



*Российская Академия Наук*

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ  
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY  
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ-2014-07

Preprint IBRAE-2014-07

**Р. И. Бакин, Д. В. Бирюков, А. И. Илюшкин,  
А. А. Киселев, Д. В. Ковальчук, С. Н. Красноперов,  
И. И. Линге, М. Н. Савкин, А. В. Шикин**

# **РАНЖИРОВАНИЕ ЯДЕРНО И РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ**

Москва  
2014

Moscow  
2014

УДК 621.039.74

Бакин Р. И., Бирюков Д. В., Илюшкин А. И., Киселев А. А., Ковальчук Д. В., Красноперов С. Н., Линге И. И., Савкин М. Н., Шикин А. В. РАНЖИРОВАНИЕ ЯДЕРНО И РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ. Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2014-07. Москва: ИБРАЭ РАН, 2014. — 16 с. — Библиогр.: 14 назв. — 112 экз.

#### Аннотация

Рассмотрены основные аспекты ранжирования объектов использования атомной энергии по потенциальной опасности с применением методики расчета комплексного показателя безопасности и ущерба окружающей среды, разработанной в Управлении по выводу из эксплуатации ядерных объектов Великобритании (Nuclear Decommissioning Authority – сокращенно NDA). Показана необходимость и проведена адаптация методики расчета комплексного показателя безопасности и ущерба окружающей среды, в частности для учета чрезвычайных ситуаций с радиологическими последствиями. Приведены примеры применения адаптированной методики в отечественной практике – для решения задач инвентаризации, ранжирования и определения приоритета включения объектов наследия в программы обеспечения ядерной и радиационной безопасности. Показана необходимость исследования чувствительности и оценки погрешностей результата расчета к входным параметрам в проблеме ранжирования, а так же проведения сравнительных расчетов по объектам низкой потенциальной опасности и, возможно, формирование интегрированной методики на последующих этапах работ.

©ИБРАЭ РАН, 2014

Bakin R. I., Biryukov D. V., Ilyushkin A. I., Kiselev A. A., Kovalchuk D. V., Krasnopetrov S. N., Linge I. I., Savkin M. N., Shikin A. V. RANKING NUCLEAR AND RADIATION HAZARDOUS FACILITIES ACCORDING TO THE POTENTIAL HAZARD. Preprint № IBRAE-2014-07. Moscow: Nuclear Safety Institute of the Russian Academy of Sciences (IBRAE RAN), 2014. — 16 p.

#### Abstract

The paper examines the main aspects of ranking nuclear facilities according to the potential hazard using the methodology developed by the U.K. Nuclear Decommissioning Authority (NDA) to calculate the indicator integrating the environmental safety and the environmental damage. The paper involves an adaptation of the methodology, in particular, for accounting radiological emergencies, and shows the necessity of such adaptation. This was exemplified by typical applications of the adapted methodology in Russian practices – to meet the challenges in inventorying, ranking and prioritizing legacy facilities under the nuclear and radiation safety programmes. The paper demonstrates that sensitivity studies and evaluation of discrepancies in the calculation results with respect to the input parameters are essential for ranking, as well as comparative calculations involving low potential hazard facilities and, possibly, the development of an integrated methodology at later stages.

©Nuclear Safety Institute, 2014

# Ранжирование ядерно и радиационно опасных объектов по потенциальной опасности

*Р. И. Бакин, Д. В. Бирюков, А. И. Илюшкин, А. А. Киселев, Д. В. Ковальчук,  
С. Н. Красноперов, И. И. Линге, М. Н. Савкин, А. В. Шикин*

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ  
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
115191, Москва, ул. Большая Тульская, д. 52  
тел.: (495) 952-24-21 факс: (495) 958-11-51, эл. почта: pbl@ibrae.ac.ru

## Введение

Ранжирование ядерно и радиационно опасных объектов применяется для решения широкого спектра задач, связанных с планированием мероприятий по обеспечению безопасности, оценкой соответствия состояния объекта требованиям безопасности, категорированием по опасности и т.д. Основные существующие подходы описаны в работе, посвященной инвентаризации ядерно и радиационно опасных объектов [1]. При проведении инвентаризации ядерно и радиационно опасных объектов (ЯРОО) изначально был разработан подход, предполагающий формирование групп схожих объектов, определение обобщенного показателя степени опасности для опорных объектов в группах в монетарном выражении (руб./год) и последующую сшивку групп [2]. Подход продемонстрировал работоспособность, однако оказался крайне трудозатратным при массовом применении. В этой ситуации были еще раз проанализированы аналогичные исследования, выполненные за рубежом в последние годы. Наибольший интерес представила методика ранжирования, разработанная в Управлении по выводу из эксплуатации ядерных объектов Великобритании (Nuclear Decommissioning Authority — сокращенно NDA) несколько лет тому назад [3, 4].

В данной статье рассмотрены основные процедуры этой методики и вопросы её адаптации для применения в отечественной практике.

## Методика ранжирования NDA для выводимых из эксплуатации ядерных объектов

Ранжирование установок и сооружений осуществляется на основе значений комплексного показателя безопасности и ущерба окружающей среды (*КП*). Расчет комплексного показателя безопасности и ущерба окружающей среды осуществляется по формуле [3]:

$$КП = ПРО \cdot (ИО \cdot ИНО)^4, \quad (1)$$

где: *ПРО* — потенциал радиологической опасности, *ИО* — идентификатор объекта, *ИНО* — идентификатор неопределенности отходов.

При расчете потенциала радиологической опасности, *ПРО*, учитываются следующие параметры и факторы: суммарная активность, находящаяся в объекте (*СА*); агрегатное состояние РАО (*АС*); сложность перевода в безопасное состояние (*СП*). В итоге:

$$ПРО = \frac{СА \cdot АС}{СП}. \quad (2)$$

На качественном уровне можно сказать, что множитель *СА* по смыслу является обобщенной радиометрической характеристикой источника, параметр *СП* характеризует свойства барьеров безопасности, а *АС*, по сути, отражает возможные скорости процессов миграции и фильтрации.

В качестве *СА* используется величина, называемая потенциалом поглощаемой токсичности (*ППТ*). Ее физический смысл — это объем воды, который необходим для разбавления материала до безопасной для использования в качестве питьевой воды концентрации и вычисляются по формуле:

$$ППТ = \sum_i A_i \cdot P_i, \quad (3)$$

где:  $A_i$  — количество радионуклида  $i$  в ТБк,  $P_i$  — специфический токсический потенциал радионуклида  $i$  (*СПТ*).

Показатель *АС* зависит от агрегатного состояния материала и характеризует, какая часть основного объема материала высвободится, если на короткое время (около 1 дня) будет полностью утрачена защитная оболочка. Диапазон табличных значений: от 1 для жидкостей и газов до  $10^{-6}$  для твердых веществ [4]. Между этими предельными значениями находятся вещества, характеризующиеся дисперсным составом (шламы, крошка) — 0,1, и мелкие твердые объекты (гранулы, дробинки и пр.) —  $10^{-5}$ . Консервативно при оценке *АС* материалы считаются более диспергированными, чем они, возможно, есть на самом деле. Значения параметра *АС* для различных материалов приведены ниже (см. таблицу 1).

**Таблица 1 — Значения показателя *АС* для различных материалов**

Состояние/форма	Значение
Газы, жидкости, жидкие растворы и шламы	1
Другие растворы	0,1
Пыль, поверхностные загрязнения	0,1
Измельченные и мелкие твердые вещества	0,00001
Монолитные твердые вещества	0,000001

Показатель *СП*, определяющий сложность захоронения материалов, зависит от физических, химических характеристик радиоактивных веществ источника (тепловыделение, коррозионная стойкость, горючесть, химическая стабильность — особенно по отношению к воздействию воздуха и воды, критичность, химическая активность) и характеризует время, в течение которого радиоактивный материал можно оставить без наблюдения и других вмешательств, при этом сохраняя уверенность, что защитная оболочка будет находиться в исправном состоянии. Длительный период в данном случае говорит о возможности оставления материала в текущем состоянии, а короткий период характеризует большую неотложность корректирующих мер. Значения показателя *СП* варьируются от недель до десятилетий. Значения показателя *СП* приведены ниже (см. таблицу 2).

**Таблица 2 — Значения показателя *СП* для различных материалов**

Время контроля (по инженерным оценкам)	Характерное значение (время в часах)	Округленное значение
Часы	1	1
Дни	24	10
Недели	168	100
Месяцы	730	1000
Годы	8760	10000
Десятилетия	87600	100000

В таблице 3 в качестве примера приведены данные по нуклидному составу, использованные для вычислений *ППТ* [4].

