



**В. Б. ГЛЕБОВ**  
Кандидат техн. наук, старший научный сотрудник ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»». Область научных интересов: анализ уязвимости ядерных материалов по отношению к возможным несанкционированным действиям с ними и разработка мер и средств противодействия незаконному обороту ядерных материалов.

E-mail:  
VBGlebov@mephi.ru

В работе анализируются условия безопасного обращения с ядерными материалами на объектах ядерного топливного цикла (ЯТЦ) с точки зрения проблемы ядерного нераспространения. Применительно к этой области сформулированы условия приемлемого риска и определены основные уровни контроля ядерных материалов. На основе понятия приемлемого риска рассмотрены задачи управления риском. Сформулирована задача подавления области неприемлемого риска. Для различных сценариев нерегламентированной деятельности получены требования к эффективности контрольной деятельности внутри и вне объектов ЯТЦ. Продемонстрирована роль внеобъектового контроля в создании эшелонированной защиты ядерных материалов.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:**

вероятность обнаружения, внутри- и внеобъектовый контроль, значимое количество, обогащение урана, передел материала, переключение, приемлемый риск, ущерб, эффективность контроля, ядерное нераспространение, ядерные материалы.



**С. В. МАСТЕРОВ**  
Заместитель начальника отдела конъюнктуры коммерческого управления Московского филиала ОАО «Нижегородская инжиниринговая компания «Атомэнергопроект»». Область научных интересов: анализ проблем ядерного нераспространения и повышения внутренней защищенности ядерных материалов по отношению к возможным несанкционированным действиям с ними.

E-mail: m.s.v@bk.ru

## Риск-анализ условий контроля ядерных материалов для исключения нерегламентированной ядерной деятельности



**Н. К. КАЛУГИН**  
Младший научный сотрудник отдела безопасности предприятий топливного цикла ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности». Область научных интересов: гамма-спектрометрия ядерных материалов, нейтронные детекторы, низкоэнергетические ядерные реакции, внутренняя защищенность ядерных материалов, риск-анализ в ядерном нераспространении, ядерная и радиационная безопасность.

E-mail:  
n.k.kalugin@yandex.ru

### Введение

Использование ядерных материалов (ЯМ) в гражданском ядерном топливном цикле (ЯТЦ) сопряжено с определенной потенциальной опасностью, которая связана с проблемой ядерного нераспространения. В исследовании (Glaser, 2006) выполнены оценки опасности урансодержащих материалов (УМ) на основе детерминированного анализа их стратегической ценности.

В данной работе угроза использования ЯМ для создания ядерного взрывного устройства (ЯВУ) анализируется, исходя из представлений о риске:

$$R = P \cdot D, \quad (1)$$

где  $P$  – вероятность создания ЯВУ;  $D$  – величина потенциального ущерба от использования ЯМ в целях разрушения. В задачах ядерного нераспространения ущерб от применения ЯВУ принято мерить его энерговыходом  $Y$ , который зависит от свойств и массы ЯМ.

В рамках существующей системы мониторинга несанкционированной деятельности (НСД) с ЯМ вероятность  $P$  зависит от возможностей нарушителя, начального состояния материала, его конечного состояния и может быть представлена:

$$P \equiv P(F, S_i \rightarrow S_f) \quad (2)$$

где  $F$  – возможности нарушителя – фонды и доступная технологическая база;  $S_i$  – начальное состояние ЯМ, характеризующееся массой, физической формой, химическим составом, активностью, местоположением и др.;  $S_f$  – конечное состояние ЯМ (конструкция ЯВУ, местоположение, химический и изотопный состав, активность и др.);  $i$  – initial;  $f$  – final.

Величина потенциального ущерба  $D$  зависит от конечного состояния ЯМ:  $D \equiv D(S_f)$ .

В отличие от санкционированной характеристика НСД (деятельности, противоречащей утвержденным правилам обращения с ЯМ) имеет специфические черты:

- стремление нарушителя создать ЯВУ с максимальным разрушительным действием;
- стремление сократить время проведения несанкционированных работ с учетом внешних контрольных мер за НСД;
- скрытное проведение несанкционированных работ: уровень скрытности определяется как свойствами переключенного ЯМ, так и финансовыми затратами нарушителя. Высокий уровень скрытности подразумевает, например, что к НСД привлекаются лица (внутренние нарушители), знакомые с порядком контрольных мероприятий. В этом случае уже проверенные объекты с ЯМ нельзя исключать из множества, подлежащего контролю, то есть поиск НСД представляет собой перебор с возвратом элементов множества.

