

Оптимизация риска при утилизации АПЛ

Рылов М.И., Генеральный директор ООО «Межотраслевой экспертно-сертификационный, научно-технический и контрольный центр ядерной и радиационной безопасности (РЭСцентр)», Санкт-Петербург

Камынов Ш.В., к. ф.-м. н., главный специалист РЭСцентра, Санкт-Петербург

Анисимов Н.А., старший научный сотрудник ФГУП «ЦНИИ им. Акад. А.Н. Крылова», Санкт-Петербург.

Можаев А.С., д.т.н., профессор, ведущий специалист ОАО «Специализированная инженеринговая компания «Севзапмонтажавтоматика» (СПИК СЗМА), Санкт-Петербург

Никитин В.С., к.т.н., директор ФГУП «Научно-исследовательское проектно-технологическое бюро «Онега», Северодвинск.

В работе проведена оптимизация риска с использованием классических критериев принятия решений применительно к возможным ядерным и радиационным авариям при утилизации атомных подводных лодок (АПЛ). В качестве показателя оптимизации выбран экономический ущерб, а для иллюстрации предложенного подхода рассмотрены три сценария возможных радиационных аварий и ограниченное число мероприятий (стратегий) по снижению их последствий. На основе анализа классических критериев выбрана оптимальная стратегия снижения экономического ущерба.

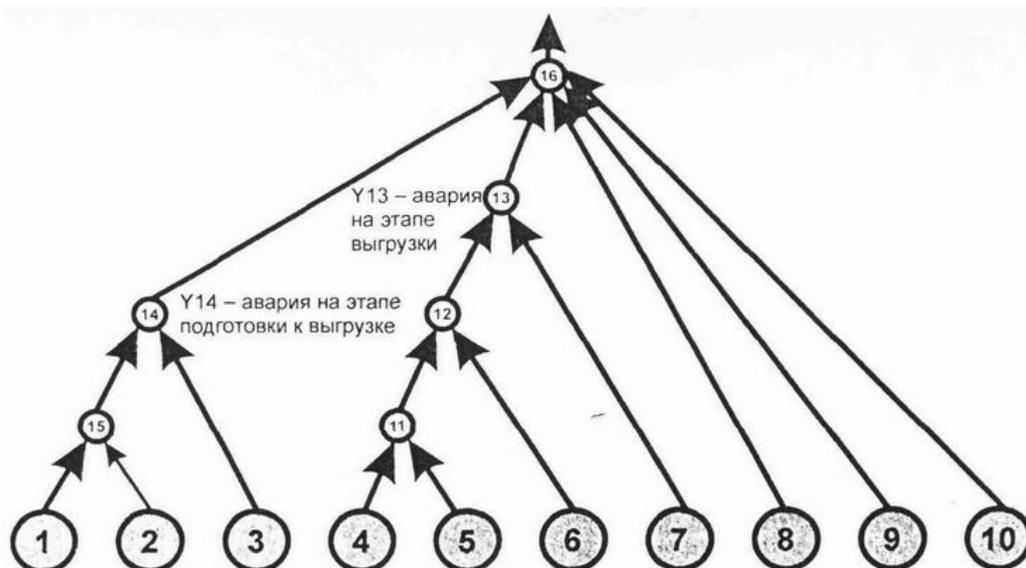
Возникновение аварийных ситуаций возможно на различных этапах утилизации атомных подводных лодок (АПЛ), но наиболее опасным с точки зрения возможности возникновения ядерной и радиационной аварии справедливо считается этап выгрузки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). Опасность этапа выгрузки ОЯТ из АПЛ определяется как возможными радиационными последствиями, так и вероятностью их реализации. Поэтому в настоящей работе рассчитаны радиационные последствия для возможных сценариев ядерной и радиационной аварий на этапе выгрузки ОЯТ, оценены вероятности возможных аварий для трех сценариев аварий и выполнена оптимизация на основе классических критериев принятия решений. Сценарии возможных ядерных и радиационных аварий, активность радионуклидов в возможных выбросах из реакторов АПЛ и их радионуклидный состав определены на основе данных, приведенных в работах [1-3]. На начальном этапе, в ходе изучения и первичного формализованного описания сценария ядерной или радиационной аварии, были выделены 10 исходных событий (ИС) и определены их вероятности в процессе утилизации АПЛ. Эти ИС приведены в табл. 1.