**Таблица 3 — Нуклиды и значения *СПП***

Изотоп	<i>СПП</i> (м <sup>3</sup> /ГБк)
Кобальт-60	2040000
Стронций-90	16800000
Цезий-137	7800000
Уран-235	27000000
Уран-238	27000000
Плутоний-239	15000000
Америций-241	12000000

Идентификатор объекта отражает его текущий статус, демонстрирует, насколько объект на данный момент выполняет свою текущую функцию, вне зависимости от того, отличается ли она от проектной. В работе [3] представлены десять фиксированных значений параметра в диапазоне от 100 (для наиболее проблемных объектов) до 2 и даны признаки объектов, подпадающих под выбранные значения. Объекты,

попадающие в ближайший к максимальному значению параметра интервал, характеризуются следующим образом: «Проектный срок службы сооружения исчерпан, одна оболочка, известны/предполагаются значительные повреждения и неспособность обеспечить безопасность в чрезвычайных ситуациях. Сооружение не соответствует современным требованиям безопасности при проектных авариях». Для сравнения наименьшее значение параметра присваивается объектам, проектный срок эксплуатации которых не завершен, нет значительных повреждений, обеспечивается безопасность, в том числе при проектных авариях. При этом сроки приведения в безопасное состояние укладываются в остаточный ресурс, возможно продление эксплуатационного ресурса. Сооружению не угрожают расположенные рядом объекты, само оно так же не представляет опасности для окружающих объектов.

Таким образом, значения идентификатора объекта и соответствующие ему объекты определяются в зависимости от сочетания следующих параметров:

- текущее состояние объекта (наличие существенных дефектов);
- остаточный ресурс объекта;
- степень изоляции опасных веществ;
- наличие средств (резервный фонд) на случай непредвиденных ситуаций;
- способность объекта выдерживать современные проектные аварии;
- взаимодействие с другими опасными объектами;
- соотношение времени извлечения отходов из объекта со сроками его проектной эксплуатации;
- наличие обоснования безопасности.

Идентификатор неопределенности отходов отражает природу и состояние материалов (химических или радиоактивных), содержащихся в анализируемом объекте по принципу «насколько становится сложнее обращаться с материалом с течением времени, если оставить его при текущих условиях, и оказывает ли существенное влияние этот фактор на подход, используемый для перевода объекта в безопасное состояние».

Этот признак дает возможность дифференцировать отходы на те, сложность перевода в безопасное состояние которых ухудшится со временем, и те, проблемность обращения с которыми не изменится, если не начать предпринимать действия по их переводу в безопасное состояние немедленно. В работе [3] значения идентификатора неопределенности отходов разбиты на 11 категорий: диапазон значений лежит в интервале 100 (для первой, наиболее опасной категории) до 2 (для 11-й наименее опасной категории). Значения идентификатора неопределенностей отходов определяются в зависимости от сочетания следующих параметров:

- состав и количество отходов и побочных продуктов. Возможность реалистично установить количество отходов непосредственно до начала процесса перевода в безопасное состояние;
- постоянство свойств;
- физическое состояние;
- химическая реакционная способность;
- наличие упаковки отходов;
- наличие ядерной опасности;
- потенциальная реактивность (способность интенсивных изменений вещества с образованием тепла или взрыва);
- сложность и возможность мониторинга деградации материала. Возможность ведения мониторинга и обращения с деградирующими материалами с помощью стандартных методов.

Отметим, что набор категорий объектов в [3] применяется в основном к эксплуатирующимся неаварийным объектам, либо к объектам, подготовка к выводу из эксплуатации которых начата своевременно и осуществляется в полном объеме. Это означает, что из-за специфики отечественной отрасли, подход применим только к малой доли части ЯРОО, в то время как подавляющее большинство объектов могут быть охарактеризованы не корректно. В качестве примера для отечественной практики характерна возможность резкого изменения состояния объекта, то есть возникновения чрезвычайных ситуаций с радиологическими последствиями, последнее в ряде случаев может быть обусловлено достаточно плачевным, ветхим состоянием объектов наследия.

В целом характеристика состояния сооружения и размещенных в нем материалов варьируется в широком диапазоне — от единиц до  $10^{16}$ . Это позволяет корректно оценить безопасность содержания радиоактивных материалов, активность которых также варьируется в диапазоне от долей ТБк до тысяч и миллионов ТБк в отдельном объекте.

Характерные значения комплексного показателя безопасности варьируются в широком диапазоне —  $10^4$  до  $10^{21}$ . Пример оценки комплексного показателя безопасности по отдельным объектам ядерного комплекса Селлафилд (Великобритания) приведен в таблице 4 [4].

**Таблица 4 — Комплексный показатель безопасности объектов Селлафилд [3]**

Установка	ПРО	ИО	ИНО	КП
Установка обращения с плутонийсодержащими отходами	$10^3$	30	2	$1,3 \cdot 10^{10}$
Установка по обращению с САО	$10^8$	30	75	$2,56 \cdot 10^{21}$
Установка обращения с САО (с дистанционным манипулятором)	$10^5$	8	75	$1,30 \cdot 10^{16}$
Пункт хранения НАО	$10^{-2}$	8	10	$4,1 \cdot 10^5$

При этом объекты с уровнем комплексного показателя порядка  $10^{14}$  и выше характеризуются специализированными NDA высокоприоритетными, а с уровнем порядка  $10^5$  — с низким приоритетом. Методика позволяет оценивать эффективность хода работ по объектам за счет сопоставления оценок состояния объектов на различных этапах вывода из эксплуатации.

## Адаптация детерминированной методики NDA

Комплексный системный подход, использованный в методике NDA, и её большая пригодность к массовым оценкам в сравнении с подходом, предложенным в работе [2], инициировали работу по адаптации её признаков ранжирования к российским реалиям, а именно конкретизированы значения идентификатора объекта (ИО), а также учтены возможные чрезвычайные ситуации и их категорирование по шкале ИНЕС [8]. Пример характеристик объекта, используемых для определения значения параметра ИО, представлен в таблице 5.

**Таблица 5 — Описание идентификатора объекта**

Категория	Описание	ИО
1	Защитные барьеры не функционируют. Сильное радиоактивное загрязнение за границами объекта вследствие выхода радиоактивных веществ из объекта.	100
2	Проектный срок службы сооружения исчерпан, один защитный барьер, известны/предполагаются значительные повреждения и неспособность обеспечить безопасность в чрезвычайных ситуациях. Сооружение не соответствует современным требованиям безопасности при проектных авариях.	91
3	Проектный срок службы сооружения исчерпан, один защитный барьер, незначительные повреждения. Сооружение не соответствует современным требованиям безопасности при чрезвычайных ситуациях.	74
4	Срок службы сооружения исчерпан, один защитный барьер, нет повреждений, оценены последствия чрезвычайных ситуаций и выработаны меры по их снижению или максимальный масштаб последствий по шкале ИНЕС превышает уровень 4.	52
5	Проектный срок эксплуатации сооружения не исчерпан, нет значительных повреждений, два и более защитных барьера, обеспечивается безопасность. Тем не менее, сооружение не соответствует современным требованиям к безопасности при проектных авариях, а сроки приведения в соответствие выходят за рамки остаточного ресурса.	29
6	Проектный срок эксплуатации сооружения не исчерпан, нет значительных повреждений, один и более защитных барьера, обеспечивается безопасность. Сроки приведения в безопасное состояние укладываются в остаточный ресурс. Сооружение не соответствует современным требованиям к безопасности при проектных авариях или максимальный масштаб последствий по шкале ИНЕС превышает уровень 3.	15
7	Проектный срок эксплуатации сооружения не исчерпан, нет значительных повреждений, два и более защитных барьера, обеспечивается безопасность. Сроки приведения в безопасное состояние укладываются в остаточный ресурс. Сооружение соответствует современным требованиям безопасности при проектных авариях, но, как следствие, безопасность за рамками продленного срока эксплуатации не обоснована.	8
8	Проектный срок эксплуатации сооружения не исчерпан, нет значительных повреждений, два и более защитных барьера, обеспечивается безопасность. Сроки приведения в безопасное состояние укладываются в остаточный ресурс. Сооружение соответствует современным требованиям безопасности при проектных авариях, обоснование безопасности дальнейшей эксплуатации объекта выполняется. Аварии на расположенных рядом объектах могут нанести сооружению значительный ущерб.	5
9	Проектный срок эксплуатации сооружения не исчерпан, нет значительных повреждений, два и более защитных барьера, обеспечивается безопасность. Сроки приведения в безопасное состояние укладываются в остаточный ресурс. Сооружение соответствует современным требованиям безопасности при проектных авариях, обоснование безопасности дальнейшей эксплуатации объекта выполняется. Сооружению не угрожают расположенные рядом объекты, но авария на объекте может нанести значительный вред расположенным рядом более опасным объектам.	3
10	Срок эксплуатации сооружения не исчерпан, нет значительных повреждений, два и более защитных барьера, обеспечивается безопасность. Сроки приведения в безопасное состояние укладываются в остаточный ресурс. Сооружение соответствует современным требованиям безопасности при проектных авариях, безопасность эксплуатации за рамками установленного срока обоснована. Сооружению не угрожают расположенные рядом объекты, само оно также не представляет опасности для окружающих объектов.	2

Также проведена адаптация категорий с конкретизацией значений идентификатора неопределенности отходов. Идентификатор определяется на основе детализированной таблицы 6.

