

СТАТЬИ

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ХРАНИЛИЩ И МОГИЛЬНИКОВ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

И.В. Калиберда, В.Н. Коробкин, Г.В. Малевинский,
Т.З. Югай (НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России)

В любом из пунктов хранения радиоактивных отходов (ПХ РАО) размещено несколько хранилищ и могильников РАО. Известны объекты, в зоне строго режима которых размещено несколько десятков хранилищ и могильников. Хранилище (могильник) – строительная конструкция, предназначенная для длительного хранения РАО. Это хранилища и могильники различного типа, построенные и введенные в эксплуатацию в разное время. В каждом из них проводится радиационный контроль в установленных местах, удаленных от хранилищ и находящихся в пределах или на границах санитарно-защитной зоны (СЗЗ) и (или) зоны наблюдений (ЗН).

Как правило, данные замеров радиационных характеристик являются интегральными величинами и представляют собой результат воздействия радионуклидов хранилищ и могильников, размещающихся в промышленной зоне (промзоне). На основе данных радиационного контроля определяют радиационный фон в исследуемой точке, который также характеризует суммарную степень делокализации хранилищ и могильников. При изменении радиационного фона в контролируемых точках в пределах или на границах СЗЗ и ЗН встает задача поиска претендента-вкладчика в радиационный фон. Но на основе данных радиационного контроля трудно определить вклад конкретного хранилища (могильника) в радиационный фон на площадке без данных о надежности хранилищ и могильников в части выполнения ими функций локализации РАО.

Рис. 1 позволяет схематично описать сказанное выше в части существующей проблемы идентификации хранилища (могильника), у которого нарушена функция локализации.

Ниже описаны подход и методика анализа надежности хранилищ и могильников РАО, обеспечивающие возможность выявлять «проблемные» хранилища и могильники. Предполагается, что анализируя надежность хранилищ и могильников, выявляя риски невыполнения локализующей функции в пределах рассматриваемых периодов (0 – 30 – 100 лет), можно исключить влияние отдельных из них, а остальные ранжировать по моменту наступления делокализации.

Для выделения хранилищ и могильников, полностью или частично утративших свои локализующие функции, следует рассмотреть конструктивные решения, условия размещения, а также выполнить анализ надежности каждого из хранилищ и могильников, учитывая изотопный состав и объем РАО в хранилище (могильнике).

Используя современную терминологию классификации систем и элементов объектов использования атомной энергии по выполняемым функциям безопасности, можно констатировать, что хранилище (могильник) РАО – это пассивная система безопасности, выполняющая локализующие функции. Локализовать отходы – это значит не допустить утечки (миграции) радионуклидов из хранилища (могильника), в котором они хранятся, за границы объекта и тем более за пределы СЗЗ и ЗН.

Основу подхода к оценке надежности хранилищ и могильников РАО составляют исследования отказов с использованием расчетных методов. Невыполнение локализующей функции предполагает миграцию радионуклидов от места размещения РАО. Возможны три пути миграции:

- по воздуху воздушными потоками;
- по поверхности площадки с дождевыми и талыми водами;
- через глубинные слои грунта с грунтовыми водами.

В связи с указанным рассматриваются три вида риска:

- миграция радионуклидов по воздуху;
- миграция радионуклидов по поверхности воды;
- миграция радионуклидов через глубинные слои воды.

Для наземных и приповерхностных могильников могут иметь место все три вида рисков.

Хранилище (могильник) РАО – это, как правило, система, включающая несколько защитных барьеров, препятствующих свободному контакту РАО с окружающей внешней средой (матрицы, упаковки, контейнеры, боксы, экраны, строительные конструкции, искусственные и природные грунтовые барьеры).

Для хранилищ и могильников РАО основные причины отказов защитных барьеров – внешние воздействия природного и техногенного происхождения. Сценарии последствий развития событий – это медленно развивающиеся процессы деградации барьеров на пути миграции радионуклидов, хотя при экстремальных внешних воздействиях возможны мгновенные отказы, например, при разрушении емкости с жидкими радиоактивными отходами (ЖРО), размещенной на или выше поверхности земли.

Методика анализа надежности хранилищ и могильников разрабатывалась и адаптировалась на примере конкретного ПХ РАО. Были проанализированы условия размещения хранилищ и могильников, влияющие на их делокализацию, а также наводнения, подтопления, атмосферные осадки, сейсмические колебания грунта и другие события. Вначале проводится качественный анализ надежности. Исходной информацией для него служит техническая документация, пояснительные записки, технические описания, схемы и рабочие чертежи хранилищ (могильников), сведения об условиях работы хранилищ и могильников, регламенты технического обслуживания и ремонта.

Для каждого типа хранилищ и могильников определены инженерные барьеры, препятствующие утечке радионуклидов из хранилищ и могильников. При этом учитывались конструктивные особенности хранилищ, свойства материалов ограждающих и изолирующих конструкций, сборность отдельных элементов, виды хранящихся РАО и т.п.

Специфика хранилищ и могильников как пассивных систем определяется следующими особенностями:

а) элементами локализирующей конструкции служат слои материалов, блокирующих движение радионуклидов в виде инфлюэнтов из хранящихся РАО. Каждый из этих слоев становится физическими барьером на пути распространения инфлюэнтов,

б) старение материала проявляется в виде трещин, которые увеличиваются и создают риск частичного разрушения конструкции или полного разрушения, способного разблокировать радионуклиды, открывая пути их миграции за пределы локализирующей конструкции;

в) отказом элемента (барьера) считается любое его локальное сквозное повреждение, нарушающее целостность этого элемента конструкции или его связей с соседними элементами.

В табл. 1 приведена краткая характеристика инженерных барьеров для хранилищ (могильников) различных типов для ограничения распространения радионуклидов.

