),
Крянев А. В.**, д. ф.-м. н. (avkryanov@mephi.ru)

Статья поступила в редакцию 9 ноября 2020 г.

Аннотация

Рассмотрены проблема выбора варианта обращения с радиоактивными отходами и применение метода многофакторного анализа при выборе оптимального варианта на множестве альтернатив. Приведенный метод позволяет решить сложную задачу по определению оптимального сценария обращения с радиоактивными отходами с помощью сравнения факторов, характеризующих возможные сценарии, для ранжирования их по важности и расчета комплексного показателя для каждого рассматриваемого варианта. Результатом применения данного метода является количественная оценка эффективности для каждого из рассматриваемых вариантов обращения с радиоактивными отходами с максимальным значением комплексного показателя для выбора оптимального варианта.

► **Ключевые слова:** обращение с РАО, экспертные оценки, схема Саати, метод многофакторного выбора оптимального варианта, комплексный показатель, оптимальный вариант.

* Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва, Российская Федерация.

** Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Российская Федерация.

SELECTION OF OPTIMAL OPTION FOR RADIOACTIVE WASTE MANAGEMENT USING MATHEMATICAL METHODS

Bochkarev V. V.*,
Brilliantov B. D.*,
Kryanev A. V.**, D. Sc.

Article is received on November 9, 2020

Abstract

The problem of selecting an option for radioactive waste management is discussed. To optimize the selecting process the multivariate analysis method was used. The above method allows us to solve the difficult task of determining the optimal scenario for radioactive waste management by comparing particular indicators characterizing possible scenarios, to rank them by importance and calculate a complex indicator for each option considered. The result of applying this method is a quantitative assessment of the effectiveness for each of the considered options for radioactive waste management with the maximum value of the complex indicator for the best option.

► **Keywords:** *radioactive waste management, expert estimates, Saati scheme, multifactor method for the optimal option selection, a comprehensive indicator, the best option.*

* Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety, Moscow, Russian Federation.

** National Research Nuclear University “MEPhI”, Moscow, Russian Federation.

Введение

Современное состояние и перспективы развития Единой государственной системы обращения с радиоактивными отходами (ЕГС РАО) в Российской Федерации, сложившаяся ситуация с накопленными радиоактивными отходами (РАО) и необходимость обеспечения приемлемого уровня безопасности обращения как с накопленными, так и образующимися РАО с учетом экономических и социальных факторов, а также существующее многообразие категорий и классов РАО, мест их размещения дают возможность формировать различные варианты обращения с РАО, что, в свою очередь, ставит задачу по выбору оптимального варианта. Подобная задача характерна для всех крупных ядерных держав.

В этой связи задача обеспечения, с одной стороны, радиационной безопасности, а с другой – экономической эффективности при обращении с РАО, рассматривается во всем мире как одна из приоритетных и принципиально важных задач для уменьшения затрат и дозовых нагрузок как на персонал, так и на население и для ограничения поступления радионуклидов в окружающую среду [1].

Таким образом, при определении стратегии по обращению с РАО важнейшим критерием является соблюдение максимального уровня безопасности и минимизация возможного ущерба для населения и окружающей среды при сохранении разумного уровня финансовых и материальных затрат, а по возможности и уменьшения их. Кроме того, на выбор стратегии могут существенно влиять и другие факторы:

- технические (уровень развития технологий, наличие квалифицированных специалистов и реального опыта проектирования, степень проработки ключевых технических решений);
 - экологические (совокупный вред окружающей среде);
 - радиационные (коллективная и индивидуальная дозы);
 - социально-политические (соответствие международным практикам и отношение населения к рассматриваемым вариантам);
 - временные (длительность сроков реализации и риски их срыва),
- а также факторы, важные для лиц, принимающих решение, в каждой конкретной ситуации.

Таким образом, в современных условиях планирование обращения с РАО, основанное на выработке и обосновании эффективности

управленческих решений по выбору стратегии обращения с РАО, определению планируемых организационных и технических мероприятий, последовательности и сроков их реализации, применяемых при этом технологий и технических средств, требует использования математических методов и алгоритмов.

Математические методы выбора оптимального варианта (в различных вариациях) давно используются для поддержки принятия управленческих решений в различных областях, в том числе связанных со сложными техническими системами и процессами [2–5]. Применялись такие методы и при принятии решений в области использования атомной энергии [6–10]. Метод многофакторного выбора оптимального варианта на конечном множестве альтернатив был использован для обоснования выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). На основе этого опыта было разработано и утверждено руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по обоснованию выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии» (РБ-153-18) [11].

