

$$M_{jia} \{l_i(j) \zeta[a_{ki}(j)] + [1 - l_i(j)] z[a_{N-1,i}(j)]\} = \\ = M_{jia} \{z[a_{N-1,i}(j)]\},$$

что есть условное математическое ожидание i, j члена суммы J_0 .

Предложение доказано.

Предложение 2 можно интерпретировать следующим образом. После определения состояния цепи $a_{ki}(j)$ по некоторому правилу $l_i(j)$ принимается решение или добавить в сумму оценки новый член ζ , или отложить пополнение суммы до появления состояния $a_{N-1,i}(j)$. В любом случае новый член в сумму добавляется после определения $a_{N-1,i}(j)$, т.е. при отсутствии обрыва цепи между этими состояниями.

Предложение 2 дает возможность избавиться от бесконечности дисперсии. Реальная форма детектора имеет ненулевой объем, так детектор изображается скорее множеством $R_{1\varepsilon}$ для некоторого фиксированного ε , а не линией R_1 .

При возникновении события в множестве A_1 проверяется возможность слишком большого вклада, что и ведет к бесконечности второго момента. Эту проверку можно делать приближенно. В случае близкого положения точки оценка y_2 не используется, а вместо этого в следующем состоянии из A_2 выполняется оценка с помощью одного луча, т.е. оценка y . В случае бесконечно тонкого детектора это не уничтожит бесконечности второго момента за счет отложенных до A_2 членов сумм. Однако для отложенных членов можно использовать физически более корректную оценку для объемного функционала по $R_{1\varepsilon}$. Оценка близости должна быть устроена так, что для событий в точках из $R_{1\varepsilon}$

всегда применяется отложенная до A_2 оценка. Точно также осуществляется переход к оценке

по множеству $R_{1\varepsilon}$ в случае, когда детектор лежит почти в касательной плоскости конуса.

Заключение. Предложенная схема регистрации дает возможность эффективнее рассчитывать отклик датчиков ВРК энергетических реакторов, так как эти детекторы представляют собой тонкие прямые цилиндры. Она также может быть применена к проволочкам, используемым как дозиметрические образцы. Важным свойством предложенных алгоритмов является возможность использовать программы физического модуля без изменений.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 06-07-89251-а, 07-07-12072-офи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Спанье Дж., Гелбард Э. Метод Монте-Карло и задачи переноса нейтронов. М.: Атомиздат, 1972. 270 с.
2. MCNPTM — Version 4B. Ed. J. Briesmeister. LA-1265-M, 1997.
3. Gomin E.A., Maiorov L.V. The MCU Monte Carlo code for 3D depletion calculation (invited). — In: Proc. of Intern. Conf. on Mathem. and Comput., Reac. Phys., and Envir. Analyses in Nucl. Applications. Madrid, Spain, 27—30 September 1999, v. 2, p. 997—1006.
4. Золотухин В.П., Майоров Л.В. Оценка параметров критичности реакторов методом Монте-Карло. М.: Энергоатомиздат, 1984.
5. Майоров Л.В. Оценки смещения результатов при расчете реакторов и хранилищ ядерного топлива методом Монте-Карло. — Атомная энергия, 2005, т. 99, вып. 4, с. 243—256.
6. Белл Д., Глестон С. Теория ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1974. 495 с.
7. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, 1973. 312 с.
8. Феллер В. Введение в теорию вероятностей. Т. 2. М.: Мир, 1967.
9. Шварц Л. Анализ. Т. 1. М.: Мир, 1972.

Поступила в Редакцию 25.05.07

УДК 621.039.76+614.876

РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РЕАБИЛИТАЦИИ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ

Саркисов А.А., Высоцкий В.Л. (ИБРАЭ), Сивинцев Ю.В. (РНЦ «Курчатовский ин-т»),
Никитин В.С. (НИИПБ «Онега»)

Арктические льды сокращаются. В течение прошлого столетия зона зимнего простирания полярного льда Скандинавских морей уменьшилась примерно на 25%. В 2005 г. Берингово море доступным для судоходства. В связи с этим рассматриваются варианты развития судоходных

зимой было почти полностью незамерзающим, что беспрецедентно. Если это продолжится, Северный Ледовитый океан в ближайшее десятилетие может оказаться круглогодично путей в Арктике, а также вдоль российского морского побережья, которое свободно от пи-

ратства и является кратчайшим между Европой и Юго-Восточной Азией. Открывается перспектива для перевозок грузов с западного побережья Канады, США в Европу и обратно. Поэтому значимость незамерзающей Арктики огромна и неоспорима.

Для нашей страны это открывает большие возможности. С одной стороны, оживление северного судоходства поможет восстановить ослабленную экономику отдаленных регионов, с другой, наладить взаимовыгодные двусторонние отношения между Россией и Западом, Западом и Юго-Восточной Азией. Россия играет особую роль в сохранении арктических экосистем. В российском секторе находится около трети всей площади Арктики — одного из крупнейших биосферного резерва и экологического фильтра. Для приатлантической части характерны разнообразие и обилие организмов, в летний период отмечаются большие скопления североатлантических рыб (сельдь, треска, пикша, морской окунь, сайда и др.). В Северном Ледовитом океане обитают несколько видов китов, главным образом, полосатики и гренландский кит. Холодные моря Арктики, богатые рыбой и зверем, являются обширным источником продовольственных ресурсов, огромные богатства скрыты в недрах ее дна [1].

Природные богатства требуют бережного отношения к региону. Однако происходившие в прошлом столетии события, связанные с гонкой ядерных вооружений, уже нанесли урон Арктике — ее отдельные районы оказались радиоактивно загрязненными, на дне появились опасные твердые радиоактивные отходы, включая затонувшие/затопленные атомные подводные лодки и реакторные отсеки с отработавшим ядерным топливом. Все это может негативно сказаться на дальнейшем развитии региона, недопустимо в современных условиях и не должно повториться вновь. В связи с отмеченными обстоятельствами в последнее время наблюдается возрождение интереса к реабилитации морей, включая подъем затонувших и затопленных ядерных и радиационно опасных объектов. Цель настоящей статьи — ранжировать такие объекты с учетом радиационных факторов, оценить радиоэкологические и технико-экономические проблемы, связанные с их возможным подъемом.

