

ЯДЕРНОЕ НАСЛЕДИЕ В АРКТИКЕ

С началом широкого развития атомной энергетики в конце 1940-х годов остро встала проблема утилизации радиоактивных отходов (РАО). Одним из вариантов утилизации, получившим довольно широкое распространение, стал сброс РАО в открытое море. В 60–70-х годах прошлого века практика затопления радиоактивных отходов в Мировом океане была общепринятой для стран, развивавших деятельность по использованию ядерной энергетики в мирных и военных целях. По данным МАГАТЭ, до 1982 года 14 странами (без СССР) в 47 районах Тихого и Атлантического океанов было затоплено 1,24 МКи (46 ПБк) радиоактивных отходов. Подавляющая их часть — более 98 % — приходится на северо-западную Атлантику.

Советский Союз, а позднее Российская Федерация в 1957–1993 годах осуществляли сброс РАО в арктических (Баренцево и Карское) и дальневосточных (Японское и Охотское) морях, а также в северо-западной части Тихого океана. Необходимость захоронения РАО в море была связана в основном с деятельностью Военно-морского флота и морских парокhodств, имеющих атомный флот. По данным изданной в 2005 году «Белой книги-2000», содержащей наиболее полные данные о затопленных в российских морях РАО, их общая активность (на момент сброса) составляла ~ 1,1 МКи (40 ПБк), при этом на Арктику приходилось 97 % всех отечественных сбросов РАО. Затопливались твердые (~ 17000 контейнеров и различных конструкций реакторов) и жидкие радиоактивные отходы, атомные реакторы, в том числе и с невыгруженными активными зонами: 4 реакторных отсека, экранная сборка атомного ледокола «Ленин» и атомная подводная лодка (АПЛ) К-27 (см. рисунок). Большинство из объектов, затопленных в Арктике, находятся в территориальных водах России.

Суммарно в Карское море и заливы Новой Земли было сброшено РАО активностью, эквивалентной более 1 МКи (38 ПБк). В настоящее время эта активность за счет радиоактивного распада снизилась более чем в 10 раз (до ~ 100 кКи) и определяется

в основном долгоживущими радионуклидами ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr и ⁶⁰Co. Для сравнения, суммарная активность выброса при аварии на Чернобыльской АЭС составила, по опубликованным данным, от 50 до 90 МКи (из них до 1,6 МКи долгоживущих ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr).

Помимо специально затопленных РАО, в Арктике аварийно затонули (и до сих пор находятся на дне) две АПЛ — «Комсомолец» и К-159 (с 1989 года Б-159), в трех реакторах которых также находится невыгруженное отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) (см. рисунок).

Таким образом, затопленные в Арктике объекты следует разделить по степени опасности на два класса:

- объекты с ОЯТ, представляющие как радиационную, так и ядерную опасность, — ядерно- и радиационно опасные объекты (ЯРОО);
- твердые радиоактивные отходы (ТРО), опасные только в радиационном отношении.

При этом ЯРОО также следует разделить на две группы — затонувшие в результате аварий АПЛ «Комсомолец» и Б-159 и специально затопленные объекты с ОЯТ в Карском море и заливах архипелага Новая Земля.

В настоящее время общая активность затопленных ЯРОО и ТРО более чем на 90 % определяется активностью долгоживущих продуктов деления ядерного топлива ¹³⁷Cs (T_{1/2} = 30 лет) и ⁹⁰Sr (T_{1/2} = 29,2 лет). Общий радиационный потенциал этих групп объектов представлен ниже в таблице

Общий радиационный потенциал объектов, затопленных в Арктике

Группы затопленных объектов	Активность на 2012 г.	
	ТБк	кКи
Аварийно затонувшие АПЛ	8800	240
ЯРОО, затопленные в Карском море	2700	73
ТРО	400	10

Затопления РАО в Карском море и заливах Новой Земли.



Затонувшие в Арктике атомные подводные лодки.



