



ОПРЕДЕЛЕНИЕ В ВОДЕ И ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ БАРЕНЦЕВА МОРЯ КОНТРОЛЬНЫХ УРОВНЕЙ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ ПРИЕМЛЕМЫЙ ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ РИСК

© 2022 г. Н. А. Росновская, А. И. Крышев, И. И. Крышев

Научно-производственное объединение «Тайфун», Обнинск, Российская Федерация
E-mail: rosnovskaya@rpatyphoon.ru

Поступила в редакцию 21.03.2022; после доработки 07.06.2022;
принята к публикации 26.09.2022; опубликована онлайн 29.11.2022.

Разработаны критерии оценки радиационной обстановки, обеспечивающие приемлемый экологический риск, — контрольные уровни содержания радионуклидов в компонентах природной среды. Метод применён для расчёта контрольных уровней содержания техногенных радионуклидов в воде и донных отложениях Баренцева моря, превышение которых обеспечивает радиационную защиту морской биоты. Для этого выполнена оценка локальных коэффициентов накопления ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{239}Pu в биоте Баренцева моря с использованием многолетних данных наблюдений, а также выбраны представительные виды его экосистемы — рыба (треска), моллюск (мидия), водное растение (фукус) и морское млекопитающее (гренландский тюлень). Значения коэффициентов накопления ^{137}Cs , ^{239}Pu и ^{90}Sr составили соответственно (л·кг⁻¹): в рыбе — 93, 262 и 12; в моллюсках — 51, 1180 и 21; в водорослях — 69, 732 и 19; в морских млекопитающих — 63, 222 и 14. Значения коэффициентов распределения радионуклидов ^{137}Cs , ^{239}Pu и ^{90}Sr между водой и донными отложениями составили 426, 189 600 и 443 л·кг⁻¹ соответственно. Для большинства представительных организмов Баренцева моря значения коэффициентов накопления техногенных радионуклидов отличаются от справочных значений. Отсутствие выраженного временного тренда для коэффициентов накопления всех техногенных радионуклидов в рыбе Баренцева моря в 1992–2020 гг. указывает на установление равновесия в распределении радиоактивности между компонентами арктической морской экосистемы. Контрольные уровни содержания радионуклидов в воде Баренцева моря (Бк·л⁻¹) составляют 115 для ^{137}Cs , 439 для ^{90}Sr , 0,124 для $^{239,240}\text{Pu}$; в донных отложениях (кБк·кг⁻¹ сырого веса) — 48,9 для ^{137}Cs , 194 для ^{90}Sr , 23,6 для $^{239,240}\text{Pu}$. Значения индекса загрязнения как воды, так и донных отложений Баренцева моря, рассчитанные с использованием данных мониторинга и величин контрольных уровней, в 2006–2020 гг. были на несколько порядков ниже единицы и не имели существенной тенденции к повышению или снижению. Основной вклад в индекс загрязнения воды Баренцева моря с точки зрения воздействия на природную биоту вносит $^{239,240}\text{Pu}$ (до 75 %), в индекс загрязнения донных отложений — ^{137}Cs (до 90 %). Соотношение вкладов техногенных радионуклидов в индекс загрязнения воды и донных отложений Баренцева моря в настоящее время является постоянным.

Ключевые слова: Арктика, Баренцево море, вода, донные отложения, биота, контрольный уровень, коэффициент накопления, коэффициент распределения, радионуклид

Для корректной интерпретации данных мониторинга необходимо сравнить их с критериями оценки радиационной обстановки, обеспечивающими приемлемый экологический риск. В качестве таких критериев удобно использовать контрольные уровни содержания радионуклидов

в компонентах природной среды, с которыми могут быть прямо сопоставлены результаты измерений. Были разработаны рекомендации по оценке радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки ([Оценка радиационно-экологического воздействия, 2015](#)) и по расчёту контрольных уровней содержания радионуклидов в морской воде ([Порядок расчёта, 2016](#)). Контрольные уровни, определённые в рекомендациях ([Порядок расчёта, 2016](#)), базируются на использовании обобщённых значений коэффициентов накопления радионуклидов в биоте, коэффициентов распределения между водой и донными отложениями ([Sediment Distribution Coefficients, 2004](#)) и стандартного выбора представительных организмов ([ICRP Publication 108, 2008](#)) и не учитывают региональные особенности.

Значения коэффициентов накопления радиоактивных веществ в компонентах арктической морской экосистемы могут существенно отличаться от среднемировых значений. Арктический регион характеризуется суровым климатом с низкими температурами. В холодных водах Арктики накопление и выведение радионуклидов у гидробионтов происходит медленнее, чем в водоёмах умеренного или тёплого климата; кроме того, набор представительных организмов при проведении радиоэкологических оценок для арктических морей отличается от стандартного ([Kryshev et al., 2022](#) ; [Sazykina & Kryshev, 2011](#)).