Каждый из возможных вариантов обращения с РАО оценивается множеством факторов, что делает выбор оптимального варианта нетривиальной задачей. При этом применение метода, положенного в основу [11] и вполне подходящего для решения задачи по выбору варианта вывода из эксплуатации ОИАЭ, характеризующегося достаточно небольшим набором альтернатив, в случае выбора стратегии обращения с РАО часто дает очень близкие оценки, что затрудняет окончательный выбор, делает его неочевидным.

По мере накопления знаний и опыта применения математических методов выбора оптимального варианта для задач, не связанных с выводом из эксплуатации, все более насущной становилась необходимость внесения ряда изменений в примененный в [11] метод многофакторного выбора оптимального варианта на конечном множестве альтернатив, направленных на повышение его универсальности, облегчения адаптации к новым практическим задачам.

В настоящей статье представлен разработанный авторами усовершенствованный метод многофакторного выбора оптимального варианта, адаптированный к решению задач при обращении с РАО, позволяющий получать наглядную оценку эффективности рассматриваемых вариантов с учетом их качественных и количественных характеристик. Применяемые подходы (числовая интерпретация

качественных факторов, нормирование значения факторов, определение коэффициентов приоритета факторов, применение различных способов расчета для получения коэффициентов приоритета из матрицы Саати [2–5], различающихся по расчетной сложности и точности результатов) позволяют в ходе формирования и сопоставления различных вариантов обращения с РАО на основе оценок, в том числе экспертных, факторов, характеризующих каждый из рассматриваемых вариантов, проводить их свертку и приведение к комплексному показателю. Значение комплексного показателя служит мерой оптимальности рассматриваемого варианта и предназначено для учета лицом, принимающим решения, при выборе варианта обращения с РАО.

Метод многофакторного выбора оптимального варианта на конечном множестве альтернатив

Для поддержки принятия решений при обращении с РАО используется метод многофакторного выбора на конечном множестве альтернатив, являющийся усовершенствованной версией метода, представленного в [11].

Под факторами будем понимать количественные (или качественные) показатели оцениваемого варианта обращения с РАО, значения которых получены на основе оценок характеристик соответствующих процессов.

Для каждого рассматриваемого варианта определяется количественное значение каждого фактора,

в том числе и для факторов, имеющих изначально качественный характер. При этом, если значение фактора одинаково для всех вариантов решений, то он исключается из решения.

Рассматриваемая схема сравнения вариантов и выбора оптимального из них реализуется при следующей последовательности действий:

- выявление и формулировка вариантов решений, подлежащих оцениванию;
- интерпретация качественных факторов;
- нормализация факторов;
- ранжирование факторов для определения весовых коэффициентов;
- оценка решений и предварительный выбор оптимального решения;
- анализ чувствительности для полученного результата;
- окончательный выбор оптимального решения.

Числовая интерпретация качественных факторов

Для факторов, значения которых имеют качественный характер, следует провести экспертную оценку по числовой шкале от 0 до 100, где максимальным (равным 100) становится значение, которое, по мнению эксперта и/или лица, принимающего решение, является самым благоприятным из всех принимаемых данным фактором. Пример подобного подхода представлен в табл. 1.

Таблица 1

Пример интерпретации качественного фактора

Гидрологическая изученность рассматриваемого района размещения	Оценка
Высокая	100
Средняя	70
Низкая	40
Отсутствует	10

Нормирование значений факторов

При нормировании значений факторов осуществляется приведение факторов к безразмерной форме K_{ij}^H .

Для факторов, подлежащих максимизации, используется формула:

$$K_{ij}^H = \frac{K_{ij} - K_{i,min}}{K_{i,max} - K_{i,min}}, i = 1, \dots, n_1, j = 1, \dots, m. \quad (1)$$

Для факторов, подлежащих минимизации, используется формула:

$$K_{ij}^H = \frac{K_{i,max} - K_{ij}}{K_{i,max} - K_{i,min}}, i = 1, \dots, n_2, j = 1, \dots, m. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2):

m – число рассматриваемых вариантов;

n_1 – число факторов, подлежащих максимизации;



n_2 – число факторов, подлежащих минимизации ($n_1 + n_2 = n$);

$K_{i,max}$ – максимальное значение i -го фактора среди всех m вариантов;

$K_{i,min}$ – минимальное значение i -го фактора среди всех m вариантов;

K_{ij} – ненормализованное (исходное) значение i -го фактора для j -го варианта.

Определение коэффициентов приоритета факторов

Ниже приведены методы получения коэффициентов приоритета: для малого количества факторов или более грубой оценки и для случая, когда количество факторов велико или требуется более точная оценка.

