

УДК 621.039.743:621.311.25

## Долгоживущие радионуклиды и проблема захоронения радиоактивных отходов в Северном регионе России

В.А. Наумов<sup>1</sup>, С.А. Гусак<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Горный институт КНЦ РАН

<sup>2</sup> Горный факультет КФ ПетрГУ, кафедра горного дела и обогащения

**Аннотация.** В статье представлены результаты анализа структуры и радиационных характеристик радиоактивных отходов в Северном регионе России. На основе выполненного анализа определено влияние долгоживущих радионуклидов в составе региональных радиоактивных отходов при выборе типа объекта их окончательной изоляции от биосферы.

**Abstract.** The paper presents the analysis results of structure and radiation characteristics of radioactive waste in the Northern region of Russia. The influence of long-lived radionuclides in regional radioactive waste when choosing the type of facility for final isolation of waste from the biosphere has been determined on the basis of the analysis.

**Ключевые слова:** радиоактивные отходы (РАО), классификация РАО, долгоживущие радионуклиды, захоронение РАО, подземный региональный могильник РАО

**Key words:** radioactive waste (RW), classification of RW, long-lived radionuclides, disposal of RW, underground regional repository of RW

### 1. Проблема обращения с радиоактивными отходами в Северном регионе России

Обращение с радиоактивными отходами (РАО), как источниками радиационной опасности для окружающей среды и населения, является одной из актуальных экологических проблем современной России. Особое место в контексте данной проблемы занимает Северный регион РФ (Мурманская и Архангельская области).

Население региона "вступило" в атомный век в конце 1950-х годов, когда была начата эксплуатация атомного ледокола "Ленин" и первых атомных подводных лодок (АПЛ). И на протяжении десятилетий в регионе накапливались проблемы обращения с РАО. В настоящее время Северный регион отличается от других регионов России высокой концентрацией работающих ядерных энергетических установок (ЯЭУ) на атомных судах военного и гражданского флотов, а также Кольской АЭС, при эксплуатации которых уже накоплено и продолжает накапливаться значительное количество твердых радиоактивных отходов (ТРО) и жидких радиоактивных отходов (ЖРО). По оценкам (Саркисов, 2008), на региональных объектах обращения с РАО к 2009 г. было накоплено около 62000 м<sup>3</sup> ТРО и примерно 17000 м<sup>3</sup> ЖРО. Накопление значительных объемов РАО было обусловлено тем, что в течение длительного времени общепринятой практикой обращения со всеми образующимися РАО как в Северном регионе, так и в России в целом, являлось контролируемое временное хранение отходов.

В настоящее время отходы Кольской АЭС хранятся во временных поверхностных хранилищах на площадке станции. Для хранения РАО от эксплуатации судовых ЯЭУ используются береговые и плавучие технические базы ФГУП "Атомфлот" и Северного флота. Большая часть временных хранилищ РАО, в частности на объектах Северного флота, не приспособлена для долговременной эксплуатации и не соответствует современным требованиям по безопасности.

В ближайшие годы потенциальная радиологическая опасность временного хранения РАО в регионе будет возрастать в связи с увеличивающимся темпом накопления отходов после прекращения практики затопления в акватории северных морей отходов, образующихся при эксплуатации кораблей и судов, оснащенных ЯЭУ. Проблема обращения с РАО в регионе может обостриться также вследствие развития работ по утилизации выведенных из эксплуатации АПЛ, реабилитации бывших береговых технических баз Северного флота, утилизации судов атомного технологического обслуживания и вывода из эксплуатации действующих энергоблоков КАЭС. В структуре РАО, которые могут появиться в процессе выполнения этих работ, прогнозируется образование примерно 128000 м<sup>3</sup> ТРО и около 51000 м<sup>3</sup> ЖРО (Саркисов, 2008).

Проблема обращения с РАО как в Северном регионе, так и в России в целом, пока еще решается за счет продления срока службы старых хранилищ с повышением их изолирующих свойств. Для вновь образующихся РАО – за счет использования новых технологических решений, которые позволяют минимизировать количество отходов и сократить строительство дополнительных хранилищ. Однако, как

показывает мировая и отечественная практика, контролируемое долговременное хранение РАО, приводящее к их накоплению, не является приемлемой стратегией в достижении основной цели обращения с РАО – обеспечение гарантий безопасности человека и окружающей среды без возложения ответственности за результаты нынешней деятельности на будущие поколения. Основным способом их изоляции должно быть не длительное хранение, а окончательное захоронение без извлечения (Козырев, 2009).

