

## СООТВЕТСТВИЕ МЕЖДУ КАТЕГОРИЕЙ РАДИОАКТИВНОГО ИСТОЧНИКА И ОБЕСПЕЧЕНИЕМ ЕГО СОХРАННОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕГЛАМЕНТОВ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА РАДИАЦИОННЫХ ОБЪЕКТАХ НАРОДНОГО ХОЗЯЙСТВА

П.М. Рубцов, Д.Е. Романов, А.И. Мусорин  
(НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России)

В технических документах МАГАТЭ [1, 2] в отличие от [3, 4] дается логически четкая и простая методика отнесения радиоактивных (радионуклидных) источников, применяемых при осуществлении многообразных видов деятельности в различных отраслях народного хозяйства, таких как медицина, строительство, образование, сельское хозяйство, химическая промышленность, металлургия, металлообработка и т.п., к одной из пяти категорий по потенциальной опасности и к одной из четырех групп по обеспечению их сохранности (физической защиты) при осуществлении того или иного вида деятельности.

Данная проблематика настолько важна, что некоторые фрагменты из [1] явно представлены в документе МАГАТЭ очень высокого уровня [5], подписанного всеми государствами-членами МАГАТЭ.

Целью данной статьи является привлечение внимания читателей к данной проблематике и целесообразности использования подходов МАГАТЭ при формулировании именно технических требований при разработке технических регламентов в части, касающейся регулирования безопасности на объектах народного хозяйства России. Внедрение подходов МАГАТЭ, видимо, повлечет за собой определенные изменения в устоявшейся в последние 10-12 лет практике регулирования безопасности на объектах народного хозяйства, но, безусловно, повысит ее эффективность и качество.

В соответствии с [1] система категоризации представляет собой относительное ранжирование и группирование источников и видов деятельности (практик), на которых могут основываться практические решения. В обычных условиях система категоризации будет относиться к этим решениям как в ретроспективном смысле для обеспечения (гарантии) использования и (или) сохранения существующих источников безопасным и

надежным образом, т.е. под полным контролем, так и в предполагаемом (на будущее) смысле для обеспечения использования "будущих" источников должным образом, т.е. что они будут максимально безопасным образом приспособлены к условиям и специфике того или иного вида деятельности.

Согласно [1], категоризация базируется на допущении, что радиоактивный источник рассматривается как опасный в том случае, если он может быть угрозой для жизни или быть причиной перманентного ущерба (вреда), который повлечет за собой ухудшение качества жизни облученного человека. Перманентные ущербы включают в себя, например, ожоги, требующие хирургического вмешательства, и т.п. Облучение считается опасным, если оно имеет результатом повреждение органа или кожи, которое может быть причиной смерти в течение нескольких лет. Временные повреждения, такие как покраснение и болезненная чувствительность кожи или временные изменения состава крови, не рассматриваются как опасные.

Считается, что степень любых таких ущербов будет зависеть от многих факторов, включая активность, геометрический размер источника; как близко и как долго находится человек от источника; диспергируется или нет радиоактивный материал источника и приведет ли это к загрязнению кожи или попаданию радиоактивных веществ в организм ингаляционным или пероральным путем.

Предлагаемая МАГАТЭ категоризация обеспечивает относительное ранжирование радиоактивных источников в терминах их потенциальной возможности быть причиной немедленных и вредных для здоровья человека эффектов, если не обеспечивается должным образом их безопасное применение и сохранность. В практическом плане применение этой категоризации, по сути, создает основу для

того, чтобы распределение людских и финансовых ресурсов было бы соразмерным с категорией источника при одновременной минимизации радиационных рисков для персонала и населения, если с источниками обращаться должным образом.

Согласно [1], все источники, применяемые на объектах народного хозяйства, классифицируются на пять категорий, при этом источники категории 1 являются потенциально наиболее опасными, а источники категории 5 не являются опасными.

Опасный источник определяется в [6] как: "Источник, который мог бы, если он не находится под контролем, привести к появлению значительного облучения, которое приводило бы к выраженным детерминистским эффектам". Для всех категорий источников в [1] приведены четкие научно обоснованные критерии. И хотя предлагаемая МАГАТЭ категоризация в целом ориентирована на закрытые радиоактивные источники, эта методология может также применяться для категоризации открытых радиоактивных источников.

В [1] отмечается, что данная категоризация не распространяется на устройства, генерирующие излучение, такие как рентгеновские аппараты и ускорители частиц, хотя она может быть применена к радиоактивным источникам, вырабатываемыми ими или используемыми как материал мишени в таких устройствах. Ядерные материалы, как они определены в [7], также исключены из сферы действия этой категоризации.

Определенного рода факторы специально исключены из критериев категоризации:

- Социально-экономические последствия в результате аварий или злонамеренных действий исключаются, так как методология измерения количества и сравнения этих эффектов, особенно на международном уровне, пока еще полностью не разработана.
- Стохастические эффекты излучения (например, повышенный риск рака) исключаются, так как детерминистские эффекты, возникающие в результате аварий или злонамеренных действий, вероятно, перекрывают

любой увеличенный стохастический риск в течение короткого срока.

- Предумышленное (сознательное) облучение лиц по медицинским причинам исключается из критериев категоризации, хотя радиоактивные источники, используемые для этих целей, включаются в систему категоризации, поскольку имеются отчеты об авариях, включающих такие источники.

Система категоризации МАГАТЭ в общих чертах базируется на концепции "опасных" источников и использовании так называемой, "D-величины". Концепция "опасного" источника конвертирована в эксплуатационные параметры посредством вычисления количества радиоактивного материала, которое могло бы привести к тяжелым детерминистским эффектам для заданных сценариев облучения и для заданных дозовых критериев [8].

В дополнение к обычным аварийным ситуациям эти сценарии включали ситуации с диспергированием (рассеиванием) радиоактивного материала источника, которые могут иметь место при злонамеренных актах. Были рассмотрены следующие сценарии (пути) облучения:

1. Незащищенный источник, носимый в руках в течение 1 ч, в кармане в течение 10 ч, или находящийся в помещении в течение от нескольких дней до нескольких недель.
2. Диспергирование источника, например, при пожаре, взрыве или действиях человека, приводящих к получению дозы от ингаляции, приема пищи и (или) загрязнения кожи.