Эти специфические черты являются противоречивыми с позиции способов реализации цели нарушителя. Стремление нарушителя создать в короткий срок ЯВУ с максимальным разрушительным действием связано с применением технологий тонкой химической/изотопной переработки переключенного (выведенного из-под внутреннего контроля) материала и интенсификации несанкционированных работ. Это приведет к снижению уровня скрытности работ и повышению вероятности обнаружения. Таким образом, максимальный риск создания ЯВУ возможен в ходе действий нарушителя. В связи с этим при анализе различных сценариев предполагалось рациональное поведение нарушителя, которое позволяет считать, что он будет следовать взвешенному плану действий, учитывающему приведенные выше противоречивые специфические черты НСД. Отмеченное обстоятельство позволяет применять консервативный подход в оценке риска, то есть использовать оценку риска сверху по множеству конечных состояний ЯМ и путей перехода к конечному состоянию.

В качестве угрозы рассматриваются попытки создания ЯВУ субнациональными группами, не имеющими широкого доступа к продвинутым ядерным технологиям. Таким образом, возможности нарушителя ограничены, и мы опишем их условием создания лишь простейшего ЯВУ, например ствольного типа (crude device). Для устройств подобного рода можно применять различные ЯМ. Однако надо отметить, что использование плутония в устройствах ствольного типа затруднительно. Его основная масса присутствует в облученном топливе, которое является радиационно защищенным и требует применения трудоемкой технологии радиохимической переработки. Поэтому мы рассматриваем сценарии несанкционированной деятельности, связанные с переключением некоторого количества  $M$  урана,

природного либо обогащенного, с объекта/объектов ЯТЦ и его дальнейшего технологического передела в металлический уран оружейного качества (далее в расчетных исследованиях принято, что содержание изотопа  $^{235}\text{U}$  в уране после передела:  $x = 0,9$ ).

При моделировании возможная НСД на объекте рассматривается как процесс утечки УМ с объекта. Модель внеобъектовой НСД включает технологический передел ЯМ. Соответственно, внешний мониторинг подразумевает процедуру идентификации объектов, где есть признаки подобной деятельности. Упрощенная модель несанкционированного технологического передела УМ имеет три основные стадии:

- физико-химический передел исходного материала;
- обогащение ( $x_f$ ) материала до оружейного качества: ( $x_f \geq 0,9$ ,  $x$  – доля изотопа  $^{235}\text{U}$  в уране; индекс  $f$  относится к конечному состоянию ЯМ).
- физико-химическая переработка обогащенного материала.

### Приемлемый риск. Области приемлемого и неприемлемого риска

Под значимым количеством (ЗК) ЯМ будем понимать такое количество ЯМ, из которого можно создать ЯВУ. В условиях принятых ограничений по возможностям нарушителя (ЯВУ ствольного типа)  $M_{\min} \leq \text{ЗК} \leq M_{\max}$ , где  $M_{\min}$ ,  $M_{\max}$  – минимальная и максимальная массы ЯМ для создания ЯВУ.

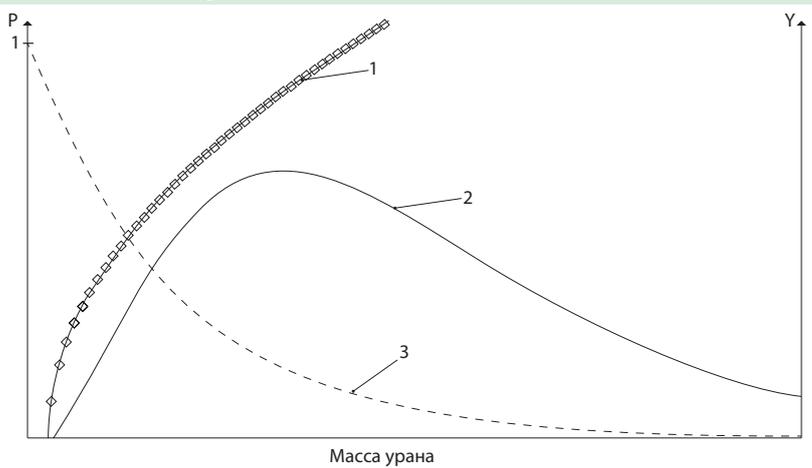
С точки зрения нераспространения переключение ЗК ЯМ должно быть исключено, то есть вероятность переключения  $P_{\text{div}}(\text{ЗК}) = 0$  (div – diversion). Так как точно достичь такого значения вероятности невозможно, то отмеченное выше требование означает настолько малую вероятность  $P_{\text{div}}(\text{ЗК})$ , что переключение ЯМ и создание ЯВУ теряло бы первоначальное преимущество в сравнении с неядерными взрывными устройствами, на основе химической взрывчатки, например.