Присутствие техногенных радионуклидов в Баренцевом море преимущественно обусловлено следующими факторами: атмосферными выпадениями после испытаний ядерного оружия во второй половине XX в.; переносом с течениями радиоактивных сбросов с предприятий, расположенных на территории Великобритании и Франции; наличием в арктических морях затонувших или затопленных ядерных и радиационно опасных объектов; поступлением радионуклидов после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. ([Саркисов и др., 2015](#) ; [Сивинцев и др., 2005](#)). Экспедиционные обследования акватории Баренцева моря показали наличие в морской воде таких долгоживущих техногенных радионуклидов, как ^{137}Cs , ^{90}Sr и ^{239}Pu ([Gwynn et al., 2016](#) ; [Jensen et al., 2016](#)).

Задачей исследования является определение контрольных уровней содержания техногенных радионуклидов в воде и донных отложениях Баренцева моря, непревышение которых обеспечивает радиационную защиту морской биоты. Для этого выполнена оценка локальных коэффициентов накопления техногенных радионуклидов в биоте и коэффициентов распределения между водой и донными отложениями Баренцева моря с использованием многолетних данных наблюдений, а также выбраны представительные виды экосистемы Баренцева моря и пороговые значения мощности дозы облучения, ниже которых не возникает детерминированных радиобиологических эффектов для морской биоты.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Контрольный уровень i -го радионуклида в морской воде рассчитывали по формуле:

$$C_i = \frac{P}{\varepsilon_{a,i} \cdot \alpha_i \cdot CF_i + \varepsilon_{e,i} \cdot (\tau_w + 0,5 \cdot K_{d,i} \cdot \tau_s)}, \quad (1)$$

где P — пороговое значение мощности дозы, при превышении которого могут возникать детерминированные радиобиологические эффекты для представительного организма, $\text{мГр} \cdot \text{сут}^{-1}$;

$\varepsilon_{a,i}$ — дозовый коэффициент внутреннего облучения организма от накопленного i -го радионуклида, $(\text{мГр} \cdot \text{сут}^{-1}) / (\text{Бк} \cdot \text{кг}^{-1} \text{ сырого веса})$;

α_i — коэффициент качества, связанный с относительной биологической эффективностью излучения, безразмерный;

CF_i — коэффициент накопления i -го радионуклида в представительном организме, $\text{л} \cdot \text{кг}^{-1}$;

$\varepsilon_{e,i}$ — дозовый коэффициент внешнего облучения организма от морской воды и донных отложений, (мГр·сут⁻¹)/(Бк·кг⁻¹ сырого веса);

$K_{d,i}$ — коэффициент распределения i -го радионуклида между морской водой и донными отложениями, л·кг⁻¹ сырого веса;

τ_w и τ_s — доли времени, которые представитель морской биоты проводит в толще воды и вблизи дна соответственно, безразмерные.

Контрольный уровень i -го радионуклида в морских донных отложениях рассчитывали по формуле:

$$S_i = \frac{P}{\varepsilon_{a,i} \cdot \alpha_i \cdot CF_{s,i} + 0,5 \cdot \varepsilon_{e,i} \cdot \tau_s}, \quad (2)$$

где $CF_{s,i}$ — отношение удельной активности i -го радионуклида в морском организме к его удельной активности в донных отложениях, кг·кг⁻¹ сырого веса.

Для выбора представительных объектов природной среды применяют следующие критерии: экологическую значимость объекта, доступность для радиоэкологического мониторинга, величину дозы облучения, радиочувствительность, способность к самовосстановлению (Kryshev & Sazykina, 2012). При определении представительных организмов арктических морей особое значение имеет наличие данных мониторинга, позволяющих оценить локальные значения коэффициентов накопления техногенных радионуклидов в морской биоте. Исходя из этого, в качестве представительных организмов Баренцева моря были выбраны: рыба — треска *Gadus morhua* Linnaeus, 1758; двустворчатый моллюск — мидия *Mytilus edulis* Linnaeus, 1758; водное растение — фукус двухрядный *Fucus distichus* Linnaeus, 1767; морское млекопитающее — гренландский тюлень *Pagophilus groenlandicus* (Erxleben, 1777).

Для определения коэффициентов накопления радионуклидов в представительных организмах Баренцева моря и коэффициентов распределения радионуклидов между водой и донными отложениями создана база данных о содержании радионуклидов в компонентах его экосистемы. Суммарная ошибка определения удельной активности радионуклидов для компонент Баренцева моря составляет не более 25 %. Основная часть данных была получена в результате экспедиционных обследований в рамках российско-норвежской программы мониторинга Баренцева моря в 2006–2020 гг. (Gwynn et al., 2016 ; Jensen et al., 2016). Данные за более ранний период (начиная с 1992 г.) взяты из литературы (Brown et al., 2004 ; Kryshev et al., 2002).

