

лярной системы делается вывод о чувствительности метода к идентификации новых неизвестных изотопов элементов Периодической таблицы Д.И. Менделеева.

Авторы приносят благодарность А.В. Попову, К. Блауму, М. Блоку, К. Дюльману, С. Наги и О.И. Безродновой. Д. Симоновски благодарит СПбГУ за поддержку стажировки в Германии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huang W., Audi G., Kondev F. e.a. The AME2016 evaluation (I). — Chinese Phys. C, 2017, v. 41, p. 50.
2. Burbidge E., Burbidge G., Fowler W. e.a. Synthesis of the elements in stars. — Rev. Mod. Phys., 1957, v. 29, p. 547.
3. Гусев Ю.И., Новиков Ю.Н., Попов А.В. и др. Ионные ловушки Пеннинга для высокопрецизионных измерений массы нейтроноизбыточных ядер на реакторе ПИК. — Атомная энергия, 2014, т. 118, вып. 6, с. 334—340.
4. Коноплев К.А. Реактор ПИК. — В сб.: Основные результаты деятельности ПИЯФ. СПб, 2005, с. 18—23.
5. Eibach M., Beyer T., Blaum K. e.a. Transport of fission products with a helium gas-jet at TRIGA-SPEC. — Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. A, 2010, v. 613, p. 226—231.
6. MacFarlane R., Gough R., Oakey N., Torgerson D. The helium-jet recoil transport method. — Nucl. Instrum. Meth., 1969, v. 73, p. 285—291.
7. Silva R., Trautmann N., Zendel M. e.a. A gas-jet recoil-transport system for fission products and its application to a continuous chemical separation procedure in the gas phase. — Ibid., 1977, v. 147, p. 371—378.
8. Leo W. Techniques for nuclear and particle physics experiments. — Pramana, 1994, v. 6, p. 382.
9. White F. Fluid Mechanics. McGraw-Hill, 2009. 885 p.
10. Grund J. Online Coupling of TRIGA-TRAP to the Research Reactor TRIGA Mainz. Institut für Kernchemie (JGU) Mainz, 2018, p. 64—84.
11. Tarasov O., Bazin D. Exotic Beam Production with Fragment Separators (URL: <http://lise.nsl.msui.edu/lise.html>).
12. Ziegler J. Interactions of Ions in Matter (URL: <http://www.srim.org>).

Поступила в Редакцию 18.07.17

УДК 621.039.553.5

ПРОГНОЗ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ ГИПОТЕТИЧЕСКИХ АВАРИЙ НА ЯДЕРНЫХ И РАДИАЦИОННО ОПАСНЫХ ОБЪЕКТАХ, НАХОДЯЩИХСЯ НА ДНЕ БАРЕНЦЕВА И КАРСКОГО МОРЕЙ

*Саркисов А.А., Антипов С.В., Высоцкий В.Л., Кобринский М.Н., Шведов П.А.,
Билашенко В.П., Хохлов И.Н. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)*

По состоянию на 2003 г. на дне арктических морей находилось около 18 тыс. радиационных объектов, затопленных в 1957—1993 гг. Единицы из них представляют радиационную опасность. Решение об удалении таких объектов с акваторий или продолжение хранения на дне принимается с учетом радиоэкологических последствий, которые могут возникнуть при авариях природного или техногенного характера.

В Арктическом регионе на дне морей находятся шесть объектов, корабельные реакторы которых содержат отработавшее ядерное топливо: затонувшие подводные лодки «Комсомолец» и Б-159 в Норвежском и Баренцевом море соответственно, затопленная в недостаточно подготовленном состоянии в Новоземельской впадине Карского моря баржа с реактором заказа 421, затопленные в заливах Новой Земли, Карского моря подводная лодка К-27, реакторные отсеки заказа 901, 285 и экранная сборка атомного ледокола «Ленин» со специальной подготовкой к

длительному хранению на дне [1, 2]. Их опасность определяется начальным уровнем подготовки, текущим техническим состоянием защитных барьеров, радиационным потенциалом, составом и интенсивностью выхода радионуклидов в морскую воду при возникновении аварий, а также расположением относительно районов морского промысла, проживания населения и его потребительскими возможностями.

При определении последствий гипотетических аварий рассматривают радиационный потенциал, прогнозируют выход радионуклидов, распространение и интенсивность загрязнения окружающей среды в предположении, что авария произошла. Оценивают результаты прогноза в соответствии с допустимыми нормами загрязнения окружающей среды и дополнительными дозовыми нагрузками при потреблении морепродуктов.

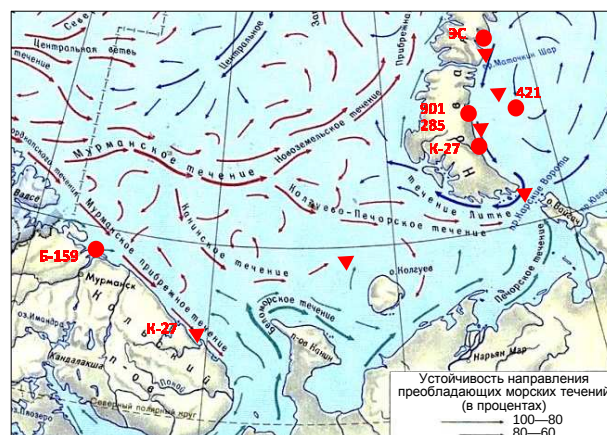
Настоящие исследования включают прогноз и оценку радиоактивного загрязнения морской

среды каждым объектом в местах их нахождения и при транспортировке, анализ радиоэкологических последствий по сценариям «оставить все как есть» (продолжать хранение объектов на дне), подъем и утилизация (реабилитация).