1) Прямое ранжирование факторов

Все факторы ранжируются от самых важных (значимых) до тех, значения которых наименее, по мнению эксперта (или лица, принимающего решение), влияют на выбор решения. Факторы одного уровня важности (значимости) могут получить одинаковый ранг. Далее задается значение коэффициента приоритета \bar{W}_i в 100 % самому важному (значимому) фактору, а для остальных факторов значения задаются в процентах, отображающих во сколько раз они (остальные факторы) менее значимы для данной задачи. Пример прямого ранжирования факторов представлен в табл. 2.

Далее полученные значения следует нормировать на сумму, равную единице, по формуле:

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{W}_j}, i = 1 \dots n, \tag{3}$$

где:

n – число факторов;

\bar{W}_i – коэффициент приоритета ранга i -го фактора до нормирования на сумму, равную единице;

W_i – коэффициент приоритета i -го фактора.

Полученные значения W_i используются в формуле (13) для ранжирования вариантов и определения оптимального варианта.

2) Определение коэффициентов приоритета с помощью схемы Саати

Составляется квадратная матрица V размером n (число факторов, отобранных для сопоставления вариантов) для попарного сравнения значимости факторов:

$$V = \begin{pmatrix} 1 & V_{12} & V_{13} & \dots & V_{1n} \\ 1/V_{12} & 1 & V_{23} & \dots & V_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/V_{1n} & 1/V_{2n} & 1/V_{3n} & \dots & 1 \end{pmatrix}. \tag{4}$$

В каждую ячейку (элемент V_{ij} матрицы V) над главной диагональю матрицы вносится числовое значение отношения приоритета (значимости) i -го фактора над j -м фактором, то есть если $V_{34} = 3$, то это означает, что фактор с номером 3 в три раза значимее, чем фактор с номером 4. Элементы главной диагонали $V_{ii}, i = 1, \dots, n$ заполняются единицами. В табл. 3 приведен пример для трех факторов (число строк и столбцов для заполнения таблицы равно общему числу всех учитываемых факторов n).

Таблица 2

Пример прямого ранжирования факторов

Факторы	\bar{W} – Значимость, %
Затраты на реализацию сценария	100
Риск срыва сроков	90
...	...
Необходимость проведения дополнительных исследований	50
...	...

Таблица 3

Пример заполнения неполной таблицы сравнения трех факторов

Фактор	1. Стоимость реализации варианта	2. Время реализации варианта	3. Индивидуальная доза
1. Стоимость реализации варианта	1	2	0,5
2. Время реализации варианта	0,5	1	0,8
3. Индивидуальная доза	2	1,25	1

Число 2 в позиции (1, 2) матрицы означает, что фактор «Стоимость реализации варианта» оценивается как в 2 раза более значимый по сравнению с фактором «Время реализации варианта». Число 0,5 в позиции (1, 3) матрицы означает, что фактор «Стоимость реализации варианта» в 0,5 раза более значим (или в половину менее значим) по сравнению с фактором «Индивидуальная доза».

Для определения значений коэффициентов приоритета W_i решается задача на максимальное собственное значение матрицы Саати V :

$$Vx_{max} = \lambda_{max} \cdot x_{max}, \quad (5)$$

где:

$\vec{x}_{max} = (x_{1,max}, \dots, x_{n,max})^T$ – собственный вектор, соответствующий максимальному собственному значению матрицы V .

Известно, что все компоненты вектора \vec{x}_{max} – положительные, а $\lambda_{max} \geq n$ [3].

Искомые коэффициенты приоритета $W_i, i = 1, \dots, n$ определяются после операции нормирования:

$$W_i = \frac{x_{i,max}}{\sum_{j=1}^n x_{j,max}}, i = 1, \dots, n. \quad (6)$$

Для нахождения приближенных значений коэффициентов приоритета факторов в качестве альтернативы решению задачи на максимальное собственное значение матрицы можно использовать способы, приведенные ниже.

А) Способ, рекомендуемый в настоящее время для выбора варианта вывода из эксплуатации ОИАЭ [11]. После заполнения ячеек матрицы V (элементов V_{ij}) подсчитываются уровни приоритета каждого фактора K_i путем последовательного суммирования элементов строк матрицы V по следующей формуле:

$$\bar{W}_i = \sum_{j=1}^n V_{ij}. \quad (7)$$

Далее определяется суммарный уровень приоритета всех факторов:

$$\bar{W} = \sum_{i=1}^n \bar{W}_i. \quad (8)$$

Затем определяются коэффициенты приоритета факторов:

$$W_i = \frac{\bar{W}_i}{\bar{W}}. \quad (9)$$

Б) Второй способ заключается в использовании нормированных средних геометрических

элементов строк матрицы Саати V и обладает большей точностью:

$$W_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n V_{ij}}}{\sum_{k=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n V_{kj}}}. \quad (10)$$

Стоит отметить, что для всех представленных методов решения о ранжировании или сравнении принимаются на экспертном уровне.