База данных включает 107 значений удельных активностей по ¹³⁷Cs, 45 значений по ^{239,240}Pu и 65 значений по ⁹⁰Sr. Для определения коэффициентов накопления и распределения использованы сведения о содержании радионуклидов в воде, донных отложениях и биоте, полученные в один год и в одном местоположении в Баренцевом море. На рис. 1 представлена карта района исследований в ходе российско-норвежского мониторинга и расположения мест реперного отбора проб.

Для вычисления результирующих локальных значений коэффициентов накопления и коэффициентов распределения проводили статистический анализ, выполняя проверку нормальности распределения с использованием критерия Шапиро — Уилка (Кобзарь, 2006). В случае отсутствия нормального распределения применяли методы непараметрической статистики (Кобзарь, 2006).

Значения дозовых коэффициентов определяли с помощью калькулятора BiotaDC v.1.5.1 (<http://biotadc.icrp.org/>), который является приложением к публикации 136 Международной комиссии по радиационной защите (ICRP Publication 136, 2017). Морские организмы аппроксимировали эллипсоидами со следующей массой и соотношениями между осями: треска — 2 кг, 1/0,2/0,2; тюлень — 130 кг, 1/0,24/0,24; моллюск — 1,64·10⁻² кг, 1/0,5/0,5; водное растение — 6,5·10⁻³ кг, 1/0,01/0,01. В качестве критерия предельно

допустимого радиационного воздействия на биоту принимали следующие значения мощности дозы: $10 \text{ мГр}\cdot\text{сут}^{-1}$ для моллюсков; $1 \text{ мГр}\cdot\text{сут}^{-1}$ для рыбы и водных растений (бурые водоросли); $0,1 \text{ мГр}\cdot\text{сут}^{-1}$ для долгоживущего морского млекопитающего (ICRP Publication 108, 2008 ; ICRP Publication 124, 2014). Значения параметров τ_w и τ_s консервативно приняты равными 0,5 для рыбы, водных растений и морских млекопитающих; для моллюска принято значение $\tau_s = 1$.

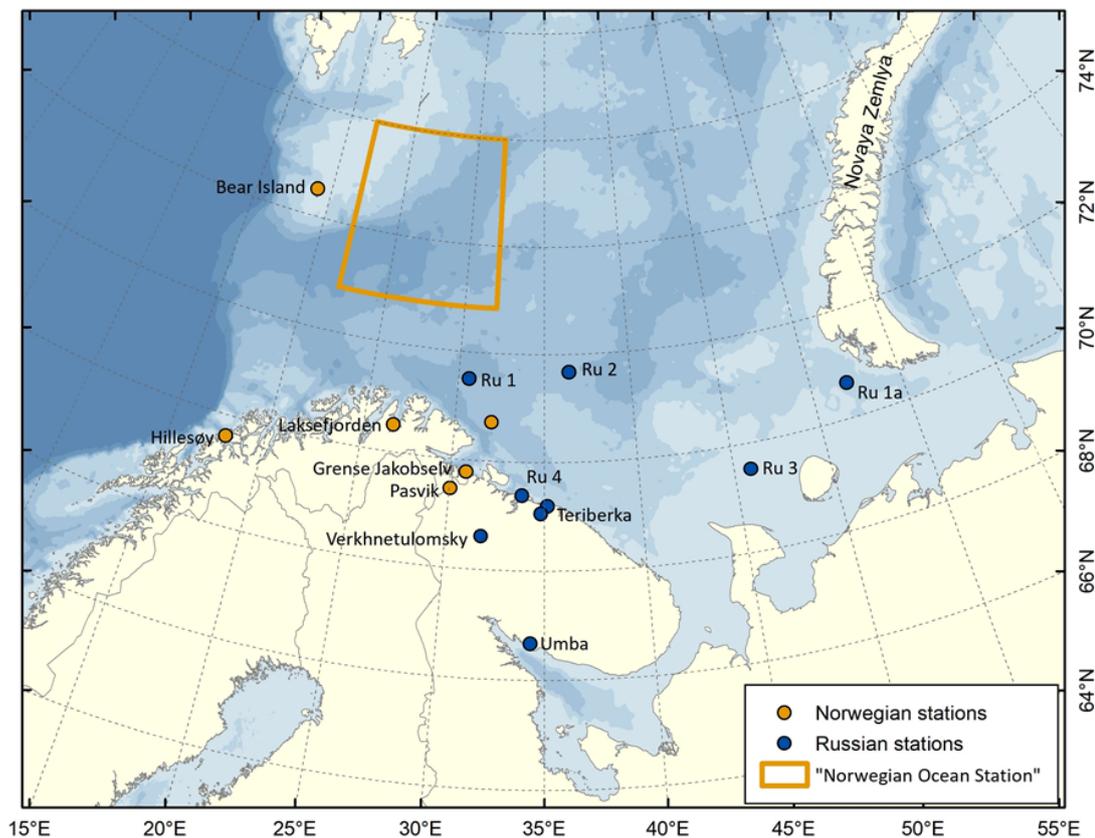


Рис. 1. Карта района исследований и расположения мест реперного отбора проб
Fig. 1. Map of the study area and location of the reference sampling sites