Источники радиоактивного загрязнения Арктики. В 1960—1970 гг. практика затопления радиоактивных отходов в Мировом океане была

общепринятой для стран, использующих атомную энергию. Первыми такую операцию провели США в 1946 г. в северо-восточной части Тихого океана, затопив низкоактивные отходы в 80 км от побережья Калифорнии. Убеждение в безопасности этих мероприятий было настолько большим, что не были надежно зафиксированы данные ни об активности отходов, ни об их радионуклидном составе. Вскоре к такой практике прибегли и другие государства: Великобритания, затопившая низкоактивные отходы в Северной Атлантике с 1949 г., Новая Зеландия и Япония, осуществлявшие такую деятельность вблизи своих берегов в Тихом океане с 1954—1955 гг., затем с 1960 г. Бельгия, избравшая для этой цели пролив Ла-Манш рядом с побережьем Франции, и многие другие страны. В 1959 г. США также впервые затопили в Атлантическом океане корпус демонтированного ядерного реактора атомной подводной лодки «Сивулф». Всего в 1946—1982 гг. (преимущественно в период действия Лондонской конвенции) радиоактивные отходы затопляли 14 стран в 47 районах Атлантического и Тихого океанов.

По обобщенным данным первой инвентаризации, выполненной МАГАТЭ в 1991 г., за 36 лет радиоактивность затопленных в морях Мирового океана отходов составила 46 ПБк (без учета вклада СССР) [2]. Большая часть (98,75%) приходится на северо-западную Атлантику — 45,3 ПБк (отходы Великобритании 77,5%). Из оставшихся 1,25% в Тихом океане доминируют отходы США (97,1%). В этом регионе, кроме Новой Зеландии и Японии, затопляла отходы Южная Корея вблизи своего побережья в Японском море. В 1983 г. страны-участницы Лондонской конвенции, в основном, под давлением «зеленого» движения приняли решение о моратории — добровольной приостановке удаления отходов, в 1993 г. обязались не затоплять радиоактивные отходы в море.

В 1959—1993 гг. в Арктике (Баренцево и Карское моря) слив жидких и затопление твердых радиоактивных отходов осуществлял Советский Союз, позднее Российская Федерация. В моря удаляли только отходы, образующиеся в процессе эксплуатации атомных подводных лодок и атомных ледоколов, при этом в специально выбранные районы вне интенсивного судоходства и рыболовного промысла, твердые отходы — вблизи восточного побережья архи-

пелага Новая Земля. Наибольшая активность отходов, затопленных в Карском море, приходилась на 1967 г. — около 26 ПБк, однако к настоящему времени в результате радиоактивного распада она уменьшилась и не превышает 4 ПБк (рис. 1) [3, 4].

Мониторинг содержания техногенных радионуклидов в окружающей среде, проводящийся в течение многих десятилетий, позволил выделить источники радиоактивного загрязнения Арктики:

глобальные выпадения атмосферных ядерных испытаний;

атмосферные выпадения вследствие аварии 1986 г. на Чернобыльской АЭС;

вынос радионуклидов водами рек, впадающих в арктические моря;

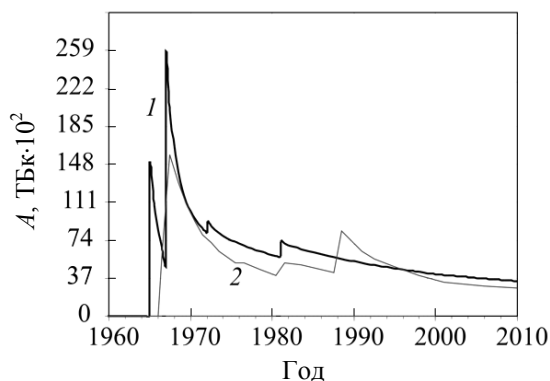
перенос морскими водами жидких радиоактивных отходов, сбрасываемых западно-европейскими заводами по переработке отработавшего ядерного топлива;

сбросы радиоактивных отходов атомного флота, проведенные СССР/Россией на акваториях Карского и Баренцева морей;

последствия аварий при эксплуатации кораблей с ЯЭУ.

В настоящее время в Арктике основными источниками загрязнения остаются жидкие отходы западно-европейских заводов по переработке отработавшего топлива и глобальные выпадения, а также захоронения твердых отходов атомного флота СССР/России и затонувшие в северо-западной части Арктики подводные лодки. Последние являются возможными источниками, опасность которых возрастает по мере деградации защитных барьеров.

Сброс радиоактивных отходов заводов



Р и с. 1. Изменение активности радиоактивных отходов, затопленных в Арктике, по данным РНЦ «Курчатовский институт» (1) с учетом короткоживущих радионуклидов и МНТЦ (2) с учетом только долгоживущих радионуклидов

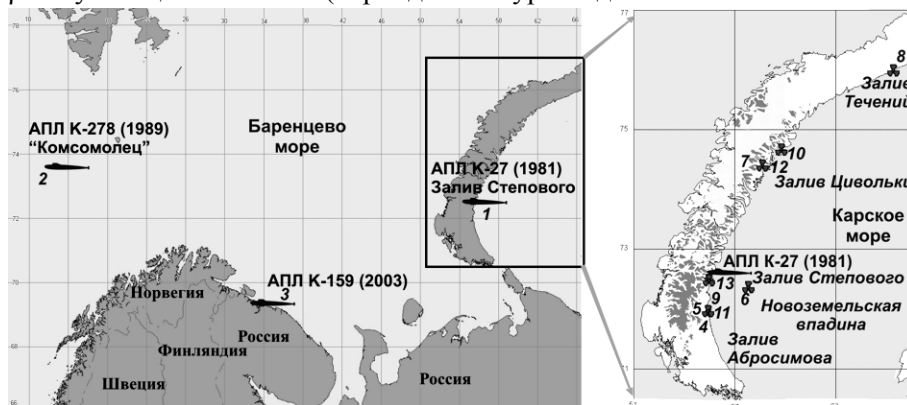
Великобритании и Франции. Поступление жидких радиоактивных отходов западно-европейских радиохимических заводов оказало заметное влияние на содержание техногенных радионуклидов в южных частях Баренцева и Карского морей. Со времени ввода в эксплуатацию (1957 г.) завод в Селлафилде (Великобритания) сбросил в Ирландское море ¹³⁷Cs активностью более 37 ПБк и ⁹⁰Sr — 5,5 ПБк. В результате водообмена к 1985 г. в Баренцево море поступили ¹³⁷Cs активностью ~7,4 ПБк (по данным 1995 г. 9,1 ПБк) и ⁹⁰Sr — 1,7 ПБк, из них примерно по 2% проникло в Карское море. Сброс отходов был наибольшим в 1974—1978 гг. Поскольку время переноса загрязненных водных масс из Ирландского в Баренцево и Карское моря составляет 5—6 лет, максимум содержания радионуклидов был отмечен в начале 1980 гг. Концентрация ¹³⁷Cs в южной части Баренцева моря достигла 30 Бк/м³, что в 5—6 раз превышало фон, обусловленный глобальными выпадениями. Однако за последние 15 лет подобные сбросы в Ирландское море уменьшились в 100 раз. Активность ¹³⁷Cs, поступившего в 1995—1999 гг., составила 46 ТБк, ⁹⁰Sr — 130 ТБк, что близко к суммарной активности жидких радиоактивных отходов, сброшенных СССР/Россией в арктические моря [4].