Прогноз и оценка опасности. Распространение техногенных радионуклидов в морской воде прогнозировали с применением трехмерной модели динамики океана ИВМ-ИО по сетке 3×3 км от поверхности до дна на стандартных горизонтах [3]. Топография представлена данными ЕТОРО-5, атмосферные воздействия взяты из [4]. Для прогноза в качестве реперного принят ^{137}Cs , который примерно на 50% определяет радиационный потенциал рассматриваемых объектов [1, 2].

Разработаны сценарии чрезвычайных ситуаций с неконтролируемым выходом ^{137}Cs в местах нахождения объектов, в районах транспортировки и при продолжительном поступлении в морскую воду в результате коррозионного разрушения в период длительного нахождения на дне. На рис. 1 видно, что перенос радионуклидов из затонувшей подводной лодки Б-159 вдоль Кольского полуострова будет определяться Мурманским прибрежным, затем Канинским, Беломорским, Колгуево-Печорским и Печорским течениями. Полуостров Канин и остров Колгуев окажут местное влияние на смещение и характер рассеяния примеси. В результате она может поступить в Белое и Карское моря. Критический район — пролив Карские Ворота, где встречаются устойчивые противотечения Литке и Печорское.

Наиболее опасен неконтролируемый выброс радионуклидов. Коррозионное разрушение со временем может сопровождаться незначительным, но длительным их поступлением в морскую воду [1, 2]. Средняя активность поступления ^{137}Cs в морскую воду при гипотетических



Р и с. 1. Поверхностные течения в Баренцевом и Карском морях: ●, ▼ — районы нахождения и транспортировки объектов с отработавшим топливом

авариях на объектах по мере уменьшения приведена в табл. 1.

В прогнозе, кроме среднего, использовалось его удвоенное поступление из объекта в качестве максимального, а также повышенное в несколько раз от среднего уровня. Повышенное содержание ^{137}Cs в морской воде может возникнуть при затоплении транспорта, осуществляющего доставку одновременно нескольких объектов. Изучение поведения радиоактивной примеси с возросшим выбросом открывает возможность определения особенностей ее распространения на обширных акваториях, за пределами моря, в глубоководной Новоземельской впадине и в проливе Карские Ворота.

Загрязнение морей и допустимые нормы. В международной практике нет единого критерия допустимого радиоактивного загрязнения морской среды. Последствия гипотетических аварий оценивали сопоставлением результатов прогноза с ведомственными (ВМФ) нормами и хорошо изученными действующими источниками [5, 6].

Таблица 1. Гипотетические аварии, средняя ожидаемая активность поступления ^{137}Cs в морскую воду

Сценарии	Объект с отработавшим топливом					
	Б-159	К-27	ЭС	Заказ 901	Заказ 285	Заказ 421
Неконтролируемый выброс на дне и поверхности:						
один реактор, ТБк	25	1,5	2	0,42	0,45	0,2
один объект, ТБк	50	3	2	0,84	0,45	0,2
Длительный выход на дне:						
один реактор, ТБк/год	4	0,08	0,12	0,04	0,04	0,02
один объект, ТБк/год	8	0,16	0,12	0,08	0,04	0,02

Известно, что с 1952 г. в Ирландское море стали поступать техногенные радионуклиды в результате постоянного слива жидких радиоактивных отходов радиохимических предприятий Селлафилда. Загрязнения 1976—1985 гг. считаются наибольшими. В морскую воду ежегодно сливали ^{137}Cs активностью 1000—5000 ТБк, ^{134}Cs — 30—800 ТБк, ^{90}Sr — 4—6 ТБк, ^{239}Pu — 10—80 ТБк, а также другие радионуклиды. Это в десятки—сотни раз превосходило накопленную радиоактивность на всех затопленных и затонувших отечественных объектах с ядерным топливом в Арктическом регионе. В результате на выходе из Ирландского моря содержание ^{137}Cs в морской воде составляло 1000—2500 Бк/м³. Попадая в Северо-Атлантическое, Норвежское, Нордкапское, затем в Мурманское и Прибрежное Мурманское течения, загрязнение достигало Баренцева и Карского морей [7]. Оно носило трансграничный характер и распространялось на 1500—3500 км от источника. В конце 1980-х годов Великобритания снизила, но не прекратила слив жидких отходов. В результате самоочищение Баренцева и Карского морей от ^{137}Cs с 20—30 до фона 5—10 Бк/м³ заняло 15—20 лет.

Соответственно в европейских странах было принято допустимое содержание ^{137}Cs в морепродуктах для населения 500 Бк/кг, что в 2,5 раза превышает отечественную норму [8, 9]. Норматив продолжает действовать, хотя к 2000 г. годовое поступление из Селлафилда ^{137}Cs снизилось до 9—10 ТБк, ^{134}Cs — 0,3 ТБк, ^{90}Sr — 20—40 ТБк, ^{239}Pu — 0,1 ТБк и стало сопоставимо с прогнозируемым выходом радионуклидов при гипотетических авариях из всех отечественных объектов с ядерным топливом, находящихся на дне. В этих условиях для оценки последствий гипотетических аварий исходили из отечественных подходов [3—5]:

допустимая концентрация (объемная активность) в морской воде ^{137}Cs 2220 Бк/м³;

допустимая концентрация (удельная активность) в песках пляжей и грунтах приливной зоны для ^{137}Cs 2590 Бк/кг;