Если привлекается больше одного эксперта и их оценки разнятся, то следует использовать средние арифметические оценок экспертов для каждого элемента матриц Саати.

Например, в случае оценки от L экспертов имеем L заполненных матриц Саати:

$$V^{(l)} = \begin{pmatrix} 1 & V_{12}^{(l)} & V_{13}^{(l)} & \dots & V_{1n}^{(l)} \\ 1/V_{12}^{(l)} & 1 & V_{23}^{(l)} & \dots & V_{2n}^{(l)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1/V_{1n}^{(l)} & 1/V_{2n}^{(l)} & 1/V_{3n}^{(l)} & \dots & 1 \end{pmatrix}, l = 1, \dots, L. \quad (11)$$

Поэтому следует проводить усреднение элементов верхней треугольной части матрицы:

$$V_{ij} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L V_{ij}^{(l)}, i < j, i = 1, \dots, n, j = i + 1, \dots, n. \quad (12)$$

Тем самым сформируется матрица Саати V с усредненными элементами V_{ij} , определяемыми формулой (12).

Далее, после получения матрицы с усредненными элементами, следует действовать по второй схеме – с одной матрицей Саати V .

Оценка вариантов и предварительный выбор оптимального варианта

После определения числовых значений коэффициентов приоритета $W_i, i = 1, \dots, n$ частных показателей $K_{ij}^H, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, m$ для каждого из m вариантов захоронения радиоактивных веществ по формуле (13) подсчитываются комплексные показатели:

$$K_j = \sum_{i=1}^n W_i \cdot K_{ij}^H, j = 1, \dots, m, \quad (13)$$

где:

K_{ij}^H – нормализованное значение i -го фактора для j -го варианта;

W_i – коэффициент приоритета i -го фактора;

m – число рассматриваемых вариантов;

n – число факторов, отобранных для сопоставления вариантов.

Предварительным оптимальным вариантом является тот, для которого комплексный показатель (средневзвешенное значение суммы

нормализованных значений факторов с учетом коэффициентов приоритета) максимален:

$$K_{\text{опт}} = \max_j \{K_j\}, j = 1, \dots, m. \quad (14)$$

Вариант с большим значением комплексного показателя считается наиболее предпочтительным для реализации.

Таким образом, получаем предварительный результат о выборе оптимального варианта принятия решения.

Анализ чувствительности для полученного результата и окончательный выбор оптимального варианта

С целью определения устойчивости результатов проводится анализ чувствительности предварительно выбранного варианта.

Так как процедура выбора оптимального варианта основывается на количественных значениях факторов, полученных из оценок показателей, которые имеют неопределенности, то необходимо исследование предварительного оптимального решения на устойчивость. Исследование заключается в повторном повторении процедуры выбора оптимального варианта для крайних значений каждого из интервалов неопределенности оценок. Если для какой-либо оценки произойдет изменение решения, то рекомендуется провести дополнительные исследования по уточнению данной оценки. В противном случае, неопределенность показателя, на основе оценки которого проводилась указанная процедура, критической не является и дальнейшие исследования с целью уточнения его оценки не требуются.

Итерационный характер процедуры и необходимость применения уточняющих исследований оценок параметров указывает на возможность и желательность автоматизации расчетов из рассмотренной методики выбора оптимального варианта решения из множества альтернатив.

Пример применения методики выбора оптимального варианта на основе многофакторного анализа

Ниже приведен пример применения описанного в данной статье метода для случая выбора между шестью вариантами на основе значения четырех факторов.

Варианты обращения с РАО для удобства записи далее будем обозначать как А1...А6. Под

вариантами обращения могут пониматься различные альтернативные сценарии по обращению с РАО, например, рассматриваемые на этапе проектирования какого-либо ОИАЭ: хранение в собственных хранилищах на срок промежуточного хранения, передача на захоронение до истечения срока промежуточного хранения, передача для хранения специализированной организации без сооружения собственных хранилищ и др.

Рассмотрим следующий набор влияющих на решение факторов: стоимость (млн. руб.), длительность (год), суммарная дозовая нагрузка на персонал по всем путям облучения (индивидуальная доза, мкЗв/год) и суммарная дозовая нагрузка на население (индивидуальная доза, мкЗв/год). Далее будем обозначать их для удобства записи как Ф1, Ф2, Ф3 и Ф4. Все четыре фактора подлежат минимизации.