Происхождение "D-величин", характеризующих степень опасности источника, основано на дозовых критериях, приведенных в [1]:

- (1) 1 Гр на костный мозг или 6 Гр на легкое от излучения с низкой линейной передачей энергии (from low LET radiation), получаемые органом в течение двух дней.** Это есть дозовые уровни из табл. IV-1 в ОНБ [9], при которых вмешательство всегда обосновывается для того, чтобы предотвращать ранние смерти [10, 11]. Следует отметить, что эти

- дозовые уровни являются граничными критериями, связанными с наименьшими мощностями доз, которые считаются угрожающими жизни человека [8].
- (2) **25 Гр на легкое от вдыхания радионуклидов с высокой линейной передачей энергии в течение года.** Это есть дозовый уровень, который приводит к смертельным исходам гончих собак вследствие радиационного пневмонита, пульмонита и легочного фиброза в пределах 1,5 лет [12].
- (3) **5 Гр на щитовидную железу, получаемых органом в течение двух дней.** Это есть дозовый уровень из табл. IV-I приложения IV в ОНБ [9], при котором вмешательство всегда обосновывается для того, чтобы предотвратить атиреоз (гипотиреоз). Атиреоз принимается как ухудшение качества жизни.
- (4) **Для источника, находящегося в контакте с биологической тканью, доза более чем 25 Гр на глубине: (а) 2 см для большинства частей тела (например, от источника в кармане) или (б) 1 см для рук.** 25 Гр есть порог для некроза (омертвления или смерти биологической ткани) [11, 13]. Опыт [14] указывает на то, что омертвление биологической ткани для многих частей тела (например, на бедре) в результате ношения источника в кармане может быть успешно вылечена без того, чтобы в результате произошло ухудшение качества жизни, если поглощенная доза от источника в ткани в пределах около 2 см (глубины) удерживается ниже 25 Гр. Однако для источника, носимого в руках, поглощенная доза в пределах около 1 см (глубины) должна удерживаться ниже 25 Гр для то-

го, чтобы предотвратить ущерб, который ухудшает качество жизни.

- (5) **Для источника, который полагается слишком большим (крупным по размерам), чтобы его носили, 1 Гр на костный мозг в течение 100 ч в помещении на расстоянии 1 м от источника.**

В соответствии с этими дозовыми критериями для некоторых широко применяемых в народном хозяйстве радионуклидов "D-величины", т.е. активности, соответствующие "опасному" источнику, и полезные кратные числа в целях иллюстрации фрагментарно приведены в табл.1 (в [1] это табл. 1.2, и в ней приведен более полный список радионуклидов, а всеобъемлющий перечень радионуклидов как для внешнего, так и для внутреннего облучения представлен в [8]). Согласно [8], "D-величины" – это конкретные уровни активности различных радионуклидов, разработанные для целей аварийного планирования и реагирования. Они даются в терминах активности, выше которой радиоактивный источник рассматривается как "опасный" источник [14], так как он имеет значительную потенциальную возможность быть причиной тяжелых детерминистских эффектов, если он не применяется и не сохраняется безопасным и надежным образом.

Согласно [1], эти "D-величины" рассматривались для того, чтобы их использовать в качестве согласованных нормирующих факторов для формирования численного относительного ранжирования радиоактивных источников и видов деятельности с применением этих источников.

Относительное ранжирование источников и видов деятельности для наглядности далее будем проводить с рассмотрением табл.2 (в [1] это приложение II).

Таблица 1

Активность<sup>a</sup>, соответствующая "опасному" источнику ("D-величина"<sup>b</sup>) для выбранных радионуклидов, и полезные кратные числа

Радионуклид	1000 x D		10 x D		D		0,01 x D	
	(ТБк)	(Ки) <sup>c</sup>	(ТБк)	(Ки) <sup>c</sup>	(ТБк)	(Ки) <sup>c</sup>	(ТБк)	(Ки) <sup>c</sup>
Am-241	6.E+01	2.E+03	6.E-01	2.E+01	6.E-02	2.E+00	6.E-04	2.E-02
Am-241/ Be	6.E+01	2.E+03	6.E-01	2.E+01	6.E-02	2.E+00	6.E-04	2.E-02
Au-198	2.E+02	5.E+03	2.E+00	5.E+01	2.E-01	5.E+00	2.E-03	5.E-02
Cd-109	2.E+04	5.E+05	2.E+02	5.E+03	2.E+01	5.E+02	2.E-01	5.E+0 0
Cf-252	2.E+01	5.E+02	2.E-01	5.E-00	2.E-02	5.E-01	2.E-04	5.E-03
Cm-244	5.E+01	1.E+03	5.E-01	1.E+01	5.E-02	1.E+00	5.E-04	1/E-02
Co-57	7.E+02	2.E+04	7.E+00	2.E+02	7.E-01	2.E+01	7.E-03	2.E-01
Co-60	3.E+01	8.E+02	3.E-01	8.E+00	3.E-02	8.E-01	3.E-04	8.E-03
Cs-137	1.E+02	3.E+03	1.E+00	3.E+01	1.E-01	3.E+00	1.E-03	3.E-02

<sup>a</sup> Из-за того, что табл.1 не показывает, какие дозовые критерии были использованы, эти "D-величины" не следует использовать в обратной задаче для получения дозы от источников с известной активностью.

<sup>b</sup> Подробности происхождения "D-величин" и "D-величины" для дополнительных радионуклидов даны в ссылке [8].

<sup>c</sup> Исходные используемые "D-величины" даны в ТБк. "D-величины" в Ки представлены для практического использования и округлены после преобразования.

Таблица 2

Некоторые виды деятельности и радионуклиды, представляющие интерес, и их диапазон активностей и категорий

I	II	III	IV		V	VI	VII	VIII		IX
			Количество активности в применении		"D-величина"	"A/D-отношение"		Категория		Назначенная
Вид деятельности	Радионуклид		Ки	ТБк	ТБк			Базирующаяся на "A/D-отношении"		
			<b>Категория 1</b>							
Радиоизотопные термoeлектрические генераторы	Sr-90	Макс	6.8E+05	2.5E+04	1.0E+00	2.5E+04	1			
	Sr-90	Мин	9.0E+03	3.3E+02	1.0E+00	3.3E+02	2		1	
	Sr-90	Тип	2.0E+04	7.4E+02	1.0E+00	7.4E+02	2			
	Pu-238	Макс	2.8E+02	1.0E+01	6.0E-02	1.7E+02	2			
	Pu-238	Мин	2.8E+01	1.0E+00	6.0E-02	1.7E+01	2			
	Pu-238	Тип	2.8E+02	1.0E+01	6.0E-02	1.7E+02	2			1

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Вид деятельности	Радионуклид		Количество активности в применении		"D-величина"	"A/D-отношение"	Категория	
			Ки	ТБк	ТБк		Базирующаяся на "A/D-отношении"	Назначенная
Облучатели: стерилизация и консервация продукции	Co-60	Макс	1.5E+07	5.6E+05	3.0E-02	1.9E+07	1	
	Co-60	Мин	5.0E+03	1.9E+02	3.0E-02	6.2E+03	1	1
	Co-60	Тип	4.0E+06	1.5E+05	3.0E-02	4.9E+06	1	
	Cs-137	Макс	5.0E+06	1.9E+05	1.0E-01	1.9E+06	1	
	Cs-137	Мин	5.0E+03	1.9E+02	1.0E-01	1.9E+03	1	
	Cs-137	Тип	3.0E+06	1.1E+05	1.0E-01	1.1E+06	1	1
<b>Категория 2</b>								
Брахи-терапия высоких/средних мощностей доз	Co-60	Макс	2.0E+01	7.4E-01	3.0E-02	2.5E+01	2	
	Co-60	Мин	5.0E+00	1.9E-01	3.0E-02	6.2E+01	3	2
	Co-60	Тип	1.0E+01	3.7E-01	3.0E-02	1.2E+01	2	
	Cs-137	Макс	8.0E+00	3.0E-01	1.0E-01	3.0E+00	3	
	Cs-137	Мин	3.0E+00	1.1E-01	1.0E-01	1.1E+00	3	2
	Cs-137	Тип	3.0E+00	1.1E-01	1.0E-01	1.1E+00	3	
Ка-либ-ровочные установки	Co-60	Макс	3.3E+01	1.2E+00	3.0E-02	4.1E+01	2	Не назначается
	Co-60	Мин	5.5E-01	2.0E-02	3.0E-02	6.8E-01	4	
	Co-60	Тип	2.0E+01	7.4E-01	3.0E-02	2.5E+01	2	Не назначается
Уровне-ры	Cs-137	Макс	5.0E+00	1.9E-01	1.0E-01	1.9E+00	3	
	Cs-137	Мин	1.0E+00	3.7E-02	1.0E-01	3.7E-01	4	3
	Cs-137	Тип	5.0E+00	1.9E-01	1.0E-01	1.9E-00	3	
	Co-60	Макс	1.0E+01	3.7E-01	3.0E-02	1.2E+01	2	
	Co-60	Мин	1.0E-01	3.7E-03	3.0E-02	1.2E-01	4	3
	Co-60	Тип	5.0E+00	1.9E-01	3.0E-02	6.2E+00	3	