Таблица 1

**Краткая характеристика инженерных барьеров
для хранилищ различных типов**

Тип хранилища	Инженерные барьеры
А	1. Внутренняя металлическая облицовка: нержавеющая сталь толщиной 5 мм 2. Монолитный железобетон ограждающих конструкций резервуара толщиной 200 мм 3. Наружная обмазочная гидроизоляция: битум
Б	1. Внутренняя обмазочная гидроизоляция: битум 2. Монолитный железобетон ограждающих конструкций 3. Наружная обмазочная гидроизоляция: битум
В (РАО, не подлежащие обработке)	1. Материал буфера: цементный раствор на ЖРО 2. Внутренняя обмазочная гидроизоляция: битум 3. Цементная стяжка с добавлением жидкого стекла 4. Ограждающие конструкции хранилища: монолитный железобетон фундаментной плиты толщиной 300 мм, сборный железобетон наружных стен толщиной 600 мм, покрытия – 200 мм 5. Наружная оклеечная гидроизоляция: два слоя рубероида
Г (отвержденные)	1. Материал матрицы: битум, цемент 2. Внутренняя обмазочная гидроизоляция: битум 3. Цементная стяжка с добавлением жидкого стекла 4. Ограждающие конструкции хранилища: монолитный железобетон фундаментной плиты толщиной 300 мм, сборный железобетон наружных стен толщиной 600 мм, покрытия – 200 мм 5. Наружная оклеечная гидроизоляция: два слоя рубероида
Д	1. Корпус источника 2. Материал буфера: свинец 3. Материал стенок приемного контейнера: нержавеющая сталь 4. Материал колодца: монолитный железобетон
Е	1. Материал корпусов спецконтейнеров: металл 2. Материал ограждающих конструкций: монолитный железобетон толщиной 400 мм
Ж	1. Материал спецконтейнера: металл 2. Материал буфера: свинец 3. Материал приемного колодца: чугун 4. Наружное ограждение: монолитный железобетон
И	1. Материал стенок: нержавеющая сталь толщиной 10 мм 2. Ограждающие конструкции здания

В табл. 2 приведены общие сведения об объеме качественного анализа, выполненного для хранилищ исследуемого ПХ РАО.

Сводная таблица вариантов качественного анализа надежности по типам хранилищ и схемам делокализации

Схема делокализации	Номера таблиц по типам хранилищ															
	А	Б	В1	В2	В3	В4	Г1	Г2	Г3	Г4	Д	Е1	Е2	Ж1	Ж2	И
Сверху-вниз	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Сверху-вбок		2	2	2	2	2	2	2	2	2	-	2	2	2	2	-
Снизу-вниз	2	6	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	-	5	5	-
Снизу-вбок		5	4	4	4	4	4	4	4	4	4	-	-	-	-	-
Сбоку-вниз	4	4	-	-	5	5	-	-	5	5	-	3	-	3	3	-
Сбоку-вбок	1	3	-	-	-	-	-	-	-	-	2	4	-	4	4	-
Сверху-вниз	-	-	-	-	-	-	5	5	6	6	-	-	-	-	-	2
Сбоку-вбок	-	-	-	-	-	-	6	6	7	7	-	-	-	-	-	-
Снизу-вниз	5	-	-	-	-	-	7	7	8	8	-	-	-	-	-	-
Снизу-вбок	-	-	-	-	-	-	8	8	9	9	-	-	-	-	-	-
Сбоку-вниз	-	-	-	-	-	-	-	-	10	10	-	-	-	-	-	-

Условные обозначения типов хранилищ, принятые при выполнении качественного анализа надежности:

- А - законсервированные хранилища ЖРО;
 - Б - законсервированные хранилища твердых несцементированных ТРО;
 - В1 - эксплуатируемые одноэтажные хранилища твердых сцементированных ТРО;
 - В2 - то же, двухэтажные;
 - В3 - законсервированные одноэтажные хранилища твердых сцементированных РАО;
 - В4 - то же, двухэтажные;
 - Г1 - эксплуатируемые одноэтажные хранилища РАО, отвержденных в битумную (№ 1-4) или цементную (№ 5-6) матрицы;
 - Г2 - то же, двухэтажные;
 - Г3 - законсервированные одноэтажные хранилища РАО, отвержденных в битумную (№ 1-5) или цементную (№ 6-10) матрицы;
 - Г4 - то же, двухэтажные;
 - Д - хранилища ИИИ;
 - Е1 - эксплуатируемые хранилища радиевых и радиий-мезоторийевых ИИИ;
 - Е2 - то же, законсервированные;
 - Ж1 - эксплуатируемые хранилища РАО высокой активности;
 - Ж2 - то же, законсервированные;
 - И - хранилища для временного хранения ЖРО.
- Условные обозначения элементов, принятые в таблицах:
- Н - нагруженный, НН - ненагруженный;
 - К - контролируемый, ПК - периодически контролируемый;
 - НК - неконтролируемый;
 - В - восстанавливаемый, НВ - невозстанавливаемый.

На рис. 2, 3, 4 и 5 представлены эскизы четырех типов хранилищ (в качестве примера):

- емкости для захоронения твердых радиоактивных отходов (ТРО);
- хранилище для отработавших источников ионизирующего излучения (ИИИ).
- емкости для хранения ЖРО;
- хранилища для радиий-мезоторийевых источников и высокоактивных отходов.

На рис. 6 приведена укрупненная и обобщенная логическая диаграмма с деревьями событий для путей развития делокализации хранилищ и могильников при внешних воздействиях природного происхождения (осадках, наводнениях, подтоплениях и землетрясениях). Установлено, что любое из внешних воздействий способствует прониканию влаги к РАО.

При качественном анализе выявлены возможные пути выхода радионуклидов из хранилищ и могильников рассматриваемых типов за их пределы. Для хранилищ ТРО и отвержденных отходов были выявлены негативные последствия от проникновения влаги различного происхождения во внутренний объем хранилища и ее обратного выхода.

Исходная информация, характеризующая влияние надежности элементов локализирующей конструкции на выполнение функции локализации при различных направлениях проникновения влаги в РАО и утечки радионуклидов из хранилища (сверху - вниз, снизу - вбок и т.д.), затабулирована по результатам качественного анализа надежности конструкции в целом.