Сбросы жидких отходов с заводов в Селлафилде в Ирландское море и на мысе Аг (Франция) в пролив Ла-Манш продолжают по настоящее время, хотя и с меньшей интенсивностью. Лондонская конвенция, ратифицированная Великобританией и Францией, предусматривает полное прекращение сброса химических и радиоактивных веществ в моря, омывающие Европу, к 2018 г. Доза облучения населения и гидробионтов, обусловленная этими источниками, невелика, не превышает сотых долей дозы за счет естественного радиационного фона и в сотни раз ниже допустимой концентрации для радионуклидов в питьевой воде. Количественные оценки радиоэкологических последствий удаления радиоактивных отходов в северо-западную Атлантику, выполненные международной группой экспертов, привели к заключению о пренебрежимо малом дополнительном радиационном воздействии этих сливов на население и морскую биоту [5].

Радиоактивные отходы российского атомного флота. В настоящее время на дне мо-

рей западной Арктики находятся три подводные лодки, пять реакторных отсеков с корабельными и судовыми ЯЭУ, 19 судов, в том числе баржа с реактором, выгруженным из подводной лодки, 735 радиоактивных конструкций и блоков, затопленных без герметичной упаковки, и более 17 тыс. контейнеров с твердыми радиоактивными отходами [4]. Наибольшую радиационную опасность представляют затонувшие/затопленные объекты, которые содержат делящиеся вещества, в частности, отработавшее топливо массой, превышающей критическую, что теоретически не исключает при определенных условиях возможность возникновения самопроизвольной цепной реакции, инициирующей частичное поступление техногенных радионуклидов в окружающую среду. В настоящее время на дне Арктики находятся семь ядерно опасных объектов (рис. 2).

В ядерном топливе и внутренних конструкциях реактора источниками ионизации являются β -, γ -излучающие продукты деления урана, активационные радионуклиды и α -излучающие трансурановые элементы (актиноиды). В реакторах лодок и затопленных объектов, для которых характерно большое время выдержки после прекращения эксплуатации, доминируют долгоживущие радионуклиды. К ним относятся β -излучающие ^{90}Sr (период полураспада



Р и с. 2. Основные ядерные и радиационно опасные объекты, находящиеся на дне моря: 1 — лодка К-27; 2 — лодка «Комсомолец»; 3 — лодка К-159; 4 — реакторный отсек лодки К-19; 5 — реакторный отсек лодки К-11; 6 — реактор лодки К-140; 7 — экранная сборка ледокола «Ленин»; 8 — два реактора лодки К-3; 9 — реакторный отсек лодки К-5; 10 — реакторный отсек ледокола «Ленин»; 11 — корпус реактора; 12 — 237 контейнеров с отходами; 13 — четыре крышки реакторов

29,1 года), ^{241}Pu (14 400 лет), β -, γ -излучающий ^{137}Cs (30 лет), α -излучающие ^{239}Pu (24 100 лет), ^{240}Pu (6540 лет), ^{241}Am (432 года) и др. По суммарной активности этих радионуклидов среди объектов на дне арктических морей доминируют затонувшие подводные лодки К-159 и «Комсо-

Т а б л и ц а 1. Радиоактивность затонувших/затопленных объектов с отработавшим ядерным топливом по состоянию на 2000 г.

Объект	Завершение эксплуатации, год	Радиоактивность, ТБк	Вклад, %
Атомная подводная лодка:			
К-159	1989	4000	35
«Комсомолец»	1989	3550	32
заказа № 601 с двумя реакторами	1968	831	7
Реакторный отсек атомной подводной лодки:			
заказа № 901 с двумя реакторами	1961	759	6
заказа № 285 с двумя реакторами (топливо в реакторе левого борта)	1964	628	5
Реактор левого борта лодки заказа № 421	1968	251	2
Экранная сборка второго реактора ЯЭУ ОК-150 ледокола «Ленин»	1966	1579	13
Всего	—	11 598	100

молец», затем следует экранная сборка ледокола «Ленин» (табл. 1, по состоянию на 2007 г. активность меньше указанной в ней примерно на 10%). Оценки радиоэкологических последствий удаления радиоактивных отходов российского

атомного флота в арктические моря, выполненные экспертами МАГАТЭ [6] и Европейского союза [7], привели к заключению о пренебрежимо малом дополнительном их воздействии на население и морскую биоту.

Атомная подводная лодка «Комсомолец» затонула в апреле 1989 г. в Норвежском море в 180 км юго-западнее о. Медвежьего на глубине 1685 м. В ее четвертом отсеке располагается ЯЭУ с водяным реактором мощностью 190 МВт, в первом —

две торпеды, оснащенные ядерными боеголовками. Перед затоплением реактор был переведен в режим устойчивого расхолаживания, что обеспечило ядерную безопасность в момент гибели и при последующем нахождении на грунте. По

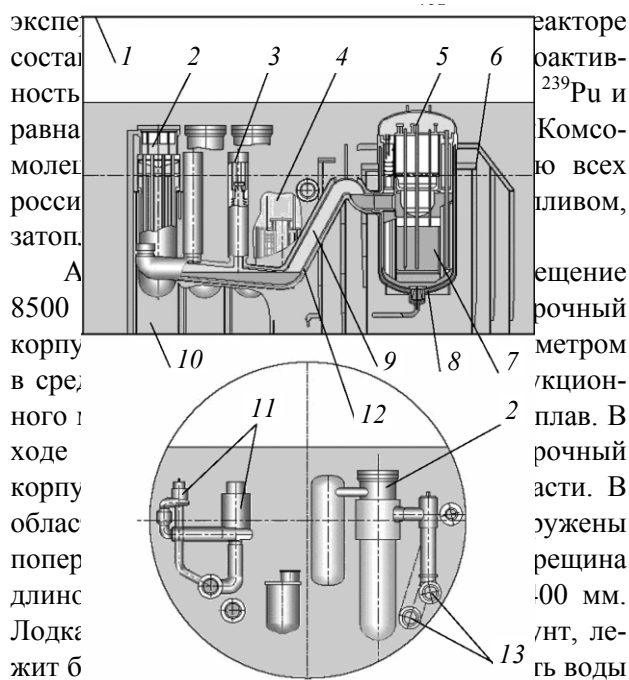


Рис. 3. Консервация реакторного отсека атомной лодки К-27: 1 — прочный корпус; 2 — парогенератор; 3 — клапан и сильфонный компенсатор; 4 — бокс бака насосов; 5 — реактор; 6 — бак свинцово-водной защиты; 7 — затвердевший свинцово-висмутый сплав; 8 — фурфурол с азотно-кислым кадмием; 9 — битум с ортоборной кислотой; 10 — битум; 11 — насосы; 12 — теплоизоляция; 13 — трубопроводы