Главной целью настоящей статьи является определение влияния содержания долгоживущих радионуклидов в отходах на выбор объекта захоронения региональных РАО.

## 2. Объекты окончательной изоляции РАО

В соответствии с современными концептуальными подходами, систему объектов окончательной изоляции РАО в Российской Федерации должны составлять три типа объектов, соответствующие всем необходимым техническим, политическим и социальным критериям (Козырев, 2009; Гусаков-Станюкевич и др., 2008):

- федеральный пункт (или пункты) захоронения РАО в глубоких геологических формациях;
- региональные объекты, конкретные типы которых (приповерхностного типа или глубокого заложения) будут уточняться после дополнительных исследований;
- локальные пункты окончательной изоляции РАО приповерхностного типа, создаваемые в местах накопления значительных объемов РАО, извлечение которых невозможно или экономически нецелесообразно.

Рассматриваемые типы объектов окончательной изоляции РАО соответствуют современной международной практике и рекомендациям МАГАТЭ, в которых определены два основных способа захоронения РАО (*Scientific and technical basis...*, 2002; 2003):

- приповерхностное захоронение, под которым понимается захоронение отходов в сооружениях, размещаемых на поверхности или на глубине от нескольких метров до ста метров;
- геологическое захоронение, при котором сооружения для РАО размещаются на глубине нескольких сотен метров в стабильных геологических формациях, обеспечивающих изоляцию РАО от биосферы в течение десятков тысяч лет и более.

В варианте приповерхностного захоронения предполагается, что продолжительность функционирования инженерных барьеров системы захоронения (матрица отходов, конструкция контейнеров, строительные конструкции и др.) будет сопоставима с периодом снижения активности радионуклидов до приемлемого уровня. Такой способ захоронения приемлем для изоляции короткоживущих РАО, содержащих радионуклиды, распад которых до приемлемого уровня активности составляет несколько десятилетий или сотни лет.

При геологическом захоронении геологическая среда выполняет функцию основного защитного барьера, а функциональное назначение инженерных барьеров состоит в задержке выхода радионуклидов в течение ограниченного периода времени (примерно до 1000 лет).

Выбор системы захоронения РАО зависит от многих факторов, обусловленных, в частности, нормативно-правовой ситуацией, наличием пригодных горнотехнических и гидрогеологических условий на площадках – кандидатах для размещения подземного хранилища, финансовыми и социально-экономическими аспектами и т.д. Общей целью захоронения является изоляция РАО от биосферы без нанесения неприемлемого ущерба человеку и окружающей среде. Поэтому изоляция отходов с помощью любой системы захоронения должна оставаться эффективной в течение времени распада радионуклидов до приемлемого уровня. Это значит, что при выборе наиболее эффективного способа захоронения РАО наряду с упомянутыми выше факторами одним из определяющих является продолжительность потенциальной радиологической опасности отходов, под которой понимается промежуток времени, по истечении которого РАО могут быть выведены из-под контроля и переведены в категорию промышленных отходов с неограниченным использованием.

Значение этого фактора в проблеме окончательной изоляции обуславливает необходимость классификации РАО по способу захоронения. Однако существующая в России в настоящее время система классификации РАО и обращения с ними, которая досталась в качестве "исторического наследия" от СССР, не отвечает требованиям сегодняшнего дня.

## 3. Классификация радиоактивных отходов

Классификацию РАО по удельной активности (низкоактивные, среднеактивные и высокоактивные отходы), установленную российскими нормативными документами, нельзя считать безупречной. Она позволяет оценивать потенциальную опасность отходов, определять требования по способам обращения

с РАО и осуществлять учет и контроль РАО. Но эта классификация практически не ориентирована на выбор системы захоронения отходов (Козырев, 2009; Кочетков, 2008). Поэтому необходимость решения проблемы окончательной изоляции отходов, как и решения задачи по выводу из эксплуатации ядерных объектов и реабилитации загрязненных территорий, потребовала дальнейшего совершенствования российской классификации РАО (Козырев, 2009; Гусаков-Станюкевич и др., 2008).