В табл.3 и 4 приведены примеры качественного анализа надежности хранилищ типов В1 и И.

Таблица 3

Качественный анализ надежности хранилищ типа В1 при поступлении и распространении влаги по схеме «сверху – вниз»

Элемент конструкций (барьер) на пути продвижения влаги	Класс элемента	Контролируемость элемента	Возможность восстановления	Означает ли отказ данного элемента отказ всей системы изоляции	Примечание
Сборная плита/стык покрытия	НН	ПК	В	Нет	
Верхний цементный слой буфера	НН	НК	В*	Нет	
Нижний цементный слой буфера	Н	НК	НВ	Нет	
Битумный слой на фундаменте	Н	НК	НВ	Нет	
Цементная стяжка фундамента	Н	НК	НВ	Нет	
Монолитная плита фундамента	Н	НК	НВ	Нет	

* При очередной загрузке

Таблица 4

Качественный анализ надежности хранилищ типа И при распространении ЖРО через стенки

Элемент конструкций (барьер) на пути распространения ЖРО	Класс элемента	Контролируемость элемента	Возможность восстановления	Означает ли отказ данного элемента отказ всей системы изоляции	Примечание
Нержавеющая сталь	Н	К	В*	Нет	
Монолитный бетон	Н	К	В	Нет	

* При осушении резервуара

В процессе выполнения анализа надежности методика расчета надежности опирается на моделирование поведения хранилища как сложной многобарьерной системы. При качественном анализе надежности рассматриваются все возможные пути транспорта влаги. Для упрощения расчетов надежности допускается принимать во внимание только путь минимального сопротивления распространению влаги. Погрешность неучета других путей распространения влаги лежит в пределах точности исходных данных.

При анализе надежности различных локализирующих конструкций принимаются следующие допущения:

- отказом элемента конструкции считается такое его повреждение, при котором нарушается целостность локализирующего слоя и таким образом становится возможной миграция радионуклидов в грунтовые воды;
- для любого элемента конструкции принимается единый закон распределения наработки между отказами – нормальный закон распределения наработки;
- значения времени безопасной эксплуатации хранилища T оцениваются исходя из проектных условий работы элементов конструкций.

Для описания процесса старения элемента обычно применяется нормальный закон распределения наработки. Ниже приведены результаты анализа надежности хранилищ и могильников на примере исследуемого ПХ РАО, полученные на основе проектных данных. Проверка соответствия проектных и реальных условий работы не проводилась, однако для конкретного случая она целесообразна в целях обеспечения справедливости выводов.

Расчет вероятности нарушения функции локализации (ВНФЛ) проводится для трех моментов времени t .

1) $t = 3$ года (за $t = 0$ принимается начало эксплуатации могильника, в среднем через три года производится его консервация. Речь идет об оценке накопления единичных повреждений в сравнительно тяжелых условиях первого периода эксплуатации открытого сверху могильника);

2) $t = 30$ лет (если считать, что часть хранилищ и могильников на ПХ РАО достигнет 30 лет эксплуатации в 2006 году);

3) $t = 100$ лет.

При анализе надежности хранилищ и могильников проанализировано состояние 16 типов хранилищ и рассмотрены 11 сценариев их делокализации.

При расчете ВНФЛ принимались худшие оценки условий работы элемента в названных (консервативный принцип), когда фактическая надежность хранилища (могильника) будет предположительно выше полученных расчетных оценок, если сформулированные допущения окажутся адекватными действительности. В противном случае не исключается, что фактическая надежность будет хуже расчетной, но это маловероятно.

Полученные результаты долгосрочного прогноза поведения хранилищ и могильников следует рассматривать как предварительные. Их рекомендуется уточнять по мере накопления новых экспериментальных данных о состоянии хранилищ, а также на основе данных радиационного контроля, если темпы их разрушения окажутся выше расчетных.

В табл. 5 приводятся результаты анализа надежности элементов локализующих систем. На рис. 7 представлена модель независимых отказов толстостенного элемента вследствие его старения (модель хранилища жидких РАО), а на рис. 8 и 9 – деревья отказов для отдельных типов хранилищ. В табл. 6 приведены данные риска невыполнения локализующей функции для приповерхностных хранилищ разных типов (при дожде и при затоплении). Они позволяют оптимистично смотреть на возможность обеспечения безопасного захоронения ТРО и отвержденных РАО низкой, средней и высокой активности в хранилищах и могильниках приповерхностного типа. На рис. 10 и 11 приведены графики – временные тренды риска делокализации хранилищ отдельных типов.

Таблица 5

Надежность элементов локализующих систем

Элемент локализующих систем	Условия работы		Закон распределения	Консервативная оценка срока службы, T (лет)
	Имеется контакт с влагой	Происходит замерзание/оттаивание		
Цементная матрица	Да	Нет	$\delta = 1/3 T$	5
	Нет	Нет	$\delta = 1/3 T$	15
Битумная матрица	Да	Нет	$\delta = 1/3 T$	50
	Нет	Нет	$\delta = 1/3 T$	150
Цементный шов, буфер	Да	Да	$\delta = 1/3 T$	15
	Да	Нет	$\delta = 1/3 T$	50
	Нет	Да	$\delta = 1/3 T$	50
	Нет	Нет	$\delta = 1/3 T$	150
Бетонная плита, панель-монолит	Да	Нет	$\delta = 1/3 T$	50
	Да	Нет	$\delta = 1/3 T$	150
	Да	Нет	$\delta = 1/3 T$	500
Наружная (внутренняя) гидроизоляция (битум)	Да	Нет	$\delta = 1/3 T$	5
Облицовка из нержавеющей стали в контакте с ЖРО	Не имеет существенного значения	Нет	$\delta = 1/3 T$	$T = d/V$, где d – толщина листа, мм; V – скорость коррозии; $V_{max} = 60$ мкм/год
Сталь, чугун (в контакте с влагой)	Да	Нет	$\delta = 1/3 T$	$T = d/V$, где d – толщина листа, мм; V – скорость коррозии; $V_{max} = 20$ мкм/год
Свинец	Не имеет существенного значения	Нет	$\delta = 1/3 T$	$T \rightarrow ?$