6,8 м, наружного 7,9 м. Лодка выведена из состава Северного флота в 1989 г., длительное время находилась в отстое в Гремике (Мурманская обл.) совместно с другими. В 2003 г. в плановом порядке их стали переводить на судоремонтный завод «Нерпа» для передачи на утилизацию. К концу августа этого же года несколько лодок были успешно доставлены судами флота на завод. 30 августа 2003 г. на маршруте перехода К-159, которую вел спасательный буксир, попала в шторм. Перед выходом на ней были проведены необходимые технические мероприятия по непотопляемости, в том числе дополнительно заведены две пары судоподъемных понтонов. Во время шторма понтоны оборвались, и лодка затонула в Баренцевом море к северо-западу от острова Кильдин перед входом в Кольский залив на глубине 246 м. В районе затопления уклон дна составляет около 2°. С юга и юго-востока дно поднято, видимость 1—3 м, придонное течение 0,8—1,2 узла, грунт — глинистый ил.

На 1960-е годы пришлось масштабная замена реакторных отсеков и реакторов на нескольких лодках и атомном ледоколе «Ленин», что объясняется произошедшими авариями и ре-

монтными реакторах и торные отс ния научно сержации и радиацион сение мини обосновани нению эко альтернати тавшим тог зи восточнс

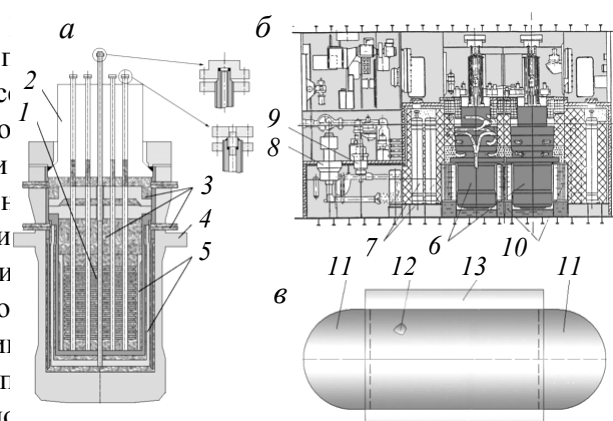


Рис. 4. Расположение оборудования в реакторном отсеке подводной лодки заказа № 901 с отработавшим топливом: 1 — отработавшее топливо; 2 — крышка; 3 — фурфурол; 4 — корпус; 5 — экранная сборка; 6 — реакторы; 7 — компенсаторы объема; 8 — главный насос; 9 — вспомогательный насос; 10 — цистерна биологической защиты; 11 — были плавучести; 12 — прочный корпус реакторного отсека; 13 — легкий корпус

Всего 11 — были плавучести; 12 — прочный корпус реакторного отсека; 13 — легкий корпус оснащенная двумя жидкометаллическими реакторами, два реакторных отсека, один корабельный реактор и специальный контейнер с экранной сборкой, содержащей часть отработавшего топлива первой ЯЭУ атомного ледокола «Ленин».

Перед затоплением подводной лодки К-27 (заказа № 601) ЯЭУ и реакторный отсек были подвергнуты особой консервации. Свободные объемы реактора и связанного с ним оборудования, в частности, конструкцию выемной части, содержащей отработавшее топливо, а также зазоры в чехлах стержней системы управления и защиты заполнили твердеющим радиационно стойким консервантом на основе фурфурола. По

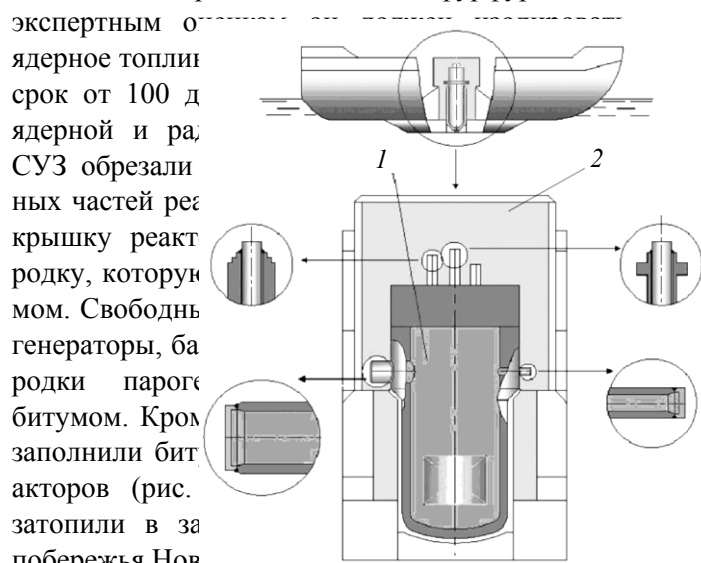
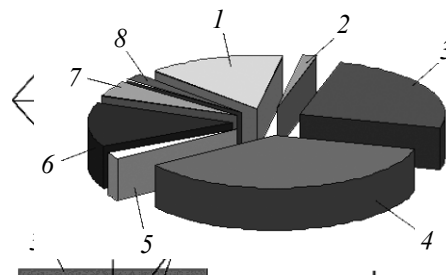


Рис. 5. Размещение и консервация реактора лодки заказа № 421 на барже фурфуролом (1) и бетоном (2)

реакторах обоих бортов (рис. 4, а) подвергли консервации, которая включала герметизацию всех его выходных отверстий, установку дополнительного кожуха и заполнение свободных объемов консервантом на основе фурфурола (рис. 4, б). Для обеспечения плавучести реакторного отсека при транспортировке к месту затопления к нему приварили герметичные носовой и кормовой були (рис. 4, в). В районе затопления их заполнили морской водой, и вся конструкция опустилась на дно залива Абрисимова. В 1966 г. из аварийного реактора правого борта лодки заказа № 285 выгрузили топливо. Реактор левого борта с отработавшим топливом подвергли аналогичной консервации и затопили там же. При подготовке к затоплению аварийного реактора лодки заказа № 421 все патрубки также заглушили, свободные внутренние объемы заполнили консервантом на основе фурфурола. Реактор разместили на барже и вместе с нею затопили в Новоземельской впадине. Перед затоплением верхнюю и среднюю части реактора дополнительно окружили защитным слоем бетона (рис. 5).