Таблица 1.

События, инициирующие ядерную или радиационную аварию и их вероятности

Обозначение	Описание события	Вероятность P_i
X_1	Разлив ЖРО при подготовке к выгрузке ОЯТ	$5,8 \cdot 10^{-4}$
X_2	Выброс газа из системы ГВД	$3,0 \cdot 10^{-6}$
X_3	Выход сорбентов при перегрузке	$4,0 \cdot 10^{-6}$
X_4	Падение контейнера с ОТВС при выгрузке ОЯТ	$6,0 \cdot 10^{-3}$
X_5	Повреждение ОТВС при выгрузке	$4,0 \cdot 10^{-3}$
X_6	Возникновение СЦР в процессе выгрузки ОЯТ	$1,0 \cdot 10^{-7}$
X_7	Пожар на АПЛ в процессе выгрузки ОЯТ	$1,2 \cdot 10^{-4}$
X_8	Затопление АПЛ при отстое с выгруженной активной зоной	$3,6 \cdot 10^{-4}$
X_9	Затопление трехотсечного блока при его транспортировании в пункт временного хранения (ПВХ)	$1,0 \cdot 10^{-6}$
X_{10}	Затопление трехотсечного блока при его отстое в ПВХ	$1,0 \cdot 10^{-7}$

Сценарии ядерных или радиационных аварий были определены традиционным способом перебора возможных комбинаций исходных событий, приводящих к различным видам аварий с использованием программного комплекса автоматизированного структурно-логического моделирования (ПК АСМ) [4]; при этом схема функциональной целостности (СФЦ) представлена в виде дерева отказов, изображенного на рис. 1.



При полномасштабном анализе риска следует рассматривать все аварийные ситуации, однако в данной статье в качестве иллюстрации подхода к оптимизации риска при выгрузке ОЯТ из АПЛ мы ограничились следующими тремя сценариями:

1. Возникновение самоподдерживающейся цепной реакции деления (СЦР) (первый сценарий).
2. Падение гражданского самолета на станцию выгрузки ОЯТ (второй сценарий).
3. Падение гражданского самолета на площадку для хранения контейнеров с ОЯТ (третий сценарий).

Последние два сценария рассмотрены в связи с событиями, связанными с проявлениями терроризма, в том числе с попытками вызвать тяжелые аварии на ядерно- и радиационно-опасных объектах. В качестве таковых были выбраны станция выгрузки ОЯТ из АПЛ и площадка для временного хранения контейнеров с ОЯТ.

Полная вероятность возможной аварии на этапе выгрузки ОЯТ из АПЛ определена логико-вероятностным методом, используемым для определения надежности и безопасности сложных технических систем [4]. Вероятности возникновения СЦР и падения самолета на указанные объекты приняты на основе статистических данных. Расчет экономического ущерба для различных сценариев ядерных и радиационных аварий произведен по методике, утвержденной Минатомом России и Госатомнадзором России [5]. Результаты расчетов экономического ущерба для трех сценариев радиационных аварий приведены в таблице 2.

Результаты расчетов экономического ущерба и значения вероятности ядерной и радиационной аварий на этапе выгрузки ОЯТ из АПЛ

Сценарий	Содержание сценария	Эк. ущерб, тыс. руб.	Вероятность, год ⁻¹
Первый	Возникновение самоподдерживающейся цепной реакции деления (СЦР)	3380,3	$\approx 1 \cdot 10^{-7}$
Второй	Падение самолета на станцию выгрузки ОТВС	812,1	$\approx 1,6 \cdot 10^{-5}$
Третий	Падение самолета на площадку для хранения контейнеров с ОЯТ	737,8	$\approx 1,6 \cdot 10^{-5}$

Полученные результаты показывают, что наибольшую опасность представляют аварии, развивающиеся по вышеприведенным сценариям, при этом первый сценарий (возникновение СЦР в активной зоне реактора АПЛ) по всем компонентам экономического ущерба существенно превосходит остальные. В то же время вероятность реализации первого сценария примерно на 2 порядка ниже, чем других. В таблице 3 приведены значения отдельных компонентов экономического ущерба для каждого из сценариев ядерной или радиационной аварии.