**Риски невыполнения локализирующей функции для
приповерхностных хранилищ разных типов**

Тип хранилища	Название хранилища	Консервативные оценки ВНФЛ, случаев/хранилищ/год				
		При дожде			При затоплении	
		$t = 3$	$t = 30$	$t = 100$	$t = 30$	$t = 100$
А	Законсервированные хранилища ЖРО	7,2E-6	4,2E-3	1,4E-1	4,2E-3	1,4E-1
Б	Законсервированные хранилища несцементированных ТРО	5,8E-10	1,4E-4	2,5E-2	1,2E-2	1,6E-1
В1 ↓ В3	Эксплуатируемые (через 3 года – законсервированные) одноэтажные хранилища твердых сцементированных ТРО	1,1E-6	0,8E-4	4,6E-2	2,0E-4	4,7E-2
В2 ↓ В4	Эксплуатируемые (через 3 года – законсервированные) двухэтажные хранилища твердых сцементированных ТРО	1,1E-6	0,8E-4	4,6E-2	2,0E-4	4,7E-2
Г1 ↓ Г3	Эксплуатируемые (через 3 года – законсервированные) одноэтажные хранилища отвержденных РАО в виде: <ul style="list-style-type: none"> ▪ битумной (№2) матрицы; ▪ цементной (№7) матрицы 	4,2E-7 1,5E-5	0,8E-4 2E-2	4,6E-2 1,6E-1	2,2E-4 1,4E-2	4,7E-2 1,6E-1
Г2 ↓ Г4	Эксплуатируемые (через 3 года – законсервированные) двухэтажные хранилища РАО в виде: <ul style="list-style-type: none"> ▪ битумной матрицы; ▪ цементной матрицы 	4,2E-7 1,5E-5	0,8E-4 2E-2	4,6E-2 1,6E-1	2,2E-4 1,4E-2	4,7E-2 1,6E-1
Д	Хранилища ИИИ	→ 0	→ 0	→ 0	→ 0	→ 0
Е1	Эксплуатируемые хранилища радиевых и радий-мезоториевых ИИИ	→ 0	→ 0	→ 0	1,4E-4	2,0E-2
Е1	Законсервированные хранилища радиевых и радий-мезоториевых ИИИ	→ 0	→ 0	→ 0	1,4E-4	2,0E-2
Ж1	Эксплуатируемые хранилища РАО высокой активности	→ 0	→ 0	→ 0	2,4E-7	2,8E-3
Ж2	Законсервированные хранилища РАО высокой активности	→ 0	→ 0	→ 0	2,4E-7	2,8E-3
И	Хранилища для временного хранения ЖРО	7,2E-6	4,2E-3	1,4E-1	4,2E-3	1,4E-1

Полученные результаты анализа надежности должны учитываться эксплуатирующими организациями при контроле состояния хранилищ и служить основанием для принятия ими компенсирующих мер. Они также могут стать исходными данными для определения зон загрязнения радионуклидами, распространяющимися из хранилищ после потери ими функций локализации, в пределах промзоны, СЗЗ и ЗН. Размеры зон загрязнения радионуклидами от каждого из хранилищ могут определяться для любого заданного момента времени.

Полученные данные о зонах загрязнения радионуклидами и сопутствующими токсичными элементами в дальнейшем могут использоваться для экспертизы хранилищ РАО, а также для повышения научного уровня получения оценок риска от эксплуатации хранилищ ПХ РАО для окружающей среды и населения.

Выводы

1. При размещении на промплощадке ПХ РАО нескольких хранилищ и могильников целесообразно использовать методы оценки надежности на основе расчетных исследований отказов их барьеров, устраиваемых для ограничения выхода из хранилищ (могильников) радионуклидов.
2. Индивидуальные оценки надежности хранилищ и могильников создают основу для выявления «проблемных» хранилищ и могильников для различных периодов их эксплуатации.
3. Часть элементов хранилищ и могильников на ранних (до консервации) этапах хранения РАО относится к контролируемым и восстанавливаемым элементам. Контроль за их эксплуатацией для предупреждения раннего попадания влаги в хранилище (могильник) – один из способов управления надежностью хранилищ. В то же время возможности повышения надежности за счет предупредительных мероприятий невелики, и поэтому в предварительных прогнозах риска указанные мероприятия могут не рассматриваться.
4. Проведенный анализ не отрицает возможности длительного (более 100 лет) захоронения РАО низкой и средней активности в могильниках приповерхностного типа в условиях удачно выбранной площадки и достаточных размеров СЗЗ, что подтвердили расчетные исследования хранилищ и могильников ПХ РАО.
5. На основе полученных результатов планируется внедрять метод оценки надежности хранилищ в нормативные документы на регулирующем уровне.

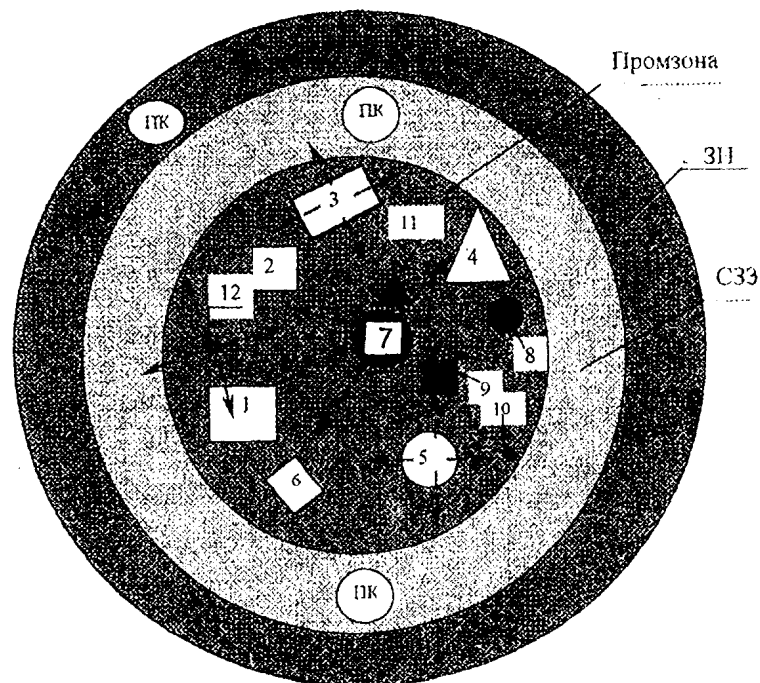


Рис. 1. Интегральная схема функционирования ПХ РАО

Условные обозначения:

ПК – точка радиационного контроля;

1, 2, 3, 4, ... 12 – номера хранилищ;

→ - направление миграции радионуклидов;

■, △, □, ●, ○, ▲, ● - хранилища различного типа в промзоне.