Значение параметра α_i (коэффициента качества, связанного с относительной биологической эффективностью излучения) для ^{137}Cs и ^{90}Sr равно 1. В работе (Sazykina & Kryshev, 2016) было показано, что коэффициент качества α -излучающих радионуклидов в среднем для биоты составляет 15. При этом было выявлено, что для разных α -излучающих радионуклидов величины коэффициента качества существенно различаются: для изотопов радия $\alpha_i = 5$; для изотопов плутония и америция $\alpha_i = 50$. С учётом этого результата при определении контрольных уровней ^{239}Pu в воде и донных отложениях Баренцева моря нами использовано значение $\alpha_i = 50$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По итогам анализа радиоэкологической базы данных определены коэффициенты накопления радионуклидов ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$ в представительных объектах биоты Баренцева моря. Результаты расчётов приведены в табл. 1. Для сравнения в таблице указаны значения коэффициентов накопления этих радионуклидов из рекомендаций (Оценка радиационно-экологического воздействия, 2015), основанные на публикации МАГАТЭ (Sediment Distribution Coefficients, 2004) и не учитывающие региональные особенности.

Таблица 1. Среднемноголетние значения коэффициентов накопления радионуклидов в биоте Баренцева моря за период с 1992 по 2020 г.

Table 1. Long-term mean values of the concentration factors of radionuclides in the Barents Sea biota in 1992–2020

| Радионуклид | Коэффициент накопления по данным мониторинга, л·кг ⁻¹ | Двусторонний доверительный интервал (95 %), T1, T2 | Коэффициент накопления по рекомендациям (Оценка радиационно-экологического воздействия, 2015), л·кг ⁻¹ |
|-----------------------|--|--|---|
| Рыба | | | |
| ¹³⁷ Cs | 93 | 76, 129 | 100 |
| ⁹⁰ Sr | 12 | 10, 27 | 3 |
| ^{239,240} Pu | 262 | 197, 1000 | 100 |
| Моллюски | | | |
| ¹³⁷ Cs | 51 | 26, 258 | 60 |
| ⁹⁰ Sr | 21 | 7, 56 | 10 |
| ^{239,240} Pu | 1180 | 912, 4333 | 3000 |
| Водные растения | | | |
| ¹³⁷ Cs | 69 | 58, 76 | 50 |
| ⁹⁰ Sr | 19 | 10, 31 | 10 |
| ^{239,240} Pu | 732 | 449, 1724 | 4000 |
| Морские млекопитающие | | | |
| ¹³⁷ Cs | 63 | 36, 86 | 210 |
| ⁹⁰ Sr | 14 | 1, 26 | 2 |
| ^{239,240} Pu | 222 | 111, 333 | 280 |

Величины коэффициентов накопления ¹³⁷Cs в рыбе, моллюсках и водных растениях Баренцева моря хорошо соответствуют (см. табл. 1) обобщённым среднемировым значениям из рекомендаций (Оценка радиационно-экологического воздействия, 2015), тогда как для морских млекопитающих локальное значение коэффициента накопления ¹³⁷Cs в 3,3 раза ниже. Для всех представленных организмов Баренцева моря коэффициенты накопления ⁹⁰Sr в 2–7 раз выше обобщённых среднемировых значений. Коэффициент накопления ^{239,240}Pu в рыбе Баренцева моря выше значения, указанного в рекомендациях (Оценка радиационно-экологического воздействия, 2015), в моллюсках и водных растениях — существенно ниже.

Коэффициенты распределения радионуклидов между водой и донными отложениями Баренцева моря, определённые в результате анализа радиоэкологической базы данных, приведены в табл. 2 в сравнении со значениями этого параметра из рекомендаций (Оценка радиационно-экологического воздействия, 2015), представляющими собой усреднённые мировые значения для морских экосистем.

Таблица 2. Среднемноголетние значения коэффициентов распределения радионуклидов между водой и донными отложениями Баренцева моря за период с 2006 по 2020 г.