Таблица 3
Компоненты экономического ущерба в различных сценариях аварий, тыс. руб.

№ сценария	У ₁	У ₂	У ₃	У ₄	У ₅	У _Σ
Первый	194,2	3,3	1553,9	75,0	1553,9	3380,3
Второй	53,6	0,9	365,4	26,8	365,4	812,1
Третий	4,6	0,9	363,4	5,5	363,4	737,8

Указанные в таблице компоненты экономического ущерба имеют следующее содержание:

У₁ – экономический ущерб, наносимый здоровью персонала и населения в результате ядерной или радиационной аварии;

У₂ – компонент экономического ущерба, связанный с затратами на проведение радиационного обследования загрязненных в результате радиационной аварии помещений, оборудования и территории;

У₃ – компонент экономического ущерба, связанный с прямыми затратами на ликвидацию последствий радиационной аварии, включающий затраты на проведение дезактивации помещений, оборудования и территории, с транспортированием и переработкой получающихся при этом радиоактивных отходов (РАО) и др.;

У₄ – экономический ущерб от выбросов и сбросов радиоактивных веществ (РВ) в окружающую среду, условно называемый нами «экологическим»;

У₅ – затраты на ремонтно-восстановительные работы после аварии; оцениваются примерно равными расходам на ликвидацию аварии, т.е. в первом приближении У₅ = У₃.

Для целей оптимизации риска по показателю максимального экономического ущерба из перечня возможных мероприятий по снижению риска при утилизации АПЛ, приведенного в работе [3], нами выбраны следующие меры, реализация которых должна привести к его снижению:

1. Оперативное использование передвижных установок экстренного подавления огня, включая постоянное дежурство пожарной службы в течение всего периода утилизации АПЛ;

2. Организация обучения технического персонала действиям при возникновении пожаров.

Реализация пунктов 1 и 2 снижает длительность пожара до 0,5 часа вместо одного часа (время, использованное при расчете последствий радиационной аварии) и уменьшает его интенсивность; при этом примерно вдвое снижается объем выброса радиоактивных веществ в виде аэрозолей и как следствие доза, получаемая персоналом и пожарными, снижается примерно в два раза.

3. Разработка инструкции по дезактивации поверхностей помещений и оборудования в аварийных условиях. Реализация этого пункта снижает трудоемкость дезактивации примерно в два раза и приблизительно на 30% уменьшает объем получающихся при этом ЖРО и ТРО.

4. Разработка превентивных мер по ограничению доступа и времени пребывания персонала и населения на территории вдоль оси факела выброса (в течение 5-10 суток после аварии) для выявления и оконтуривания пятен загрязнения на местности после аварии.

5. Разработка превентивных мер по ограничению пребывания персонала в опасной зоне при проведении операций по выгрузке ОЯТ из АПЛ в зависимости от времени проведения операций и складывающихся при этом метеоусловий (направления и силы ветра, интенсивности осадков и т. д.).

Реализация указанных мероприятий приводит к снижению индивидуальной и коллективной доз, получаемых персоналом и населением, к уменьшению площади загрязненных поверхностей территории промплощадки и оборудования, к уменьшению количества РАО, подлежащих переработке и, как следствие, к снижению экономического ущерба. Оценка величин снижения экономического ущерба произведена с использованием методики [5] по отдельным компонентам ущерба. Частично при этом использованы и экспертные оценки. Результаты приведены в табл. 4 и 5.

При снижении длительности пожара до 0,5 часа вместо одного часа доза, получаемая персоналом и пожарными, значительно снижается.