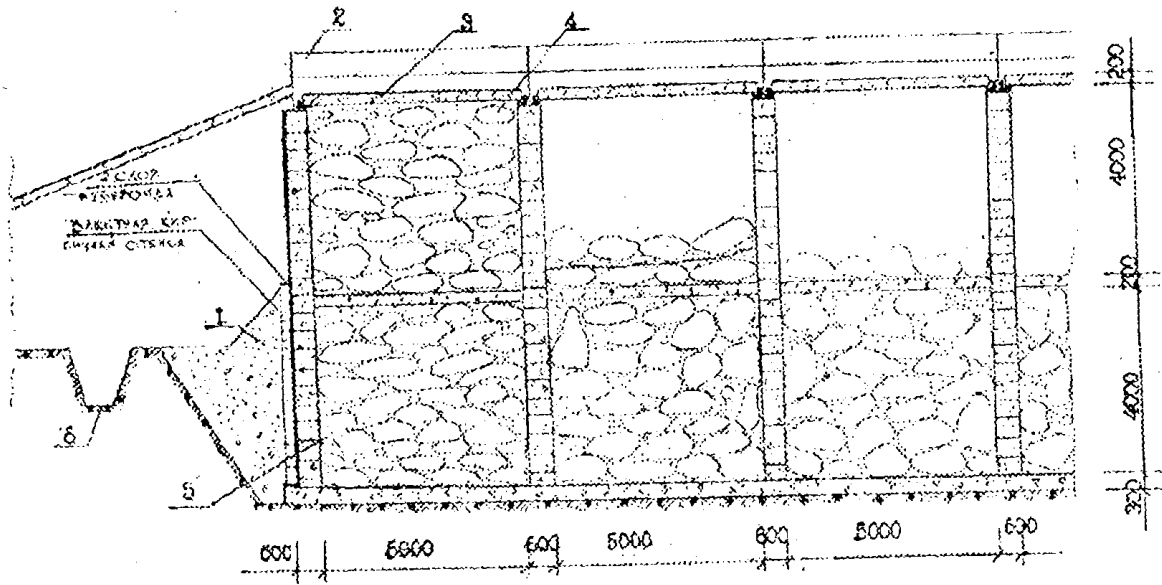


Рис. 2. Емкости для захоронения твердых радиоактивных отходов
 1 – глиняный замок, 2 – ограждение, 3 – плита перекрытия,
 4 – отходы, 5 – цементный раствор, 6 – дренажная канава

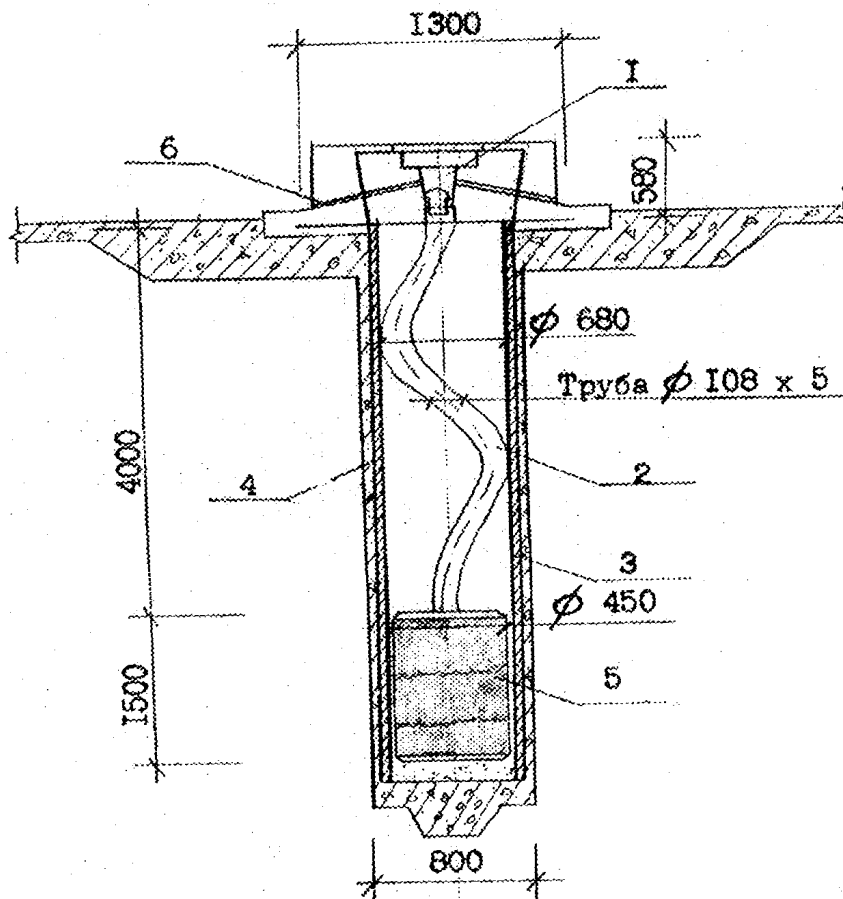


Рис.3. Хранилище для отработавших источников ИИИ
 1 – разгрузочная воронка, 2 – загрузочный канал,
 3 – чугунная обечайка, 4 – бетон, 5 – контейнер,
 6 – водоотводные каналы