Как видно из таблицы, наибольшим радиационным потенциалом обладают аварийно затонувшие АПЛ. При этом ОЯТ в реакторах этих АПЛ не было специально подготовлено к затоплению, т.е. не были добавлены дополнительные защитные барьеры. В отличие от ЯРОО, затопленных в Карском море, активные зоны реакторов этих АПЛ не заполнены твердым раствором на основе фурфурола (радиационно-стойкий консервант на основе эпоксидной смолы) и битума, что в будущем приведет к непосредственному контакту оболочек теплоделяющих элементов (ТВЭЛ) с морской водой и их последующему коррозионному разрушению. При этом, несмотря на то, что реакторы надежно заглушены штатной системой поглотителей, через некоторое время из-за коррозионного разрушения оболочек ТВЭЛ и осыпания топлива возможно такое изменение геометрии активной зоны, что система поглотителей потеряет свою эффективность. Это, в свою очередь, может привести к ядерной аварии — возникновению самоподдерживающейся цепной реакции (СЦР). В этом случае возможен выброс в окружающую морскую среду как образовавшихся при СЦР продуктов деления (в основном короткоживущих), так и накопленных в топливе реактора за время предыдущей эксплуатации. Таким образом, аварийно затонувшие АПЛ представляют собой наибольшую опасность.

Активные зоны ЯРОО, затопленных в Карском море, заполнены консервантом, что исключает их контакт с морской водой и, следовательно, возникновение СЦР. Вместе с тем поведение консерванта в морской воде в течение длительного (десятилетиями) времени исследовано недостаточно полно. Кроме того, возможно изначально неполное заполнение активной зоны консервантом вследствие его недостаточной текучести. Учитывая это, можно прогнозировать проникновение малых объемов морской воды в активную зону затопленных реакторов. Для водо-водяных реакторов это не представляет опасности, однако для затопленной АПЛ К-27 с двумя жидкометаллическими (ЖМТ) реакторами на промежуточных нейтронах, содержащих высокообогащенное топливо, такое количество воды может спровоцировать возникновение СЦР. Поэтому АПЛ К-27 представляет собой наибольшую ядерную опасность среди всех объектов, затопленных в Арктике.

Первые комплексные исследования затопленных ЯРОО в Карском море были проведены в совместных российско-норвежских экспедициях 1992–1994 годов. В ходе этих работ было исследовано состояние природных сред в заливах Абросимова, Степового и Цивольки. Уже в ходе этих работ было обнаружено, что приводимые в архивных данных координаты мест затопления объектов зачастую не соответствуют их реальному положению. Таким образом, возникла задача по поиску затопленных объектов и их идентификации.

При определении воздействия затопленных ЯРОО на окружающую среду основной задачей является оценка состояния защитных барьеров безопасности, то есть тех конструктивных преград, которые отделяют радиоактивные вещества внутри объекта от окружающей их морской среды. В связи с этим одной из главных целей обследования затопленных радиационно опасных объектов является выявление выхода техногенных радионуклидов в морскую среду, поскольку это обстоятельство прямо свидетельствует о нарушении целостности защитных барьеров.

Первоначально основным методом исследований был отбор проб придонной воды и донного грунта по заранее определенной схеме-сетке. Этот метод позволил оценить средний уровень концентрации техногенных радионуклидов в воде и осадочных породах этого региона. Для оценки состояния защитных барьеров безопасности потребовалось прямое (*in situ*) измерение уровней гамма-излучения

с помощью подводной аппаратуры радиационного контроля. Многолетний опыт экспедиционных работ показал, что для обследования объектов, затопленных в заливах Новой Земли на глубинах не более 50 м, оптимальным является использование малых и сверхмалых телеуправляемых подводных аппаратов (ТПА) с размещенными на них подводными спектрометрами.

В 2001 году в целях создания государственной системы обеспечения безопасности подводных потенциально опасных объектов (ППОО) и специальных подводных работ Правительство Российской Федерации приняло решение о совершенствовании деятельности по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций на ППОО. Согласно этому решению на МЧС России было возложено ведение реестра ППОО во внутренних и территориальных водах Российской Федерации. Начиная с 2002 года МЧС России проводит ежегодные экспедиционные работы по обследованию подводных потенциально опасных объектов в Карском море. Основными задачами этих работ является определение местоположения затопленных объектов, оценка их состояния и определение уровней радиоактивного загрязнения морской среды в местах затопления.