Таблица 6 — Описание идентификатора неопределенности отходов

Категория	Описание	ИНО
1	В сооружении находятся не переработанные (неупакованные) ядерные и/или радиоактивные материалы и иные отходы, в том числе накопленные при эксплуатации и в ходе работ по ВЭ. Материалы подвержены процессам физической деградации. Методы извлечения не определены. Мониторинг, а также контроль развития процессов деградации не производится. Или: Полное удаление ядерных и радиоактивных материалов невозможно. Мониторинг, а также контроль развития процессов производится, но управление затруднено или невозможно.	100
2	В сооружении находятся упакованные ядерные и/или радиоактивные материалы. Материалы подвержены процессам физической деградации, что, в свою очередь, может усложнить процесс их удаления, привести к увеличению дозовой нагрузки на персонал, занимающийся извлечением РАО, или к возникновению потенциала критичности. При этом постоянный мониторинг, а также контроль развития процессов не производится.	90
3	В сооружении находятся химически активные не переработанные ядерные и/или радиоактивные материалы, при этом их наличие, количество или места нахождения в общем объеме не могут быть достоверно установлены путем взятия проб или какими-либо другими способами, кроме как в ходе практических работ по их удалению.	74
4	В сооружении находятся химически активные не переработанные ядерные и/или радиоактивные материалы, при этом их наличие, количество или места нахождения в общем объеме точно не известны, но могут быть достоверно установлены в рамках КИРО.	50
5	В сооружении находятся не переработанные ядерные и/или радиоактивные материалы, которые, вероятно, подвержены процессам физической деградации, потенциально сопровождаемым дисперсией и миграцией радионуклидов, что, в свою очередь, может повлиять на то, какие именно методы придется применять для извлечения отходов, а также привести к увеличению дозовой нагрузки на персонал, занимающийся извлечением РАО, или к возникновению потенциала критичности. Постоянный мониторинг, а также контроль развития процессов деградации производится.	30
6	В сооружении находятся упакованные ядерные и/или радиоактивные материалы, которые, вероятно, подвержены процессам физической деградации, потенциально сопровождаемым распадом/дисперсией данных материалов, что, в свою очередь, может повлиять на то, какие именно методы придется применять для извлечения отходов, а также привести к увеличению дозовой нагрузки на персонал, занимающийся извлечением РАО, или к возникновению потенциала критичности. Постоянный мониторинг, а также контроль развития процессов деградации производится.	17
7	В сооружении находятся не переработанные радиоактивные материалы, которые не являются химически активными, но, подвержены процессам физической деградации до уровней, при которых возможно увеличение дозовой нагрузки на персонал, занимающийся извлечением РАО. Постоянный мониторинг, а также контроль развития процессов деградации не производится.	9
8	В сооружении находятся упакованные ядерные и/или радиоактивные материалы, которые не являются химически активными, но могут быть подвержены процессам физической деградации до уровней, при которых возможно увеличение дозовой нагрузки на персонал, занимающийся извлечением РАО в случае отсутствия постоянного мониторинга и контроля развития процессов деградации.	5
9	В сооружении находятся не переработанные ядерные и/или радиоактивные материалы, которые не являются химически активными, не подвержены процессам физической деградации до каких-либо значимых уровней в случае постоянного мониторинга и контроля развития процессов деградации.	3
10	В сооружении находятся упакованные ядерные и/или радиоактивные материалы, которые не являются химически активными, не подвержены процессам физической деградации до каких-либо значимых уровней по итогам мониторинга. Упаковки соответствуют требованиям к безопасности при проектных авариях. (К этой категории относятся объекты, не подпадающие под остальные требования)	2

Апробация адаптированной методики расчета комплексного показателя безопасности и ущерба окружающей среды проводилась более чем на 400 объектах наследия ФЦП ЯРБ 2016–2025 гг. Ниже на примере четырех гипотетических объектов — трех водоемов-хранилищ и одного сооружения, характеристики для которых подготовлены на основе реальных объектов, — продемонстрированы основные подходы к расчету.

*Водоем-хранилище А:*

$ИО = 100$  — проектный срок службы объекта практически исчерпан, проработаны вопросы обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях. Поскольку объект является естественным водоемом и оценить состояние защитных барьеров и их эффективность представляется затруднительным, оценка выбрана консервативно;

$ИНО = 30$  — объект содержит переработанные отходы/вторичные продукты, представленные в основном долгоживущими радионуклидами (плутоний-239, америций-241), то есть крайне в незначитель-

ной мере подвержены процессам физической деградации. Известно, что постоянный мониторинг водоема-хранилища производится;

$AC = 1$  — РВ, размещенные в объекте относятся к категории «Газы, жидкости, жидкие растворы и шламы»;

$СП = 10000$  — объект является стабильным, тепловыделение отсутствует, меры по обеспечению безопасности потребуются только в случае подтверждения значительной деградации барьеров безопасности или при критическом понижении уровня воды в водоемах с оголением радиоактивных илов.

*Водоем-хранилище Б:*

$ИО = 74$  — проектный срок службы объекта практически исчерпан, объект окружен глиняным экраном толщиной порядка 0,75 м. Проработаны вопросы обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях;

$ИНО = 30$  — объект содержит непереработанные отходы/вторичные продукты, подвержены процессам физической деградации, сопровождаемым распадом/дисперсией данных материалов. Известно, что постоянный мониторинг водоема-хранилища производится;

$AC = 1$  — РВ, размещенные в объекте относятся к категории «Газы, жидкости, жидкие растворы и шламы»;

$СП = 10000$  — объект является стабильным, тепловыделение отсутствует, меры по обеспечению безопасности потребуются только в случае подтверждения значительной деградации барьеров безопасности или при критическом понижении уровня воды в водоемах с оголением радиоактивных илов.

*Водоем-хранилище В:*

$ИО = 29$  — используется комбинированное экранирование бассейна (битум + бетон), срок эксплуатации не исчерпан, тем не менее, сооружение не соответствует современным требованиям безопасности, а сроки приведения в безопасное состояние выходят за рамки остаточного ресурса;

$ИНО = 30$  — объект содержит не переработанные отходы/вторичные продукты, которые в незначительной мере подвержены процессам физической деградации (распад актуален только для изотопов цезия-137 и кобальта-60, при этом америций-241, дающий значительный вклад в определение коэффициента — останется). Известно, что постоянный мониторинг водоема-хранилища производится;

$AC = 1$  — РВ, размещенные в объекте относятся к категории «Газы, жидкости, жидкие растворы и шламы»;

$СП = 10000$  — объект является стабильным, тепловыделение отсутствует, меры по обеспечению безопасности потребуются только в случае подтверждения значительной деградации барьеров безопасности или при критическом понижении уровня воды в водоемах с оголением радиоактивных илов.

*Сооружение Г*

$ИО = 91$  — Проектный срок службы сооружения исчерпан, один защитный барьер, известны/предполагаются значительные повреждения и неспособность обеспечить безопасность в чрезвычайных ситуациях. Сооружение не соответствует современным требованиям безопасности при проектных авариях;

$ИНО = 9$  — В сооружении находятся непереработанные радиоактивные материалы, которые не являются химически активными, но подвержены процессам физической деградации до уровней, при которых возможно увеличение дозовой нагрузки на персонал, занимающийся извлечением РАО. Постоянный мониторинг, а также контроль развития процессов деградации не производится;

$AC = 0,1$  — Наибольшую опасность представляет мелкодисперсное поверхностное загрязнение помещений и оборудования (пыль и легкие фракции, содержащие радионуклиды);

$СП = 1000$  — Возможно частичное или полное обрушение кровли, разрушение несущих конструкций, вследствие чего неизбежен вынос радионуклидов за пределы объекта. Причиной аварии могут послужить погодные явления (сезонные), поэтому предполагается, что мониторинг нужно проводить не реже раза в несколько месяцев.