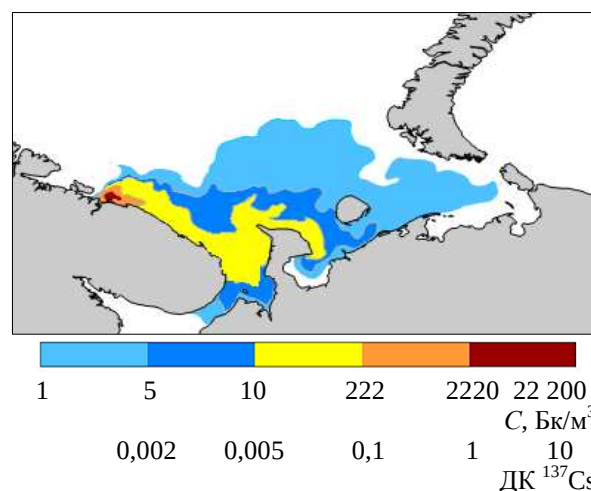
среднее фоновое содержание ^{137}Cs 5 Бк/м³, ниже — 1—5 Бк/м³, выше — 5—10 Бк/м³.

Загрязнение морской воды на уровне одной допустимой концентрации (1 ДК) соответствует безопасному содержанию ^{137}Cs в биоте, которое принято для населения Таможенного союза: ры-

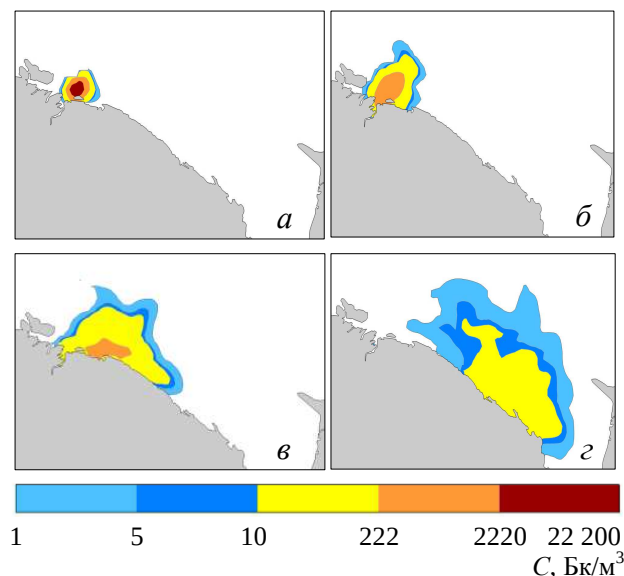
ба — 130 Бк/кг, морепродукты — 200 Бк/кг. Их годовое потребление не превышает дозовый предел 1 мЗв, рекомендованный МАГАТЭ.

Гипотетические аварии с неконтролируемым выбросом. Прогноз распределения ^{137}Cs в Баренцевом и Карском морях от источников выполнен на поверхности, нижележащих горизонтах и в придонном слое. При анализе основное внимание уделено поверхностному загрязнению как наиболее динамичному по сравнению с другими слоями воды. С этой целью результаты прогноза выхода примеси на поверхность для каждого объекта объединяли в единый массив, что позволило воспроизвести общую картину ее распространения от начала аварии до фона, определить масштабы, области недопустимого, приемлемого и фоновых значений.

Атомная подводная лодка Б-159. Прогноз распространения в Баренцевом море в течение 1,5 года после гипотетической аварии с выходом ^{137}Cs активностью 50 ТБк из двух реакторов показал совпадение направлений его перемещения с последствиями слива жидких радиоактивных отходов 1976—1985 гг. предприятиями Селлафилда в Ирландское море. На рис. 2 видно, что прибрежное течение будет переносить ^{137}Cs вдоль Кольского полуострова в общем пространстве 350×900 км, через 6 мес достигнет Белого моря и в последующие полгода распространится по акватории Печорского моря. Объемная активность за это время снизится с более 22 200 до 1—5 Бк/м³. Перемещение радиоактив-



Р и с. 2. Распространение ^{137}Cs на поверхности Баренцева, Белого и Печорского морей в течение года в результате гипотетической аварии двух реакторов подводной лодки Б-159 при неконтролируемой мощности выброса ^{137}Cs 50 ТБк



Р и с. 3. Динамика перемещения и рассеяния радиоактивного загрязнения на поверхности Баренцева моря через 3 (а), 13 сут (б), 1 (в), 3 мес (г)

ной примеси с морской водой представляет собой «облако», которое медленно движется по течению и рассеивается (рис. 3). Загрязнение поверхности воды более $22\,200\text{ Бк/м}^3$ ($\geq 10\text{ ДК}$) ожидается вблизи подводной лодки в радиусе 2—3 км. При активности начального поступления ^{137}Cs 25—50 ТБк время существования этой области не превысит суток, при 100 ТБк — 1—2 сут, в придонном слое ввиду замедленного рассеяния — до 2—3 сут. На поверхности через 3 сут область, содержащая ^{137}Cs активностью $2220\text{—}22\,200\text{ Бк/м}^3$, составит $20\times 30\text{ км}$, через 13 сут объемная активность уменьшится в 10 раз, размеры возрастут до $40\times 70\text{ км}$. Через месяц загрязнение, перемещаясь вдоль Кольского полуострова, примет иные очертания и на 3-й месяц составит $120\times 200\text{ км}$ ($\leq 222\text{ Бк/м}^3$), к