Важной вехой в планируемом переходе к новым принципам категорирования и классификации отходов, отражающим количественные критерии в определении способа захоронения РАО, явилось введение федеральных норм и правил НП-055-04, в которых, в частности, установлено допустимое содержание радионуклидов в РАО, размещаемых в приповерхностных могильниках (см. табл. 1).

Как следует из нормативных требований, приповерхностному захоронению подлежат короткоживущие (содержащие радионуклиды с периодом полураспада менее 30 лет, а также Cs-137) низко-, средне- и высокоактивные РАО с ограниченным содержанием долгоживущих (с периодом полураспада более 30 лет) радионуклидов. Максимальная удельная активность альфа-излучателей (уран и трансурановые элементы) с периодом полураспада более 5 лет в отдельных упаковках с РАО (ячейках захоронения РАО) не должна превышать  $3,7 \cdot 10^3$  Бк/г при условии, что в среднем в могильнике их удельная активность не превышает 370 Бк/г. Отходы, содержащие радионуклиды в количестве, превышающем приведенные в табл. 1 пределы, должны направляться на захоронение в могильник глубокого заложения (Козырев, 2009).

Таблица 1. Допустимое содержание долгоживущих радионуклидов в РАО, подлежащих захоронению в приповерхностных могильниках в России (Козырев, 2009)

Радионуклиды	Период полураспада	Удельная активность
C-14	5730 лет	$3,0 \cdot 10^{11}$ Бк/м <sup>3</sup>
C-14 в активированном металле		$3,0 \cdot 10^{12}$ Бк/м <sup>3</sup>
Ni-59 в активированном металле	$7,5 \cdot 10^4$ лет	$8,1 \cdot 10^{12}$ Бк/м <sup>3</sup>
Ni-63	100 лет	$2,6 \cdot 10^{13}$ Бк/м <sup>3</sup>
Ni-63 в активированном металле		$2,6 \cdot 10^{14}$ Бк/м <sup>3</sup>
Sr-90	29,1 года	$2,6 \cdot 10^{14}$ Бк/м <sup>3</sup>
Nb-94 в активированном металле	$2,03 \cdot 10^4$ лет	$7,4 \cdot 10^9$ Бк/м <sup>3</sup>
Cs-137	30 лет	$1,7 \cdot 10^{14}$ Бк/м <sup>3</sup>
Tс-99	$2,13 \cdot 10^5$ лет	$1,1 \cdot 10^{11}$ Бк/м <sup>3</sup>
I-129	$1,57 \cdot 10^7$ лет	$3,0 \cdot 10^9$ Бк/м <sup>3</sup>
Pu-241	14,4 года	$1,3 \cdot 10^5$ Бк/г
Cm-242	163 сут	$7,4 \cdot 10^5$ Бк/г
Уран и трансурановые альфа-излучающие радионуклиды с периодом полураспада более 5 лет		$3,7 \cdot 10^3$ Бк/г

Качественно новые принципы классификации РАО в России, ориентированные на их окончательную изоляцию и соответствующие рекомендациям МАГАТЭ, должны быть законодательно утверждены с введением федерального закона "Об обращении с радиоактивными отходами" (Гусаков-Станюкевич и др., 2008; Евстратов, 2009).

Из рассмотренных принципов классификации РАО следует, что независимо от того, какие площадки на концептуальной стадии выбраны в качестве перспективных для размещения могильника, выбор системы захоронения и концепция могильника должны базироваться на характеристиках отходов, определяющих продолжительность их потенциальной радиологической опасности.

#### 4. Радиоактивные отходы региона: структура и радиологическая опасность

Оценка характеристик РАО, определяющих выбор способа их окончательной изоляции, представляет собой комплексную научно-техническую задачу, которая обуславливает необходимость инвентаризации отходов, образующихся в процессе эксплуатации различных реакторных установок, и прогноза накопления отходов в будущем к моменту окончания проектного срока службы и в процессе демонтажных работ при снятии ЯЭУ с эксплуатации.

##### 4.1. Эксплуатационные отходы

Данные инвентаризации по радионуклидному составу эксплуатационных отходов, которые могут быть образованы в регионе к 2020 г., были использованы в концептуальном проекте регионального подземного могильника РАО. Этот проект был разработан в рамках международного

проекта по программе TACIS, выполненного специалистами Горного института Кольского научного центра РАН совместно с российскими и западноевропейскими партнерами (*Концептуальный проект...*, 1998). Данные по количественному и качественному составу кондиционированных отходов для концептуального проекта регионального могильника были предоставлены ВНИПИЭТОм (головная проектная организация Росатома в области обращения с РАО). В обобщенном виде количественные характеристики кондиционированных РАО в соответствии с типом модулей для их размещения приведены в табл. 2.