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Вид деятельности	Радионуклид		Количество активности в применении		"D-величина"	"A/D-отношение"	Категория	
			Ки	ТБк	ТБк		Базирующаяся на "A/D-отношении"	Назначенная
Калибровочные установки	Am-241	Макс	2.0E+01	7.4E-01	6.0E-02	1.2E+01	2	Не назначается
	Am-241	Мин	5.0+00	1.9E-01	6.0E-02	3.1E+00	3	
	Am-241	Тип	1.0E+01	3.7E-01	6.0E-02	6.2E+00	3	
<b>Категория 4</b>								
Брахи-терапия низких доз	Cs-137	Макс	7.0E-01	2.6E-02	1.0E-01	2.6E-01	4	
	Cs-137	Мин	1.0E-02	3.7E-04	1.0E-01	3.7E-03	5	4
	Cs-137	Тип	5.0E-01	1.9E-02	1.0E-01	1.9E-01	4	
	Ra-226	Макс	5.0E-02	1.9E-03	4.0E-02	4.6E-02	4	
	Ra-226	Мин	5.0E-03	1.9E-04	4.0E-02	4.6E-03	5	4
	Ra-226	Тип	1.5E-02	5.6E-04	4.0E-02	1.4E-02	4	
	I-125	Макс	4.0E-02	1.5E-03	2.0E-01	7.4E-03	5	
	I-125	Мин	4.0E-02	1.5E-03	2.0E-01	7.4E-03	5	4
	I-125	Тип	4.0E-02	1.5E-03	2.0E-01	7.4E-03	5	
	Ir-192	Макс	7.5E-01	2.8E-02	8.0E-02	3.5E-01	4	
	Ir-192	Мин	2.0E-02	7.4E-04	8.0E-02	9.3E-03	5	4
	Ir-192	Тип	5.0E-01	1.9E-02	8.0E-02	2.3E-01	4	
	Au-198	Макс	8.0E-02	3.0E-03	2.0E-01	1.5E-02	4	
	Au-198	Мин	8.0E-02	3.0E-03	2.0E-01	1.5E-02	4	4
	Au-198	Тип	8.0E-02	3.0E-03	2.0E-01	1.5E-02	4	
Cf-252	Макс	8.3E-02	3.1E-03	2.0E-02	1.5E-01	4		
Cf-252	Мин	8.3E-02	3.1E-03	2.0E-02	1.5E-01	4	4	
Cf-252	Тип	8.3E-02	3.1E-03	2.0E-02	1.5E-01	4		
Средства измерений уровня загрязнения, плотности, толщины	Am-241	Макс	1.2E-01	4.4E-03	6.0E-02	7.4E-02	4	
	Am-241	Мин	1.2E-02	4.4E-04	6.0E-02	7.4E-03	5	4
	Am-241	Тип	6.0E-02	2.2E-03	6.0E-02	3.7E-02	4	
	Cs-137	Макс	6.5E-02	2.4E-03	1.0E-01	2.4E-02	4	
	Cs-137	Мин	5.0E-02	1.9E-03	1.0E-01	1.9E-02	4	
	Cs-137	Тип	6.0E-02	2.2E-03	1.0E-01	2.2E-02	4	4

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Вид деятельности	Радионуклид		Количество активности в применении		"D-величина"	"A/D-отношение"	Категория	
			Ки	ТБк	ТБк		Базирующаяся на "A/D-отношении"	Назначенная
Калибровочные установочные	Sr-90	Макс	2.0E+00	7.4E-02	1.0E+00	7.4E-02	4	Не назначается
	Sr-90	Мин	2.0E+00	7.4E-02	1.0E+00	7.4E-02	4	
	Sr-90	Тип	2.0E+00	7.4E-02	1.0E+00	7.4E-02	4	
<b>Категория 5</b>								
Позитронная томография	Ge-68	Макс	1.0E-02	3.7E-04	7.0E-01	5.3E-04	5	5
	Ge-68	Мин	1.0E-03	3.7E-05	7.0E-01	5.3E-05	5	5
	Ge-68	Тип	3.0E-03	1.1E-04	7.0E-01	1.6E-04	5	5
Мессбауэровская спектроскопия	Co-57	Макс	1.0E-01	3.7E-03	7.0E-01	5.3E-03	5	5
	Co-57	Мин	5.0E-03	1.9E-04	7.0E-01	2.6E-04	5	5
	Co-57	Тип	5.0E-02	1.9E-03	7.0E-01	2.6E-03	5	5

Табл. 2 приведена специально в целях иллюстрации самой идеи категоризации, а именно: для каждой категории произвольно выбрано по два вида деятельности, тогда как в [1] представлены аналогичные более подробные сведения для всех пяти категорий и для более чем 70 видов деятельности с применением десятков типов радионуклидных источников.

В табл. 2 для каждого вида деятельности и каждого радионуклида, используемого в этом виде деятельности, задаются три уровня активности – максимум, минимум и типичный. Эти данные приведены в колонках I-V. Для того чтобы численно расположить по рангу (от 1 до 5) источники и виды деятельности, каждая активность (колонка V) делилась на нормирующий фактор (колонка VI) для того, чтобы получить безразмерное нормализованное "A/D-отношение" (колонка

VII). Все "A/D-отношения" наносились на логарифмический график (рис. 1) для того, чтобы использовать "A/D-отношение" для "типичных" активностей источников из табл.2 в качестве основных точек данных, а "A/D-отношения" для максимальной и минимальной активностей наносились как границы интервалов ("range bars").

Рассмотрим теперь, каким образом организовывались границы категорий, т.е. диапазон "A/D-отношений" по вертикальной оси для каждой из категорий.

Как упоминалось выше, на практике источники с активностью большей, чем "D-величина", имеют потенциальную возможность быть причиной выраженных детерминистских эффектов. Следовательно, отношение активностей A/D рассматривалось так, чтобы логическая линия, разделяющая категории, образовыв-

вала две категории (меньше единицы и больше единицы).