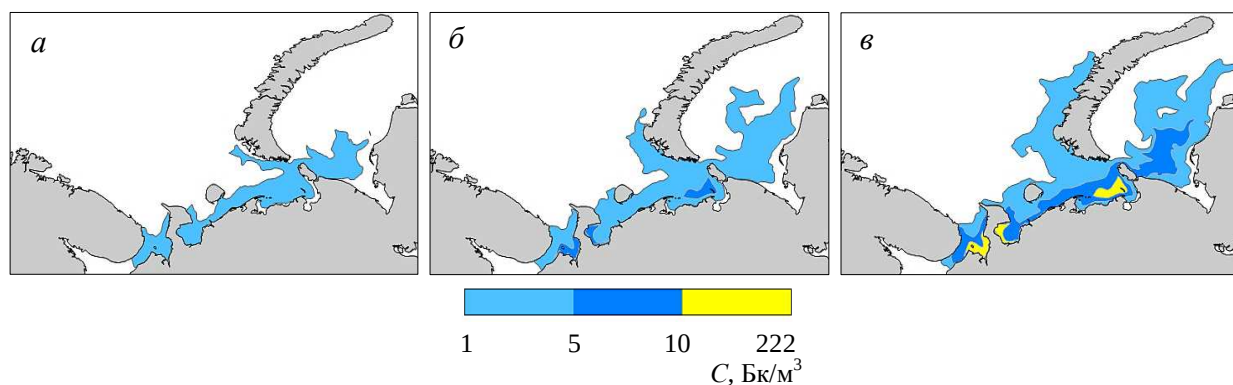
12 мес увеличится до $350\times 900\text{ км}$, содержание ^{137}Cs в воде станет фоновым.

Масштаб радиоактивного загрязнения существенно зависит от мощности источника выброса. На рис. 4 видно, что при 25 ТБк через 18 мес перед проливом Карские Ворота противотечение Литке начнет разделять поток примеси на две части. При 100 ТБк загрязнение станет наибольшим. Вновь образовавшийся поток поднимется вдоль Новой Земли на север и войдет в Баренцево море, основной продолжит перемещаться в Карское море. Примесь начнет интенсивно проникать в глубь заливов и задерживаться в них.

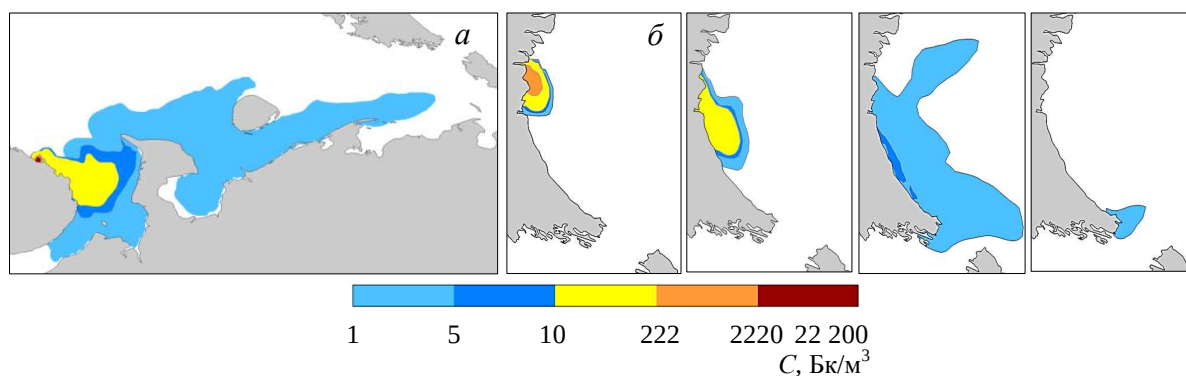
По сравнению с ограниченным по времени загрязнением морской воды ^{137}Cs в течение нескольких лет—десятилетий будет сохраняться в донных отложениях, так как его десорбция медленнее накопления [1, 2]. При коэффициенте накопления песчано-илистыми отложениями, равном 300, морская вода активностью 8700 Бк/м^3 загрязнит дно более чем на 2590 Бк/кг ($\geq 1\text{ ДК}$) в радиусе 10—20 км от Б-159, что потребует ограничения донного сбора и отлова морепродуктов на длительное время.

По сравнению с Б-159 радиационный потенциал остальных затопленных объектов в 20—250 раз ниже (см. табл. 1), в связи с этим все характеристики радиоактивного загрязнения будут существенно меньше.

Атомная подводная лодка К-27. Прогноз последствий гипотетической аварии в районе пос. Гремихи в Баренцевом море, где планируется выгрузка отработавшего топлива, был выполнен с максимальным выходом ^{137}Cs 6 ТБк с тем, чтобы выявить особенности его поступле-



Р и с. 4. Остаточное радиоактивное загрязнение поверхности морской воды Баренцева, Белого, Печорского и Карского морей через 18 мес после гипотетической аварии двух реакторов подводной лодки Б-159 при мощности выброса ^{137}Cs 25 (а), 50 (б), 100 ТБк (в)



Р и с. 5. Поверхностное радиоактивное загрязнение воды на рейде пос. Грехи (а) в Баренцевом море через 1 год после гипотетической аварии двух реакторов подводной лодки К-27 при неконтролируемой мощности выброса ^{137}Cs 6 ТБк и з. Степового (б) 3 ТБк в Карском море через 0,5 года с периодичностью 13 сут, 1, 3, 6 мес