Отмеченная выше стратегия защиты и контроля ЯМ выражается в снижении риска неэнергетического использования ЯМ до приемлемого уровня. Если энергетический выход ЯВУ выражать через килограмм-эквиваленты химической взрывчатки, то при фиксированном составе ЯМ массы  $M$  условие приемлемости риска можно определить соотношением:

$$R(M) = P(M) \cdot Y(M) \leq M, \quad (3)$$

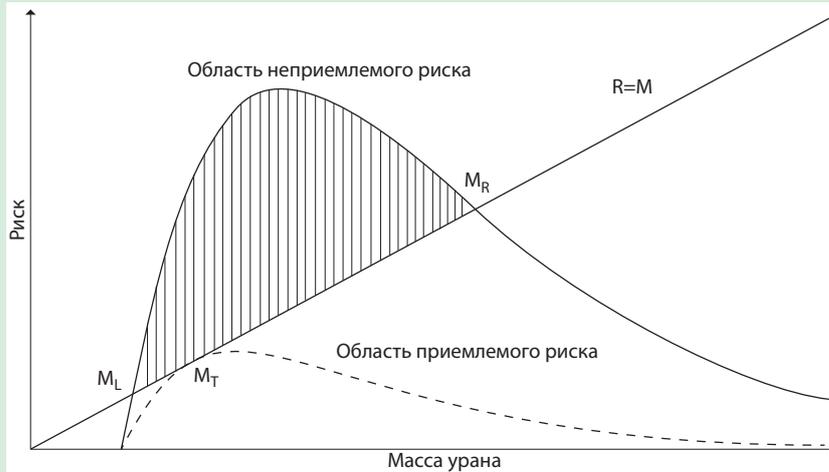
где  $R(M)$  – риск создания ЯВУ из ЯМ массы  $M$ ;  $P(M)$  – вероятность создания ЯВУ;  $Y(M)$  – величина потенциального ущерба от использования ЯМ массы  $M$  в целях разрушения.

Рис. 1. Вероятность избежать обнаружения и ущерб в зависимости от массы вовлеченного в НСД урана



1 – энерговыход; 2 – риск; 3 – вероятность необнаружения НСД

Рис. 2. Приемлемый риск в условиях минимального уровня контроля



$M_L$ ,  $M_R$  – левая и правая точки пересечения кривой зависимости риска от массы ЯМ с лучом приемлемого риска;  $M_T$  – соответствующая точка касания

На рис. 1, 2 показаны зависимости риска и его компонент (вероятности реализации несанкционированных действий с ЯМ и ущерба от НСД) от массы вовлеченного в НСД урана.

В общем случае функция  $R(M)$  растет с увеличением переключаемой массы  $m$ , достигает максимума, после чего достаточно резко падает. В областях  $(0, M_L]$ ,  $[M_R, \infty)$  выполняется условие приемлемого риска (ПП) (L – left, R – right). Область  $(M_L, M_R)$ , где риск  $R(M)$  выше прямой  $R(M)=M$ , является областью неприемлемого риска (НПР). Наличие области НПР и ее величина зависят от характера ЯМ, используемых в НСД, и уровня их контроля. Точки  $M_L$  и  $M_R$  являются показательными, так как их взаимное положение отражает соотношение между потенциальной опасностью ЯМ и уровнем контроля за несанкци-

онированной деятельностью с ним. Объединение  $M_L$  и  $M_R$  в одну точку касания  $M_T$  говорит о достижении ПР для любой массы урана в условиях минимального уровня контроля (рис. 2).

## Специфика контроля ЯМ на объектах и вне их

Надо отметить, что обнаружить НСД с ЯМ можно лишь по объективно существующим признакам. Специфика НСД на ядерном объекте и вне его позволяет выделить ряд значимых признаков, по которым можно судить о наличии/отсутствии НСД с ЯМ. На объекте главными признаками отсутствия НСД являются условия сохранности ЯМ и их целостность. Мониторинг ЯМ реализуется в виде ряда учетных и контрольных процедур, в зависимости от количества, формы и состояния ЯМ. Учет и контроль ЯМ на объекте варьируют также по скорости просмотра и качеству процедур. Среди внутриобъектовых контрольных процедур можно особо отметить:

- регулярный административный контроль наличия ЯМ (реализуется в форме визуальной идентификации объектов с ЯМ или по бар-кодам);
- регулярный контроль доступа к ЯМ (контроль состояния пломб и печатей);
- регулярный контроль передач ЯМ.