Кратко комментируя данные табл. 2, можно отметить, что в общем объеме кондиционированных РАО примерно 60 % составляют отходы Кольской АЭС, содержащие около 90 % полной активности. Прогнозируется, что среди отходов атомных флотов и обслуживающей инфраструктуры около 60 % будут составлять РАО от объектов Северного флота.

Введение федеральных норм и правил, которые устанавливают допустимое содержание радионуклидов в РАО, размещаемых в приповерхностных могильниках (табл. 1), позволяет предварительно дифференцировать региональные эксплуатационные отходы по способу захоронения. В соответствии с данными табл. 1 можно выделить следующие основные группы радионуклидов в составе отходов:

- продукты реакций активации нейтронами;
- продукты деления;
- актиниды.

Таблица 2. Объем и активность кондиционированных РАО в регионе на 2020 г.  
(*Концептуальный проект...*, 1998)

Источник РАО	Объем РАО, м <sup>3</sup>	Активность, ТБк		
		Полная	Со-60	Cs-137
Северный флот	29785	1605	241	599
Кольская АЭС	70285	19118	5527	894
ФГУП "Атомфлот"	17930	382	38	225
Итого:	118000	21105	5806	1714

Из перечисленных в табл. 1 долгоживущих радионуклидов к группе радионуклидов – продуктов активации относятся следующие:

– С-14, накапливающийся в теплоносителе первого контура водо-водяных реакторов по реакции  $^{17}\text{O}(n,\alpha)^{14}\text{C}$  и в нержавеющей стали, из которой изготовлены большинство конструктивных элементов реакторных установок, по реакции  $^{13}\text{C}(n,\gamma)^{14}\text{C}$ . Этот радионуклид, который является чистым бета-излучателем с периодом полураспада ( $T_{1/2}$ ) 5730 лет, также может накапливаться в активированных бетонных конструкциях по реакции  $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ . Низкая энергия распада С-14 обуславливает трудности в обнаружении этого радионуклида в отходах;

– Ni-59 и Ni-63, образующиеся при активации нейтронами материалов конструкций реактора (нержавеющая сталь, сплавы на основе никеля) в реакциях радиационного захвата  $^{58}\text{Ni}(n,\gamma)^{59}\text{Ni}$  и  $^{62}\text{Ni}(n,\gamma)^{63}\text{Ni}$ , соответственно. Ni-59 распадается посредством захвата электрона (период полураспада 76000 лет), а Ni-63 является слабым бета-излучателем с периодом полураспада примерно 100 лет;

– Nb-94, образующийся в реакции  $^{93}\text{Nb}(n,\gamma)^{94}\text{Nb}$  при активации материалов активной зоны. При относительно высоком содержании Nb в нержавеющей сталях (5-300 ppm) и в инконеле (400-50000 ppm) очень долгоживущий Nb-94 (период полураспада 20300 лет) может накапливаться в материалах активной зоны в значительных количествах.

К продуктам деления, приведенным в табл. 1, относятся: Cs-137 ( $T_{1/2}=30$  лет), Tc-99 ( $T_{1/2}=2,13\cdot 10^5$  лет), I-129 ( $T_{1/2}=1,57\cdot 10^7$  лет). Активность таких радионуклидов в отходах определяется двумя процессами. Первый процесс определяет их накопление в облученном ядерном топливе, а второй – выход радионуклидов из топлива в теплоноситель при разгерметизации оболочек твэлов и поступление в различные технологические среды, которые и образуют радиоактивные отходы.

Как и продукты деления, уран и трансурановые  $\alpha$ -активные радионуклиды попадают в радиоактивные отходы при разгерметизации или разрушении оболочек тепловыделяющих элементов и поступлении их из топлива в теплоноситель.