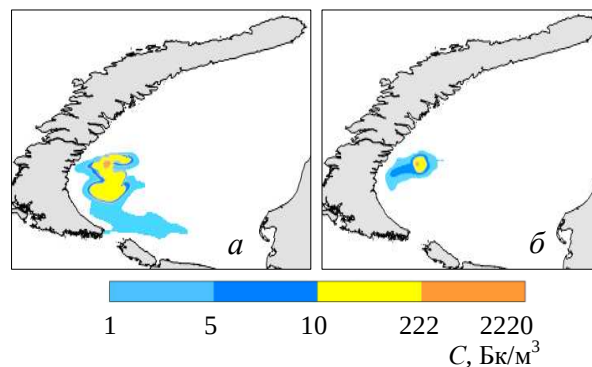
ния в Белое море. Одновременно в мало посещаемой части Карского моря на выходе из з. Степового, где находится К-27, он проведен при 3 ТБк, и это оказалось достаточным для понимания различий в динамике перемещения примеси в этих морях. На рис. 5, а видно, что прибрежным течением примесь переносится в восточном направлении. Полуостров Канин является естественным препятствием, в результате чего ^{137}Cs попадает в горловину Белого моря, но часть его, обогнув полуостров, вдоль берега достигнет Печорского моря. Общая площадь распространения по поверхности составляет 350×150 км, что в 6 раз меньше, чем от Б-159. Загрязнение с уровнем более 2220 Бк/м^3 (≥ 1 ДК) ожидается вблизи подводной лодки (2—3 км) и продлится до 3—5 сут. В остальных местах через 1 мес достигнет 30×80 км ($10\text{—}222 \text{ Бк/м}^3$), 3 мес — 60×200 км ($5\text{—}10 \text{ Бк/м}^3$), к 12 мес станет ниже фона. В Карском море при выбросе ^{137}Cs активностью 3 ТБк загрязнение более 2220 Бк/м^3 (≥ 1 ДК) будет меньше — до 1 км, 2—3 сут (рис. 5, б). На 13-е сут область составит 5×10 км ($222\text{—}2220 \text{ Бк/м}^3$), через 1 мес — 30×80 км ($\leq 222 \text{ Бк/м}^3$), через 3 мес будет ниже верхнего предела фона ($\leq 10 \text{ Бк/м}^3$), к 6 мес возле пролива Карские Ворота рассеется. Общее загрязнение охватит юго-восточную оконечность Новой Земли размером 60×200 км.

Радиационный потенциал остальных затопленных в Карском море объектов в 1,5—15 раз ниже, чем у К-27 (см. табл. 1). По этой причине для изучения динамики перемещения примеси по акватории Карского моря прогноз проводили с повышенным в 10 раз и более выбросом радионуклида.

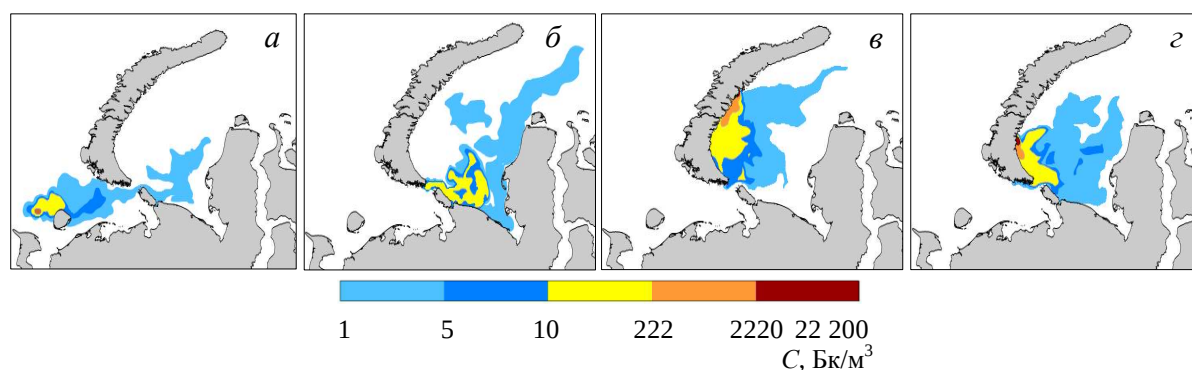
Реактор заказа 421. В отличие от других объектов он находится на глубине 300 м в открытой части моря. Прогноз, выполненный для повышенного в 10 раз выброса 2 ТБк на поверхности, показал, что ^{137}Cs будет переноситься в верхнем 50-м слое воды и на средний горизонт 150 м не опустится (рис. 6). Одновременно авария на дне приведет к противоположному эффекту — примесь останется в слое 200—300 м, на средний горизонт не поднимется и интенсивность рассеяния снизится.

Выявленная неидентичность поведения радионуклида между верхними и нижними слоями воды обусловлена каньонной структурой Новоземельской впадины, которая формирует разнонаправленное перемещение водной массы. К другой особенности относится круговорот на открытой акватории, который не позволяет ^{137}Cs приблизиться к береговой линии и поступить через пролив Карские Ворота в Печорское море.

Транспортировка объектов из Карского в Баренцево море. Подготовка, подъем и установка на транспорт объектов для отправки на



Р и с. 6. Распространение ^{137}Cs на поверхности (а) и в придонном слое (б) в течение года после гипотетической аварии реактора заказа 421 в Новоземельской впадине Карского моря при неконтролируемой мощности выброса 2 ТБк



Р и с. 7. Распространение ^{137}Cs на поверхности Баренцева и Печорского морей в течение 1 года после аварии транспорта с несколькими объектами при неконтролируемой мощности выброса 9 (а, б) и 20 ТБк (в, г) в районе о-ва Колгуев, проливе Карские Ворота, на рейде заливов Цивольки и Степового в Карском море

утилизацию являются сложными видами деятельности, сопряженными с техническими опасностями не меньше, чем столкновение судов. Поэтому показанные на рис. 2—6 прогнозы следует воспринимать как результаты подготовительного этапа для этих целей.