Таблица 4
Изменение компонентов экономического ущерба в результате реализации мероприятий по снижению риска радиационной аварии

Мероприятие	Сценарий	Компоненты экономического ущерба, тыс. руб.*					
		Y ₁	Y ₂	Y ₃	Y ₄	Y ₅	Y _Σ
1. Использование установок экстренного подавления огня (A ₁)	первый	194,2	3,3	1553,9	75,0	1553,9	3380,3
	второй	32,3	0,9	248,0	13,4	248,0	542,6
	третий	3,2	0,9	245,7	2,8	245,7	498,3
2. Организация обучения технического персонала действиям при возникновении пожаров (A ₂)	первый	194,2	3,3	1553,9	75,0	1553,9	3380,3
	второй	32,3	0,9	333,1	21,4	333,1	720,8
	третий	4,6	0,9	327,5	4,4	327,5	664,9
3. Разработка инструкции по дезактивации поверхностей помещений и оборудования в аварийных условиях (A ₃)	первый	194,2	3,3	1086,5	75,0	1086,5	2445,5
	второй	46,7	0,9	228,0	26,8	228,0	530,4
	третий	4,6	0,9	213,0	5,5	213,0	437,0
4. Разработка мер по ограничению доступа и времени пребывания персонала и населения на территории вдоль оси	первый	101,7	3,3	1553,9	75,0	1553,9	3287,8
	второй	17,8	0,9	365,4	26,8	365,4	776,3
	третий	-	0,9	363,4	5,5	363,4	733,2

факела выброса (A ₄)							
5. Разработка превентивных мер по ограничению пребывания персонала в опасной зоне при проведении операций по выгрузке ОЯТ из АПЛ в зависимости от времени проведения операций (A ₅)	первый	55,5	3,3	1553,9	75,0	1553,9	3241,6
	второй	15,7	0,9	333,1	26,8	333,1	709,6
	третий	-	0,9	327,5	4,4	327,5	660,3

*) С частичным учетом затрат на проведение мероприятий (C_i).

На основании этих исходных данных предпринята попытка оптимизации риска радиационной аварии при утилизации АПЛ для принятия управленческих решений с использованием результатов работ [6-8].

Таблица 5
Эффективность мер по снижению экономического ущерба при радиационных авариях

Индекс мероприятия, A _i	Показатели снижения экономического ущерба по сценариям, тыс. руб.		
	П ₁ = -ΔY ₁	П ₂ = -ΔY ₂	П ₃ = -ΔY ₃
A ₁	0	269,5	-239,5
A ₂	0	-91,3	-72,9
A ₃	-934,6	-281,7	-300,8
A ₄	-92,5	-35,8	-4,6
A ₅	-138,5	-102,5	-77,5
Вероятность реализации сценариев, q _i , год. ⁻¹	~1×10 ⁻⁷	~1,6×10 ⁻⁵	~1,6×10 ⁻⁵
q _i , нормированная, отн. ед.	0,003	0,4985	0,4985

Выбор критериев оптимизации

Из достаточно широкого набора классических критериев принятия решений для данной конкретной задачи «в условиях риска» (т.е. при известных вероятностях возможных аварий) (подробнее см. [6]) наиболее подходящими считаем следующие критерии:

- критерий Бейеса;
- критерий Ходжа-Лемана;
- критерий Лапласа;
- критерий Гермейера;
- критерий произведений.

Для получения более общей картины оптимизации использовались также критерии, обычно применяемые в условиях неопределенности, т. е. при отсутствии данных о вероятностях возможных аварий, такие как:

- критерий Вальда (минимаксный);
- обобщенный критерий Гурвица.

Отметим, что обобщенный критерий Гурвица включает в себя как частные случаи некоторые из вышеназванных критериев, и он включен в рассмотрение в качестве именно обобщающегося показателя (см. [6]). Максимальный критерий не использовался ввиду

того, что он является критерием крайнего оптимизма, характерным для азартного отношения к риску, и не применим к рассматриваемой задаче.

Для определения коэффициентов формируемых критериев – λ_i (показатели пессимизма – λ_1 и оптимизма – λ_2 при принятии решений) функция нежелательности вреда (ущерба, проигрыша) – аналог функции полезности выигрыша – нормирована на максимальную величину экономического ущерба – 4000 тыс. руб. и в духе предложений Фармера аппроксимирована кривой $\sim X^{0,6}$, характеризующей осторожное отношение к риску. Сумма показателей для каждого сценария должна быть равна 1, т. е. $\lambda_1 + \lambda_2 \equiv 1$. Для проведения оптимизации перенормированы также вероятности аварий по трем сценариям из следующего условия:

$$q_i \geq 0, \quad j = 1, 2, 3; \quad \sum_{j=1}^3 q_j = 1;$$

тогда получаем: $q_1 = 0,003$; $q_2 = 0,4985$; $q_3 = 0,4985$.