Практически для всех указанных ранее долгоживущих радионуклидов характерны трудности в измерении и определении накопления, поскольку они являются чистыми бета- и альфа-излучателями и имеют низкие удельную активность и энергетические характеристики распада. Их количество в РАО может быть определено только в лабораторных условиях с помощью специальных методов. Поэтому в существующей практике используются различные методы оценки содержания таких радионуклидов в

радиоактивных отходах. Так, например, в западноевропейских странах для определения содержания долгоживущих радионуклидов в эксплуатационных РАО широкое распространение получила методология, основанная на использовании корреляционных факторов. В количественном выражении такие корреляционные факторы представляют собой отношения активности трудно измеряемых долгоживущих радионуклидов к активности легко детектируемых (реперных) радионуклидов, в качестве которых, например, рассматриваются  $^{60}\text{Co}$  и  $^{137}\text{Cs}$ . Первый радионуклид связывается с радионуклидами, которые по своей природе являются продуктами активации, а второй радионуклид, который генетически связан с нуклидами топливной природы, рассматривается в качестве реперного для оценки содержания продуктов деления и актинидов. Именно такой методический подход был использован авторами статьи в рамках международного проекта по программе TACIS для предварительной оценки безопасности регионального подземного могильника РАО (*Предварительная оценка...*, 2000). В качестве примера в табл. 3 приведены корреляционные факторы, которые были использованы для оценки содержания основных долгоживущих радионуклидов в эксплуатационных отходах Кольской АЭС.

Применение методического подхода, основанного на использовании корреляционных факторов в сочетании с расчетными оценками по специализированным математическим программам, позволило оценить содержание долгоживущих радионуклидов в региональных эксплуатационных отходах (*Предварительная оценка...*, 2000). При этом были использованы данные по содержанию реперных радионуклидов, которые были охарактеризованы в данных по инвентаризации кондиционированных РАО (*Концептуальный проект...*, 1998). Суммарная оцененная активность долгоживущих радионуклидов в региональных эксплуатационных отходах приведена в табл. 4.

На основе данных по содержанию долгоживущих радионуклидов в кондиционированных РАО и нормативных требований (табл. 1) была выполнена предварительная оценка радиационных характеристик различных потоков отходов, определяющих способ их захоронения. В обобщенном виде результаты этой оценки приведены в табл. 5.

Таблица 3. Корреляционные факторы для долгоживущих радионуклидов в составе эксплуатационных РАО Кольской АЭС (*Предварительная оценка...*, 2000)

Определяемый радионуклид	Период полураспада, лет	Реперный радионуклид	Корреляционный фактор
Tc-99	$2,13 \cdot 10^5$	Cs-137	$4,2 \cdot 10^{-4}$
I-129	$1,57 \cdot 10^7$	Cs-137	$1,0 \cdot 10^{-6}$
Pu-239	$2,41 \cdot 10^4$	Cs-137	$1,44 \cdot 10^{-4}$
Pu-240	6550	Cs-137	$1,44 \cdot 10^{-4}$
Am-241	432	Cs-137	$1,41 \cdot 10^{-3}$

Таблица 4. Прогнозная оценка суммарной активности долгоживущих радионуклидов в региональных эксплуатационных РАО на 2020 г. (*Предварительная оценка...*, 2000)

Радионуклид	Активность, Бк
C-14	$2,89 \cdot 10^{13}$
Ni-59	$9,57 \cdot 10^{13}$
Ni-63	$1,09 \cdot 10^{16}$
Nb-94	$6,13 \cdot 10^{12}$
Tc-99	$8,58 \cdot 10^{13}$
I-129	$2,04 \cdot 10^9$
Cs-137	$1,06 \cdot 10^{15}$
Pu-239	$2,94 \cdot 10^{11}$
Pu-240	$2,94 \cdot 10^{11}$
Pu-241	$7,14 \cdot 10^{12}$
Am-241	$2,88 \cdot 10^{12}$

Таблица 5. Распределение региональных эксплуатационных РАО по способам захоронения

Источник РАО	Объем кондиционированных РАО, м <sup>3</sup> (%)		Всего
	Приповерхностное захоронение	Геологическое захоронение	
Северный флот	28645 (96,2)	1140 (3,8)	29785
Кольская АЭС	15490 (22)	54795 (78)	70285
ФГУП "Атомфлот"	12700 (70,8)	5230 (29,2)	17930
Итого:	56835 (48,2)	61165 (51,8)	118000

Кратко комментируя данные табл. 5, следует отметить, что из общего потока эксплуатационных отходов более 50 % кондиционированных РАО могут потребовать геологического захоронения. Для большей части отходов это требование обусловлено активностью альфа-излучателей. Отмечая ориентировочный характер такой оценки, следует сказать, что в определении содержания долгоживущих радионуклидов в РАО были использованы верхние пределы удельной активности отходов различного типа, приведенные в данных ВНИПИЭТа при выполнении упомянутого ранее международного проекта (*Концептуальный проект...*, 1998). Поэтому более дифференцированные данные по содержанию реперных радионуклидов в составе РАО различного типа позволят выполнить более корректные и обоснованные оценки по определению способа окончательного захоронения отходов.