Table 2. Long-term mean values of the radionuclide water–sediment distribution coefficients in the Barents Sea in 2006–2020

| Радионуклид | Коэффициент накопления по данным мониторинга, л·кг ⁻¹ | Двусторонний доверительный интервал (95 %), T1, T2 | Коэффициент накопления по рекомендациям (Оценка радиационно-экологического воздействия, 2015), л·кг ⁻¹ |
|-----------------------|--|--|---|
| ¹³⁷ Cs | 426 | 362, 640 | 3000 |
| ⁹⁰ Sr | 443 | 180, 720 | 1000 |
| ^{239,240} Pu | 189 600 | 56 360, 318 310 | 100 000 |

Средние значения коэффициента распределения ^{137}Cs и ^{90}Sr между водой и донными отложениями Баренцева моря по результатам мониторинга (см. табл. 2) ниже величин, указанных в рекомендациях (*Оценка радиационно-экологического воздействия*, 2015), в 7 и 2,3 раза соответственно. Средний коэффициент распределения $^{239,240}\text{Pu}$ между водой и донными отложениями Баренцева моря в 1,9 раза выше значения, рекомендованного в (*Оценка радиационно-экологического воздействия*, 2015), однако имеет широкий доверительный интервал.

Коэффициенты накопления техногенных радионуклидов в рыбе Баренцева моря не имеют выраженного тренда или отчётливой тенденции к повышению или снижению (рис. 2 и 3), что может указывать на установление равновесия в распределении радиоактивности между компонентами арктической морской экосистемы.

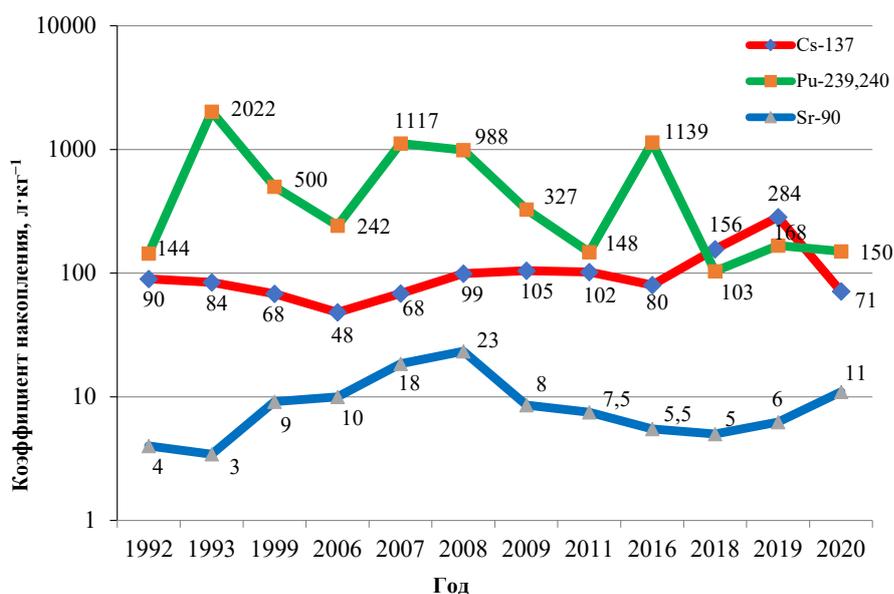


Рис. 2. Динамика коэффициентов накопления радионуклидов в рыбе Баренцева моря в 1992–2020 гг.

Fig. 2. Dynamics in the concentration factors of radionuclides in the Barents Sea fish in 1992–2020

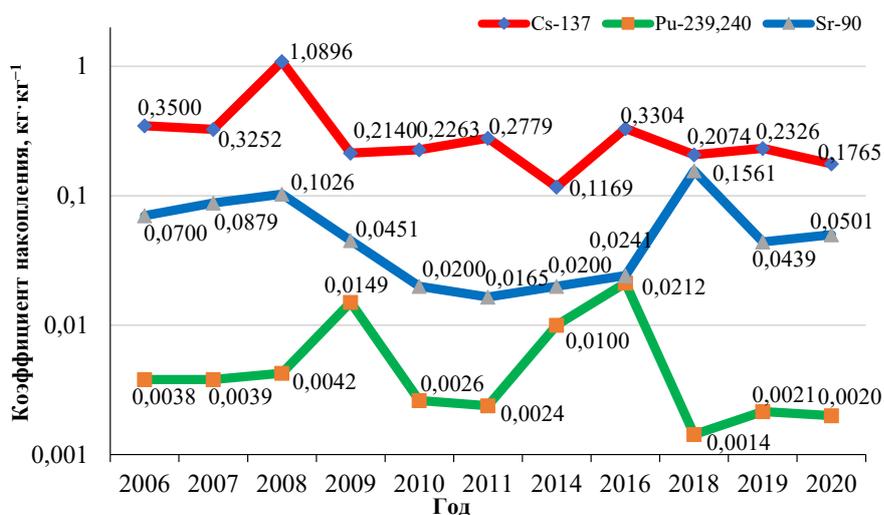


Рис. 3. Изменение коэффициентов накопления радионуклидов в рыбе Баренцева моря из донных отложений в 2006–2020 гг.