Однако для того чтобы система категоризации удовлетворяла множеству различных вариантов применения, описанному в [1] (хотя в практике различных стран их может быть больше или меньше), ясно, что необходимы более чем две категории.

Кроме того, большое количество и многообразие видов деятельности выше и ниже этой линии подтверждало, что были необходимы дополнительные категории.

При разработке "D-величин" было признано, что активность источника, в 10 раз большая, могла повысить угрозы жизни за счет облучения в относительно короткий период времени [15]. Поэтому линия, разделяющая категории, была прочерчена для  $A/D=10$ . Однако, остаются некоторые высокоактивные источники (например, РИТЭГи) в той же самой категории, что и источники со значительно меньшей активностью (например, брахитерапия высоких мощностей доз (HDR)). Поэтому было решено использовать опыт эксплуатации, профессиональные оценки и уроки, извлеченные из аварий, для того, чтобы разделить эти виды деятельности, что привело к дополнительной разделительной линии при  $A/D=1000$ .

Поскольку имелся большой диапазон видов деятельности и активностей источников ниже  $A/D=1$ , была необходима дополнительная (еще одна) линия, разделяющая категории. Поэтому опыт эксплуатации, профессиональные оценки и уроки, извлеченные из аварий, были использованы для того, чтобы прочертить разделяющую линию при  $A/D=0,01$  с более низкой отсеченной частью для установления этой категории при активности радионуклида, которая полагается освобожденной от регулирующего контроля, поделенной на соответствующую "D-величину"<sup>1</sup>. Конкретные уровни активностей для радионуклидов, освобожден-

ных от контроля, в полном объеме приведены в приложении 1 в ОНБ [9].

Учет вышеперечисленных факторов привел к системе из пяти категорий, как показано в прямоугольниках на рис.1. Затем категоризация была усовершенствована с признанием того, что факторы, иные, чем активность, могут быть необходимы для рассмотрения.

Результаты показывали, что хотя "A/D-отношения" обеспечивают здравую и логическую основу для категоризации, имеются другие факторы риска, которые проводят линию согласия взглядов специалистов, имеющих практический опыт в области радиационной защиты, тем не менее возможно усовершенствование описанной системы категоризации.

Далее были использованы опыт и оценки для пересмотра категории, назначенной для каждой ситуации – "вид деятельности/радионуклид". Кроме того, там, где практически возможно, полагалось нежелательным иметь особые виды деятельности, связывающие две категории, хотя в некоторых случаях было необходимо разделять характерные виды деятельности (например, брахитерапия была разделена на брахитерапию высоких мощностей доз (HDR), брахитерапию низких мощностей доз (LDR) и перманентные (т.е. долговременные) имплантанты). В других случаях, таких как калибровочные источники, было невозможно отнести их к отдельной категории, пока их активность может меняться от низкой активности до активности свыше 100 ТБк. Таким образом, в такой ситуации назначение категории может быть рассмотрено на основе "схемы" шаг за шагом, вычислением "A/D-отношения" и далее рассмотрением других факторов, если это необходимо.

Поэтому категория, назначаемая каждой паре "вид деятельности/радионуклид", была пересмотрена с учетом таких факторов, как характер вида деятельности (работы), мобильность источника, опыт известных аварий, а также типичные и уникальные действия в пределах данного вида деятельности (с конкретным источником). Например, некоторые низкоактивные РИТЭГи могли попасть в категорию 2, если бы должна была рассматриваться только актив-

<sup>1</sup> Хотя низкоактивные источники не будут приводить к выраженным детерминистским эффектам, "D-величины" использовались в качестве нормирующих факторов для всех источников, чтобы обеспечить соответствие (единый подход) для всех категорий.



ность. Но поскольку РИТЭГи, вероятно, должны находиться в отдаленных местах расположения, не под контролем и могут содержать большие количества плутония или стронция, все они были отнесены к категории 1.

Подобно этому все стационарные уровнемеры были отнесены к категории 3, хотя активность небольшого количества  $^{60}\text{Co}$  уровнемеров может относиться к категории 2 в силу только (собственно) самой активности. Из-за типичного диапазона активностей для уровнемеров они попадают в категорию 3, а доступ к более высокой активности стационарных уровнемеров обычно является низким; поэтому практика использования "стационарных уровнемеров" была отнесена к категории 3.

Наиболее наглядно универсальность и наглядность методологии категоризации представлены в табл.3, где в качестве примера приведена категоризация небольшого количества широко распространенных видов деятельности. Удобство применения табл.3 заключается, например, в том, что для неизвестных и (или) не приведенных в ней видов деятельности категория источника может быть определена делением активности радионуклида на соответствующую "D-величину", приведенную в табл.1. Это дает нормируемое "A/D-отношение", которое можно сравнить с "A/D-отношениями" в правой колонке табл.3, а назначаемая категория основана на активности (признавая, что другие факторы могут быть, если нужно, приняты во внимание).

Эта возможность применять систему категоризации к не перечисленным в [1] "видам деятельности/источникам" будет особенно полезной для аварийных методик.

Для практического уяснения методологии применения системы категоризации МАГАТЭ необходимо одновременно рассматривать табл.2, 3 и рис.1.

Во время разработки системы категоризации было признано, что в некоторых видах деятельности, таких как ядерная медицина, используются короткоживущие радионуклиды с малым периодом полураспада, которые могут быть также открытыми. Примеры таких приме-

нений включают Tc-99m в диагностике и I-131 в терапии. В этих ситуациях принципы системы категоризации также могут применяться для того, чтобы определить категорию для источника, но поверхностное решение будет нуждаться в выборе активности, по которой вычисляется "A/D-отношение". Следовательно, подтверждается, что эти ситуации рассматриваются на основе схемы "шаг за шагом".

Если вид деятельности включает агрегацию источников в обычное хранилище или использование определенного места локализации, где источники находятся в похожих закрытых условиях, таких как установки хранения, производственные процессы или любые транспортные средства, то для целей назначения категории общая активность может трактоваться как один источник. Следовательно, суммарная активность радионуклида может быть разделена на соответствующую "D-величину", а вычисленное "A/D-отношение" сравнивается с "A/D-отношениями", приведенными в правой колонке табл.3. Таким образом, назначение категории, основанное на активности, должно относиться к соответствующему виду деятельности.

Если источники с несколькими радионуклидами агрегированы, то сумма "A/D-отношений" может быть использована для того, чтобы определить категорию в соответствии с формулой:

$$\text{Aggregate A/D} = \sum_n \frac{\sum_i A_{i,n}}{D_n},$$

где  $A_{i,n}$  – активность каждого индивидуального  $i$ -го источника  $n$ -го радионуклида;

$D_n$  – "D-величина" для  $n$ -го радионуклида.

В каждом случае следует признавать, что при назначении категории может понадобиться принять во внимание другие факторы. Кроме того, при рассмотрении аккумуляции источников важно осознавать возможность изменения вида деятельности, например, "производство" уровнемеров является отличным (другим) видом деятельности от "применения" таких средств измерения.