Можно отметить, что в рамках проекта по программе ТАСИС в качестве основного варианта для захоронения эксплуатационных РАО принят могильник приповерхностного типа, размещаемого на глубине до 100 м. Однако с учетом новой классификации РАО, возможно, для значительной части отходов потребуются геологическое захоронение.

В приведенных ранее данных не были представлены высокоактивные отходы, образующиеся при эксплуатации судовых ЯЭУ (стержни системы управления реактора, датчики и конструкции внутриреакторного контроля и др.). Представленные в табл. 2 и 5 данные по кондиционированным отходам также не учитывают РАО от демонтажа энергоблоков Кольской АЭС и реакторных отсеков АПЛ, выведенных из эксплуатации. Учет этих отходов может также привести к необходимости рассмотрения геологического захоронения части региональных отходов.

#### 4.2. Отходы от демонтажа реакторных установок

Вывод из эксплуатации является заключительным этапом жизненного цикла ядерной энергетической установки. Он включает в себя демонтаж и разборку оборудования и конструкций установки, а также обращение с радиоактивными отходами, образующимися в процессе выполнения этих работ. Определение радионуклидного состава демонтажных отходов является одной из ключевых задач, решение которой направлено, прежде всего, на разработку стратегии вывода ЯЭУ из эксплуатации с учетом требований по обеспечению радиационной безопасности персонала и окружающей среды. Другое важное целевое назначение этой задачи состоит в выборе наиболее эффективной системы окончательного захоронения демонтажных отходов.

В структуре демонтажных РАО можно выделить две группы отходов:

- конструкции, которые в процессе эксплуатации ЯЭУ подвергаются интенсивному облучению нейтронами;
- конструкции и оборудование, поверхности которых загрязнены активированными продуктами коррозии и продуктами деления.

Около 90 % активности демонтажных отходов определяется активированными конструкциями. Наиболее высокая активность характерна для элементов конструкций, которые размещаются в активной зоне реактора и в непосредственной близости от нее. Значительной нейтронной активации подвергаются также корпус реактора и близко расположенные к нему элементы биологической защиты. Радионуклидный состав отходов активационной природы зависит от многих факторов, среди которых выделим следующие:

- химический состав материалов конструкций, подвергающихся воздействию потока нейтронов;
- интенсивность и пространственно-энергетическое распределение потока нейтронов;
- мощность и особенности эксплуатационных режимов ЯЭУ, которые определяют динамику накопления радионуклидов – продуктов активации;
- состав теплоносителя первого контура ЯЭУ.

Очевидно, что каждая конкретная ЯЭУ будет иметь свои специфические условия накопления радионуклидов активационной природы. Информация о радиационных характеристиках наведенной активности частично может быть получена экспериментально путем отбора образцов и измерения их активности (*Былкин и др.*, 2009). Однако в практике прогнозных оценок радионуклидного состава отходов активационного происхождения широкое применение получили расчетные методы на основе использования специализированных математических программ (*Былкин и др.*, 2009; *Борисов и др.*, 1994; *Radiological characterization...*, 1998).

Такая методика была использована авторами настоящей работы в прогнозных оценках радиационных характеристик РАО, образующихся при демонтаже энергоблоков Кольской АЭС. Основные результаты этих оценок приведены в статье (*Мельников и др.*, 1998). Расчетные оценки показывают, что по уровню максимальной удельной активности к категории отходов, для которых может потребоваться геологическое захоронение, относятся внутрикорпусные устройства,