Fig. 3. Dynamics in the concentration factors of radionuclides in the Barents Sea fish from bottom sediments in 2006–2020

Рассчитанные значения коэффициентов накопления и распределения были использованы для определения контрольных уровней ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$ в воде и донных отложениях Баренцева моря. Контрольные уровни для каждого представительного организма, обитающего в Баренцевом море, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Контрольные уровни содержания радионуклидов в воде и донных отложениях Баренцева моря, обеспечивающие радиационную безопасность представительных организмов

Table 3. Control levels of radionuclides in the Barents Sea water and bottom sediments ensuring the radiation safety of the reference organisms

| Организм | Контрольный уровень в воде, Бк·л ⁻¹ | | | Контрольный уровень в донных отложениях, Бк·кг ⁻¹ сырого веса | | |
|-----------------|---|-------------------|-----------------------|---|-------------------|-----------------------|
| | ^{137}Cs | ^{90}Sr | $^{239,240}\text{Pu}$ | ^{137}Cs | ^{90}Sr | $^{239,240}\text{Pu}$ |
| Рыба | $8,78 \cdot 10^2$ | $4,37 \cdot 10^3$ | $1,05 \cdot 10^0$ | $3,75 \cdot 10^5$ | $1,94 \cdot 10^6$ | $2,00 \cdot 10^5$ |
| Моллюск | $5,53 \cdot 10^3$ | $1,45 \cdot 10^4$ | $2,34 \cdot 10^0$ | $2,35 \cdot 10^6$ | $6,41 \cdot 10^6$ | $4,43 \cdot 10^5$ |
| Водное растение | $9,20 \cdot 10^2$ | $1,36 \cdot 10^3$ | $3,77 \cdot 10^{-1}$ | $3,93 \cdot 10^5$ | $6,03 \cdot 10^5$ | $7,14 \cdot 10^4$ |
| Млекопитающее | $1,15 \cdot 10^2$ | $4,39 \cdot 10^2$ | $1,24 \cdot 10^{-1}$ | $4,89 \cdot 10^4$ | $1,94 \cdot 10^5$ | $2,36 \cdot 10^4$ |

В качестве результирующего контрольного уровня содержания радионуклида в воде Баренцева моря принято его наименьшее значение среди значений всех представительных организмов, что обеспечивает защиту наиболее уязвимого звена экосистемы. Самыми низкими, как следует из табл. 3, значения контрольных уровней всех радионуклидов являются для морского млекопитающего (тюленя). Таким образом, контрольные уровни техногенных радионуклидов в воде Баренцева моря, обеспечивающие безопасность морской биоты (Бк·л⁻¹), составляют 115 для ^{137}Cs , 439 для ^{90}Sr , 0,124 для $^{239,240}\text{Pu}$. Контрольные уровни техногенных радионуклидов в донных отложениях Баренцева моря (кБк·кг⁻¹ сырого веса) оценены в 48,9 для ^{137}Cs , 194 для ^{90}Sr , 23,6 для $^{239,240}\text{Pu}$.

Индексы загрязнения воды I_w и донных отложений I_s Баренцева моря рассчитаны по формулам:

$$I_w = \sum_i \frac{C_{w,i}}{C_i}; \quad I_s = \sum_i \frac{C_{s,i}}{S_i}, \quad (3)$$

где $C_{w,i}$ — объёмная активность i -го радионуклида в морской воде, Бк·л⁻¹;

$C_{s,i}$ — удельная активность i -го радионуклида в донных отложениях, Бк·кг⁻¹ сырого веса.

На рис. 4 представлена динамика индексов загрязнения воды и донных отложений Баренцева моря техногенными радионуклидами в 2006–2020 гг.

Из рис. 4 видно, что индекс загрязнения воды Баренцева моря находился в пределах от $4,2 \cdot 10^{-5}$ (2014 г.) до $8,7 \cdot 10^{-5}$ (2006 г.). Индекс загрязнения донных отложений Баренцева моря изменялся в диапазоне от $5,8 \cdot 10^{-6}$ (2016 г.) до $3,8 \cdot 10^{-5}$ (2018 г.). Индексы загрязнения как воды, так и донных отложений Баренцева моря в 2006–2020 гг. не имели выраженной тенденции к повышению или снижению.

Относительный вклад ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$ в индекс загрязнения воды Баренцева моря в 2006–2020 гг. приведён на рис. 5. Наибольший вклад в индекс загрязнения воды вносил $^{239,240}\text{Pu}$ — от 49 до 75 % в разные годы. При этом вклад ^{137}Cs в индекс загрязнения воды Баренцева моря варьировал от 16 до 41 %, вклад ^{90}Sr — от 5 до 15 %. Индекс загрязнения донных отложений Баренцева моря практически полностью (до 90 %) определяется вкладом ^{137}Cs . В 2006–2020 гг. соотношение вкладов техногенных радионуклидов в индекс загрязнения воды и донных отложений Баренцева моря оставалось стабильным, не имея существенной тенденции к изменению.