Экранную сборку атомного ледокола, содержащую 125 ТВС второго реактора установки ОК-150, залили консервантом на основе фурфурола и заварили в специальном контейнере из коррозионно-стойкой стали. После длительного хранения на берегу его погрузили в кессон, вваренный в центральную часть цилиндрического понтона. Для поддержания допустимой радиационной обстановки вблизи понтона свободный объем в его центральной части заполнили бетоном (рис. 6). Понтон с контейнером, содержащим экранную сборку ледокола, отбуксировали и затопили в заливе Цивольки у восточного побережья Новой Земли [8]. В 2005 г. его обнаружили и обследовали в ходе специальной экспедиции МЧС [9].

При затоплении единичных реакторов без отработавшего топлива (лодки заказа № 538) корпус каждого закрыли стальной крышкой, поместили в лихтер Л-8711 и затопили вместе с ним в заливе Течений архипелага Новая Земля. Перед затоплением отсеков лодок заказов № 254 и 260 отработавшее топливо выгрузили, реакторы и реакторные отсеки законсервировали, как и лодки заказа № 901, и затопили в заливе Абрисимова. Реакторный отсек атомного ледокола с установкой ОК-150 и тремя реакторами без от-



Р и с. 7. Вклад реальных и возможных источников загрязнения морей Арктического региона России: 1 — сброс жидких отходов заводов Селлафилда (15,4%); 2 — слив жидких отходов (1,6%); 3 — реакторные отсеки и реакторы без ядерного топлива на момент затопления (24,7%); 4 — объекты с ядерным топливом на момент затопления (36,2%); 5 — сбросы твердых отходов на момент затопления (2,1%); 6 — глобальные выпадения (13,5%); 7 — речной сток (4,7%); 8 — выпадения вследствие аварии на Чернобыльской АЭС (1,8%)

тора атомного ледокола: 1 — понтон из углеродистой стали; 2, 3 — кессон и крышка кессона из коррозионно-стойкой стали; 4 — консервант на основе фурфурола и экранная сборка

работавшего топлива с закрытыми крышками вырезали методом взрывного подрыва из корпуса судна и затопили в заливе Цивольки [8]. В 2006 г. его обнаружили и обследовали в ходе специальной экспедиции МЧС [9].

Суммарная активность объектов без отработавшего топлива, затопленных в Арктике, существенно ниже, чем его содержащих. К 2000 г. она не превышала 0,8 ПБк. Для наглядности соотношение между реальными и возможными источниками радиоактивного загрязнения морей Арктического региона показано на рис. 7.

Радиоэкологическая обстановка в морях западной Арктики. Радиационная обстановка в обследованных районах признана благополучной. В течение 1960—1990 гг. и до настоящего времени радиоактивность воды в контролируемых районах была существенно ниже действующих в нашей стране нормативов и международных рекомендаций. В последнее десятилетие в открытых районах Карского и Баренцева морей наблюдается наиболее низкая за весь период концентрация техногенных радионуклидов в воде (табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Содержание ^{137}Cs в поверхностных водах морей и океанов

Море	Удельная активность, Бк/м ³
Карское (1992—1994 гг.)	3—9

Таблица 3. Концентрация ^{137}Cs , ^{90}Sr в морской воде, ^{137}Cs , ^{60}Co в донных отложениях вблизи мест захоронения твердых радиоактивных отходов и открытой части Карского моря

Среда	Морская вода, Бк/м ³				Донные отложения (слой 0—3 см), Бк/кг сухой массы	
	поверхность		придонная			
	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co
Залив:						
Абросимова (1994 г.)	4—7	2—4	4—9	2—4	9—8445	<1—66
Цивольки (1993 г.)	4—6	4—6	6—14	3—4	4—30	<1—4
Степового (1993—1994 гг.)	3—9	2—7	6—32	3—26	8—109 000	<1—3150
Новоземельская впадина (1993 г.)	4—7	2—3	7—14	2—3	7—30	<1
Карское море (фон, 1992 г.)	3—8	3—11	8—20	4—6	2—53	<1

Баренцево (1992—2000 гг.)	2—5
Черное (1991 г.)	22—37
Балтийское, центральная часть (1991 г.)	120
Ирландское, западная часть (1990—1997 гг.)	40—92
Средиземное (1990—1993 гг.)	4—6
Японское (1994—1997 гг.)	3—5
Тихий океан, побережье Гватемалы (1995—1997 гг.)	2—3

	Абросимова	Степового
	1992—1994 гг.	
^{137}Cs	200—8400	260—5450
^{60}Co	1—50	31—3150
	2002—2004 гг.	
^{137}Cs	5—44	20—1800
^{60}Co	1—5	1—26

В ходе исследований, выполненных в районах захоронения твердых отходов, в том числе вблизи затопленной лодки К-27 [10], установлено, что локальное повышенное содержание техногенных радионуклидов наблюдается преимущественно в донных отложениях заливов Абросимова и Степового, незначительно в заливе Цивольки и вблизи затопленных контейнеров и барж с твердыми отходами. На расстоянии нескольких десятков метров от них концентрация радионуклидов в донных отложениях резко понижается и далее становится сопоставимой с фоновой. В морской воде такой контраст не отмечается (табл. 3). Выявлено постепенное снижение концентрации техногенных радионуклидов в донных отложениях также в заливах Абросимова и Степового (табл. 4). По результатам многочисленных морских экспедиций концентрация техногенных радионуклидов в районах затонувших подводных лодок не отличается от фоновой, обусловленной глобальными выпадениями [11, 12].

Таблица 4. Изменение удельной активности техногенных радионуклидов в донных отложениях вблизи мест захоронения твердых радиоактивных отходов в заливах Степового и Абросимова, Бк/кг сухой массы

Радионуклид	Залив
-------------	-------

Дозу техногенного облучения морской арктической биоты (фито-, зоопланктон, ракообразные, моллюски, макрофиты, рыба и водоплавающие птицы) для этих условий оценивали методами, изложенными в рекомендациях МАГАТЭ. Установлено, что внутреннее облучение обусловлено, в основном, ^{90}Sr и ^{137}Cs и не превышает 40 нЗв/сут, что в 10 раз ниже природного внутреннего облучения. Внешнее облучение от морской воды составляет 0,3—0,9 нГр/сут, донных отложений — 100—600 нГр/сут, что в 10—100 раз меньше дозы природного радиационного фона. Коллективная доза облучения населения от потребления морепродуктов из Баренцева моря соответствует 3—5 чел-Зв/год, что в тысячи раз меньше дозы для береговых условий проживания. Наибольший вклад в дозу вносит потребление рыбы. По сравнению с Баренцевым морем коллективная доза облучения от потребления морепродуктов из Карского моря в 10 раз меньше. Индивидуальная доза критической группы населения, проживающего на побережье Баренцева и Карского морей, с учетом потребления местных морепродуктов составляет 3—4 мкЗв/год, что в сотни раз ниже современных допустимых дозовых нагрузок для населения как по российским нормам, так и по международным рекомендациям [4].