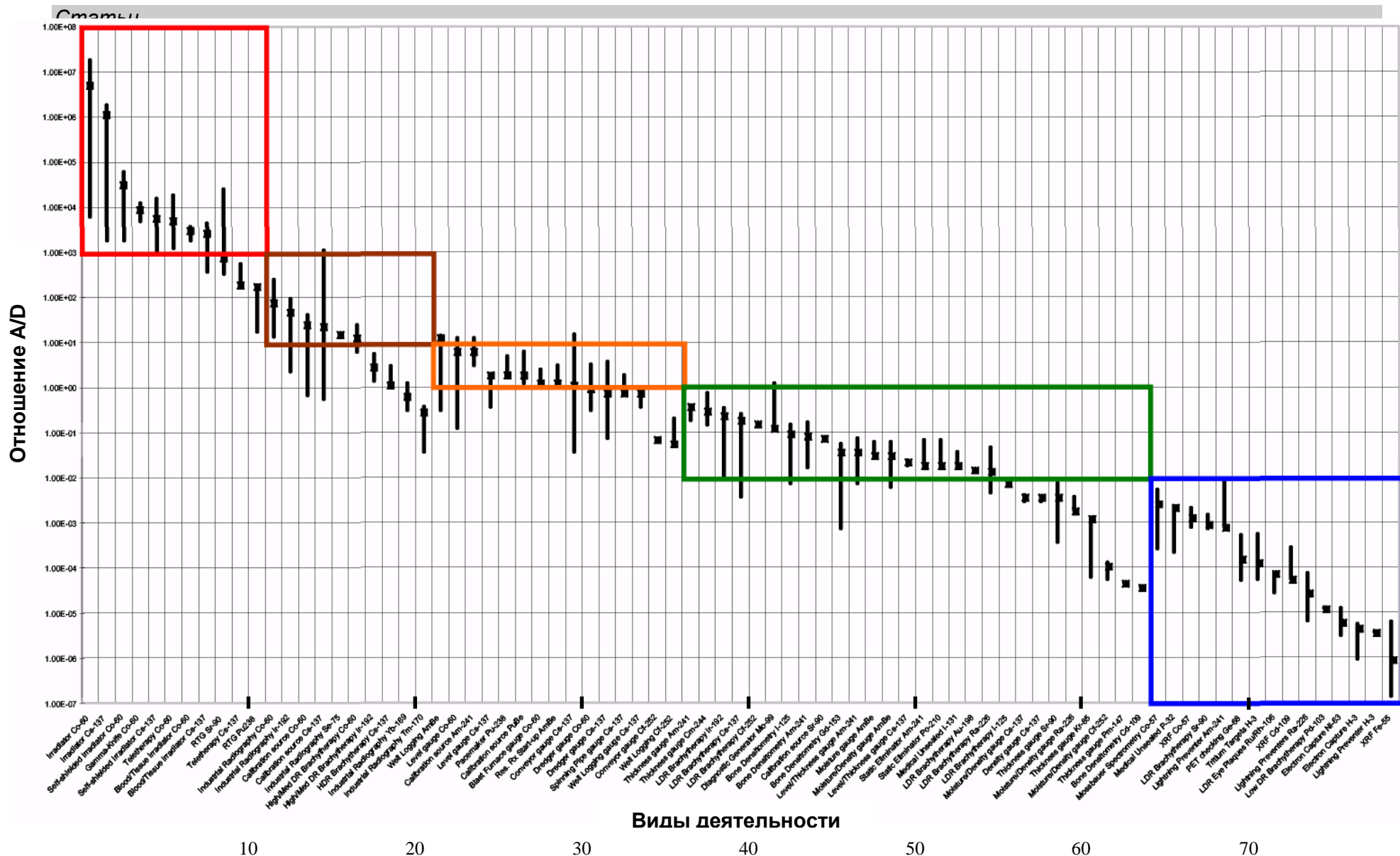


Рис.1. Относительное ранжирование видов деятельности, основанное на "A/D-отношении" (прямоугольники показывают категории, основанные исключительно на "A/D-отношении". Окончательные категории выбирали с учетом других факторов, как показано [1] в основном тексте.)

В целях иллюстрации ниже приведена часть текстовых обозначений на горизонтальной оси рис.1.

№ п/п	Вид деятельности (практика) (английский оригинал)	Вид деятельности (практика) (перевод)
1	Irradiator Co-60	Облучатель Co-60
2	Irradiator Cs-137	Облучатель Cs-137
3	Self-shielded Irradiator Co-60	Самозранированный облучатель Co-60
4	Gamma-Knife Co-60	Гамма – нож Co-60 (см. текст)
5	Self-shielded Irradiator Cs-137	Самозранированный облучатель Cs-137
6	Teletherapy Co-60	Дистанционная радиотерапия Co-60
7	Blood/Tissue Irradiator Co-60	Облучатель крови/ткани Co-60
8	Blood/Tissue Irradiator Cs-137	Облучатель крови/ткани Cs-137
9	RTG Sr-90	РИТЭГ Sr-90 (см. текст)
10	Teletherapy Cs-137	Дистанционная радиотерапия Cs-137
11	RTG Pu-238	РИТЭГ Pu-238 (см. текст)
12	Industrial Radiography Co-60	Промышленная радиография Co-60
13	Industrial Radiography Ir-192	Промышленная радиография Ir-192
14	Calibration source Co-60	Калибровочный источник Co-60
15	Calibration source Cs-137	Калибровочный источник Cs-137
16	Industrial Radiography Se-75	Промышленная радиография Se-75

Таблица 3

Таблица категоризации некоторых обычных видов деятельности

Категория	Категоризация обычных видов деятельности <sup>а</sup>	Отношение активности <sup>б</sup> A/D
1	Радиоизотопные термоэлектрические генераторы Облучатели Телерентгенотерапия, дистанционная лучевая терапия Стационарная, многопучковая телерентгенотерапия, дистанционная лучевая терапия (гамма-нож)	$A/D \geq 1000$
2	Промышленная гамма-радиография Брахитерапия высоких/средних мощностей доз	$1000 > A/D \geq 10$
3	Стационарные промышленные средства измерений – уровнемеры – датчики землечерпалок – средства измерений на конвейерах и транспортерах, содержащие высокоактивные источники – вращающиеся измерители толщины стенок труб Приборы для геофизических исследований и каротажа	$10 > A/D \geq 1$
4	Брахитерапия малых мощностей доз (исключая глазные бляшки и перманентные (долговременные) имплантанные источники) Толщиномеры Портативные средства измерений (например, влажности/плотности) Костные денситометры Нейтрализаторы статического электричества	$1 > A/D \geq 0,01$
5	Брахитерапия малых мощностей доз глазных бля-	$1 > A/D \geq \text{Уровень}$

Категория	Категоризация обычных видов деятельности <sup>a</sup>	Отношение активности <sup>b</sup> A/D
	шек и перманентные имплантатные источники Приборы флуоресценции рентгеновского излучения Приборы электронного захвата Мессбауэровская спектрометрия Позитронная томография	освобождения <sup>c</sup> /D

<sup>a</sup> Признавая, что факторы, иные, чем A/D, принимаются во внимание (раздел 2.3.6 в [1]).