Замечание: в реальной задаче количество факторов может превышать несколько десятков, здесь же, для наглядности примера, ограничимся четырьмя.

В табл. 4 представлены входные данные для рассматриваемого примера – значения каждого из факторов в случае реализации каждого из вариантов.

Во всех рассматриваемых вариантах дозовые нагрузки ниже нормативных значений. Варианты с превышением нормативных значений неприемлемы и отбрасываются до начала решения задачи.

В табл. 5 представлены входные данные после нормирования значений факторов по формулам (1) или (2).

Для наглядности зависимости результата от ранжирования факторов по важности рассмотрим два случая расстановки приоритетов.

Пусть в первом случае (табл. 6) лицо, принимающее решение, оценило факторы так, что снижение стоимости имеет основной приоритет, а длительность реализации варианта должна влиять на выбор в последнюю очередь.

Для нахождения приближенных значений коэффициентов приоритета (в данном случае точность приближенного решения достаточна для явного выделения максимального комплексного показателя) воспользуемся формулами (7)–(9). Результаты представлены в табл. 7.

Затем по формуле (13) находим комплексные показатели для каждого варианта. Результат представлен в табл. 8. Графическое представление результатов приведено на рис. 1.

Максимальное значение комплексный показатель достигает для варианта А2, то есть при

приоритете стоимости и неважности временных затрат наиболее эффективным будет вариант А2.

Во втором случае лицо, принимающее решения, может поставить высший приоритет снижению временных затрат. В таком случае матрица Саати может иметь вид, представленный в табл. 9.

Для нахождения приближенных значений коэффициентов приоритета также воспользуемся формулами (7)–(9). Результаты представлены в табл. 10.

Затем по формуле (13) находим комплексные показатели для каждого варианта. Результат представлен в табл. 11. Графическое представление результата приведено на рис. 2.

Максимальное значение комплексный показатель достигает для варианта А5, то есть при приоритете снижения временных затрат наиболее эффективным будет вариант А5.

Таблица 4

Значения факторов для каждого варианта

Факторы	Варианты					
	А1	А2	А3	А4	А5	А6
Ф1	50 000	56 000	75 000	80 000	90 000	105 000
Ф2	110	100	90	80	70	60
Ф3	7 433	3 018	6 330	1 915	811	4 674
Ф4	0,047	0,014	0,08	0,012	0,007	0,034

Таблица 5

Нормированные значения факторов для каждого варианта

Факторы	Варианты					
	А1	А2	А3	А4	А5	А6
Ф1	1	0,89(09)	0,(54)	0,(45)	0,(27)	0
Ф2	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1
Ф3	0	0,6(6)	0,16(6)	0,83(3)	1	0,416(6)
Ф4	0,(45)	0,909091	0	0,931(18)	1	0,63(63)

Таблица 6

Матрица попарного сравнения значимости факторов для первого случая

Факторы	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4
Ф1	1	4	2	4
Ф2	0,25	1	0,5	1
Ф3	0,5	2	1	1
Ф4	0,25	1	1	1

Таблица 7

Приоритет факторов

Факторы	Уровень приоритета	Коэффициент приоритета
Ф1	11	0,511628
Ф2	2,75	0,127907
Ф3	4,5	0,209302
Ф4	3,25	0,151163

Таблица 8

Комплексный показатель

Варианты	Комплексный показатель	Нормированный комплексный показатель
A1	0,580338	0,601797
A2	0,758351	1
A3	0,365116	0,120359
A4	0,624577	0,700757
A5	0,602326	0,650981
A6	0,311311	0