Отметим, что при выборе значений параметров учитывалась возможность возникновения ЧС с радиологическими последствиями. Для этого были рассмотрены два варианта разрушения крупного сооружения, в котором располагалось производство по обогащению урана. Загрязнение строительных конструкций обусловлено в основном радионуклидами  $^{235}\text{U}$  (5%) и  $^{238}\text{U}$  (95%). Уровни поверхностного загрязнения в здании  $\beta$ -активными радионуклидами составляют в среднем (по данным радиометрического обследования) — 40 част/(см<sup>2</sup>·мин.), максимально до 400 част/(см<sup>2</sup>·мин.), что соответствует расчетной плотности загрязнения — 1,6 МБк/м<sup>2</sup> по  $^{238}\text{U}$  и 0,51 МБк/м<sup>2</sup> по  $^{235}\text{U}$  и максимально — 16 МБк/м<sup>2</sup> по  $^{238}\text{U}$  и 5,1 МБк/м<sup>2</sup> по  $^{235}\text{U}$  соответственно. Площадь здания составляет 65000 м<sup>2</sup>. Таким образом, запас активности в здании — 0,1 ТБк по  $^{238}\text{U}$  и 0,04 ТБк по  $^{235}\text{U}$ , при максимальных оценках — 1,0 ТБк по  $^{238}\text{U}$  и 0,4 ТБк по  $^{235}\text{U}$ . Это соответствует данным материалов по выводу из эксплуатации, где суммарная активность РАО оценивается в 0,2 ТБк (строительные конструкции). В качестве консервативной оценки суммарный запас активности, находящейся в здании, принят 2,0 ТБк.

Считается [5], что на открытом воздухе обедненный гексафторид урана гидролизуетеся влагой, присутствующей в атмосфере, в соответствии с экзотермической реакцией:  $\text{UF}_6 + 2\text{H}_2\text{O} = \text{UO}_2\text{F}_2 + 4\text{HF}$ , при взаимодействии с влагой  $\text{UO}_2\text{F}_2$  образует аэрозольные частицы размером около 1 мкм, которые распространяются в атмосфере и осаждаются на подстилающую поверхность в соответствии с классическими моделями атмосферного переноса.



Оценка радиологических последствий проводилась с помощью программного комплекса ПРОЛОГ [6]. В силу специфики выброса прогнозируемая доза облучения формируется в основном за счет ингаляционной дозы облучения при прохождении облака и вторичного пылеподъема. При проведении расчетов рассматривалась высота подъема облака 20 м (соответствует высоте здания). В соответствии с данными работы [7] выход радионуклидов при обрушении здания может достигать 20 % в самом консервативном случае. Поэтому рассматривается атмосферный выброс до 20 % включительно. Следует отметить, что изменение суммарной активности выброса приведет к пропорциональному изменению прогностических значений доз.

На основе данных метеорологической станции, расположенной вблизи объекта, получено, что характерными направлениями ветра в районе его расположения являются юго-восточное, северо-западное и восточное направление. Наиболее опасным с точки зрения последствий от выброса радиоактивности в атмосферу для населения, является юго-восточное направление, вдоль которого расположена жилая застройка, расположенная на расстоянии 3-4 км от здания.

С учетом данных из программы по выводу из эксплуатации, известно, что средняя годовая скорость ветра составляет 2,3 м/с. При этом регулярно наблюдаются ветры со скоростью более 20 м/с, которые могут привести к обрушению здания. Расчет распространения проводился при категории устойчивости атмосферы F. Рассмотрены два сценария обрушения здания:

- разрушение здания вследствие воздействия порыва ветра;
- разрушение здания через некоторое время после воздействия ветра.

Поэтому в дальнейшем будут рассматриваться скорость ветра 20 м/с и скорость ветра 2 м/с, которая основана на оценках среднегодовой скорости ветра. При скорости ветра 2 м/с прогноз более консервативен и также должен быть учтен при рассмотрении возможных последствий. На рисунках 1-4 представлены результаты расчета радиологических последствий для выброса 2 % и 20 % без осадков и при дожде с интенсивностью 3 мм/ч при выбранных скоростях ветра.

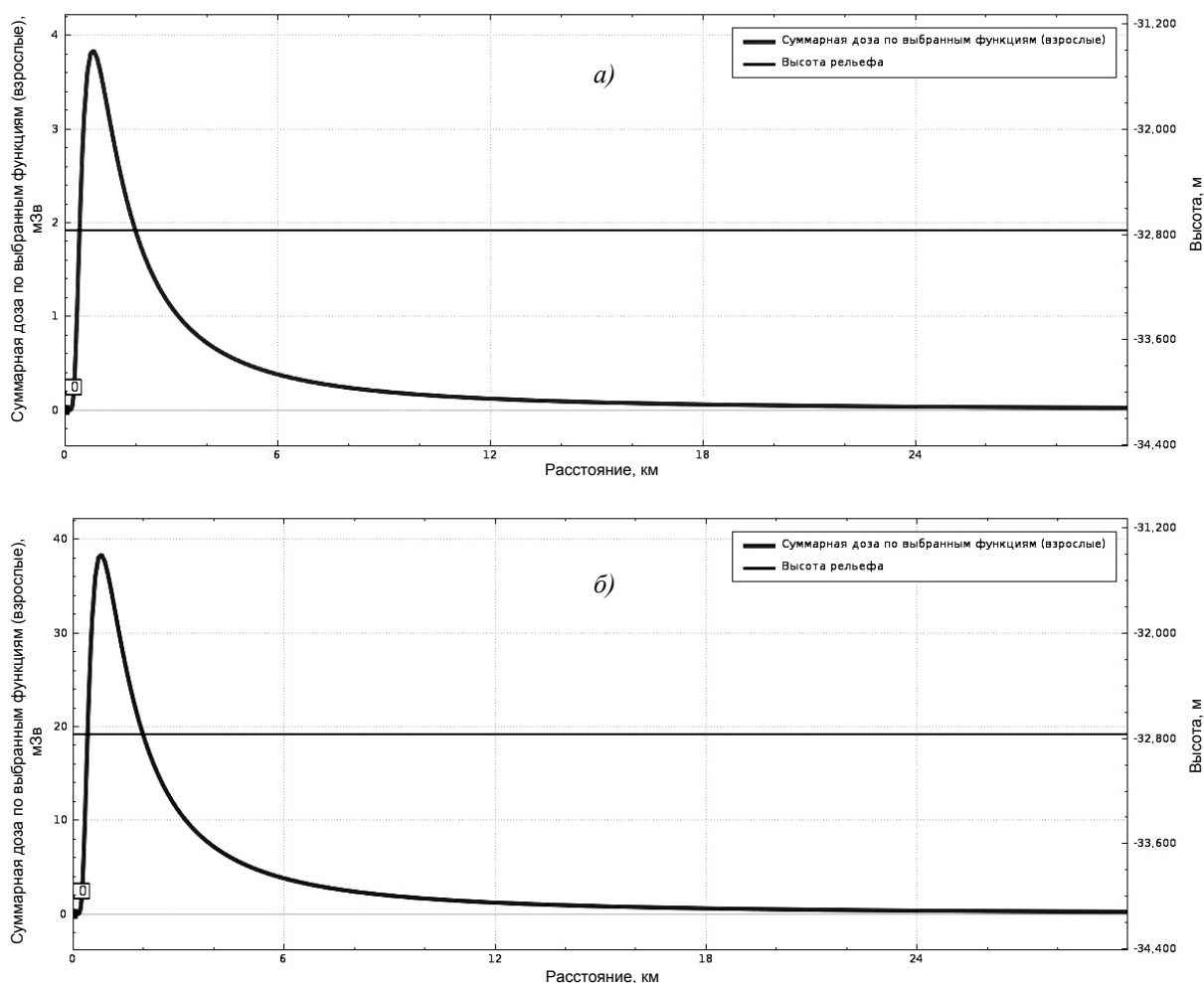


Рисунок 1 — Полная годовая прогнозируемая доза облучения (взрослые) по оси следа (скорость ветра 2 м/с) для 2 % (а), 20 % (б) от суммарной активности, мЗв