<sup>b</sup> Эту колонку можно использовать для определения категории источника, базирясь исключительно на A/D. Это может пригодиться, если, например, вид деятельности неизвестен или не приведен в списке (не перечислен); источники имеют короткий период полураспада или являются открытыми; или источники агрегированы (собраны вместе) (см. раздел 3.3 в [1]).

<sup>c</sup> Не подлежащие регулируемому контролю количества (уровни освобождения) даны в приложении I в ОНБ [9].

Таким образом, новая система категоризации обеспечивает фундаментальную и международно-признанную основу для принятия решений на основе приемлемого риска посредством обеспечения относительно ранжирования и разделения на категории источников и видов деятельности, которое базируется на логической и прозрачной (транспарентной) методологии.

Принимая во внимание ожидаемые варианты применения категоризации, система, составленная из пяти категорий, предполагает обеспечение оптимального разделения на категории, дающее гибкость для использования категорий, когда они установлены, или для их комбинирования, если это необходимо.

Изложенная выше система категоризации тесно связывается с обеспечением сохранности (физической защиты) радиоактивных источников при реализации различных видов деятельности с учетом подходов МАГАТЭ, изложенных в [2].

На основе анализа уязвимости отдельного источника может быть сделана оценка риска. Уровень этого риска будет определять меры по обеспечению сохранности (физической защиты), требуемые для защиты источника, в первую очередь от несанкционированного доступа к нему и обладания им. Чем выше этот риск, тем большие воз-

можности будут требоваться от системы физической защиты.

Этот уровень возможностей может быть выражен как требуемые рабочие характеристики для системы физической защиты. Пока имеется широкий диапазон возможных мер по физической защите, они могут описываться посредством их возможностей ограничивать доступ, обнаруживать и препятствовать несанкционированному доступу и обладанию источником.

В [2] определяются четыре группы физической защиты, основанные на этих фундаментальных возможностях защиты. Они предоставляют систематический способ категоризации ранжированных требуемых рабочих характеристик, необходимых для того, чтобы покрыть весь диапазон мер по обеспечению сохранности, зависящих от оцененного риска.

Эти группы физической защиты в [2] классифицируют требуемые рабочие характеристики системы физической защиты, как следует ниже.

#### **Группа А физической защиты.**

Меры следует устанавливать для того, чтобы удерживать от несанкционированного доступа и своевременным образом обнаруживать несанкционированный доступ и обладание источником. Эти меры должны быть такими, как предотвращение обладания источником до тех пор, пока возможно реагирование.

**Краткое изложение целей рабочих характеристик системы физической защиты  
(в [2] это табл.1)**

Группа А физической защиты:	Группа В физической защиты:	Группа С физической защиты:	Группа D физической защиты:
Безопасное обращение и защита (источника) как имущества			
Ограничение несанкционированного доступа			Верификация наличия источника в установленные интервалы (времени)
Своевременное обнаружение несанкционированного доступа			
Своевременное обнаружение несанкционированного обладания радиоактивным источником			
Предотвращение обладания источником до тех пор, пока возможно реагирование			

**Группа В физической защиты.**

Меры следует устанавливать для того, чтобы удерживать от несанкционированного доступа и своевременным образом обнаруживать несанкционированный доступ и обладание источником.

**Группа С физической защиты.**

Меры следует устанавливать для того, чтобы удерживать от несанкционированного доступа и контролировать наличие источника в установленные интервалы времени.

**Группа D физической защиты.**

Меры следует устанавливать для того, чтобы обеспечить безопасное применение источника и его адекватную защиту как имущества, контролируя его наличие в установленные интервалы времени.

Выбор качества и эффективности мер, которые воздействуют на вышеперечисленные требования, будет относиться к отдельному плану основных угроз. Блок-схема процесса оценки плана основных угроз представлена на рис.2.

Защита от несанкционированного доступа к самой физической защите главным образом нацелена на то, чтобы попытаться предотвратить кражу материала. Меры по достижению тех же самых целей могут уже иметь место для системы безопасности с целью защиты от непредусмотренного радиационного облучения.

Назначение в [2] групп физической защиты для радиоактивных источников наиболее эффективно достигается с использованием результатов оценки угроз. Это дает максимальную гибкость и специфичность для учета многообразия уровней угроз и защиты окружающей среды. Этот факт также допускает различные варианты выбора групп по обеспечению сохранности для радиоактивных источников на различных стадиях их жизненного цикла.

И наоборот, некоторые страны могут делать оценки угроз и уязвимости для всей страны и осуществлять отнесение источников к группам по обеспечению сохранности, базирующееся на этих оценках.