МАГАТЭ и норвежско-российская группа экспертов на основании результатов многолет-

них исследований и радиоэкологического мониторинга пришли к выводу, что сброшенные радиоактивные отходы СССР/России в настоящее время не представляют реальной опасности и могут некоторое время оставаться на дне моря, но, учитывая опасность особенно объектов с отработавшим топливом, необходим контроль для выявления возможных радиоэкологических изменений в районах их затопления.

Относительная опасность затопленных объектов. Ранжирование объектов по степени радиационной опасности выполнено на основе многофакторного анализа (табл. 5). Расчетная

Т а б л и ц а 5. Ранжирование и показатели относительной опасности основных ядерных объектов атомного флота России, затопленных в арктических морях, на 1 января 2000 г.

Объект (год затопления)	Глубина затопления, м	Активность, ТБк	Выход радионуклидов, Бк/год	Загрязнение грунта, ПДК	Состояние объекта	Опасность, ранг
Объекты с отработавшим топливом (основной источник продуктов деления)						
Реактор левого борта лодки заказа № 421 (1972)	300	251	3,2	< 1	Неудовлетворительное	I
Экранная сборка второго реактора ЯЭУ ОК-150 ледокола «Ленин» (1967)	10—50	1579	< 0,001	< 0,01	Удовлетворительное	II
Реакторный отсек лодки:						
заказа № 901 с двумя реакторами (1965)	20	759	< 0,001	< 0,01	»	II
заказа № 285 с двумя реакторами (топливо в реакторе левого борта, 1966)	20	628	< 0,001	< 0,01	»	II
Подводная лодка:						
«Комсомолец» (1989)	1680	3700	< 0,001	< 0,01	»	III
К-159 (2003)	246	3700	< 0,001	< 0,01	»	III
заказа № 601 с двумя реакторами (1981)	33	831	< 0,001	< 0,01	»	IV
Объекты без отработавшего топлива (основной источник продуктов активации)						
Реакторный отсек:						
ЯЭУ ОК-150 ледокола (1967)	20	60	0,2	< 1	Неудовлетворительное	I
лодки заказа № 254 с двумя реакторами (1965)	20	39,2	< 0,001	< 0,1	Удовлетворительное	II
лодки заказа № 260 с двумя реакторами (1966)	20	30	< 0,001	< 0,1	»	II
Крышки четырех реакторов (1973)	27	0,04	< 0,001	< 0,01	»	III
Крышка одного реактора (1976)	24	0,04	< 0,001	< 0,01	»	III
Лихтер-4 с двумя реакторами лодки заказа № 538 и экранной сборкой (1988)	50	744	0,5	< 1	»	I
Лихтер Л-8711 с корпусом реактора (1980)	20	1,3	< 0,001	< 0,01	»	III
Баржа «Никель» с семью крышками реакторов (1978)	47	< 0,01	< 0,001	< 0,01	»	III
Баржа «Курейка» с 15 крышками реакторов (1985)	180—300	0,01	< 0,001	< 0,01	»	IV
Твердые отходы (второстепенный источник продуктов деления и активации)						
Отходы в контейнерах						
517 (1973)	30—40	6,8	0,1	50	Неудовлетворительное	I
294 (1977)	20	10,4	0,07	15	»	I
518 (1976)	20—30	23,6	0,2	< 1	»	I
1115 (1966)	40—50	10,1	0,1	< 1	»	II
514 (1967)	40—50	7,5	0,08	< 1	»	II
665 (1965)	40—50	8,5	0,1	< 1	»	II
231 (1983)	20—30	38,7	0,2	< 1	Удовлетворительное	II
Неизвестно (1981)	20—30	10,7	0,08	< 1	»	III
Отходы в затопленных судах						
Пароход «Н. Бауман» (1964)	40—50	16,7	0,2	< 1	Удовлетворительное	II
Судно «Могилев» (1987)	300	23,4	1,9	< 0,01	»	II
Лихтер «Сояна» (1972)	300	3,7	0,3	< 0,01	»	III
Баржа «Курейка» (1985)	300	25,6	0,3	< 0,01	»	III
Надводный корабль «Леопард» (1985)	300	16,7	0,2	< 0,01	»	III
Пароход «Хосе Диас» (1967)	300	7,2	0,004	< 0,01	»	IV

интенсивность выхода радионуклидов в морскую воду взята из материалов МНТЦ [13]. По результатам натурных измерений они признаны крайне консервативными [14]. Косвенно этот вывод следует и из сопоставления концентрации техногенных радионуклидов в донных отложениях бухт Новой Земли в последние годы [15]. В качестве предельно допустимой концентрации радионуклидов использовали научно обоснованные в 1960—1970 гг. нормативы ВМФ [16—18].

Из анализа следует, что затопленные объекты как источники радиоактивного загрязнения морской среды можно разделить на три группы, первая из которых по степени исходящих угроз в среднем примерно в 10 раз превосходит вторую и в 100 раз третью:

объекты с отработавшим топливом, из них наибольшую угрозу представляет реактор левого борта подводной лодки заказа № 421;

твердые отходы. На первом месте находятся несколько разнородных захоронений контейнеров с твердыми отходами, на втором — затопленные суда;

объекты без отработавшего топлива — лихтер-4 с двумя реакторами подводной лодки заказа № 538 и реакторный отсек атомного ледокола с тремя ЯЭУ ОК-150.

Реабилитация, связанная с извлечением нескольких тысяч разрушающихся металлических контейнеров с твердыми отходами, которые в настоящее время в наибольшей степени, но в допустимых пределах загрязняют окружающую среду, — крайне дорогостоящая и трудоемкая процедура. Поэтому в первую очередь следует обратить внимание на объекты с отработавшим топливом, защитные барьеры которых еще находятся в удовлетворительном состоянии, а также лодки «Комсомолец» и К-159. Эти затопленные/затонувшие объекты являются наиболее опасными источниками радиоактивного загрязнения морской среды и содержат большое количество делящихся материалов, бесконтрольное хранение которых в современных условиях не рекомендуется даже под водой.

Извлечение судов с твердыми отходами не менее радиоэкологически опасное мероприятие, хотя более обнадеживающее, чем подъем контейнеров. Наименее перспективным является подъем объектов без отработавшего топлива,

кроме лихтера-4 и крупногабаритного реакторного отсека ледокола с первой ЯЭУ ОК-150.

Массогабаритные характеристики. Они свидетельствуют, что создание судоподъемного комплекса, ориентированного по своим техническим возможностям на подъем лодки «Комсомолец», в последующем позволит извлечь все крупногабаритные ядерные и радиационно опасные объекты (табл. 6). Однако для подъема барж, судов и реакторного отсека атомного ледокола, которые по своим формам и габаритам существенно отличаются от лодок и их реакторных отсеков, потребуется его специальная доработка.