Рассмотрим последствия гипотетических аварий при транспортировке нескольких объектов на одном судне с повышенным выбросом ^{137}Cs (9 и 20 ТБк). Это позволит получить представление о распределении загрязнения по акватории Баренцева, Печорского и Карского морей, включая пролив Карские Ворота (рис. 7).

Области наибольшего радиоактивного загрязнения морской воды вне зависимости от районов гипотетических аварий и мощности выброса в первые сутки после аварии всегда будут находиться вблизи источников. В радиусе 5—10 км содержание ^{137}Cs может достигать 2220 Бк/м³ (1 ДК), через 13—30 сут оно снизится до 222—2220 Бк/м³ (20—50 км), через 6—12 мес на удалении 300—700 км будет в пределах фона (1—5 Бк/м³).

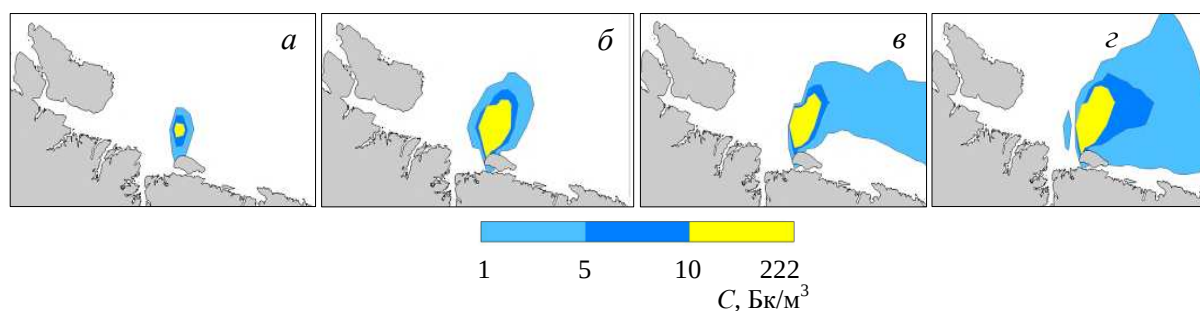
Следует отметить, что, несмотря на увеличение мощности выброса до 20 ТБк, на рейде заливов Цивольки и Степового противотечение

Литке почти не переносит ^{137}Cs в Печорское и Баренцево моря. Радиоактивная примесь, включая последствия аварии в проливе Карские Ворота, будет полностью рассеиваться внутри Карского моря.

Постоянный выход ^{137}Cs из объектов на дне. Атомная подводная лодка Б-159. Ухудшение технического состояния объектов при длительном пребывании на дне и коррозионное разрушение неизбежно будут способствовать выходу радионуклидов в морскую воду с образованием подводного шлейфа. Интенсивность годового поступления радионуклидов будет в десятки раз меньше неконтролируемого выброса.

Прогноз выхода ^{137}Cs из Б-159 со скоростью 4 ТБк/год в Баренцевом море показал, что радиоактивный шлейф локализуется в придонной области между средним горизонтом и дном, на поверхность не выходит, на средней глубине появится через 6—9 мес с объемной активностью в пределах фона (рис. 8).

Содержание ^{137}Cs в воде более 2220 Бк/м³ (≥ 1 ДК) в первые сутки ожидается вблизи подводной лодки в 0,3—0,5 км, в интервале 222—2220 Бк/м³ — 1—2 км, через 3 сут в 5—10 км



Р и с. 8. Радиоактивное загрязнение придонной области Баренцева моря при постоянном выходе ^{137}Cs из Б-159 со скоростью 4 ТБк/год через 3 сут (а), 1 (б), 3 (в) и 12 мес (г)

оно не превысит 222 Бк/м^3 . К 1—3 мес ширина радиоактивного шлейфа составит 10—15 км, длина — 25—30 км, и он будет относиться к постоянно действующему источнику. В течение последующих десятилетий объемная активность ^{137}Cs в этой области будет соответствовать 10—100 Бк/м^3 , на расстоянии 70—100 км — 1—5 Бк/м^3 .

По сравнению с Б-159 интенсивность постоянного выхода ^{137}Cs из остальных объектов в 30—200 раз ниже, что отразится на уменьшении всех характеристик радиоактивного шлейфа (см. табл. 1).

Подводная лодка К-27, реакторные отсеки заказа 901, 285, реактор заказа 421, экранная сборка. Прогноз последствий длительного поступления ^{137}Cs из К-27 для получения сравнительных данных с Б-159 выполнен для одного реактора. Он показал незначительное загрязнение морской воды. Через 3 мес примесь распространилась на 15—20 км от источника, удельная активность не превышала фон. По этой причине расчеты для объектов, находящихся вблизи береговой черты, провели с повышенным в 10 раз выходом радионуклида, для реактора заказа 421, лежащего на глубине 300 м, — в 25 раз (рис. 9).

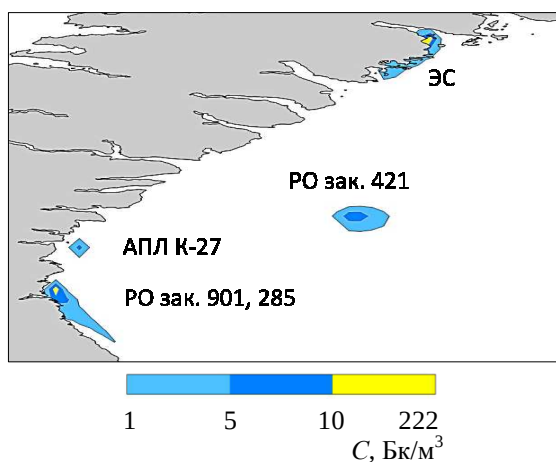
Установлено, что радиоактивный шлейф от К-27, реакторных отсеков заказа 421 и экранной сборки располагается в придонном слое. В районе нахождения реакторных отсеков он может подняться на средний горизонт и в отдельных местах на поверхность моря. Во всех случаях

объемная активность ^{137}Cs через 1—3 мес после аварии не превысит фон.