Среди учетных процедур можно выделить как базовые:

- учетные, подтверждающие и выборочные измерения лигатурной, элементной и изотопной масс;
- подведение материального баланса ЯМ после проведения физической инвентаризации: сохранность ЯМ подтверждается отсутствием превышения допустимых границ инвентаризационной разницы.

Заметим здесь, что контрольные процедуры ориентированы в основном на временное отслеживание ЯМ, а учетные процедуры – на слежение за их массой.

Специфика контроля ЯМ вне объекта связана с отсутствием данных о свойствах переключенного ЯМ и необходимостью для нарушителя проведения процессов физико-химического передела ЯМ. Поэтому средства обнаружения НСД вне объектов должны быть ориентированы на наблюдение и идентификацию как оборота, так и передела любых ЯМ (относительно урана – вне зависимости от обогащения и формы материала). Идентификация НСД означает процесс наблюдения за объектами и выявление рассогласования с заявленной деятельностью. Наблюдение ведется по индикаторам, отражающим процессы, происходящие с ЯМ. Поэтому здесь можно говорить о значимости признаков, связанных с потребле-

нием ресурсов (энергетических, водных и др.) и воздействием НСД на окружающую среду, то есть эмиссией излучений и материалов. В качестве индикаторов поиска признаков изготовления ЯВУ можно назвать:

- интенсивность излучения;
- интенсивность эмиссии химических веществ ( $UF_6$ ) в атмосферу;
- мощность потребления ресурсов;
- скорость капитальных вложений.

Во всех случаях важна высокая чувствительность средств обнаружения по этим признакам.

### Модель оценки риска

Пусть имеется совокупность объектов, содержащих ЯМ, среди которых могут быть аномальные объекты, относящиеся к НСД. Задача контроля ЯМ – обнаруживать подобные объекты. Идентификация объекта как НСД означает его отсутствие либо значительное рассогласование с заявленными данными.

Предположим, что  $S_0$  – размер всего множества, а элементы этого множества имеют размер  $s$ , который может контролироваться внешними средствами (например, масса элемента). Вероятность обнаружения дефектного элемента:

$$P_{\text{det}} = \frac{s}{S_0}. \quad (4)$$

Если не исключается наличие НСД с высоким уровнем скрытности, то при совершении  $n$  попыток вероятность не быть обнаруженным может быть оценена:

$$P_{\text{ndet}}^{(n)} = \left(1 - \frac{s}{S_0}\right)^n, \quad (5)$$

где  $n$  – от non-detection.

При большом размере множества  $S_0$  и нечеткой идентификации  $p_{\text{det}} \ll 1$  и с ростом  $S_0$   $p_{\text{det}}$  стремится к 0.

Предполагается, что мониторинг достаточно эффективный, так что скорость поиска  $V$  дефектных элементов обеспечивает конечное значение вероятности обнаружения дефектного элемента из множества  $S_0$ :  $\lambda \equiv p_{\text{det}} \cdot V > 0$ , где  $\lambda$  – постоянная обнаружения. В этих условиях переход к пределу в соотношении (5) при  $p_{\text{det}} \rightarrow 0$  приводит к следующей формуле для вероятности необнаружения:

$$P_{\text{ndet}}^{\text{div}} = e^{-\lambda \cdot t}. \quad (6)$$

Параметр обнаружения  $\lambda$  равен средней частоте обнаружения дефектных элементов. В условиях принятого консервативного подхода в оценке риска эта величина характеризует также эффективность контроля ЯМ во времени.

Если рассматривать НСД на объекте как процесс, происходящий с ЯМ (например, малые переключения ЯМ с предприятия), можно в соот-

ношении (6) перейти от временной переменной  $t$  к переменной массы ЯМ  $M$ , вовлеченного в НСД. Вероятность избежать обнаружения переключения ЯМ массы  $M$  с объекта определяется формулой:

$$P_{\text{ndet}}^{\text{div}} = e^{-a_{\text{div}} \cdot M}, \quad (7)$$

где  $a_{\text{div}}$  – средняя частота обнаружения НСД, отнесенная на единицу массы переключаемого материала.