Значения показателей пессимизма-оптимизма для трех сценариев аварий в соответствии с функцией нежелательности вреда составляет величины, приведенные в табл.6.

Таблица 6

Показатели	Сценарий аварий		
	Первый	Второй	Третий
пессимизма – λ_1	0,904	0,384	0,363
оптимизма – λ_2	0,096	0,616	0,637

Методика формирования критериев в условиях риска состоит в следующем.

На основе таблицы 5 строим исходную матрицу **A** (приведена в табл. 7), необходимую для дальнейшего расчета критериев оптимизации, в которой **П** представляет собой выбранные сценарии радиационных аварий, а A_i обозначает набор мероприятий по снижению риска. Элементы матрицы представляют собой величины снижения суммарной величины экономического ущерба в каждом сценарии при реализации данного мероприятия (в более общем смысле – стратегии) по снижению риска.

Таблица 7

Исходная матрица **A** для оптимизации

A_i	П ₁	П ₂	П ₃
A ₁	0	-269,5	-239,5
A ₂	0	-91,3	-72,9
A ₃	-934,6	-281,7	-300,8
A ₄	-92,5	-35,8	-4,6
A ₅	-138,5	-102,5	-77,5

В общем случае матрица оптимизации (**B**) отличается от матрицы **A** структурой, которая в свою очередь зависит от выбора конкретного критерия оптимизации. С использованием матрицы **B** и коэффициентов λ_i каждому мероприятию A_i по снижению риска ставим в соответствие показатель эффективности:

$$G_i = G(A_i; \lambda_1 \dots \lambda_j) = \sum_{j=1}^3 \lambda_j \times b_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

Оптимальным будет то мероприятие (стратегия), при котором расчетный показатель эффективности будет совпадать с максимальным, т. е.:

$$G_k = \max G_i (\text{при } 1 \leq i \leq m).$$

1. Оптимизация по критерию Бейеса

Полагаем известными вероятности возможных радиационных аварий. Матрица **B** выбирается равной матрице **A** (см. выше), а коэффициенты λ_j выбираются равными соответствующим нормированным вероятностям. При таком подходе принимающий решение субъект выражает полное доверие к истинности распределения вероятностей выбранных сценариев, т.е. фактически не учитывает показатели оптимизма-пессимизма.

Показатель эффективности мероприятия $A_i(G_i)$ рассчитывается по вышеприведенной формуле (1) и представляет собой средневзвешенное по вероятности значение снижения экономического ущерба:

$$B_i = G_i = \sum_{j=1}^3 \lambda \times b_{ij} = \sum_{j=1}^3 \lambda_j \times a_{ij}.$$

Полученные расчетные значения критерия Бейеса приведены в таблице 8.

Таблица 8
Расчетные значения критерия Бейеса

A_i	П_i	П₁	П₂	П₃	B_i
A₁		0	-269,5	-239,5	253,7
A₂		0	-91,3	-72,9	81,8
A₃		-934,6	-281,7	-300,8	293,2
A₄		-92,5	-35,8	-4,6	20,4
A₅		-138,5	-102,5	-77,5	90,2

2. Оптимизация по критерию Ходжа-Лемана

Известны вероятности возможных радиационных аварий. Матрица **B** формируется из двух столбцов. Элементами первого столбца (W_i) являются показатели эффективности каждого мероприятия по критерию Вальда (т.е. по минимаксному, см. ниже):

$$W_i = \min a_{ij} (\text{при } 1 \leq j \leq n \text{ и } i = 1 \dots m).$$

Элементами второго столбца являются показатели эффективности по критерию Бейеса:

$$B_i = \sum_{j=1}^3 q_j \times b_{ij} \quad (i = 1 \dots m),$$

где: q_j – вероятности соответствующих сценариев аварий.