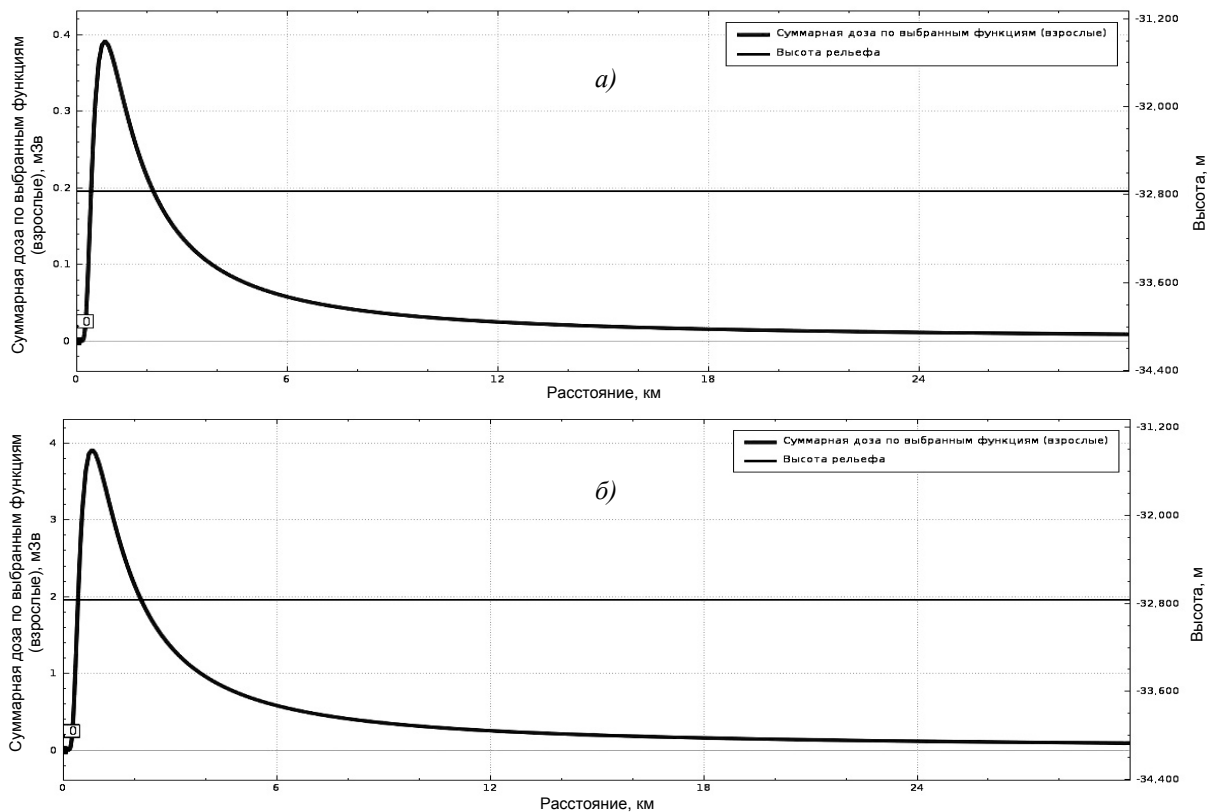


Рисунок 2 — Полная годовая прогнозируемая доза облучения (взрослые) по оси следа (скорость ветра 20 м/с) для 2 % (а), 20 % (б) от суммарной активности, мЗв

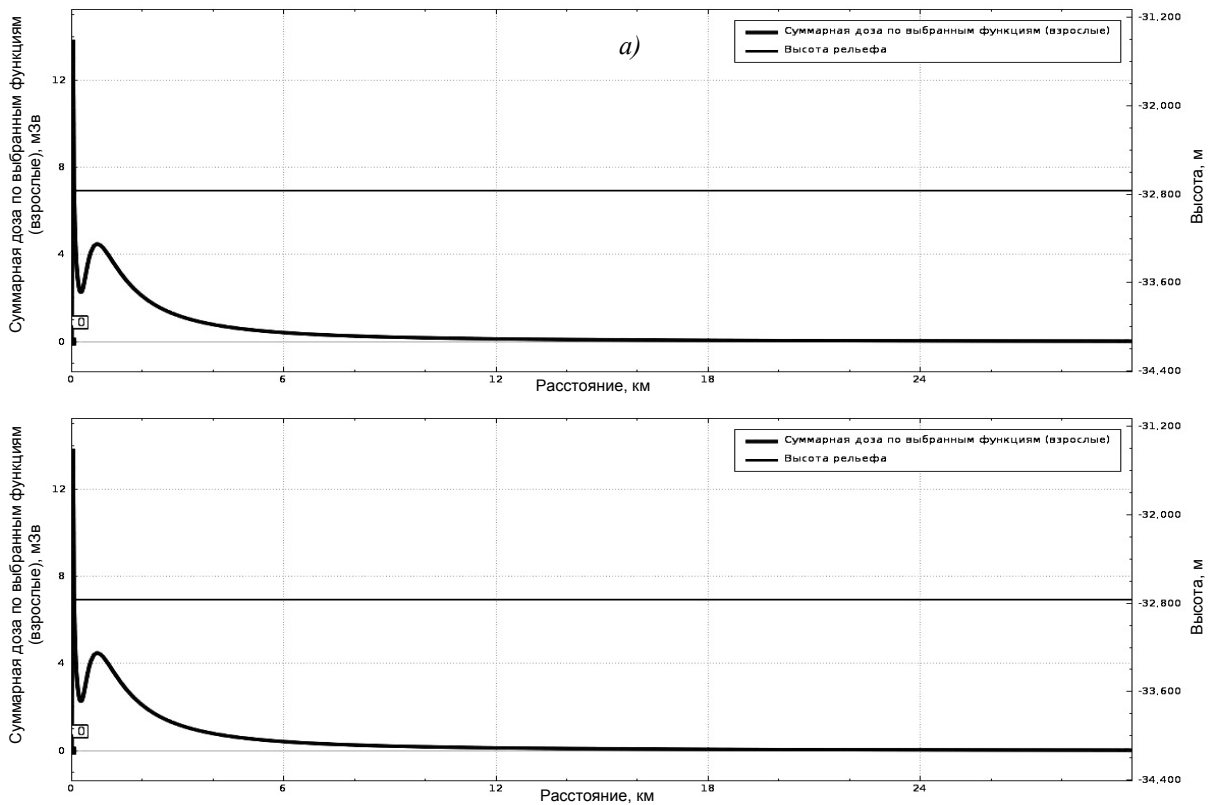


Рисунок 3 — Полная годовая прогнозируемая доза облучения (взрослые) по оси следа (скорость ветра 2 м/с) для 2 % (а), 20 % (б) от суммарной активности с учетом осадков, мЗв