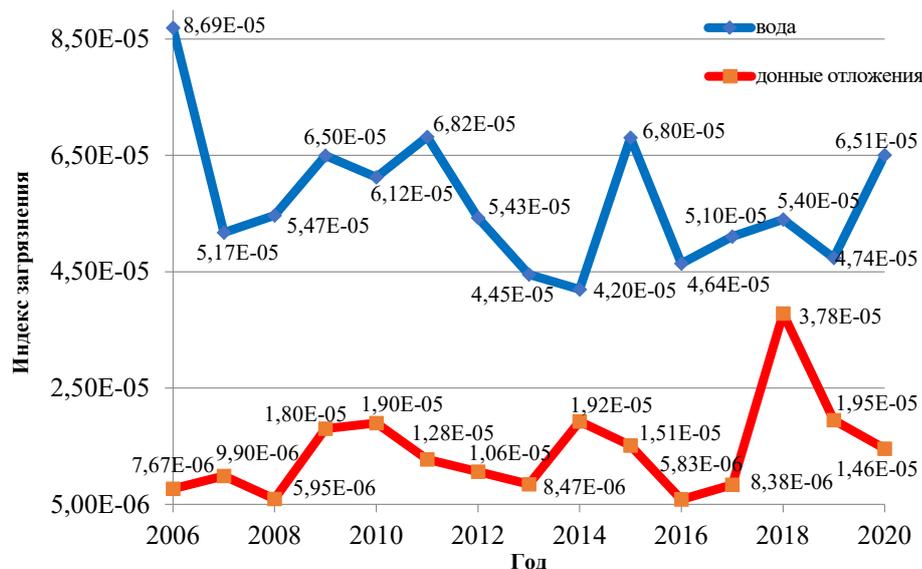


Рис. 4. Изменение индексов загрязнения воды и донных отложений Баренцева моря в 2006–2020 гг.

Fig. 4. Dynamics in contamination indices for the Barents Sea water and bottom sediments in 2006–2020

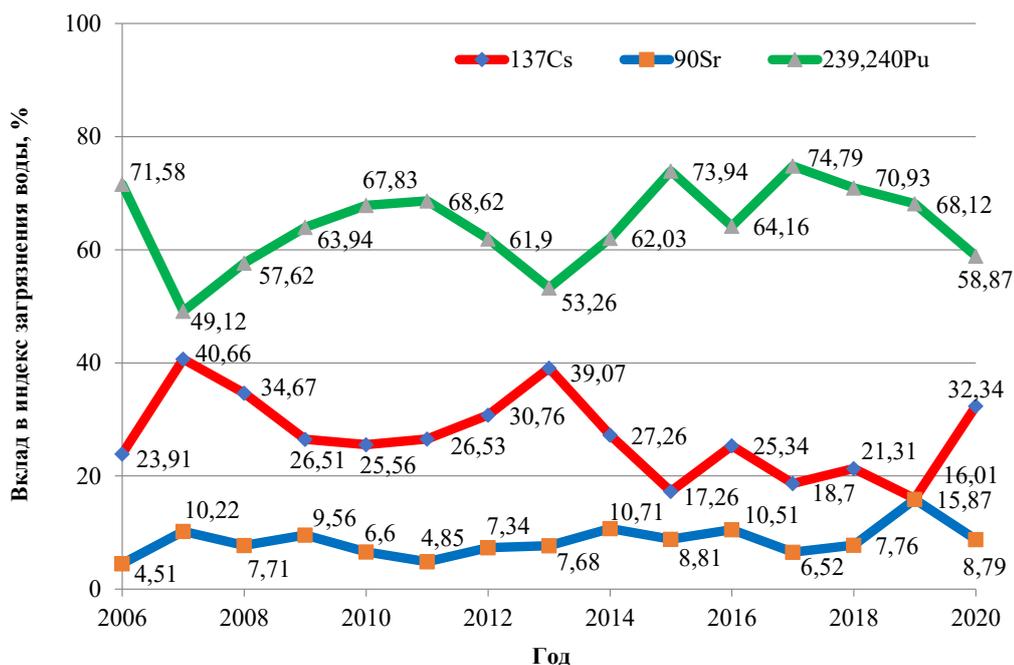


Рис. 5. Изменение относительного вклада радионуклидов в индекс загрязнения воды Баренцева моря в 2006–2020 гг.