Учитывая отмеченные стадии технологического передела ЯМ вне объектов ЯТП, приходим к выражению для оценки вероятности избежать обнаружения вне ЯО при фабрикации ЯВУ с использованием переключенного урана (обогащенного либо природного):

$$P_{\text{ndet}}^{\text{man}}(M, x) = \exp[-(a_M \cdot (1 + G(x)) + a_U \cdot F(x))M] = \exp(-a_{\text{man}} \cdot M), \quad (8)$$

где  $a_M$  – эффективность контроля ЯМ на стадиях его физико-химического передела;  $x$  – содержание  $^{235}\text{U}$  в уране;  $a_U$  – эффективность контроля ЯМ на стадии изотопного обогащения урана;

$F(x) = \frac{x - x_W}{x_f - x_W} \cdot V(x_f) + \frac{x_f - x}{x_f - x_W} \cdot V(x_W) - V(x)$ ,  $V(x) = (2x - 1) \cdot \ln \frac{x}{1 - x}$ ,  $G(x) = \frac{x - x_W}{x_f - x_W}$ ,  $x_f$  – содержание  $^{235}\text{U}$  в конечном продукте;  $x_W$  – обогащение уранового отвала.

Тогда в общем случае действия внутриобъектового и внешнего мониторинга риск переключения и несанкционированного использования урана массы  $M$  и обогащения  $x$  равен:

$$R(M, x) = P_{\text{ndet}}^{\text{div}}(M, x) \cdot P_{\text{ndet}}^{\text{man}}(M, x) \cdot Y(M, x_f), \quad (9)$$

где  $P_{\text{ndet}}^{\text{div}}(M, x)$ ,  $P_{\text{ndet}}^{\text{man}}(x, M)$  – вероятности переключения ЯМ с ЯО и использования вне объекта для создания ЯВУ соответственно;  $Y(M, x_f)$  – энерговыход цепной реакции деления (ЦРД). В формуле (9) предполагается, что за обнаружением нарушителя неизбежно следует его задержание.

Из формулы (1) следует, что для расчета риска заданной массы урана необходимо оценивать энерговыход ЦРД в конечном продукте. Для оценки энерговыхода применялась простейшая модель протекания ЦРД – модель Карсона – Хиппеля – Лимана (Mark, 1993). Параметры и условия возникновения непрекращающейся ЦРД рассчитывались посредством прямого моделирования процесса размножения нейтронов методом Монте-Карло с использованием программы MCNP-4B (Briesmeister, 1997) с константным обеспечением на основе библиотеки оцененных ядерных данных ENDF/B-VI (Rose, 1991). Модель и алгоритм расчета ее параметров соответствуют подходу, описанному в (Kryuchkov, Shmelev, Masterov, 2008).

### Контроль ЯМ с достижением приемлемого риска

В общей постановке задача обеспечения условий безопасного обращения с ЯМ заключается в определении уровня контроля ЯМ, при котором

область НПП сходится в точку (условие касания). Более конкретно задача заключается в следующем: для материала с заданными свойствами (включая фиксированное обогащение  $x$ ) найти уровень контроля (параметр обнаружения  $a_{div}$  в формуле (7)) и массу  $M$ , для которых выполняется система уравнений:

$$\begin{cases} R(a, M) = M \\ R'(a, M) = 1 \end{cases}, \quad M \in 3K. \quad (10)$$

где  $R(a, M)$  – риск создания ЯВУ из урана массы  $M$  при наличии контроля с уровнем эффективности  $a$ ;  $R'(a, M)$  – производная от  $R(a, M)$  по параметру  $M$ .

Применительно к урановому материалу фиксированного обогащения  $x$  задача касания (10) может быть решена численно с помощью несложных итерационных алгоритмов. Как показали расчеты, при численной реализации итерации являются быстро сходящимися. Завершение итерационного процесса определяется значениями

параметра обнаружения  $a(x)$  и  $M$ , для которых уравнения системы (10) выполняются с заданной точностью.

Уровни контроля будем характеризовать количеством ЯМ, переключение которого (в том числе путем множественных малых переключений) система исключает. Положение правого корня  $M_R$  (рис. 2) уравнения  $R(M)=M$  позволяет сделать такие суждения.

Мониторинг ЯМ считаем высокоэффективным (ВЭМ), если  $R(M) \leq M$  для любого  $M \in 3K$ . Если же  $R(M) \leq M$  лишь для масс ЯМ существенно больших  $M_{max}$  ( $M_R > M_{max}$ ), мониторинг ЯМ считаем низкоэффективным (НЭМ). В этих условиях при  $M_R = M_{max}$  мониторинг можно отнести к средней эффективности (СЭМ).

Рассматриваемым уровням контроля ЯМ соответствуют значения параметра « $a$ », характеризующего эффективность контроля ЯМ. Так, уровню ВЭМ соответствует значение  $a$ , являющееся решением задачи (10). Значения параметра эффективности контроля  $a$ , соответствующие НЭМ и СЭМ, находят из уравнения

$$R(M_R) = kM_{max}, \quad (11)$$

где  $k = 3-5$  для НЭМ (в расчетах ниже  $k = 3$ ) и  $k \approx 1$  для СЭМ.