Прогноз с повышенным в 10—25 раз выходом ^{137}Cs в воду показал, что его объемная активность остается в несколько раз меньше, чем при выходе из Б-159. Радиоактивное загрязнение воды в придонном слое на расстоянии до 1 км не превысит 222 Бк/м^3 (0,1 ДК), что не опасно для населения и окружающей среды.

Сравнение прогноза с натурными данными. Правомерность сравнения прогноза с последствиями слива жидких отходов из Селлафилда обусловлена тем, что европейские страны в течение нескольких десятилетий оценивали эту деятельность как приемлемую для населения и окружающей среды. Промысловый лов рыбы в отдельных районах Ирландского моря не прекращался, хотя в 2001 г. по международным оценкам его признали максимально радиоактивно загрязненным. Актуальность сравнения определяется и прогнозом специалистов Норвегии, который для гипотетических аварий с неконтролируемым выбросом ^{137}Cs из подводных лодок «Комсомолец» и Б-159 показал, что ожидаемое загрязнение окажется сопоставимым или может превзойти последствия слива жидких отходов 1976—1985 гг. из Селлафилда [10]. Настоящие исследования это не подтверждают. Из данных, приведенных в табл. 2, видно, что последствия гипотетической аварии на подводной лодке Б-159, которая обладает наибольшим радиационным потенциалом из всех находящихся на дне объектов, будут в десятки раз меньше по времени и в 3—5 раз по площади, чем от слива жидких радиоактивных отходов предприятий Селлафилда в Ирландское море в 1976—1985 гг. В случае одновременного возникновения таких аварий на всех затопленных и затонувших объектах с отработавшим топливом в Баренцевом и Карском морях последствия не примут глобальный и трансграничный характер.

Области с максимальным загрязнением морской воды будут располагаться в прибрежных водах и при нормативном подходе характеризоваться как кратковременные явления сроком до 3 мес, относящиеся к чрезвычайным ситуациям регионального и федерального уровня. Они не затронут акватории сопредельных государств, за исключением той части окраинных Баренцева и Карского морей, внутреннего Белого и прибрежного Печорского морей, которые прилегают к берегам нашей страны.



Р и с. 9. Радиоактивное загрязнение придонной области Карского моря через 3 мес после постоянного выхода ^{137}Cs из отработавшего топлива, лежащего на дне реактора подводной лодки К-27, реактора заказа 421, реакторных отсеков заказа 901 и 285, экранной сборки, со скоростью 0,08, 0,5, 0,7, 1,2 ТБк в год

Таблица 2. Прогноз гипотетических аварий на затонувших и затопленных в Баренцевом и Карском морях объектах с отработавшим ядерным топливом в сравнении с постоянным сливом жидких радиоактивных отходов предприятиями Селлафилда

Выход ^{137}Cs	Последствия радиоактивного загрязнения		
	Площадь, км ² *	Период*	Внешняя граница на уровне фона 5 Бк/м ³
~4000 ТБк/год в 1976—1980 гг. ~1000 ТБк/год в 1981—1985 гг. Выброс, ТБк: 50 средний 100 максимальный Выброс, ТБк: 3 средний 6 максимальный Выход, ТБк/год***: 4 на один реактор 8 на один объект	Слив жидких отходов в Норвежское море [6]		
	~30 000**	5 лет	1500—3500 км
	~20 000**	5 лет	Ирландское море. Часть Кельтского, Гренландского, Ла-Манша, Северного, Балтийского, Норвежского, Баренцева, Карского морей
	Гипотетическая авария с неконтролируемым залповым выбросом ^{137}Cs		
	Баренцево море, Б-159		
	~1000	1 мес	500—1500 км
	~2000	2—3 мес	Часть Баренцева, Белого, Печорского, Карского морей
	Карское море, К-27		
	~20	10—15 сут	100—200 км
	~40	20—30 сут	Часть Карского моря
	Гипотетическая авария с постоянным выходом ^{137}Cs в морскую воду		
	Баренцево море, Б-159		
	До 1	30—50 лет	30—170 км
	До 1,5	40—60 лет	Часть Баренцева моря

* Соответствуют загрязнению морской воды ^{137}Cs с объемной активностью ≥ 1 кБк/м³.

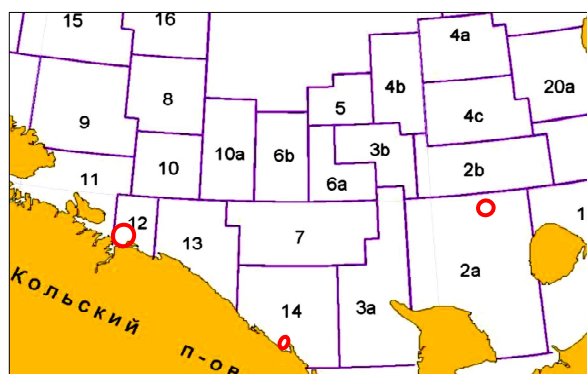
** Площадь Ирландского моря составляет 47 000 км².