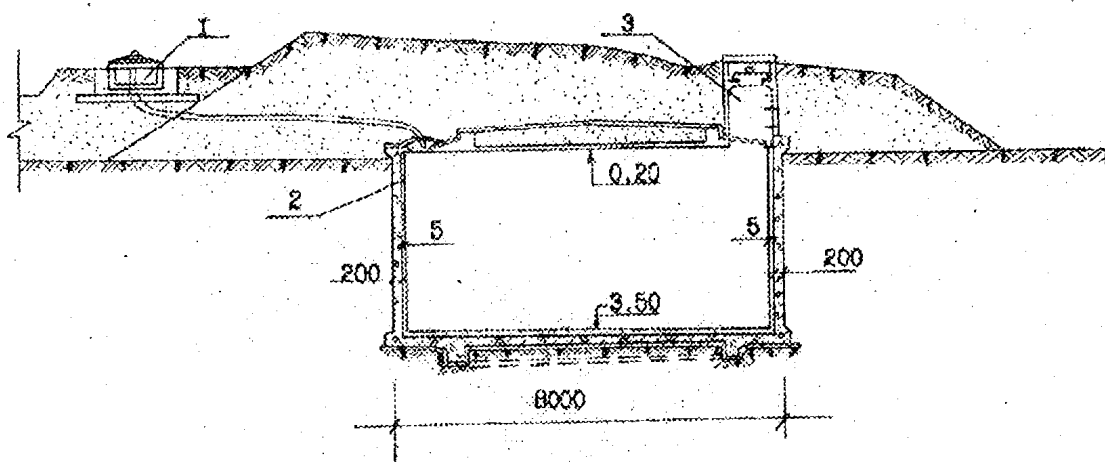


Рис.4. Емкости для хранения жидких радиоактивных отходов :
 1 – сливное устройство, 2 – облицовка из нержавеющей стали, 3 – монтажный аварийный люк

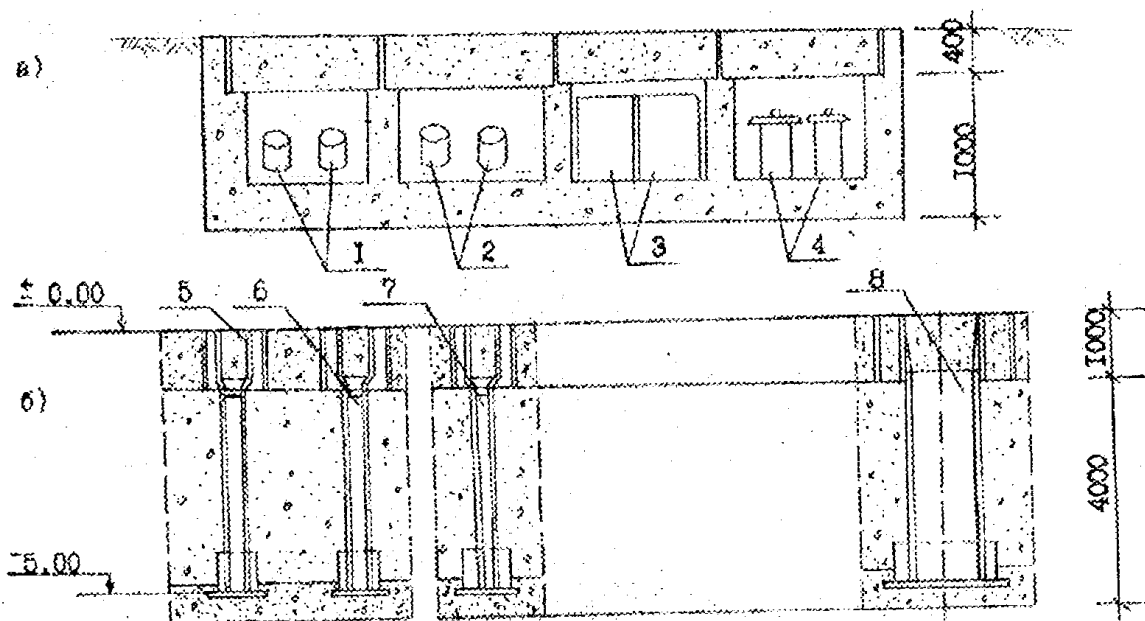


Рис.5. Хранилище для радий-мезоториевых источников (а)
 и высокоактивных отходов (б)
 1, 2, 3, 4 – различные упаковки для хранения радий-
 мезоториевых источников, 5 – пробка, 6 – хранилище для
 упаковок Д 150 мм, 7 – хранилище для упаковок Д 250 мм,
 8 – хранилище для упаковок Д 450 мм

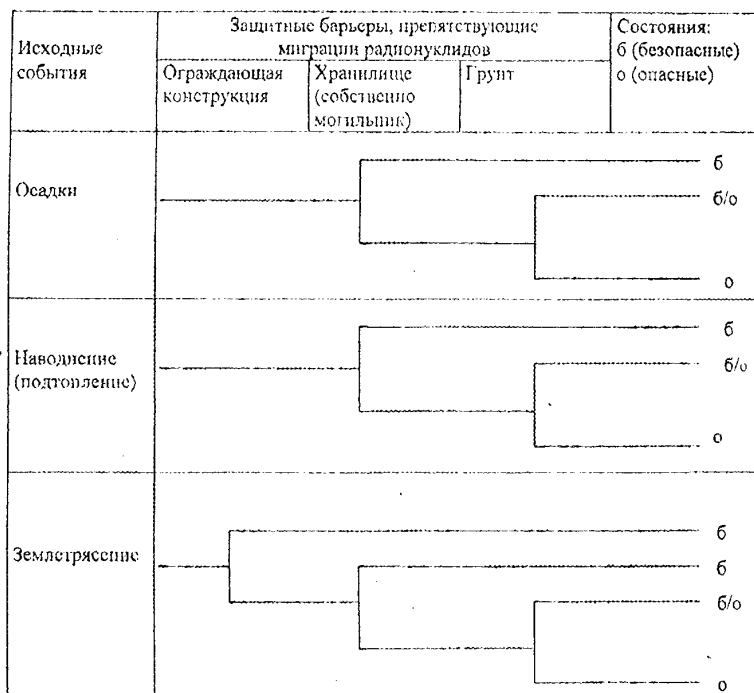


Рис. 6. Деревья событий, приводящих к утечке радионуклидов в грунт с водой (укрупненная и обобщенная логическая диаграмма путей развития децентрализации хранилища при внешних воздействиях природного происхождения)