В табл. 1 приведены найденные значения эффективностей мониторинга  $a(x)$  урана на объекте для отдельных обогащений ( $x$ ) уранового материала. По значениям эффективностей уровни контроля НЭМ, СЭМ, ВЭМ отличаются друг от друга приблизительно в три раза. С ростом обогащения ( $x$ ) требуется существенно повышать эффективность контроля урана для выполнения условий (10–11). Особенно это относится к переходу с природного урана к трехпроцентному (увеличение эффективности в 7–8 раз). В практике внутриобъектового контроля ЯМ на предприятиях эта зависимость отражается в подходе с категоризацией ЯМ (НП-030–12, 2012).

На рис. 3 приведены примеры зависимостей  $R(M)$  для урана 3%-ного обогащения в условиях действия контроля разного уровня.

Видно, что уровень ВЭМ не требует дополнительных контрольных мер. В условиях действия мониторинга ЯМ на уровне СЭМ или НЭМ имеются значительные области НПП, превышение ПР в которых может достигать трех порядков. Таким образом, с учетом стратегии подавления области НПП уровни мониторинга СЭМ и НЭМ требуют дополнительных контрольных мер, приводящих к выполнению критерия (10).

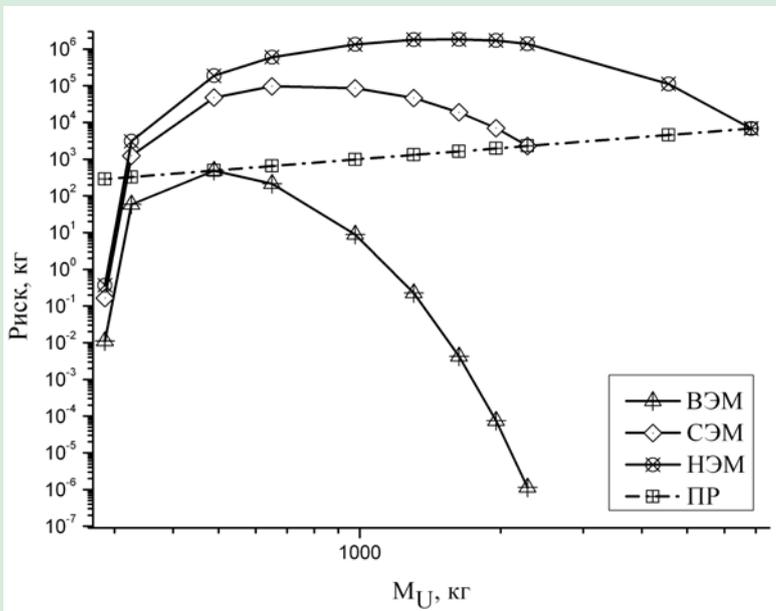
В табл. 2 приведены значения вероятностей избежать обнаружения переключения урана с объекта (формула (7)) в условиях действия контроля уровня ВЭМ.

Таблица 1

Зависимость уровней мониторинга урана от его обогащения

Обогащение, %	Эффективность при уровне мониторинга		
	НЭМ $a_{НЭМ}^{div}$	СЭМ $a_{СЭМ}^{div}$	ВЭМ $a_{ВЭМ}^{div}$
0,72	$1,909 \cdot 10^{-4}$	$5,728 \cdot 10^{-4}$	$1,65 \cdot 10^{-3}$
3	$1,404 \cdot 10^{-3}$	$4,212 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-2}$
5	$2,561 \cdot 10^{-3}$	$7,684 \cdot 10^{-3}$	$2,54 \cdot 10^{-2}$
10	$5,63 \cdot 10^{-3}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$5,75 \cdot 10^{-2}$
20	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$1,27 \cdot 10^{-1}$
36	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$6,9 \cdot 10^{-2}$	$2,45 \cdot 10^{-1}$

Рис. 3. Зависимость риска переключения урана от массы в условиях действия контроля разного уровня (уран 3%-ного обогащения)



Отсутствие в течение длительного времени случаев переключения значимых количеств ЯМ с ЯО свидетельствует о достижимости на практике уровней контроля ЯМ, подобных ВЭМ.

**Взаимосвязь внутри- и внеобъектового контроля. Эшелонированная защита ЯМ**

Наличие внеобъектового контроля ЯМ определяется рядом причин, например, он противодействует незаконному обороту ЯМ (НОЯМ) вне ЯТЦ. В целом внеобъектовый контроль ЯМ повышает надежность выполнения национальных гарантий нераспространения, так как создает эшелонированную защиту ЯМ.