*** Для остальных объектов в десятки раз меньше.

Загрязнение биоты. Баренцево море по количеству и виду рыб во много раз превосходит Карское, что делает его основным рыбопромысловым районом, где одновременно добывают краба, гребешка, креветку и др. Треска и пикша (80% сырья) относятся к трансграничным видам, их лов регулируется Россией и Норвегией. Для этого море разделено на более чем 50 районов (рис. 10 [11]).

Исследования показали, что в результате аварий с неконтролируемым выбросом ^{137}Cs на подводных лодках Б-159 могут пострадать район 12, К-27 — 14 и по маршруту транспортировки частично — 1b, 2a, 3a, 7, 13 и др., которые временно от 1 до 3 месяцев могут быть закрыты для рыбопромысловой деятельности. Следует учитывать, что политические интересы и психологический фактор населения, которые не нормируются, могут привести к неопределенному сроку противостояния всем видам промысловой деятельности в регионе [12].

Закключение. Исследования радиоэкологического состояния районов затопления и гибели объектов с отработавшим ядерным топливом в течение последних десятилетий не выявили содержания техногенных радионуклидов в воде, донных отложениях, фауне и флоре выше фона.



Р и с. 10. Прогнозируемые области загрязнения (○) морской воды на уровне допустимой нормы с объемной активностью 2220 Бк/м³ в районах промысла в Баренцевом море при авариях с неконтролируемой мощностью выброса ^{137}Cs 50 ТБк из Б-159 (а), 6 ТБк — К-27 (б), 9 ТБк — транспорта (с) с объектами Карского моря

Одновременно прогноз показал, что последствия гипотетических аварий не будут носить трансграничный характер и ограничатся морскими акваториями, прилегающими к Мурманской, Архангельской областям и Ненецкому автономному округу. Тем не менее потенциальная радиационная опасность сохраняется. Это убеждает в необходимости реабилитации арктических морей. Высокая значимость Арктики для международного сообщества может способствовать участию в экологической программе и других заинтересованных стран. Это было показано в 1998—2018 гг. при утилизации выведенных из эксплуатации атомных подводных лодок и радиозэкологической реабилитации объектов обслуживающей их инфраструктуры.

Исследования проведены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 17-19-01674).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Высоцкий В.Л. и др. Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию. Радиозэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря. Белая книга-2000. М.: ИздАТ, 2005. 624 с.
2. Саркисов А.А., Сивинцев Ю.В., Высоцкий В.Л. и др. Атомное наследие холодной войны на дне Арктики. М.: Изд-во Юлис, 2015. 699 с.
3. Ибраев Р.А., Хабеев Р.Н., Ушаков К.В. Вихререшающая $1/10^\circ$ модель Мирового океана. — Изв. РАН. Физика атмосферы и океана, 2012, № 48(1), с. 45—55.
4. Large W., Yeager S. The global climatology of an interannually varying air-sea flux data set. — Clim. Dyn., 2009, v. 33, № 2—3, p. 341—364.
5. Руководство по контролю за радиоактивным загрязнением внешней среды и внутренним облучением личного состава кораблей с атомными энергетическими установками (РКВС-90). М.: Воен. изд-во, 1991. 96 с.
6. Worldwide Marine Radioactivity Studies (WOMARS). Radionuclide Levels in Oceans and Seas. IAEA-TECDOC-1429. Vienna: IAEA, 2005. 187 p.
7. Вакуловский С.М., Никитин А.И., Чумичев В.Б. О загрязнении арктических морей радиоактивными отходами западноевропейских радиохимических заводов. — Атомная энергия, 1985, т. 58, вып. 6, с. 445—449.
8. Репин В.С. Радиационно-гигиеническая оценка возможных уровней загрязнения дальневосточных морепродуктов долгоживущими радионуклидами в связи с аварией на АЭС «Фукусима-1». — Радиационная гигиена, 2012, т. 5, № 2, с. 61—70.
9. Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов. СанПиН 2.3.2.1078-01. М.: Изд-во ИнтерСЭН, 2002. 168 с.
10. Heldal H., Vikebø F., Johansen G. Dispersal of the radionuclide caesium-137 from point sources in the Barents and Norwegian Seas and its potential contamination of the Arctic marine food chain: coupling numerical ocean models with geographical fish distribution data. — Environmental Pollution J., 2013, v. 180, p. 190—198.
11. Жичкин А.П. Пространственно-временная изменчивость промысловой значимости различных районов рыбного лова в Баренцевом море. — Вестник МГТУ, 2014, т. 17, № 3, с. 465—473.
12. Саркисов А.А. Феномен восприятия общественным сознанием опасности, связанной с ядерной энергетикой. — Вестник РАН, 2012, № 1, с. 9—18.

Поступила в Редакцию 13.08.18

УДК 621.311.25.004.7

ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС DIGITAL DECOMMISSIONING — ИНСТРУМЕНТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ВЫВОДОМ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Тихоновский В.Л., Юшицин К.В., Кузьмичев И.А., Бычкова И.А. (АО «НЕОЛАНТ», г. Москва),
Былкин Б.К. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва), Сонькин Д.М. (Национальный исследовательский
Томский политехнический ун-т», г. Томск), Крючков Д.В. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)

На заключительной стадии жизненного цикла объекта использования атомной энергии своевременное получение достоверной информации в необходимом объеме, а также возможность ее аналитической обработки позволяют не только принимать оперативные управленческие и стратегические решения, но и обеспечивать эффективность всех этапов вывода из эксплуа-

тации [1]. К основным направлениям информационных технологий следует отнести базу данных вывода из эксплуатации. Ее назначение, выработанное на основе практического опыта внедрения, состоит в следующем:

обеспечение способов накопления, упорядочивания, управления, надежного и долговременного хранения информации;