Варианты реабилитации морских акваторий. Реабилитация морских акваторий стала актуальной в связи с расширяющимися возможностями международного экономического использования региона. Выбор приемлемого способа в районах захоронений необходимо оценивать, придерживаясь правовой, экологической и технико-экономической основы. Среди объектов наибольшую опасность представляют подводные лодки. Международные соглашения не предусматривают обязательного их подъема, но разрешают любым заинтересованным странам проводить исследования для оценки возможных последствий. До настоящего времени одним из выводов подобных исследований является отсутствие значимого вреда экосистеме региона и хозяйственной деятельности населения в случае даже значительных поступлений радионуклидов в морскую воду, если объекты находятся на достаточно большой глубине («Комсомолец»), что, однако, не однозначно для мелководных районов. Таким образом, из всех рассмотренных источников наибольшую радиационную опасность для морских экосистем и населения в первую очередь представляет лодка К-159.

Анализ российских технологических схем подъема затопленных объектов флота свидетельствует об ограниченности их применения по следующим причинам: подъем возможен только с небольшой глубины, необходимо использование водолазов-глубоководников, неизвестно техническое состояние объектов, находящихся под водой 20—40 лет, подъем и транспортировка должны ограничиваться минимальным временем из-за изменчивости погодных условий. В результате рассмотрения различных вариантов СПМБМ «Малахит» приняло решение разработку технического проекта подъема подводной

Таблица 6. Массогабаритные характеристики основных затонувших или затопленных объектов

Объект	Ширина, м	Высота, м	Длина, м	Масса, т	Примечание
С отработавшим топливом					
Подводная лодка: «Комсомолец»	11	12 (без рубки)	118	8500	Цилиндр
К-159	8	9 (без рубки)	107	4050	»
заказа № 601	8	9 (без рубки)	110	4400	»
Реакторный отсек лодки: заказа № 285	7,5	8,2	12	800—900	»
заказа № 901	7,5	8,2	12	800—900	»
Реактор левого борта лодки заказа № 421	4,5	3,5	12,5	200—300	Понтон
Экранная сборка второго реак- тора ЯЭУ ОК-150 ледокола	4,5	3,5	12,5	200—300	»
Без отработавшего топлива					
Реакторный отсек: лодки заказа № 254 с двумя реакторами;	7,5	8,2	12	800—900	Цилиндр
лодки заказа № 260 с двумя реакторами;	7,5	8,2	12	800—900	»
ледокола с ЯЭУ ОК-150 с тремя реакторами	12,5	14,3	23,5	1000—1200	Параллелепипед
Твердые отходы					
Пароход «Хосе Диас»	11	4,5	76	1900	Масса нетто до 1500 т
Баржа «Никель»	9 (без мачты 13 м)	4,2	58	900	» 700 т
Контейнер	1,5	1,5	2	2—3	» 725 кг
	1,4	1,4	1,8	2—3	» 700 кг
	1	1	1,4	1—2	» 400 кг

лодки К-159 выполнить на основе судоподъемного комплекса голландской фирмы «Маммут», положительно зарекомендовавшего себя при подъеме лодки «Курск» в 2002 г. [19, 20]. Предварительная проработка позволила выбрать в качестве оптимального способ остропки лодки с помощью крупногабаритных клещевых захватов, поскольку он не требует труда водолазов-глубоководников и можно использовать опыт их изготовления и испытания в нашей стране и США. Предполагается, что два морских буксира мощностью 9000 л.с. обеспечат буксировку комплекса с лодкой К-159 к месту назначения. Поскольку до входа в Кольский залив необходимо преодолеть 8 миль, это потребует при скорости буксировки 3 узла около 3 ч. Общая протяженность маршрута, включая путь по Кольскому заливу, составит примерно 27 миль. Докование лодки предусматривается на российском судоремонтном заводе.

Сопоставление с другими вариантами подходов к реабилитации морских акваторий на северо-западе Арктики в местах гибели/затопления российских ядерных и радиационно опас-

ных объектов атомного флота показало, что ориентировочная стоимость реализации любого из них потребует многомиллионных затрат (табл. 7).

Заключение. Нахождение большого числа объектов с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами на дне такого уникального природного региона, как Арктический бассейн, без систематического радиоэкологического мониторинга и комплексной программы дальнейшего обращения с ними является неприемлемым как с экологической, так и с этической точки зрения. Наличие ядерных материалов в почти неконтролируемых условиях на морских акваториях в мелководных районах из-за террористической опасности делает данную проблему еще более актуальной.

Для обоснования основных направлений дальнейшей деятельности необходимы всесторонняя разработка и анализ различных сценариев развития процессов, влияющих на радиоэкологическую обстановку, и рассмотрение возможных вариантов обращения с затонувшими/затопленными объектами, в том числе их

Таблица 7. Оценочная стоимость реализации различных подходов реабилитации морей

Реабилитация	Техническое обеспечение	Затраты, млн руб.			Угроза, опасность	
		Технические	Мониторинг (100 лет)	Итого	реальная до 100 лет	психологическая, этическая
Сохранение на месте: без дополнительной защиты	—	0	До 3500	До 3500	Нет	Есть
с дополнительной защитой	Защитные барьеры	До 3500	До 3500	До 7000	Нет	Есть
Подъем: утилизация	Подъем, доставка на завод	До 14 000	0	До 14 000	Нет	Нет
перезахоронение в море	Подъем, доставка на завод	До 14 000				
	Подготовка к захоронению	До 3500				
	Захоронение в глубоководном районе	До 3500	До 3500	До 24 500	Нет	Есть

подъем с учетом радиоэкологических, экономических, социально-политических, этических и других факторов.