Естественно, требование исключить переключение значимых количеств ЯМ относится, в первую очередь, к внутриобъектовому контролю. Внешний мониторинг призван укреплять защиту ЯМ, удерживая полный риск в области приемлемого при вариациях внутриобъектового контроля ЯМ (в нашем случае – уровни контроля НЭМ и СЭМ). Кроме того, он также позволяет снижать остроту проблемы нераспространения в условиях существования НОЯМ вне ЯТЦ.

Для двух областей контроля полный риск переключения и использования ЯМ для создания ЯВУ определяется формулой (9). На рис. 4 приведены примеры решения задачи (10) (подавление области НПР при уровне контроля ЯМ на объекте СЭМ) в случае действия внутри- и внеобъектового контроля.

При уровне внутриобъектового контроля СЭМ наблюдается значительная область НПР, где превышение уровня ПР составляет 10 раз и более.

Причем эти превышения растут при увеличении обогащения переключенного материала, достигая 103 раз для ВОУ (36%-ное обогащение). Подавление области НПР требует применения внешнего мониторинга на уровне СЭМ и выше.

В табл. 3 приведены требования к эффективности внешнего мониторинга для обеспечения эшелонированной защиты ЯМ с выполнением критерия (10) относительно полного риска (9).

Данные табл. 3 показывают, что

- При НЭМ требования к внешнему мониторингу превышают уровень контроля на объекте. Такая ситуация не может рассматриваться как естественная, поэтому для обеспечения ПР (критерий (10)) уровень контроля НЭМ на объекте недостаточен.

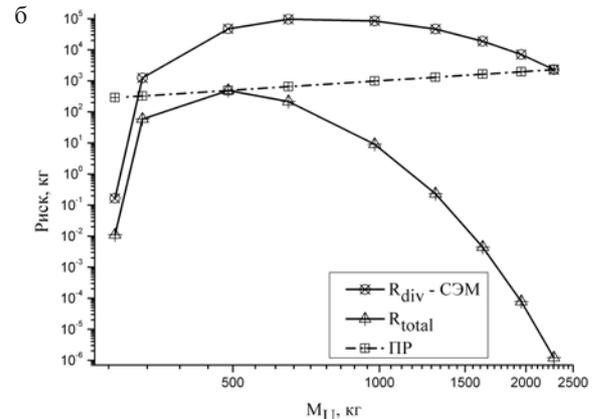
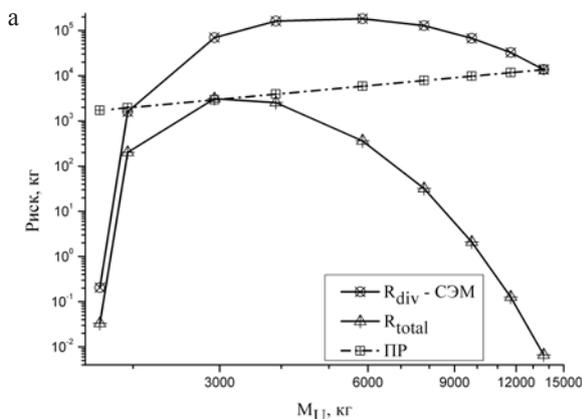
- Несмотря на дифференцированный подход к мониторингу урана различных степеней обо-

Таблица 2

Вероятности переключения различных ЗК урана в условиях мониторинга ЯМ на уровне ВЭМ

Низкообогащенный уран (обогащение – 3%)		Высокообогащенный уран (обогащение – 36%)	
Масса, кг	Вероятность переключения $P_{div}$	Масса, кг	Вероятность переключения $P_{div}$
300	$1,690 \cdot 10^{-2}$	22	$4,561 \cdot 10^{-3}$
320	$1,200 \cdot 10^{-2}$	25	$2,187 \cdot 10^{-3}$
500	$1,113 \cdot 10^{-3}$	40	$5,545 \cdot 10^{-5}$
650	$1,449 \cdot 10^{-4}$	50	$4,763 \cdot 10^{-6}$
1000	$1,240 \cdot 10^{-6}$	75	$1,039 \cdot 10^{-8}$
1300	$2,097 \cdot 10^{-8}$	100	$2,289 \cdot 10^{-11}$
1650	$1,796 \cdot 10^{-10}$	125	$5,008 \cdot 10^{-14}$
2000	$1,538 \cdot 10^{-12}$	150	$1,095 \cdot 10^{-16}$
2300	$2,602 \cdot 10^{-14}$	175	$2,396 \cdot 10^{-19}$

Рис. 4. Подавление области НПР путем введения внешнего мониторинга за ЯМ



а – природный уран; б – уран 3%-ного обогащения.