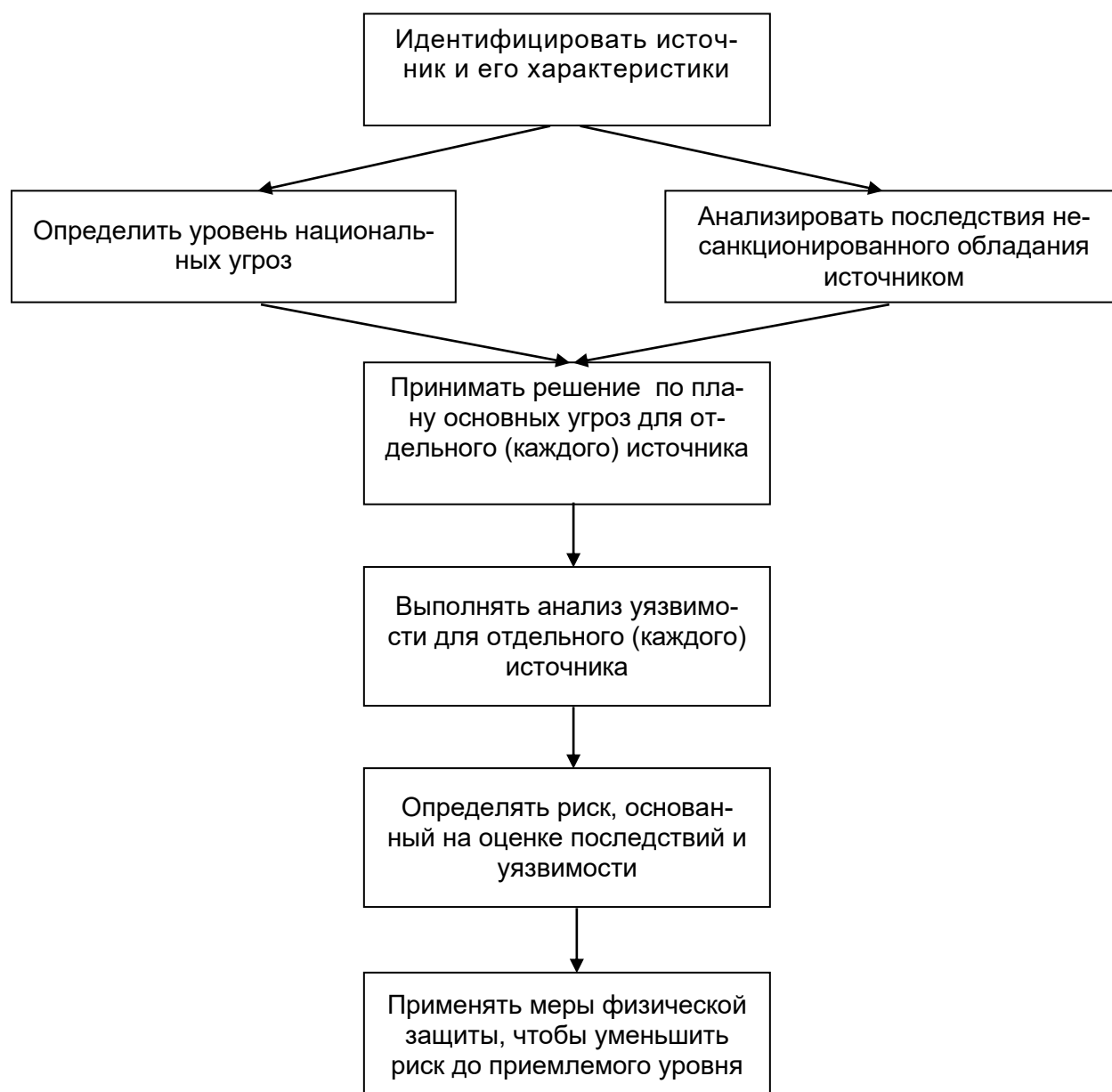


Рис. 2. Блок-схема процесса оценки плана основных угроз

В случае если имеются в наличии неполные данные для того, чтобы сделать разумную основу плана оценки угроз или делать так не считается желательным или необходимым, то меры по обеспечению сохранности могут базироваться на последствиях злонамеренного обладания и применения источника(ов) и предполагаемых угроз для источника(ов).

Как показано выше, МАГАТЭ разработало Категоризацию радиоактивных источников [1], которую поначалу можно было бы использовать для этой цели, так как она (категоризация) применяет в качестве своей основы потенциальное воздействие неконтролируемых источников

на здоровье человека и предусматривает критерий природной опасности, связанной с источником. Однако следует признать, что это не включает в себя рассмотрение социальных или экономических факторов при потере контроля над источниками.

В вышеописанной категоризации источники разделены на пять категорий – от наиболее значимой категории 1 до наименее значимой категории 5.

Источники категорий от 1 до 3 обычно имеют возможность приводить к риску облучения с выраженными тяжелыми детерминистскими эффектами при условии, если они не находятся под кон-

тролем. Тяжелый детерминистский эффект – это эффект, который является фатальным или угрожающим жизни или имеет своим результатом долговременный (перманентный) ущерб, ухудшающий качество жизни.

Согласующаяся с пересмотренным [5], каждая из категорий включает освобожденный радиоактивный материал, если любой из источников в группе негерметичен или разрушен. Методология категоризации также дает возможность для агрегации (сосредоточения) источников в их месте расположения.

Группирование источников, приведенное в табл.4, основывается на описанной выше категоризации вместе с неявным допущением угроз от отдельного лица или групп лиц с серьезным намерением завладеть источником.

Это последнее допущение используется как основа общего плана угроз. Указанные назначения (задания) положены заранее как назначения, присваиваемые по умолчанию.

Различные обстоятельства или более детальные оценки могут объяснять перемещение источника вверх или вниз по группам физической защиты. Одной из причин для источника быть отнесенным к более высокой группе физической защиты могло бы быть то, что оценка отдельной угрозы может показывать, что некоторые установки с источниками или некоторые мобильные источники являются более уязвимыми к несанкционированному овладению ими, даже если они не являются источниками с очень высокой активностью.

Однако назначение групп выполняется или с использованием методики оценки угроз, или с использованием их по умолчанию из табл.4. Тогда становится возможным принимать решение по некоторым отдельным мерам физической защиты, которые будут удовлетворять требуемым рабочим характеристикам для этой группы физической защиты.

Таблица 5

**Группы физической защиты, основанные на категоризации источников  
(в [2] это табл.2)**

Группа физической защиты	Категория источника	Примеры видов деятельности
А	1	Радиоизотопные термоэлектрические генераторы (РИТЭГи) Облучатели Телетерапия Стационарная многопучковая телетерапия (гамма-нож)
В	2	Промышленная радиография Брахитерапия высоких и средних мощностей доз
	3	Стационарные промышленные средства измерений (например, уровня, на землечерпалке, на конвейере) Геофизические средства измерений, каротаж
С	4	Брахитерапия низких мощностей доз (за исключением того, что ниже) Средства измерения толщины/уровня наполнения Портативные средства измерения (например, влажность/плотность) Костные денситометры Нейтрализаторы статического электричества
D	5	Брахитерапия низких мощностей доз глазных бляшек и перманентные (долговременные) имплантированные источники Приборы рентгеновского флюоресцентного анализа Приборы на основе электронного захвата

Табл.5 явным образом демонстрирует довольно органичную связь между системой категоризации радиоактивных источников и обеспечением их сохранности, оптимизируя людские и финансовые возможности и обеспечивая при этом приемлемый уровень радиационного риска.

Таким образом, установление категории потенциальной опасности конкретного радионуклидного источника, применяемого в том или ином виде деятельности, который уже осуществляется или только планируется осуществлять на каком-либо конкретном радиационном объекте того или иного предприятия (организации), а также группы физической защиты в отличие от [3, 4] сводится к нескольким простым действиям:

1. Для заданного радионуклидного источника из табл.1 выбирается "D-величина".
2. Для известной активности этого радионуклидного источника вычисляется "A/D-отношение".
3. Радионуклидному источнику присваивается категория:
  - Если, например, этот радионуклид и вид деятельности, где он используется, приведены в табл.2, то ему присваивается соответствующая категория, указанная в IX колонке. Если же назначенная категория не указана, то категория присваивается только по "A/D-отношению", возможно с учетом каких-либо дополнительных практически значимых факторов и особенностей использования данного источника на радиационном объекте предприятия.
  - Если значения в двух последних колонках табл.2 различаются, то это указывает на то, что при назначении категории данному источнику разработчики категоризации учитывали какие-то особенности, характерные для данного вида деятельности. Вполне возможно, что российская практика имеет свои особенности, и в некоторых случаях необходимо пересмотреть назначенную категорию опять же с учетом каких-либо дополнительных практически значимых факторов и особенностей использования данного

источника на радиационном объекте предприятия.

- Если вид деятельности неизвестен или не приведен в табл. 2, то для определения категории источника можно использовать правую колонку табл.3, базируясь исключительно на "A/D-отношении". После этого можно учесть вышеупомянутые практически значимые факторы, например: характер вида деятельности, мобильность источника, опыт известных аварий и т.п., и, основываясь на этих рассуждениях, обосновать возможность оставить без изменения, понизить или повысить категорию источника. Примером, как это описано выше, может являться отнесение всех РИТЭГов к категории 1.
4. После принятия однозначного решения о номере категории на основании табл. 5 источнику присваивается одна из четырех групп физической защиты.
  5. В соответствии с присвоенной источнику группой физической защиты, согласно табл. 4, обеспечивается соответствующий уровень охраны.