Дальнейшие исследования ядерной и радиационной опасности объектов, находящихся на дне морей западной Арктики, должны быть направлены на разработку сценариев развития процессов, влияющих на изменение радиоэкологической обстановки, проведение морских экспедиций и обоснование возможных способов подъема затонувших/затопленных объектов. Первым шагом в решении данной проблемы должно стать комплексное обследование фактического технического и радиоэкологического состояния наиболее опасных объектов в ходе проведения совместных международных научно-исследовательских экспедиций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Арктика** в XX веке. Материалы межд. конф. СПб, 2005.
2. **Inventory of Radioactive Material Entering the Marine Environment: Sea Disposal of Low Level Radioactive Waste.** IAEA-TECDOC-588, 1991.
3. **Inventory of Radioactive Waste Disposals at Seas.** IAEA-TECDOC-1105, 1999.
4. **Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П. и др.** Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию. Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря. «Белая книга-2000». М.: ИздАТ, 2005. 624 с.
5. **Coordinated Research and Environmental Surveillance Programme Related to Sea Disposal of Radioactive Waste.** CRESP Final Rep. 1991—1995. OECD, Paris, 1996.
6. **Radiological Conditions of the Western Kara Sea: Assessment of the Radiological Impact of Dumping of Radioactive Waste in the Arctic Seas.** Rep. of the Intern. Arctic Seas Assessment Project (IASAP). Vienna: IAEA, 1998.
7. **Ali S., Beaumont H., Dutton L. e.a.** Evolution of the Radiological Situation Around the Nuclear Reactors with Spent Fuel which Have Been Scuttled in the Kara Sea. Rep. EUR-17634 EN, 1997.
8. **Факты и проблемы, связанные с захоронением радиоактивных отходов в морях, омывающих территорию Российской Федерации.** Материалы доклада правительственной комиссии. Администрация Президента РФ. М., 1993. 108 с.
9. **Казеннов А.Ю., Кикнадзе О.Е., Кобылянский В.В.** Поиск и идентификация экранной сборки и реакторного отсека атомного ледокола «Ленин». — Подвод. техн. и мир океана, 2006, № 5—6, с. 38—43.
10. **Владимиров М.В., Казеннов А.Ю., Кикнадзе О.Е. и др.** Обследование затоплений радиоактивных отходов в Карском море. — Там же, с. 30—37.
11. **Гладков Г.А., Сивинцев Ю.В.** Радиационная обстановка в районе затонувшей атомной подводной лодки «Комсомолец». — Атомная энергия, 1994, т. 77, вып. 5, с. 379—386.
12. **Саркисов А.А., Высоцкий В.Л., Денскевич А.В. и др.** Результаты начального этапа радиационного мониторинга района затопления АПЛ К-159. — Известия РАН. Энергетика, 2004, № 6, с. 102—108.
13. **Лавковский С.А., Кобзев В.Н., Лысцов В.Н. и др.** Разработка научно-методологических основ диагностирования и прогнозирования состояния захоронений ядерных отходов на дне Баренцева, Карского и Японского морей. Определение путей предотвращения опасных экологических последствий. Проект 101 МНТЦ. СКБ «Лазурит». Нижний Новгород, 1998.
14. **Кикнадзе О.Е.** Модели переноса примесей в морской воде. — Подводн. техн. и мир океана, 2006, № 1, с. 14—24.
15. **Stepanets O., Borisov A., Ligaev A. e.a.** Radioecological investigations in shallow days of the Novaya Zemlya archipelago in 2002—2004. — In: Proc. 6 Intern. Conf. of

- Environmetal Radioactivity in the Arctic and Antarctic. Nice, France, 2—6 October 2005, p. 118—121.
16. **Гусев Д.И.** Гигиенические критерии к оценке загрязнения радионуклидами прибрежных морских вод. — В кн.: Proc. of Intern. Conf. Impacts of Nuclear Releases into the Aquatic Environment. Vienna: IAEA, 1975, p. 363—373.
17. **Временные санитарные требования к сбросу в море с объектов ВМФ жидких отходов, содержащих долгоживущие радиоактивные вещества (ВСТ-60).** М., 1960.
18. **Временные санитарные требования к захоронению в море радиоактивных отходов (ВСТЗ-66).** М., 1966.
19. **Технический** проект подъема, транспортировки и постановки в док ПЛА «Б-159». Пояснительная записка. СПб, ФГУП «Малахит», 2004. 78 с.
20. **Черняев А.М., Гапонов И.А., Казеннов А.Ю. и др.** Радиационное обследование атомной подводной лодки «Курск». — Атомная энергия, 2002, т. 93, вып. 3, с. 167—174.

Поступила в Редакцию 06.07.07

УДК 574:539.1.04+621.039.7

ДЕЗАКТИВАЦИЯ РАДИОАКТИВНО ЗАГРЯЗНЕННОГО ГРУНТА В РНЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

*Волков В.Г., Зверков Ю.А., Иванов О.П., Колтышев С.М., Семенов С.Г., Степанов В.Е., Шиша А.Д.
(РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

Дезактивация радиоактивно загрязненного грунта является одной из наиболее актуальных проблем проекта «Реабилитация», реализуемого в РНЦ «Курчатовский институт» с начала 2002 г. по настоящее время в целях ликвидации старых хранилищ радиоактивных отходов и очистки территории их размещения [1, 2]. Сложность решения этой проблемы обусловлена большим объемом загрязненного грунта, представляющего собой низкоактивные отходы: по оценкам суммарный объем загрязненного грунта, который необходимо было дезактивировать, составлял $\sim 10\,500\text{ м}^3$ (около 16 500 т) удельной активностью 10—200 кБк/кг. Эскавация и удаление такого объема грунта требовали значительных материальных и финансовых затрат, поэтому было принято решение его очищать непосредственно на площадке старых хранилищ. С этой целью была сооружена опытно-промышленная установка дезактивации, разработанная совместно с ВНИИНМ им. А.А. Бочвара и ВНИИХТ. На этой установке реализована водно-гравитационная и механическая сепарация загрязненного грунта, которая позволяет его разделить на фракции по крупности, выделить и удалить мелкодисперсную фракцию, характеризующуюся наибольшей удельной активностью. Выделенную мелкодисперсную фракцию как вторичные отходы упаковывали в сертифицированные контейнеры, после чего удаляли на длительное хранение на полигон МосНПО «Радон». Очищенные фракции возвращали на реабили-

руемые участки территории и использовали для обратной засыпки котлованов.

В ходе пусконаладочных работ в конструкцию, технологическую схему и состав аппаратного оснащения установки были внесены изменения, позволившие повысить ее производительность и увеличить эффективность дезактивации грунта. В настоящее время установка работает в режиме опытной эксплуатации. Анализ результатов эксплуатации дает возможность сделать вывод о ее высокой экономической эффективности при дезактивации радиоактивно загрязненного грунта.

В настоящей статье изложены основные результаты пусконаладочных работ и опытной эксплуатации установки, особенности ее технологической и аппаратной схем, приведена оценка экономической эффективности дезактивации загрязненного грунта.

Технологическая и аппаратная схемы установки. Технология дезактивации и технологическая схема установки предложены ВНИИНМ им. А.А. Бочвара на основании исследований загрязненного грунта, которые показали, что большая часть радиоактивных веществ (до 90—95%) содержится в мелкодисперсной фракции. На основе предложенной технологической схемы РНЦ «Курчатовский институт», ВНИИНМ им. А.А. Бочвара и ВНИИХТ совместно разработали аппаратную схему (рис. 1), обеспечивающую реализацию технологии, и