Таблица 3

Требования к внешнему мониторингу урана при внутриобъектовом мониторинге СЭМ и НЭМ

Обогащение ЯМ, %	Эффективность внутриобъектового мониторинга $a_{СЭМ}^{div}$	Требуемая эффективность внешнего мониторинга $a^{tan}$	Эффективность внутриобъектового мониторинга $a_{НЭМ}^{div}$	Требуемая эффективность внешнего мониторинга $a^{tan}$
НОУ:				
0,72	$5,728 \cdot 10^{-4}$	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$1,909 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-4}$
3	$4,212 \cdot 10^{-3}$	$2,63 \cdot 10^{-3}$	$1,404 \cdot 10^{-3}$	$3,42 \cdot 10^{-3}$
5	$7,684 \cdot 10^{-3}$	$4,32 \cdot 10^{-3}$	$2,561 \cdot 10^{-3}$	$5,6 \cdot 10^{-3}$
СОУ:				
10	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$8,5 \cdot 10^{-3}$	$5,63 \cdot 10^{-3}$	$1,09 \cdot 10^{-2}$
ВОУ:				
20	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$
36	$6,9 \cdot 10^{-2}$	$3,18 \cdot 10^{-2}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$

Данный анализ позволил построить модель оценки риска переключения и дальнейшего использования ЯМ для создания ЯВУ (на примере урана).

Применительно к области ядерного нераспространения сформулированы условия ПР и определены основные уровни эффективности контроля ЯМ (НЭМ, СЭМ, ВЭМ) на ядерных объектах и вне их.

На основе введенного понятия ПР рассмотрены задачи управления

гащения на объекте, наблюдается значительный рост требований к внешнему мониторингу с увеличением обогащения урана. При изменении обогащения переключенного урана от 0,72 до 36,0% требования к эффективности внешнего мониторинга возрастают примерно в 40 раз.

В связи с тем что требуемые для ВОУ и СОУ высокие уровни контроля вне объектов значительно сложнее реализовать, чем на самом объекте, целесообразно контроль урана на объектах поддерживать на уровнях: для ВОУ и СОУ – ВЭМ либо выше, а для НОУ – СЭМ и выше.

## Заключение

В работе анализируются условия безопасного обращения с ЯМ на ядерных объектах и вне ЯТЦ. С этой целью рассмотрена специфика контрольных мероприятий на ядерных объектах и вне их.

риском. Сформулирована задача подавления области НПР и предложена схема ее численного решения для сценариев НСД:

- переключение ЗК ЯМ с ЯО;
  - переключение ЗК ЯМ и технологический передел в оружейные ЯМ вне ЯО,
- а также найдены эффективности мониторинга, при которых выполняются условия ПР.

Продемонстрирована необходимость внешнего мониторинга ЯМ как средства:

- поддержки внутриобъектового контроля;
- создания эшелонированной защиты ЯМ;
- средства противодействия НОЯМ.

Сформулированы повышенные требования к мониторингу урана среднего и высокого обогащения. Обнаружен значительный скачок в требованиях к мониторингу при переходе от природного урана к НОУ (3–5%).

## Список литературы

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии «Основные правила учета и контроля ядерных материалов» (НП-030-12). Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 апреля 2012 г. №255 // Атомные станции – надзор и безопасность. URL: <http://www.seogan.ru/np-030-12-osnovnie-pravila-ucheta-i-kontrolya-yadernix-materialov.html>.
2. Briesmeister J. F. (1997) MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code. Version 4B // Report/Los Alamos National Laboratory. P. 1–147.
3. Glaser A. (2006) On the Proliferation Potential of Uranium Fuel for Research Reactors at Various Enrichment Levels // Science & Global Security. N 14. P. 1–24.
4. Kryuchkov, E. F., Shmelev A. N., Masterov S. V. (2008) An Approach to Quantitative Evaluation of Inherent Proliferation Resistance of Uranium Enriched up to 20% <sup>235</sup>U // Proc. of the 30-th International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors. Washington, D. C. P. 302–306.
5. Mark C. J. (1993) Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium // Science & Global Security. N 4. P. 111–128.
6. Rose P. F. ENDEIB-VI Summary Documentation // Report/National Nuclear Data Center, Brookhaven National Laboratory. Upton, NY. P. 1–270.