По нашему мнению, однажды присвоенная радионуклиду категория не обязательно будет соответствовать ему на протяжении всей его жизни. Например, рассмотрим Ir-192, используемый в брахитерапии высоких/средних мощностей доз (табл.2). Рассчитанное для этого нуклида "A/D-отношение" соответствует категории 3. Но с учетом всех практически значимых факторов, в частности особенностей данного вида деятельности, этому радионуклиду в [1] было решено присвоить категорию 2. Но по прошествии определенного количества времени за счет радиоактивного распада активность источника понизится настолько (допустим, она стала ниже минимального значения, указанного в табл.2), что использование его в этом виде деятельности будет невозможно. Но в то же время его активность не стала настолько малой, чтобы его использование для других целей было невозможно. Таким образом, тот же самый радионуклид можно будет использовать в брахитерапии низких мощностей доз в той же организации



(табл. 2). Как видно из табл. 2, тому же источнику может быть присвоена другая категория (в данном случае 4). Наглядно этот переход можно увидеть на рис.1. Здесь источник из пункта 17 (High/Med DR Brachytherapy Ir-192) переходит в пункт 38 (LDR Brachytherapy Ir-192). А это обстоятельство, в свою очередь, ведет к присвоению источнику более низкой группы физической защиты (табл.5).

Следовательно, в соответствии с табл. 4 можно формально изменить меры по обеспечению сохранности (если это практически целесообразно), предъявляемые к данному источнику (например, оптимизировать технические (средства визуального наблюдения), и организационные меры (оптимизировать режим доступа к источнику, состав и структуру охраны). Как следствие, это ведет уменьшению затрат на обеспечение сохранности источника, т.е. к экономии денежных средств организации, осуществляющей работу с данным источником.

Выбранные в [1] и представленные в табл. 2 виды деятельности не следует считать единственно возможными. Изложенная методология позволяет построить табл. 2 и рис.1 для любого наперед заданного числа видов деятельности, и, таким образом, рис.1 в принципе может иметь другой вид. Для крупных предприятий, осуществляющих десятки видов деятельности с использованием сотен радиоактивных источников (включая деятельность, связанную с агрегированием действующих или отработавших источников), табл.2 и рис.1 будут качественно отличаться от приведенных в [1] (в частности, длиной прямоугольников на рис.1 или даже отсутствием каких-либо категорий). В то же время для малых предприятий, имеющих несколько радиоактивных источников, построение специального графика нецелесообразно.

Представитель регулирующего органа, безусловно, должен полностью понимать все вышесказанное и при осуществлении надзора основное внимание для источников той или иной категории должен уделять учету вышеупомянутых практически значимых факторов при применении радионуклидных источников.

## Заключение

В преддверии разработки разного рода технических регламентов (в части, касающейся регулирования безопасности на объектах народного хозяйства) подходы МАГАТЭ, описанные в [1, 2], заслуживают пристального изучения с целью их адекватного отражения в этих регламентах для целей нормативного регулирования безопасности и обеспечения сохранности радиоактивных источников.

Первостепенной задачей Госатомнадзора России могла бы стать разработка необходимых руководств по безопасности на базе [1, 2] с включением основных положений этих документов в соответствующие технические регламенты.

Хотя в отличие от [3, 4] данная категоризация не носит глобальный характер, но зато позволяет четко и однозначно определить организационные и технические меры по обеспечению безопасности и сохранности радиоактивных источников на объектах народного хозяйства.

По нашему мнению, нельзя использовать один и тот же подход к определению категории потенциальной опасности для всех объектов использования атомной энергии из-за явной несопоставимости некоторых из них (например, нельзя сравнивать обыкновенный радионуклидный источник в составе дефектоскопа с атомной станцией).

Поэтому мы считаем целесообразным разработку подобных категоризаций для всех объектов использования атомной энергии, более менее однородных по назначению и наличию на них примерно одинакового количества радиоактивных веществ.

Причем в этих руководствах должны быть такие же четкие и понятные критерии отнесения любого объекта к той или иной категории, как в [1, 2], поскольку критерии в [3, 4] носят слишком общий характер и не являются универсальными для их применения ко всему множеству объектов использования атомной энергии.

Оригиналы [1, 2] и их переводы на русский язык имеются в библиотеке НТЦ ЯРБ Госатомнадзора России.

## Литература

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Categorization of radioactive sources, IAEA-TECDOC-1344, Vienna (2003).  
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Категоризация радиоактивных источников, МАГАТЭ-ТЕХДОК-1344, Вена (2003).
2. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Security of radioactive sources, IAEA-TECDOC-1355, Vienna (2003).  
МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Физическая защита радиоактивных источников, МАГАТЭ-ТЕХДОК-1355, Вена (2003).
3. Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99).
4. Проект федерального закона "Об общем техническом регламенте по радиационной и ядерной безопасности санитарно-эпидемиологического нормирования при обращении и ИИИ".
5. МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, Кодекс поведения по обеспечению безопасности и сохранности радиоактивных источников.
6. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. IAEA Safety Standards Series No. GS- R-2, IAEA, Vienna (2002).
7. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Convention on the Physical Protection of Nuclear Materials, Legal Series No. 12, IAEA, Vienna (1982).
8. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Method for Developing Arrangements for Response to a Nuclear or Radiological Emergency. (Updating IAEA-TECDOC-953), Emergency Preparedness and Response Series, Vienna (in preparation).
9. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, INTERNATIONAL LABOUR ORGANISATION, OECD NUCLEAR ENERGY AGENCY, PAN AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, WORLD HEALTH ORGANIZATION, International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series No. 115, IAEA, Vienna (1996).  
ПРОДОВОЛЬСТВЕННАЯ И СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ОБЪЕДИНЕННЫХ НАЦИЙ, МЕЖДУНАРОДНОЕ АГЕНТСТВО ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ, МЕЖДУНАРОДНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ТРУДА, АГЕНТСТВО ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГИИ ОРГАНИЗАЦИИ ЭКОНОМИЧЕСКОГО СОТРУДНИЧЕСТВА И РАЗВИТИЯ, ПАНАМЕРИКАНСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, ВСЕМИРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЗДРАВООХРАНЕНИЯ, Международные основные нормы безопасности для защиты от ионизирующего излучения и безопасного обращения с источниками излучения, Серия изданий по безопасности № 115, МАГАТЭ, Вена (1996).
10. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Intervention Criteria in a Nuclear or Radiation Emergency, Safety Series No. 109, IAEA, Vienna (1994).
11. UNITED STATES NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, Health Effects Models for Nuclear Power Plant Accidents Consequence Analysis, NUREG/CR- 4214, USNRC, Washington, DC (1989).
12. INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION, Publication 58, RBE for Deterministic Effects, Annals of the ICRP 20 (4) (1989).
13. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Diagnosis and Treatment of Radiation Injuries, Safety Reports Series No. 2, IAEA, Vienna (1998).
14. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, The Radiological Accident in Lilo, IAEA, Vienna (2000).
15. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. IAEA Safety Standards Series No. GS- R-2, IAEA, Vienna (2002).