изготовленные из нержавеющей стали. Эти устройства служат для размещения активной зоны, устройства температурного и нейтронно-физического контроля, а также в качестве направляющих для перемещения органов регулирования и организации потока теплоносителя в реакторе. К таким внутрикорпусным устройствам относятся шахта, корзина и др. С точки зрения долгоживущей радиологической опасности этих конструкций определяющими являются  $^{59}\text{Ni}$  и  $^{63}\text{Ni}$  – продукты активации изотопов никеля в составе конструкционной стали. Так, например, максимальная активность  $^{63}\text{Ni}$  в активированной стали корзины даже через 100 лет выдержки оценивается величиной примерно  $3 \cdot 10^{15}$  Бк/м<sup>3</sup>, а максимальная активность  $^{59}\text{Ni}$  –  $6 \cdot 10^{13}$  Бк/м<sup>3</sup>. Высокая удельная активность этих радионуклидов характерна также и для шахты. Полная масса этих конструкций в составе одного реактора типа ВВЭР-440 составляет примерно 44 т. Однако масса отходов, которые могут появиться после разборки реактора и для которых может потребоваться геологическое захоронение, зависит от технологии переработки этих конструкций при их подготовке к захоронению.

Использование нержавеющей стали в конструкциях АПЛ также обуславливает определяющее значение изотопов никеля при выборе способа захоронения отходов, которые появятся после демонтажа реакторных отсеков АПЛ, выведенных из эксплуатации. Результаты оценки радиационных характеристик активированных конструкций АПЛ приведены в докладе специалистов НИКИЭТ (*Ezovit u dr.*, 1996). Как следует из этих данных, долгоживущую активность сохраняют корпус реактора, внутрикорпусные стальные конструкции (экраны) и примыкающие к корпусу конструкции биологической защиты. В виде радиоактивных отходов указанные конструкции появятся после окончательной разборки реакторных отсеков, которая, согласно концепции комплексной утилизации АПЛ, должна будет производиться через 70 лет выдержки, т.е. практически к концу текущего столетия. В течение этого времени реакторные отсеки будут находиться в Пункте длительного хранения в губе Сайда. По оценкам специалистов НИКИЭТ после 70-летней выдержки удельная активность по  $^{63}\text{Ni}$  варьирует от  $5 \cdot 10^{13}$  Бк/м<sup>3</sup> для экранов до  $2,5 \cdot 10^{11}$  Бк/м<sup>3</sup> для корпуса реактора. Сопоставление этих данных с нормативными требованиями (табл. 1) позволяет сделать вывод, что РАО, которые появятся в процессе окончательной разборки активированных конструкций, могут быть захоронены в приповерхностных могильниках.

Следует отметить ряд факторов, которые могут оказать влияние на величину доли региональных РАО, для которых может потребоваться геологическое захоронение. Такими факторами, в частности, является неопределенность в сроках вывода из эксплуатации энергоблоков Кольской АЭС и неполнота данных по инвентаризации отходов (в частности, данных по высокоактивным конструкциям активных зон). Кроме того, в оценке долгоживущих отходов был использован ряд приближенных значений проблемных параметров (корреляционные факторы, активность реперных радионуклидов в РАО и др.), что требует дополнительного изучения долгоживущей активности региональных отходов и подтверждения корректности прогнозных оценок, выполняемых на основе теоретических расчетов.

## 5. Заключение

В настоящей работе выявлена доминирующая роль долгоживущих радионуклидов в составе региональных РАО при выборе типа объекта окончательной изоляции отходов от биосферы.

На основе данных по инвентаризации региональных РАО, выполненной в рамках международного ТАСИС проекта, результатов теоретических оценок и требований российских нормативных документов определено, что:

- по уровню содержания долгоживущих радионуклидов (актининов) для значительной части радиоактивных отходов Кольской АЭС может потребоваться геологическое захоронение;
- условию обеспечения безопасной изоляции РАО для большей части отходов военного и гражданского атомных флотов удовлетворяет захоронение в могильнике приповерхностного типа;
- на стадии кондиционирования РАО необходимо экспериментальное определение содержания в них долгоживущих радионуклидов, в особенности альфа-излучающих продуктов деления.

## Литература

- Ezovit Eh.S., Netecha M.E., Orlov Yu.V.** Radiation factors specifying safety in reactor compartments handling in the process of decommissioning nuclear-powered submarines. *Proc. of the ASME-JSME 4th International Conference on Nuclear Engineering, New Orleans, Louisiana, March 10-14, v.3, USA, The American Society of Mechanical Engineers*, p.21-26, 1996.
- Radiological characterization of shut down nuclear reactors for decommissioning purposes. *Technical report series No. 389. Vienna, IAEA*, 1998.