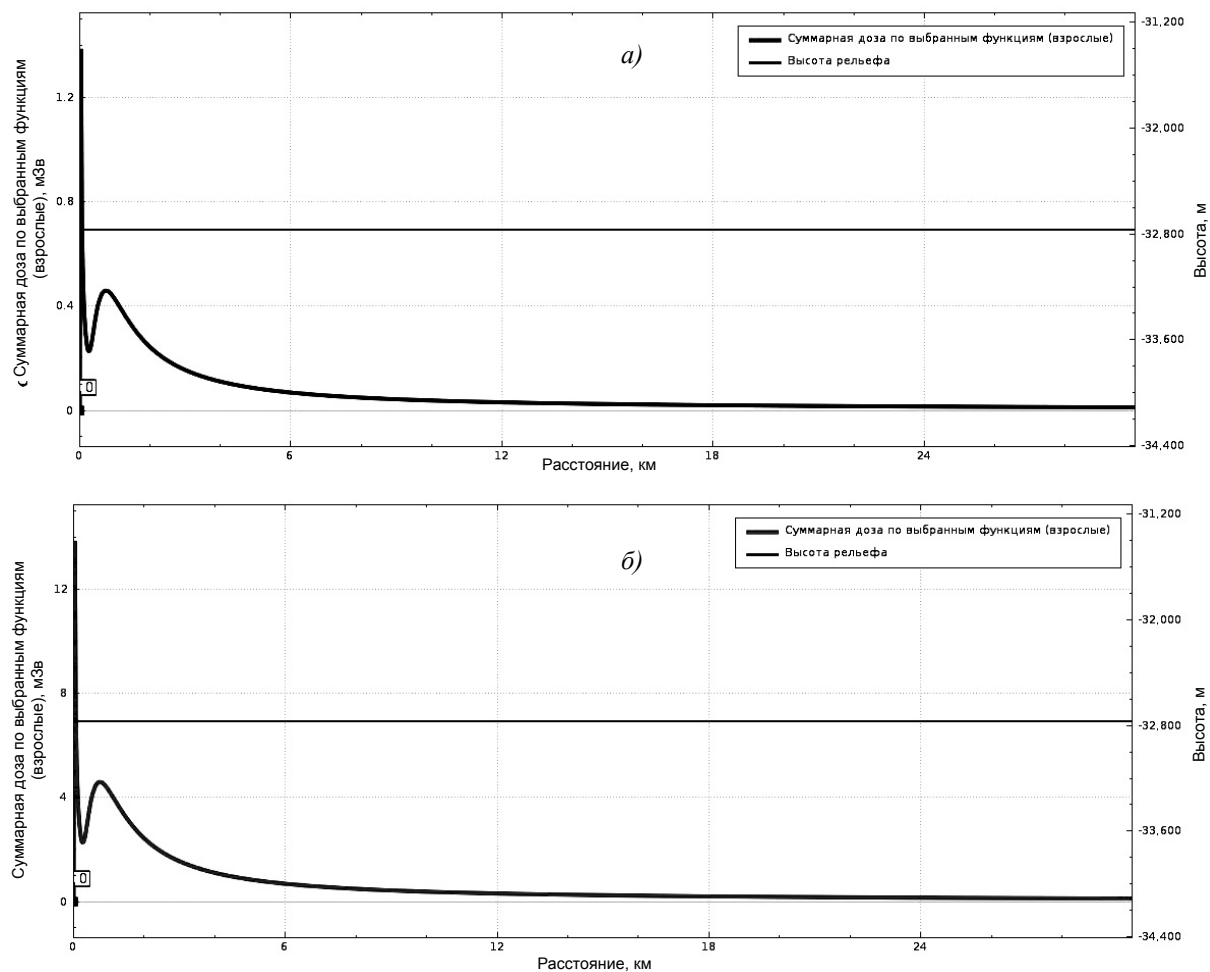


Рисунок 4 — Полная годовая прогнозируемая доза облучения (взрослые) по оси следа (скорость ветра 20 м/с) для 2 % (а), 20 % (б) от суммарной активности с учетом осадков, мЗв

Как видно из результатов расчетов, даже при 2 % переноса активности, сосредоточенной в здании, на расстояниях до 4 км от здания можно ожидать превышение годового дозового предела для населения от техногенных источников облучения (1 мЗв согласно НРБ-99/2009). Наличие осадков увеличивает прогнозируемые дозы в ближней зоне и расширяет область, где дозовые пределы могут быть превышены. При этом изменение суммарной активности в атмосферном выбросе приведет к пропорциональному изменению прогнозных значений.

Следует отметить, что в атмосферном выбросе при авариях с гексафторидом урана в состав облака загрязняющего вещества входят плавиковая кислота (HF),  $UO_2F_2$  и  $UF_6$ , из которых первые две компоненты вызывают острое химическое отравление при ингаляционном поступлении в организм человека (летальный исход от острого химического отравления наступает при вдыхании в течение 60 минут 875 мг  $UO_2F_2$  и 1325 мг HF).

Если принять 20% выброс, то максимально, он составит 0,4 ТБк (2 ТБк  $\times$  0,2). Согласно ИНЕС радиологический эквивалент для урана-235 и урана-238 относительно йода-131 равен 1000 и 900, соответственно. Это означает, что указанный выброс уранов эквивалентен выбросу йода-131 400 ТБк. А по шкале ИНЕС — это уровень 5 — сотни-тысячи ТБк или уровень 4 — десятки-сотни ТБк.

Таким образом, чрезвычайная ситуация может резко изменить статус объекта наследия, что целесообразно предусмотреть заранее, то есть учитывать при ранжировании не только текущий статус, но и вероятный будущий, что определило выбор значений параметров расчета КП.

Характеристики объектов для расчетов комплексного показателя приведены столбце 3 таблицы 7. Результаты ранжирования тестовых объектов и расчетов по формуле КП приведены в столбцах 1 и 4 таблицы 7. Для определения ранга (первый столбец) использовались значения, полученные на основе детерминистического подхода (см. столбец 4). Отметим, что результаты ранжирования для водоемов-хранилищ соответствуют данным, полученным по методике [2].

Таблица 7 — Исходные данные и результаты расчетов  $KП$

Ранг	Объект	Исходные данные: $ИО$ ; $ИНО$ ; $АС$ ; $СП$ и $A_i$ (ТБк)	$KП_D$ — де- термини- стический подход	$KП_C$ — статистический подход			
				среднее значение	наиболее вероятное	в доверительном интервале 95,45%	
						лев. граница	прав. граница
1	2	3	4	5	6	7	8
1	А	30; 74; 1; 10 000 $^{90}\text{Sr}$ : $4,05 \cdot 10^4$ $^{137}\text{Cs}$ : $4,50 \cdot 10^3$	$1,74 \cdot 10^{21}$	$1,97 \cdot 10^{21}$	$1,25 \cdot 10^{21}$	$4,71 \cdot 10^{20}$	$5,18 \cdot 10^{21}$
2	Б	3; 74; 1; 10 000 $^{239}\text{Pu}$ : $2,0 \cdot 10^3$ $\text{Am}241$ : $4,0 \cdot 10^1$	$7,40 \cdot 10^{16}$	$8,41 \cdot 10^{16}$	$5,06 \cdot 10^{16}$	$2,00 \cdot 10^{16}$	$2,21 \cdot 10^{17}$
3	В	3; 52; 1; 10 000 $^{60}\text{Co}$ : 0,3 $^{137}\text{Cs}$ : $5,1 \cdot 10^1$ $^{241}\text{Am}$ : 0,6	$2,78 \cdot 10^{13}$	$3,25 \cdot 10^{13}$	$2,00 \cdot 10^{13}$	$7,90 \cdot 10^{12}$	$8,53 \cdot 10^{13}$
3	Г	91; 9; 0,1; 1000 $^{235}\text{U}$ : 0,06 $^{238}\text{U}$ : 0,14	$6,48 \cdot 10^{15}$	$7,35 \cdot 10^{15}$	$4,36 \cdot 10^{15}$	$1,77 \cdot 10^{15}$	$1,93 \cdot 10^{15}$

В столбцах 5-8 таблицы 7 приведены следующие данные: 5 — среднее значение комплексного показателя  $KП_C$ , 6 — наиболее вероятное  $KП_{NB}$ , 7 — левая граница доверительного интервала 95,45%, 8 — правая граница.

## Анализ чувствительности и оценка неопределенности ранжирования

Подчеркнем, что методика расчета комплексного показателя относится к детерминистическим подходам, то есть, задавая входные параметры, мы получаем фиксированный результат: длительность или стоимость работ, уровень ядерной или радиационной опасности, приоритет объекта и т. д. При этом не учитывается уровень достоверности (погрешности/неопределенности) исходных данных. Неопределенности и/или погрешности в исходных данных могут существенным образом сказаться на результатах ранжирования. Так, например, неопределенности и/или погрешности в исходных данных могут привести при ранжировании к статистической тождественности объектов (пересечению доверительных интервалов) и, следовательно, поставить под сомнение определение приоритетности одного объекта над другим. А при оптимизации стоимости и сроков начала работ по переводу РАО в экологически безопасное состояние — целесообразность более раннего начала работ.

Для решения этих проблем предлагается использовать математический аппарат анализа чувствительности и оценки неопределенности (погрешности), хорошо зарекомендовавший себя в областях реакторной физики и физики защиты от ионизирующих излучений [9-14].

Подходы анализа чувствительности и оценки неопределенности могут быть использованы не только для ранжирования объектов по радиологической опасности с учетом погрешностей входных параметров, но и для оценки важности того или иного входного параметра с точки зрения вклада в результат расчета, оценки различных составляющих погрешности, выработки требований к точности представления входных параметров для уменьшения погрешности результата расчета, а также для определения области применимости метода расчета. Последнее означает проведение исследований по оценке пределов возможного изменения входных параметров для той или иной группы объектов с целью получения результата с приемлемой для практических целей погрешностью.

Расчеты коэффициентов чувствительности и оценка погрешности проводились с использованием метода Монте-Карло. Отметим, что для всех входных параметров в качестве функции распределения было выбрано распределение Гаусса со стандартным отклонением равным 10% ( $ИО$ ,  $ИНО$ ,  $АС$ ,  $СП$  и  $A_i$ ).

В таблице 8 приведены значения коэффициентов чувствительности комплексного показателя к  $ИО$ ,  $ИНО$  и  $ПРО$  и оценки составляющих погрешности результата расчета для группы ядерно и радиационно опасных объектов – водоемов-хранилищ РАО (А, Б и В) и радиационного источника (Г).