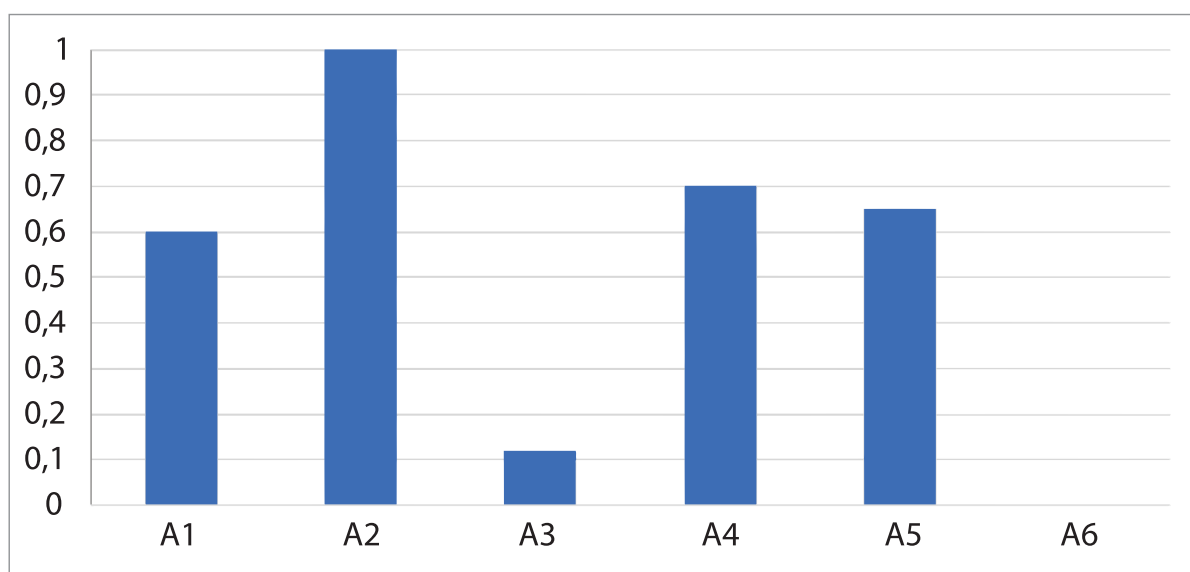


Рис. 1. Нормированное значение комплексного показателя для первого случая

Таблица 9

Матрица попарного сравнения значимости факторов для второго случая

	Ф1	Ф2	Ф3	Ф4
Ф1	1	0,25	0,5	0,5
Ф2	4	1	1,6	2
Ф3	2	0,625	1	1
Ф4	2	0,5	1	1

Таблица 10

Приоритет факторов

Факторы	Уровень приоритета	Коэффициент приоритета
Ф1	2,25	0,058824
Ф2	8,6	0,058824
Ф3	4,625	0,332481
Ф4	4,5	0,549872

Таблица 11

Комплексный показатель

Варианты	Комплексный показатель	Нормированный комплексный показатель
A1	0,215042	0
A2	0,545621	0,535846
A3	0,272246	0,092724
A4	0,712394	0,806173
A5	0,831972	1
A6	0,670374	0,738061

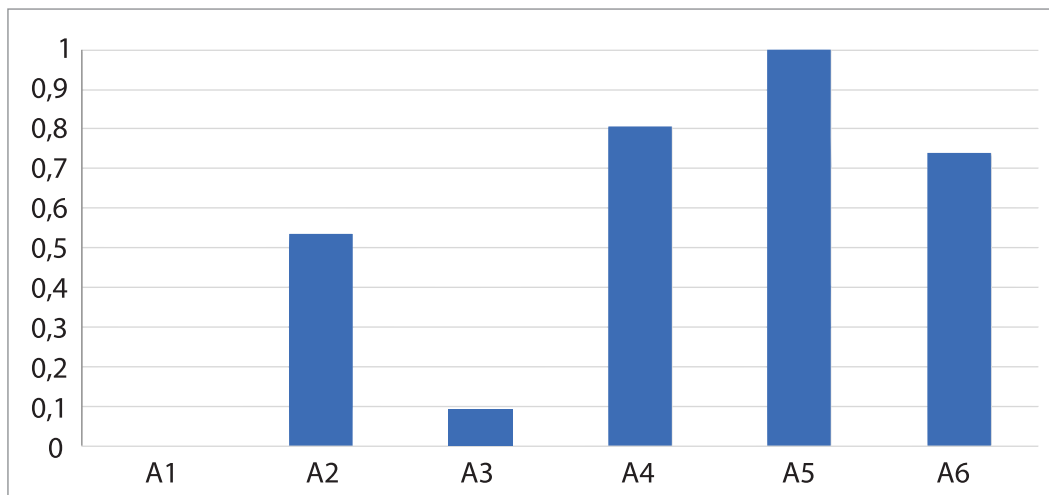


Рис. 2. Нормированное значение комплексного показателя для второго случая

Заключение

Рассмотренный в статье усовершенствованный метод многофакторного выбора оптимального варианта на конечном множестве альтернатив обладает рядом особенностей, позволяющих адаптировать его к решению новых практических задач. В частности, в нем в полной мере реализован учет качественных оценок, учтен случай нескольких несовпадающих оценок приоритетов и приведены варианты для получения быстрой (приближенной) оценки, что позволяет в ряде случаев избегать лишних временных затрат на принятие решения. Кроме того, рассмотренный метод позволяет учесть экспертные оценки приоритетов факторов

для расчета комплексного показателя эффективности различных вариантов обращения с РАО и может быть использован для:

- оценки вариантов обращения с РАО;
- сопоставления вариантов реализации различных сценариев обращения с РАО по большому набору факторов, носящих как количественный, так и качественный характер, и задаваемых в процессе решения задачи;
- выбора наиболее предпочтительного варианта обращения с РАО, в том числе, в условиях неопределенности и риска и с учетом специфики расстановки приоритетов факторов;
- детального обоснования выбора варианта обращения с РАО.