В ряду экспедиций по обследованию ЯРОО в Арктике следует отметить и совместные международные экспедиции. Так, в 2007 году в рамках Международной программы сотрудничества в военной области по вопросам окружающей среды в Арктике "АМЕС" (Arctic Military Environmental Cooperative) было проведено обследование АПЛ Б-159. По количеству ОЯТ в реакторах эта АПЛ представляет собой большую опасность. В ходе этих работ был подготовлен специальный комплекс подводной аппаратуры радиационного контроля затопленного ЯРОО и отработаны методики его применения с использованием ТПА. В этих работах также был получен большой опыт по организации взаимодействия между российскими и международными организациями, в том числе между представителями российских и иностранных ВМС.

В 2014 году обследование этой подводной лодки было продолжено в совместной российско-норвежской экспедиции. По результатам всех работ на АПЛ Б-159 было установлено, что выход радионуклидов из реакторов отсутствует. Однако, по экспертным оценкам, вероятность разгерметизации первого контура реакторов АПЛ Б-159 и выхода радионуклидов в окружающую среду в ближайшее время считается достаточно высокой.

Ранее, в 2012 году была проведена совместная российско-норвежская экспедиция по обследованию ЯРОО в заливе Степового. Особое внимание в этой экспедиции было уделено затопленной в этом заливе АПЛ К-27. По данным этих работ, а также последних российских экспедиций 2013–2015 годов радиационная обстановка в районе затопления К-27 характеризуется как нормальная, выхода радионуклидов из нее не обнаружено.

Отдельно стоит остановиться на затонувшей в Норвежском море АПЛ «Комсомолец». Место ее затопления находится в зоне интенсивного промыслового рыболовства, что объясняет заинтересованность международной общественности в регулярном радиозоологическом мониторинге этого района Мирового океана. В результате многочисленных экспедиций и радиационных обследований был обнаружен незначительный выход радионуклидов из реакторного отсека АПЛ в окружающую среду.

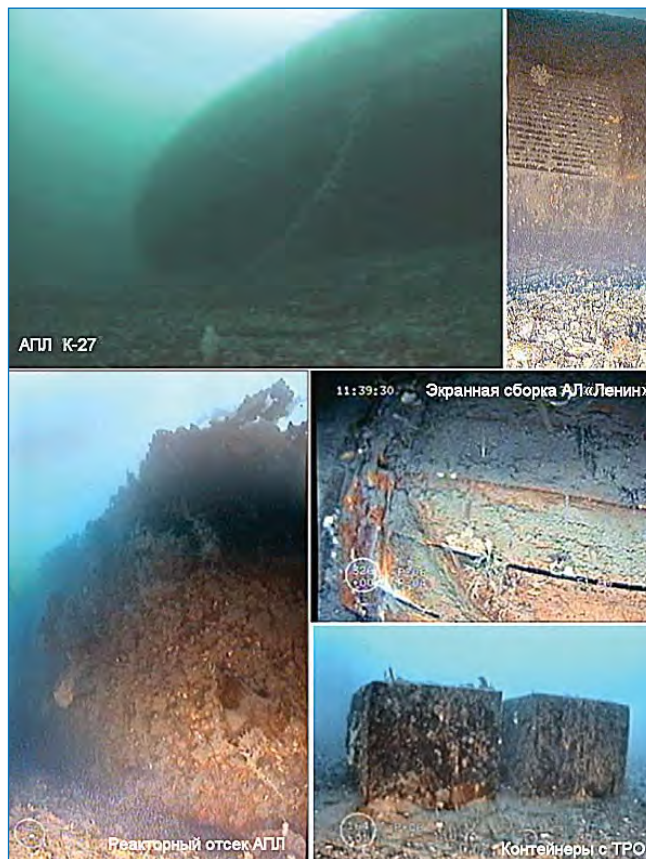
При последнем обследовании АПЛ в 2007 году было установлено, что с момента последних измерений в 1994 году концентрация радионуклидов в месте их выхода из АПЛ снизилась более чем в 30 раз. Одной из вероятных причин такого снижения могут быть, например, образующиеся продукты

коррозии (как самого топлива, так и оболочек тепловыделяющих элементов), которые перекрывают пути выхода радионуклидов из топлива в морскую воду. Однако нельзя однозначно утверждать, что такое снижение вызвано уменьшением выхода радионуклидов из топлива, так как возможной причиной может являться и сезонное изменение направления и скорости придонных течений. Для окончательного определения скорости выхода радионуклидов из АПЛ «Комсомолец» необходим долговременный мониторинг.

Затонувшая АПЛ «Комсомолец» в настоящее время является своего рода уникальным экспериментальным стендом для исследования поведения топливных элементов в морской воде при долговременном нахождении АПЛ на морском дне.