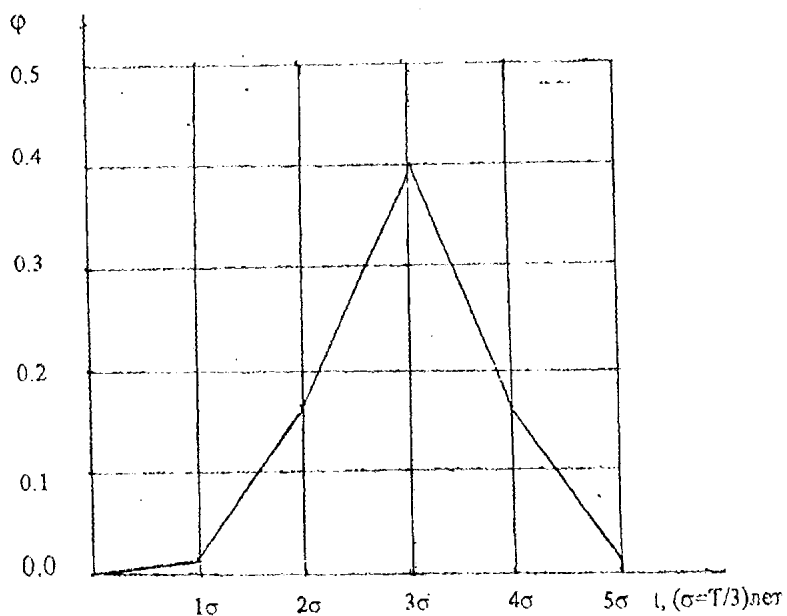


Рис. 7. Модель независимых отказов толстостенного элемента вследствие его старения

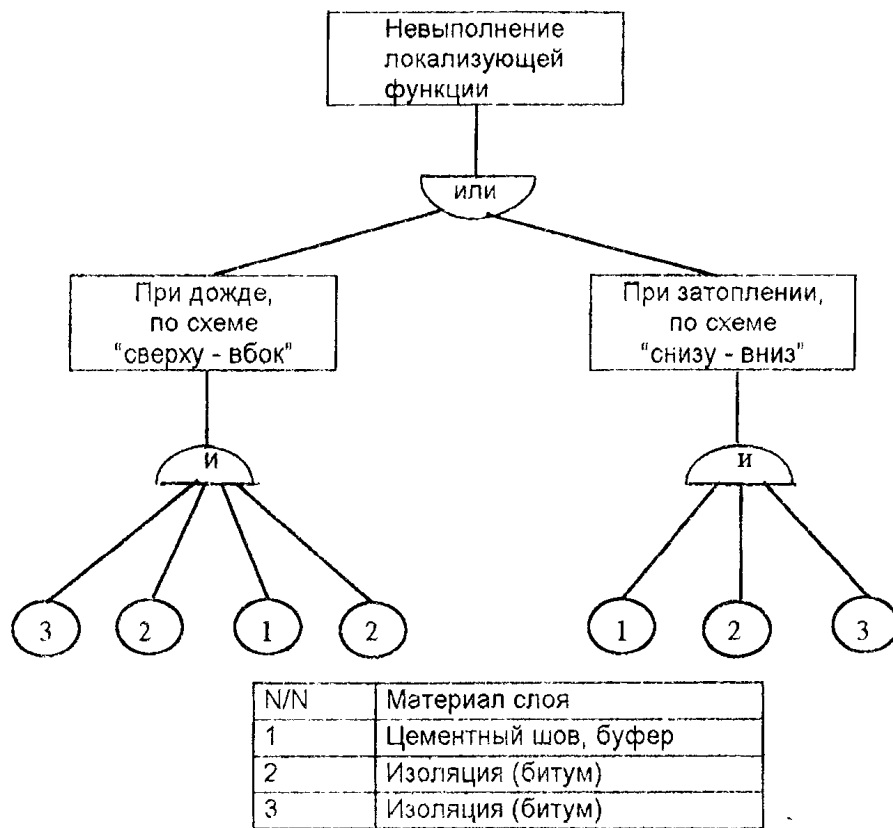


Рис. 8. Дерево отказов хранилища типа Г1 (N2)