Коэффициенты формируемого критерия выбираются следующим образом: λ_1 (показатель пессимизма) = $1 - \lambda_j$; λ_2 (показатель оптимизма) = λ_j , где $\lambda_j \in [0,1]$. Значения показателей λ_i принимаются в соответствии с таблицей 6. Тогда показатель эффективности мероприятия A_i по критерию Ходжа-Лемана будет равен:

$$G_i = \lambda_1 \times b_{i1} + \lambda_2 \times b_{i2} = (1 - \lambda) \times W_i + \lambda \times B_i = (1 - \lambda) \min a_{ij} + \sum_{j=1}^3 q_j \times a_{ij}. \quad (2)$$

Оптимальной по критерию Ходжа-Лемана является стратегия A_i с наибольшим показателем эффективности G_k (см. табл. 9).

Таблица 9
Расчетные значения критерия Ходжа-Лемана

A_i	Π_i	W_i	B_i	G_i
A_1		0	253,7	159,0
A_2		0	81,8	51,2
A_3		281,7	293,2	290,4
A_4		4,6	20,4	14,2
A_5		77,5	90,2	84,2

3. Оптимизация по критерию Гермейера

Известны вероятности возможных радиационных аварий. Матрица B формируется из одного столбца, элементами которого являются:

$$B_{ij} = \min(q_i \times a_{ij}), \quad i = 1 \dots m.$$

Показатель λ_i полагается равным 1, а показатель эффективности I -го мероприятия определяется как:

$$G_i = \max(q_1 \times a_{ij}).$$

Оптимальной стратегией по критерию Гермейера считается мероприятие с наибольшим показателем G_{\max} (см. табл. 10).

Таблица 10
Расчетные значения критерия Гермейера

A_i	Π_i	B_i	$G_i = G_{\max}$
A_1		119,4	-
A_2		36,3	-
A_3		140,4	140,4
A_4		2,3	-
A_5		38,6	-

4. Оптимизация по критерию Лапласа

В данном случае нами использованы три сценария, которые на основе принципа «недостаточного основания» Лапласа считаем равновероятными при полном доверии к этому принципу (т.е. при $\lambda_i \equiv q_j = 1/n = 0,333$, а $j = 1, 2, 3$ и мы находимся в ситуации принятия решения в условиях риска). Матрица A формируется из трех столбцов (т. е. $n = 3$) и пяти строк. Тогда показатель эффективности мероприятия (стратегии) по критерию Лапласа, обозначаемый нами через L_i , равен:

$$L_i = G_i = 1/n \times \sum_{j=1}^3 \lambda_j \times b_{ij} = 0,333 \sum_{j=1}^3 \lambda_j \times a_{ij}, \quad i = 1, \dots, m,$$

т.е. среднеарифметическому значению элементов строки. Оптимальной стратегией по критерию Лапласа является стратегия с максимальным показателем эффективности (см. табл. 11):

$$L_i = L_{\max}.$$

Таблица 11
Расчетные значения критерия Лапласа

A_i	Π_i	Π_1	Π_2	Π_3	B_i
A_1		0	-269,5	-239,5	170,0
A_2		0	-91,3	-72,9	54,7
A_3		-934,6	-281,7	-300,8	505,7
A_4		-92,5	-35,8	-4,6	44,3
A_5		-138,5	-102,5	-77,5	106,2

5. Оптимизация по критерию произведений

Поскольку для оптимизации по этому критерию требуется положительность всех элементов матрицы, т.е. $a_{ij} > 0$, то при использовании данного критерия мы ограничились двумя сценариями – Π_2 и Π_3 . Вероятности возможных радиационных аварий по этим сценариям также известны. Матрица \mathbf{B} формируется в виде вектора-столбца, элементами которого являются:

$$b_{ij} = \prod_{j=1}^3 (q_j \times a_{ij}), \quad i = 1, \dots, m.$$

Показатель λ_i полагается равным $\approx 0,37$, т.е. значению, принятому по кривой нежелательности ущерба для второго и третьего сценариев (см. табл. 6), а показатель эффективности i -го мероприятия определяется как:

$$G_i = \lambda_i \times b_{i1} = \lambda_i \times \prod_{j=1}^3 (q_j \times a_{ij}), \quad i = 1, \dots, m.$$

Оптимальной стратегией по критерию произведений считается мероприятие с наибольшим показателем G_{\max} (см. табл. 12).