Литература

1. Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации: Федер. закон от 11 июля 2011 г. № 190-ФЗ.
2. Мушик Э., Мюллер П. Методы принятия технических решений. – М.: Мир, 1990. – 552 с.
3. Саати Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М.: Радио и связь, 1993. – 320 с.
4. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Анализ, синтез, планирование решений в экономике. – М.: Финансы и статистика, 2000. – 368 с.

5. Андрейчиков А. В., Андрейчикова О. Н. Системный анализ стратегических решений в инноватике. Математические, эвристические и интеллектуальные методы системного анализа и синтеза инноваций. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 304 с.
6. Емец П. Е., Ковалевич О. М., Крянев А. В., Шарафутдинов Р. Б. Математические модели расчета инвестиционной эффективности вывода из эксплуатации ЯРОО. Препринт МИФИ 002-2007. М.: МИФИ, 2007, 27 с.
7. Емец П. Е., Ковалевич О. М., Крянев А. В., Неретин В. А., Шарафутдинов Р. Б. Системный подход при финансировании мероприятий по выводу из эксплуатации ЯРОО, классифицируемых в зависимости от категории их ЯРО. Препринт МИФИ 005-2007. М.: МИФИ, 2007, 23 с.
8. Емец П. Е., Крянев А. В. Методика оценки экономической эффективности вывода из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов // Бюллетень по атомной энергии. 2008. № 11. С. 4–7.
9. Емец П. Е., Крянев А. В. Инвестиционная эффективность вывода из эксплуатации ядерно и радиационно опасных объектов (ЯРОО) // Ядерная и радиационная безопасность. 2011. № 1 (59). С. 10–19.
10. Бочкарёв В. В., Крянев А. В., Ханбикова Д. Т. Ранжирование ядерно и радиационно опасных объектов, эксплуатация которых прекращена / Информационно-телекоммуникационные технологии и математическое моделирование высокотехнологичных систем: материалы Всероссийской конференции с международным участием. – М.: РУДН, 2014. С. 195–197.
11. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендации по обоснованию выбора варианта вывода из эксплуатации объектов использования атомной энергии. РБ-153-18: утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 29 декабря 2018 г. № 666. – 22 с.

References

1. Ob obrashhenii s radioaktivny`mi otkhodami i o vnesenii izmenenij v ot del`nye zakonodatel`nye akty Rossijskoj Federacii: Feder. zakon ot 11 iyulya 2011 g. № 190-FZ [On the Management of the Radioactive Waste and on the Amendment of Some Legal Acts of the Russian Federation. Federal Law no. 190-FZ of July 11, 2011].
2. Mushik E., Muller P. (1990). Metody prinyatiya tekhnicheskikh reshenij [Technical Decision-Making Techniques]. Moscow: Mir [in Russian].
3. Saati T. L. (1993). Prinyatie reshenij. Metod analiza ierarkhij [Decision-Making. Hierarchy Analysis Technique]. Moscow: Radio i svyaz [in Russian].
4. Andreichikov A. V., Andreichikova O. N. (2000). Analiz, sintez, planirovanie reshenij v ekonomike [Analysis, Synthesis, and Planning of Decisions in Economics]. Moscow: Finansy i statistika [in Russian].
5. Andreichikov A. V., Andreichikova O. N. (2013). Sistemnyj analiz strategicheskikh reshenij v innovatike. Matematicheskie, evristicheskie i intellektual`nye metody sistemnogo analiza i sinteza innovacij [System Analysis of Strategic Decisions for Innovations. Mathematical, Heuristic and Knowledge-Based Methods of System Analysis and Synthesis for Innovations]. Moscow: Knizhnyj dom “LIBROKOM” [in Russian].
6. Yemets P. E., Kovalevich O. M., Kryanev A. V., Sharafutdinov R. B. (2007). Matematicheskie modeli rascheta investicionnoj effektivnosti vyvoda iz ekspluatatsii YaROO. Preprint MIFI 002-2007 [Mathematical Models for Calculating Effectiveness of Investments in Decommissioning of Hazardous Nuclear and Radiological Facilities. MEPHI Preprint 002-2007]. Moscow: MIFI [in Russian].
7. Yemets P. E., Kovalevich O. M., Kryanev A. V., Neretin V. A., Sharafutdinov R. B. (2007). Sistemnyj podkhod pri finansirovanii meropriyatij po vyvodu iz ekspluatatsii YaROO, klassificiruemykh v zavisimosti ot kategorii ikh YaRO. Preprint MIFI 005-2007 [Systems Approach to Funding Decommissioning Activities for Hazardous Nuclear and Radiological Facilities Categorised Based on their Nuclear and Radiological Hazard. MEPHI Preprint 005-2007.] Moscow: MIFI [in Russian].
8. Yemets P. E., Kryanev A. V. (2008). Metodika ocenki ekonomicheskoy effektivnosti vyvoda iz ekspluatatsii yaderno i radiacionno opasnykh ob`ektov [Cost Effectiveness Analysis Methodology for Decommissioning of Hazardous Nuclear and Radiological Facilities]. Byulleten po atomnoj energii – Atomic Energy Bulletin, no. 11, pp. 4–7 [in Russian].
9. Yemets P. E., Kryanev A. V. (2011). Investicionnaya effektivnost` vyvoda iz ekspluatatsii yaderno i radiacionno opasnykh ob`ektov (YaROO) [Effectiveness of Investments in Decommissioning of Hazardous