Таблица 8 — Значения коэффициентов чувствительности и составляющих погрешности  $KП_C$

Входной параметр	Коэффициент чувствительности, отн. ед.	Вклад в погрешность расчета $KП_C$ , %			
		водоем-хранилище А	водоем-хранилище Б	водоем-хранилище В	Объект Г
1	2	3	4	5	6
<i>ИНО</i> — идентификатор неопределенности отходов	4	45,9	45,9	46,1	46,5
<i>ИО</i> — идентификатор объекта	4	46,0	46,1	46,4	46,2
<i>ПРО</i> — потенциал радиологической опасности	1	8,1	8,0	7,5	7,3
Итого		100	100	100	100

Результаты исследования кратко можно сформулировать следующим образом:

- наблюдаются незначительные различия в значениях  $KП_D$  и  $KП_C$  до 14%;
- более значительные различия (до 30%) имеют место для  $KП_D$  и  $KП_{НВ}$ ;
- значение  $KП_D$  меньше среднего значения и больше наиболее вероятного, что говорит об асимметричности функции распределения  $KП_C$  (в качестве примера см. рисунки 5-8);
- отношение значений границ доверительного диапазона (с вероятностью 95,45%) имеют большой размах (~10 раз);
- ранжирование объектов ярко выражено — их доверительные интервалы не пересекаются, что позволяет судить о хорошем качестве рассматриваемой методики (см. рисунок 9). При этом результаты ранжирования соответствуют данным, полученным по методике [2];
- параметры *ИНО* и *ИО* явно превалирует над другими — значения их коэффициентов чувствительности (см. столбец 2 в таблице 8) по крайней мере в 4 раза больше остальных и, как следствие, они суммарно определяют более 90% всей погрешности расчета (см. столбцы 3-6 в таблице 8). Следовательно для уменьшения погрешности расчета  $KП_C$  необходимо в первую очередь уменьшить неопределенности параметров *ИО* и *ИНО*.

Последнее говорит о том, что для рассмотренных объектов первостепенное значение имеют природа и состояние радиоактивных материалов и насколько объект на данный момент выполняет свою текущую функцию.