Таблица 12
Расчетные значения критерия произведений

A_i	Π_i	B_i	$G_i = G_{\max}$
A_1		$5,9 \times 10^3$	-
A_2		$6,1 \times 10^2$	-
A_3		$7,8 \times 10^3$	$7,8 \times 10^3$
A_4		15,3	-
A_5		$7,2 \times 10^2$	-

6. Оптимизация по критерию Вальда (минимаксный критерий)

Вероятности возможных аварий считаем неизвестными, поэтому принятие решения производится в условиях неопределенности. В этом случае матрица \mathbf{B} представляет собой вектор-столбец размерности $m \times 1$ с элементами:

$$b_{i1} = \min a_{ij} \quad (i = 1 \dots m, 1 \leq j \leq n).$$

Показатели λ_i полагаются равными значениям (в соответствии с кривой вредности ущерба) из таблицы 6, а показатель эффективности i -го мероприятия определяется как:

$$W_i = G_i = \lambda_i \times b_{i1} = \lambda_i \times \min a_{ij}$$

Оптимальным по критерию Вальда является мероприятие с максимальным показателем эффективности, т.е.:

$$W_k = \max W_i = \max \min a_{ij}$$

Таблица 13
Значения критерия Вальда

A_i	Π_i	B_i	$G_i = G_{\max}$
A_1		0	-
A_2		0	-
A_3		108	108
A_4		1,7	-
A_5		28,1	-

7. Оптимизация по критерию Гурвица

Вероятности возможных аварий считаем неизвестными, поэтому принятие решения производится в условиях неопределенности, и, поскольку в данном конкретном случае нами использованы лишь два значения коэффициентов формируемого критерия:

$$\lambda_1 = 1 - \lambda; \lambda_2 = \lambda; \text{ где } \lambda \in [0,1],$$

то обобщенный критерий Гурвица вырождается в обычный критерий пессимизма-оптимизма Гурвица (подробнее см. [6]). В этом случае матрица \mathbf{B} размерности $m \times 2$ формируется из матрицы \mathbf{A} в виде двух столбцов, элементы которой в строках расположены в неубывающем порядке:

$$b_{i1} = \min a_{ij}, \quad b_{i2} = \max a_{ij}, \quad i = 1, \dots, m.$$

Показатели оптимизма-пессимизма (λ_1, λ_2) выбираем равными в соответствии с кривой нежелательности ущерба (см. выше). Если обозначить показатель эффективности мероприятия A_i , по критерию пессимизма-оптимизма Гурвица через H_i , то получаем для него следующее выражение:

$$H_i = G_i = \lambda_1 \times b_{i1} + \lambda_2 \times b_{i2} = (1 - \lambda) \min a_{ij} + \lambda \times \max a_{ij}, \quad i = 1, \dots, m, \quad (4)$$

где: λ - показатель оптимизма (λ_2), а $(1 - \lambda)$ - показатель пессимизма при выборе оптимальной стратегии. Оптимальная стратегия по критерию Гурвица соответствует максимуму H_i , значения которого приведены в табл. 14.

Таблица 14
Расчетные значения критерия Гурвица

A_i	Π_i	$\min a_{ij}$	$\max a_{ij}$	H_i
A_1		0	269,5	166,0
A_2		0	91,3	56,2
A_3		281,7	934,6	123,2
A_4		4,6	92,5	3,2
A_5		77,5	138,5	30,3

Результаты расчета показателей эффективности в соответствии с указанными критериями для утилизации АПЛ и выбор оптимальной стратегии приведены в табл. 15.