Nuclear and Radiological Facilities (HNRF)]. *Yadernaya i radiacionnaya bezopasnost'* – Nuclear and Radiation Safety, no. 1 (59), pp.10–19 [in Russian].

10. Bochkarev V. V., Kryanev A. V., Khanbikova D. T. (2014). Ranzhirovanie yaderno i radiacionno-opasnykh ob'ektov, ekspluatatsiya kotorykh prekrashhena. Informacionno-telekommunikacionnye tekhnologii i matematicheskoe modelirovanie vysokotekhnologichnykh system: materialy Vserossijskoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem [Ranking of Permanently Shutdown Hazardous Nuclear and Radiological Facilities. Information and Telecommunication Technologies, and Mathematical Modeling of High-Tech Systems]. Proceedings of the Russia-wide Conference with International Participation (pp. 195–197). Moscow, RUDN [in Russian].

11. Rukovodstvo po bezopasnosti pri ispol'zovanii atomnoj energii. Rekomendacii po obosnovaniyu vybora varianta vyvoda iz ekspluatatsii ob'ektov ispol'zovaniya atomnoj energii. RB-153-18: utv. prikazom Federal'noj sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 29 dekabrya 2018 g. № 666 [Nuclear Safety Guide. Guidance on Justifying the Choice of the Decommissioning Option for Nuclear Facility. RB-153-18. Endorsed by the Order of the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service no. 666 of December 29, 2018].

Сведения об авторах

Бочкарёв Валерий Вячеславович, начальник отдела радиационной безопасности, Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Бриллиантов Борис Дмитриевич, младший научный сотрудник отдела радиационной безопасности, Федеральное бюджетное учреждение «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» (107140, г. Москва, ул. Малая Красносельская, д. 2/8, корп. 5).

Крянев Александр Витальевич, профессор кафедры прикладной математики «МИФИ», Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (115409, г. Москва, Каширское ш., д. 31).

Для цитирования

Бочкарёв В. В., Бриллиантов Б. Д., Крянев А. В. Применение математических методов при выборе оптимального варианта обращения с радиоактивными отходами // *Ядерная и радиационная безопасность*. 2020. № 4 (98). С. 35–46. DOI: 10.26277/SECNRS.2020.98.4.004.

Author credentials

Bochkarev Valeriy Vyacheslavovich, Head of Radiation Safety Division, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8 building 5, Malaya Krasnoselskaya street, Moscow, 107140), e-mail: bochkarev@secnrs.ru.

Brilliantov Boris Dmitrievich, Junior Researcher at Radiation Safety Division, Scientific and Engineering Centre for Nuclear and Radiation Safety (2/8 building 5, Malaya Krasnoselskaya street, Moscow, 107140), e-mail: brilliantov@secnrs.ru.

Kryanev Alexander Vitalievich, Professor of Applied Mathematics at “MEPhI”, National Research Nuclear University “MEPhI” (31 Kashirskoe highway, Moscow, 115409), e-mail: avkryanev@mephi.ru.

For citation

Bochkarev V. V., Brilliantov B. D., Kryanev A. V. Selection of Optimal Option for Radioactive Waste Management Using Mathematical Methods. *Nuclear and Radiation Safety*, 2020, no. 4 (98), pp. 35–46. DOI: 10.26277/SECNRS.2020.98.4.004 [in Russian].