В период с 2002 по 2015 год было проведено 11 экспедиций по обследованию РАО затопленных в Карском море и заливах архипелага Новая Земля. К настоящему времени обнаружено порядка 50 затопленных объектов, из которых более половины были обследованы с помощью ТПА. В их числе в первую очередь были обследованы объекты с ОЯТ — АПЛ К-27, экранная сборка ОК-150 а/л «Ленин», реакторные отсеки (РО) АПЛ К-19 и К-11. Кроме того, было обследовано более 40 контейнеров с ТРО. На рисунке приведены изображения некоторых из обследованных объектов.

Значимых выходов радионуклидов в окружающую среду из объектов с ОЯТ зарегистрировано не было, при этом вблизи корпусов затопленных РО обычно фиксируется излучение техногенного радионуклида ^{137}Cs , находящегося внутри отсеков. Практически для всех обследованных контейнеров с ТРО на их поверхности регистрируется излучение ^{137}Cs , в некоторых спектрах отмечается малый вклад излучения от активационного радионуклида ^{60}Co , то есть внутри контейнеров присутствуют техногенные радионуклиды. Максимальная мощность дозы на поверхности некоторых контейнеров более чем в 10 раз превосходит естественный фон. Однако на дне, уже в нескольких метрах от контейнеров, следов техногенной активности не наблюдается даже на уровне, в десятки раз меньшем, чем уровень активности природного радионуклида ^{40}K . Таким образом, по результатам проведенного обследования контейнеров с ТРО можно сделать вывод, что эти контейнеры в настоящее время не являются значимым источником загрязнения окружающей морской среды. В будущем активность всех затопленных ТРО будет снижаться со временем, и через 300 лет, когда, по экспертным оценкам, будут полностью разрушены корпуса железных контейнеров, уменьшится более чем в 1000 раз и составит менее 10 Ки. Для сравнения, радиоактивность 1 км³ морской воды за счет содержащегося в нем естественного радионуклида ^{40}K составляет ~ 300 Ки.



Затопленные в заливах Новой Земли объекты.

Затопленные ТРО без упаковки (корпуса и крышки реакторов, парогенераторы и т.д.) в основном загрязнены радионуклидами активационного происхождения (основной радионуклид — ^{60}Co с $T_{1/2} = 5$ лет) и уже сейчас не представляют какой-либо радиационной опасности для окружающей среды.

На сегодняшний день наиболее подробно исследованы заливы Абросимова, Степового и Цивольки. Вместе с тем оставшиеся четыре залива и район Новоземельской впадины обследованы явно недостаточно. Так, в Новоземельской впадине до сих пор не обнаружен реакторный отсек с ОЯТ АПЛ № 421.

Таким образом, экспедиции, проводившиеся за последние 20 лет в районы затопления, пока не выявили значимого загрязнения окружающей среды. Большим недостатком, однако, является то, что эти экспедиции проводятся разными организациями по различ-

ным методикам, при этом цели выполняемых работ обычно не согласовываются и зачастую дублируют друг друга, надлежащий обмен результатами так и не был налажен. При этом основное внимание уделяется исследованиям загрязнения окружающей среды, а не самим источникам этого загрязнения, т.е. затопленным объектам. Состояние самих затопленных объектов до сих пор исследовано явно недостаточно, что не позволяет делать надежные прогнозные оценки, касающиеся развития радиационной ситуации в регионе.

Доступная в настоящий момент информация о затопленных объектах, например Реестр ППОО (подводных потенциально опасных объектов), который ведет МЧС России, или базы данных по загрязнению окружающей среды Росгидромета, недостаточна для создания полной картины состояния затопленных в Арктике объектов и выработки достоверного прогноза на будущее.

В заключение хотелось бы отметить, что недропользователям следует обратить большее внимание на ситуацию, связанную с затоплением ЯРОО в Арктике. Если проблема утилизации выведенных из состава ВМФ атомных подводных лодок и реабилитации береговых баз флота благодаря международной кооперации к настоящему времени уже практически решена или решается, то проблема РАО, затопленных в арктических морях, остается весьма актуальной.

*А.Ю. Казеннов, О.Е. Кикнадзе, А.В. Королев
(НИЦ «Курчатовский институт»)
Фото предоставлено авторами*