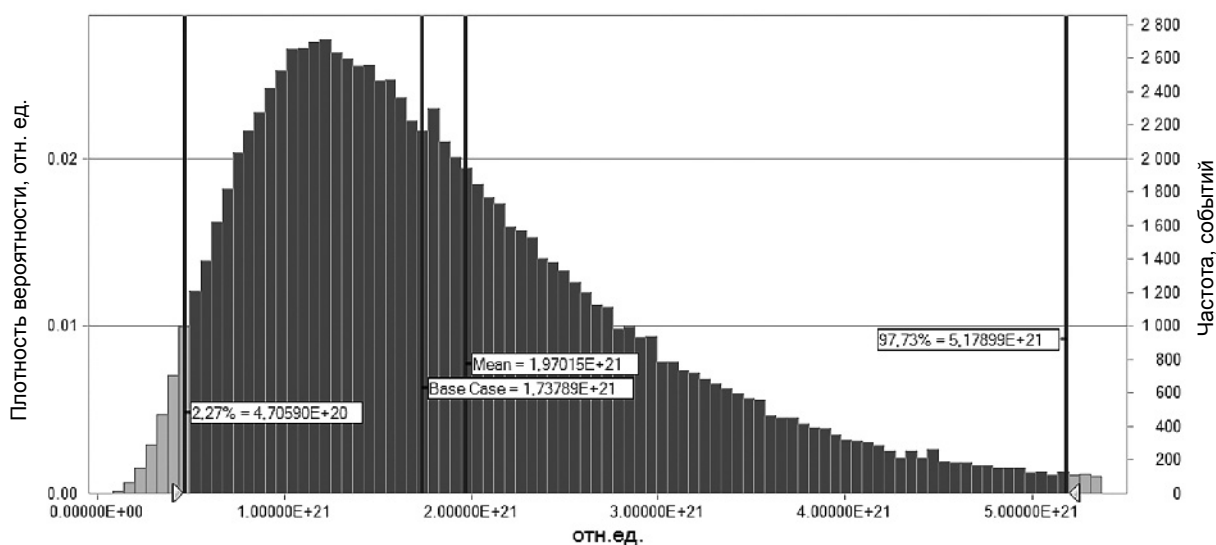


Рисунок 5 — Функция распределения  $KП_C$  для водоема-хранилища А

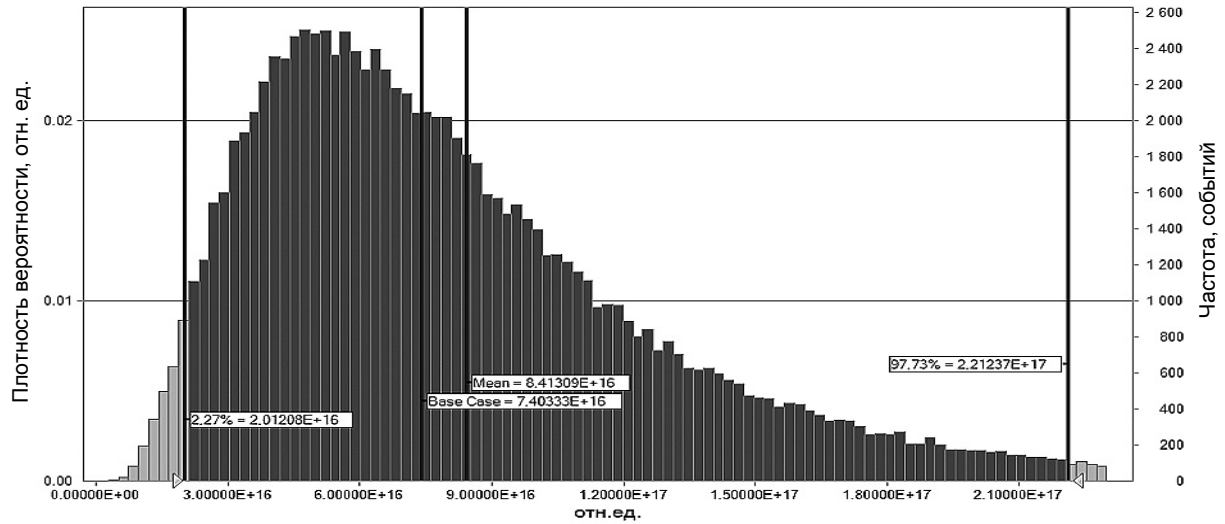


Рисунок 6 — Функция распределения КПС для водоема-хранилища Б

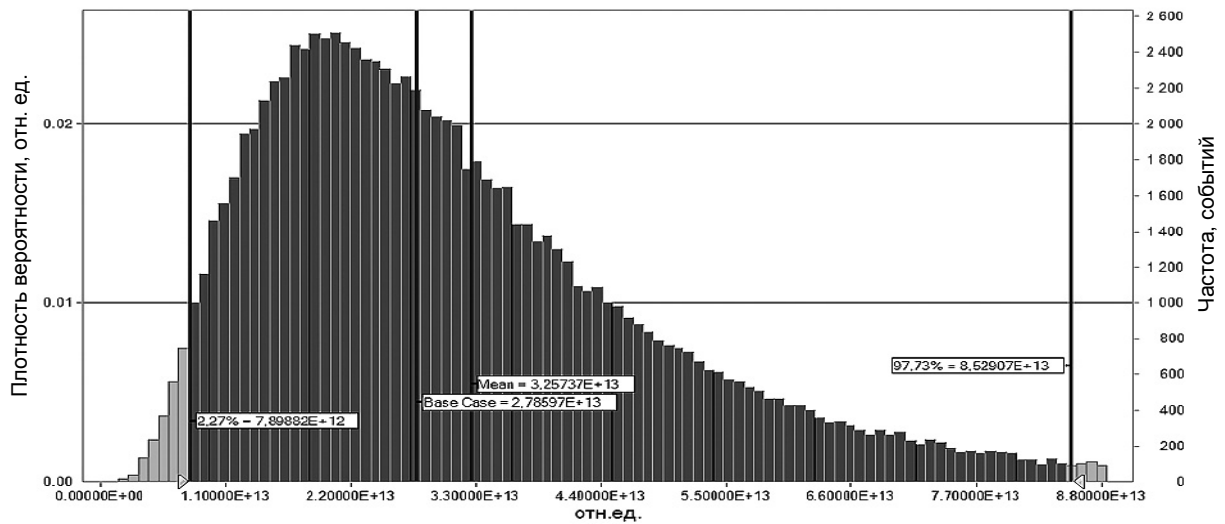


Рисунок 7 — Функция распределения КПС для водоема-хранилища В

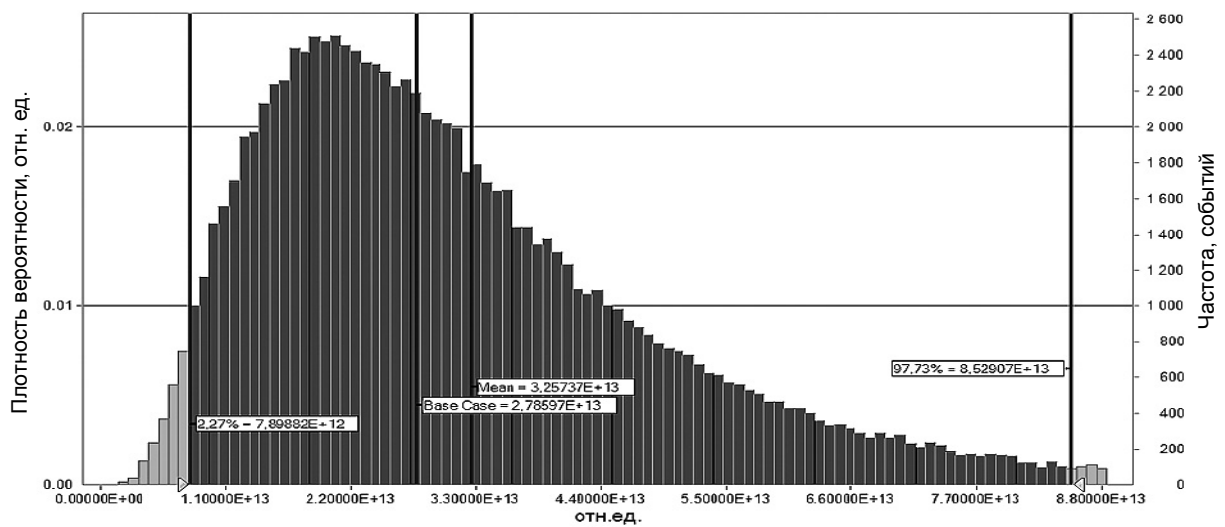


Рисунок 8 — Функция распределения КПС для сооружения Г

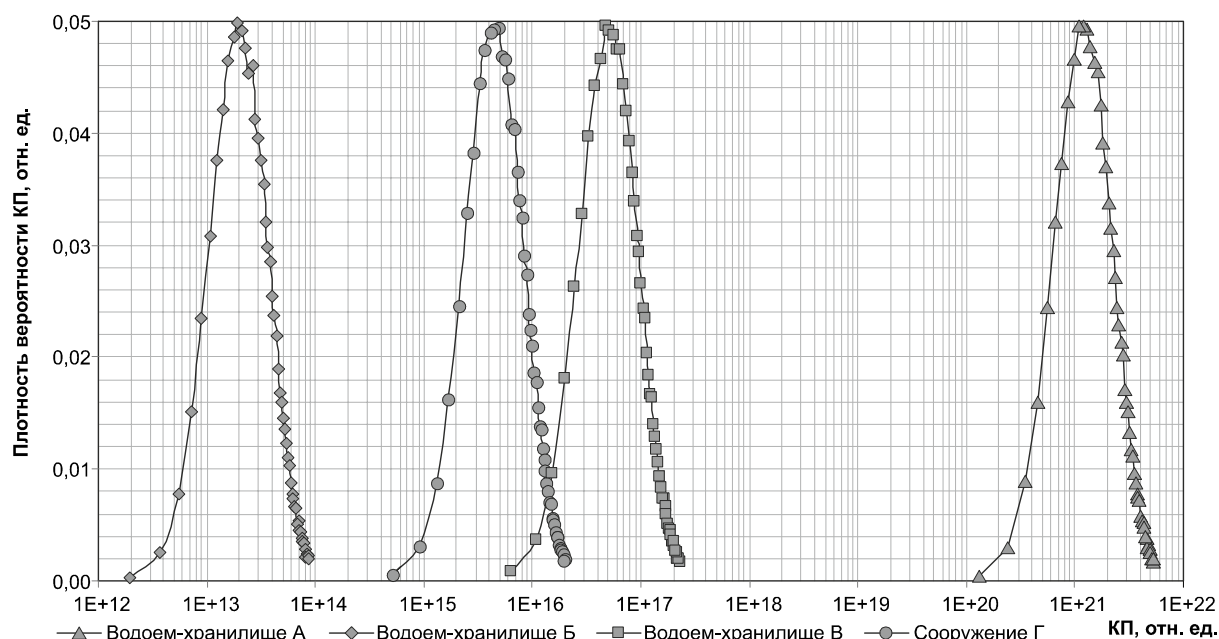


Рисунок 9 — Плотности распределения КСИ

## Выводы

Методика расчета комплексного показателя безопасности и ущерба окружающей среды NDA несомненно найдет широкое применения в задачах инвентаризации, ранжирования и определения приоритета включения объектов наследия в программы обеспечения ядерной и радиационной безопасности.

Показана необходимость и проведена адаптация методики расчета комплексного показателя безопасности и ущерба окружающей среды [3, 4], в частности для учета чрезвычайных ситуаций с радиологическими последствиями.

Показано совпадение данных по адаптированной методике и известной [2].

Показана необходимость исследования чувствительности и оценки погрешностей результата расчета к входным параметрам в проблеме ранжирования.

На последующих этапах работ целесообразно проведение сравнительных расчетов по объектам низкой потенциальной опасности и, возможно, формирование интегрированной методики.

## Литература

1. И.Л. Абалкина, Д.В. Бирюков, М.В. Ведерникова, В.И. Дорогов «Инвентаризация ядерно и радиационно опасных объектов: ожидаемые результаты и перспективы их использования» Препринт ИБРАЭ № ИБРАЭ-2014-05.
2. «О ранжировании потенциальных источников радиационного риска» Д.В. Бирюков, В.И. Дорогов, Т.А. Спивак, Д.В. Ковальчук. В кн.: Вопросы радиационной безопасности № 3, 2013.
3. NDA Prioritisation — Calculation Of Safety And Environmental Detriment Scores, Doc No EGPR02 Rev 6, April 2011. <http://www.nda.gov.uk/documents/upload/EGPR02-NDA-Prioritisation-calculation-of-safety-and-environmental-detriment-scores-Rev6.pdf>.
4. Instruction for the calculation of the Radiological Hazard Potential, Doc No EGPR02-WI01, Rev 3, March 2010. <http://www.nda.gov.uk/documents/upload/EGPR02-WI01-Instruction-for-the-calculation-of-the-Radiological-Hazard-Potential-Rev3.pdf>.
5. Планирование и готовность к аварийному реагированию при транспортных авариях, связанных с радиоактивными материалами. Safety Standards Series, № TS-G-1.2 (ST-3), IAEA, Vienna, 2005.
6. Богатов С.А., Киселев А.А., Шведов А.М. Методические подходы для оценок радиационной обстановки, ожидаемого облучения и эффективности контрмер при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу в модели ПРОЛОГ: Препринт ИБРАЭ №ИБРАЭ-2011-02, 2011.

7. Airborne Release Fractions/Rates and Respirable Fractions for Nonreactor Nuclear Facilities, DOE-HDBK-3010-94, U.S. Department of Energy, Washington, D.C. 20585, December 1994.
8. INES Руководство для пользователей международной шкалы ядерных и радиологических событий. — Вена: МАГАТЭ, 2010
9. Усачев Л.Н. Уравнение для ценности нейтронов, кинетика реактора и теория возмущений. — В кн.: Реакторостроение и теория реакторов. М., Изд. АН СССР, 1955.
10. Усачев Л.Н., Бобков Ю.Г. Теория возмущений и планирование эксперимента в проблеме ядерных данных для реакторов. М., Атомиздат, 1980.
11. Абагян А.А., Орлов В.В., Родионов Г.Н. О функциях опасности нейтронов при расчете защиты от излучений. — В кн.: Вопросы защиты реакторов. Под ред. Д.Л. Бродера, М., Атомиздат, 1963, с. 7.
12. Oblow E.M. General Sensitivity Theory for Radiation Transport. ORNL-TM-4110. Oak Ridge National Lab., 1973.
13. Proceedings of Seminar-Workshop of the Theory and Application of Sensitivity and Uncertainty Analysis, Oak Ridge, Tennessee, August 22-24, 1978, ORNL/RSIC=24, Oak Ridge National Lab., 1978.
14. Погрешности расчетов защиты от излучений. В.В. Болятко, М.Ю. Вырский, А.И. Илюшкин и др. М.: Энергоатомиздат, 1983. — 176 стр.