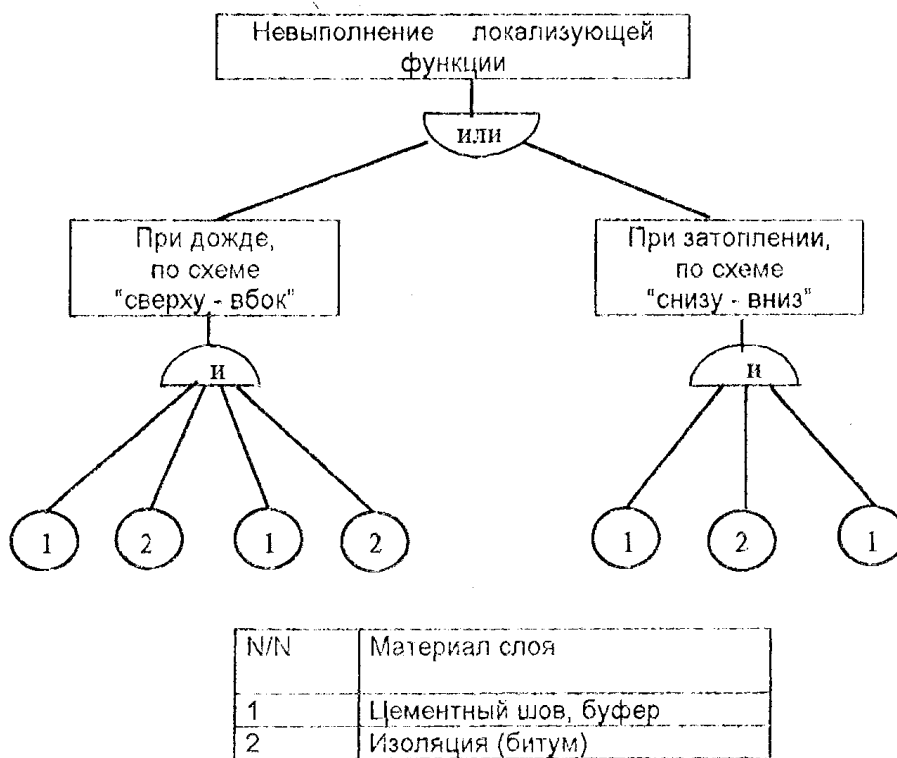


Рис. 9. Дерево отказов хранилища типа В1

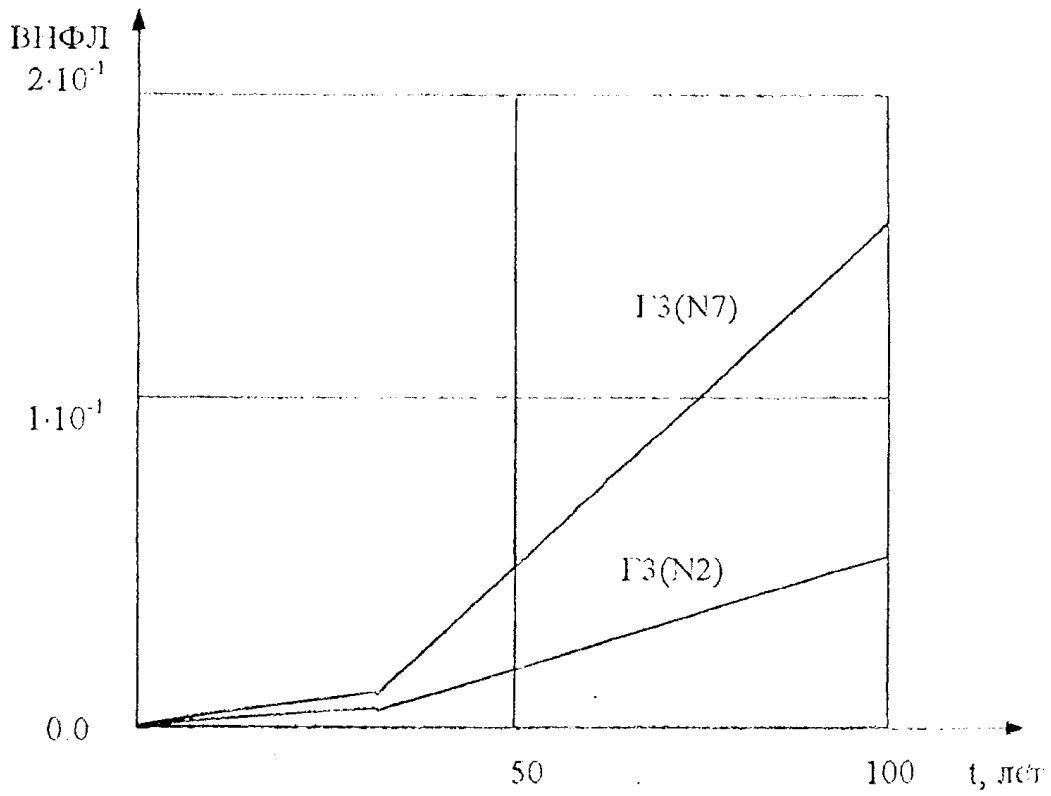


Рис. 11. Временный тренд риска делокализации для хранилищ типа ГЗ

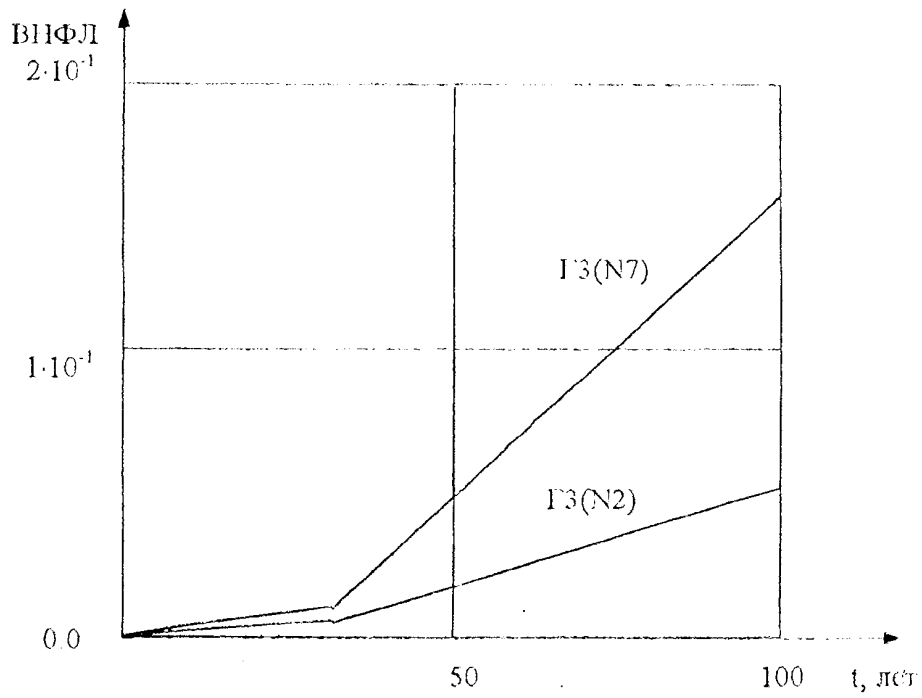


Рис. 11. Временный тренд риска делокализации для хранилищ типа ГЗ