Таблица 15
Показатели эффективности и выбор оптимальной стратегии

Меры	Критерии						
	Бейса	Ходжа-Лемана	Гермейера	Произвед.*	Лапласа	Вальда	Гурвица
A ₁	253,7	159,0	119,4	$5,9 \times 10^3$	170,0	0	166,0
A ₂	81,8	51,2	36,3	$6,1 \times 10^2$	54,7	0	56,2
A ₃	293,2	290,4	140,4	$7,8 \times 10^3$	505,7	108	123,2
A ₄	20,4	14,2	2,3	15,3	44,3	1,7	3,2
A ₅	90,1	84,2	38,6	$7,2 \times 10^2$	106,0	28,1	30,3
Оптимум	A ₃ , A ₁	A ₃	A ₃ , A ₁	A ₃ , A ₁	A ₃	A ₃	A ₁ , A ₃

* Данные критерии учитывают лишь два сценария аварии – П2 и П3.

Окончательный выбор управленческого решения по оптимизации риска определяется системой приоритетов, заложенных в управлении риском.

Ввиду относительно низких по сравнению с компонентами экономического ущерба величин затрат на проведение мероприятий A_i, в данном рассмотрении нами не учитывались возможные ошибки 1-го и 2-го рода, однако в общем случае их учет необходим, поскольку это может в значительной степени повлиять на выбор оптимальной стратегии [7].

Из таблицы 15 видно, что по большинству критериев оптимальной с точки зрения экономического ущерба является стратегия A₃, т.е. комплекс мероприятий по снижению в экономическом ущербе доли компонента, связанного с прямыми затратами на ликвидацию последствий радиационной аварии, включающего затраты на проведение дезактивации помещений оборудования и территории, с транспортированием и переработкой получающихся при этом радиоактивных отходов (РАО) и др. Это объясняется как значительным выбросом радиоактивных веществ при ядерных и радиационных авариях, развивающихся по всем трем сценариям, так и с чрезвычайно высокими тарифами на проведение работ по переработке радиоактивных отходов на специализированных комбинатах системы «Радон» (или на других специализированных предприятиях). В то же время очевидно, что значительную роль при оптимизации может сыграть и стратегия A₁, связанная непосредственно со снижением выброса радиоактивных веществ в атмосферу при ядерных и радиационных авариях. Поэтому ввиду рекомендательного характера, который носят классические критерии, окончательный выбор управленческого решения по оптимизации риска определяется системой приоритетов, заложенных в управлении риском.

Литература

1. Никитин В.С., Мишнев А.М. Технологические аспекты и необходимые технические средства для утилизации многоцелевых АПЛ в Северо-Западном регионе России. Сб. материалов международного семинара «Проблемы утилизации многоцелевых АПЛ в Северо-Западном регионе России», 26-27 марта 2003 г., Северодвинск, Россия, с. 4-22.
2. Васильев А.П. Радиоактивные, вредные и токсичные отходы, образующиеся при утилизации АПЛ, и обеспечение экологической безопасности в Северо-Западном регионе России. Там же, с. 39-48.

3. Комплексная утилизация АПК «Курсу» на СРЗ «Нерпа». Количественная оценка радиационного и химического риска при выгрузке ОЯТ с АПК «Курск» и его утилизация на СРЗ «Нерпа». Отчет о НИР, инв. № НЯДИ У949А.0415.00.001. ФГУП НИИПТБ «Онега», МЦЭБ Минатома России, Москва-Северодвинск, 2002, 102 с.
4. Можяев А.С. Программный комплекс автоматизированного структурно-логического моделирования сложных систем (ПК АСМ 2001). // Труды Международной Научной Школы «Моделирование и анализ безопасности, риска и качества в сложных системах» (МА БРК – 2001). СПб.: Издательство ООО «НПО «Омега», 2001, с. S56-61.
5. Методика расчета экономического ущерба от радиационных аварий при использовании радиоактивных веществ в народном хозяйстве, РЭСцентр, рег. № Р-03/98, С.-Петербург, 1998.
6. Лабскер Л.Г., Яновская Е.В. Общая методика конструирования критериев оптимальности решений в условиях риска и неопределенности. «Управление риском», № 4, 2002, с. 13-24.
7. Радаев Н.Н., Мельников М.В. Обоснование решений на защиту ядерно- и радиационноопасных объектов. Атомная энергия, т. 93, вып. 2, август 2002, с. 146-153.
8. Потапов Б.В., Радаев Н.Н. Распределение ресурсов территорий, направляемых на снижение рисков ЧС. «Управление риском», № 3, 2002, с. 29-35.