- Scientific and technical basis for geological disposal of radioactive wastes. *Technical report series No. 413. Vienna, IAEA, 2003.*
- Scientific and technical basis for near surface disposal of low and intermediate level waste. *Technical report series No. 412. Vienna, IAEA, 2002.*
- Борисов С.Е., Кудрявцева А.В., Лещенко А.В., Лукьянов М.А., Машкович В.П., Морев М.Н., Неретин В.А., Цофин В.И.** ВВЭР-500 как источник наведенной активности при снятии с эксплуатации. *Атомная энергия*, т.77, вып. 4, с.314-318, 1994.
- Былкин Б.К., Егоров А.Л., Журбенко Е.А., Цофин В.И.** Радиационные характеристики реакторных конструкций после окончательного останова АЭС с ВВЭР. *Атомная энергия*, т.106, вып. 1, с.56-59, 2009.
- Гусаков-Станюкевич И.В., Казаков С.В., Кудрявцев Е.Г., Крюков Е.Б.** Единая государственная система обращения с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами (концептуальные подходы и принципы формирования). *Доклад на семинаре Контактной Экспертной группы МАГАТЭ по Системе обращения с РАО в северо-западном регионе России. Оксфорд (Великобритания), 5-7 марта 2008 года.* URL: [www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/CEG/ceg\\_reports.html](http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/CEG/ceg_reports.html).
- Евстратов Е.В.** О проекте федерального закона "Об обращении с радиоактивными отходами". *Доклад на семинаре Контактной Экспертной Группы МАГАТЭ "Окончательная изоляция радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива – опыт и планы". Боммерсвик (Швеция), 24-25 февраля 2009 года.* URL: [www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/CEG/ceg\\_reports.html](http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/CEG/ceg_reports.html).
- Козырев Д.В.** Планы Российской Федерации по созданию объектов приповерхностного захоронения РАО. *Доклад на семинаре Контактной Экспертной Группы МАГАТЭ "Окончательная изоляция радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива – опыт и планы". Боммерсвик (Швеция), 24-25 февраля 2009 года.* URL: [www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/CEG/ceg\\_reports.html](http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/CEG/ceg_reports.html).
- Концептуальный проект регионального могильника для радиоактивных отходов, образующихся в северо-западной России. *Отчет по задаче 2 проекта TACIS R4.10/95 "Повышение безопасности обращения с РАО в северо-западном регионе России. Захоронение РАО. Этап 2". Горный институт КНЦ РАН, ВНИПИЭТ (Россия), ANDRA (Франция). Апатиты-Париж, 147 с., 1998.*
- Кочетков О.А.** Радиационно-гигиенические аспекты регулирования безопасности обращения с радиоактивными отходами в России. *Доклад на семинаре Контактной Экспертной группы МАГАТЭ по Системе обращения с РАО в северо-западном регионе России. Оксфорд (Великобритания), 5-7 марта 2008 года.* URL: [www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/CEG/ceg\\_reports.html](http://www.iaea.org/OurWork/ST/NE/NEFW/CEG/ceg_reports.html).
- Мельников Н.Н., Наумов В.А., Гусак С.А.** Радиоэкологические проблемы, связанные со снятием с эксплуатации энергоблоков Кольской АЭС. *Вестник МГТУ*, т.1, № 3, с.139-144, 1998.
- Предварительная оценка безопасности: отчет по задаче 6 проекта TACIS R4.10/95 "Повышение безопасности обращения с РАО в северо-западном регионе России. Захоронение радиоактивных отходов. Этап 2". *Горный институт КНЦ РАН, ВНИПИЭТ (Россия), ANDRA (Франция). Апатиты-Париж, 238 с., 2000.*
- Саркисов А.А.** Проблемы реализации интеграционного подхода к обращению с радиоактивными отходами в северо-западном регионе России и окончательной их изоляции. *Выступление на 22-ом Пленарном заседании Контактной Экспертной Группы МАГАТЭ по проектам в области радиоактивных отходов в Российской Федерации. Париж (Франция), 24-26 сентября 2008 г.* URL: [www.a-submarine.ru/News/Main/view?id=21370&idChannel=211](http://www.a-submarine.ru/News/Main/view?id=21370&idChannel=211).