Fig. 5. Dynamics in the relative contribution of radionuclides to the contamination index of the Barents Sea water in 2006–2020

Вывод. Определены коэффициенты накопления техногенных радионуклидов в биоте и коэффициенты распределения между водой и донными отложениями Баренцева моря с использованием многолетних данных наблюдений. По результатам мониторинга, коэффициенты распределения ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr между водой и донными отложениями Баренцева моря ниже среднемировых значений в 7 и 2,3 раза соответственно. Для большинства представительных организмов Баренцева моря значения коэффициентов накопления техногенных радионуклидов

отличаются от справочных значений. Отсутствие выраженного временного тренда для коэффициентов накопления всех техногенных радионуклидов в рыбе Баренцева моря в 1992–2020 гг. указывает на установление равновесия в распределении радиоактивности между компонентами арктической морской экосистемы.

Рассчитаны контрольные уровни техногенных радионуклидов в воде и донных отложениях Баренцева моря, не превышение которых обеспечивает безопасность морских организмов. Контрольные уровни радионуклидов в воде Баренцева моря (Бк·л⁻¹) составляют 115 для ¹³⁷Cs, 439 для ⁹⁰Sr, 0,124 для ^{239,240}Pu; в донных отложениях (кБк·кг⁻¹ сырого веса) — 48,9 для ¹³⁷Cs, 194 для ⁹⁰Sr, 23,6 для ^{239,240}Pu.

Значения индекса загрязнения как воды, так и донных отложений Баренцева моря, рассчитанные с использованием данных мониторинга и величин контрольных уровней, в 2006–2020 гг. были на несколько порядков ниже единицы и не имели существенной тенденции к повышению или снижению. Основной вклад в индекс загрязнения воды Баренцева моря с точки зрения воздействия на природную биоту вносит ^{239,240}Pu (до 75 %), в индекс загрязнения донных отложений — ¹³⁷Cs (до 90 %). Соотношение вкладов техногенных радионуклидов в индекс загрязнения воды и донных отложений Баренцева моря в настоящее время является постоянным.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Кобзарь А. И. *Прикладная математическая статистика для инженеров и научных работников*. Москва : Физматлит, 2006. 816 с. [Kobzar A. I. *Prikladnaya matematicheskaya statistika dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov*. Moscow : Fizmatlit, 2006, 816 p. (in Russ.)]
2. *Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки* : рекомендации Р 52.18.820-2015 / Росгидромет. Обнинск : ФГБУ «НПО «Тайфун», 2015. 64 с. [*Otsenka radiatsionno-ekologicheskogo vozdeystviya na ob"ekty prirodnoi sredy po dannym monitoringa radiatsionnoi obstanovki* : rekomendatsii R 52.18.820-2015 / Rosgidromet. Obninsk : FGBU "NPO "Taifun", 2015, 64 p. (in Russ.)]
3. *Порядок расчёта контрольных уровней содержания радионуклидов в морских водах* : рекомендации Р-52.18.852-2016 / Росгидромет. Обнинск : ФГБУ «НПО «Тайфун», 2016. 28 с. [*Poryadok rascheta kontrol'nykh urovnei sodержaniya radionuklidov v morskikh vodakh* : rekomendatsii R-52.18.852-2016 / Rosgidromet. Obninsk : FGBU "NPO "Taifun", 2016, 28 p. (in Russ.)]
4. Саркисов А. А., Сивинцев Ю. В., Высоцкий В. Л., Никитин В. С. *Атомное наследие холодной войны на дне Арктики. Радиоэкологические и технико-экономические проблемы радиационной реабилитации морей*. Москва : ИБРАЭ РАН, 2015. 699 с. [Sarkisov A. A., Sivintsev Yu. V., Vysotsky V. L., Nikitin V. S. *Atomnoe nasledie kholodnoi voyny na dne Arktiki. Radioekologicheskie i tekhniko-ekonomicheskie problemy radiatsionnoi reabilitatsii morei*. Moscow : IBRAE RAN, 2015, 699 p. (in Russ.)]
5. Сивинцев Ю. В., Вакуловский С. М., Васильев А. П., Высоцкий В. Л., Губин А. Т., Данилян В. А., Кобзев В. И., Крышев И. И., Лавковский С. А., Мазокин В. А., Никитин А. И., Петров О. И., Пологих Б. Г., Скорик Ю. И. *Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию. Радиоэкологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря («Белая книга – 2000»)*. Москва : ИздАТ, 2005. 624 с. [Sivintsev Yu. V., Vakulovsky S. M., Vasilev A. P., Vysotsky V. L., Gubin A. T., Danilyan V. A., Kobzev V. I., Kryshev I. I., Lavkovsky S. A., Mazokin V. A., Nikitin A. I., Petrov O. I., Pologikh B. G., Skorik Yu. I. *Tekhnogennye radionuklidy v moryakh, omyvayushchikh Rossiyu. Radioekologicheskie posledstviya udaleniya radioaktivnykh otkhodov v arkticheskie i dal'nevostochnye morya («Belaya kniga – 2000»)*. Moscow : IzdAT, 2005, 624 p. (in Russ.)]
6. Brown J., Børretzen P., Dowdall M., Sazykina T., Kryshev I. The derivation of transfer parameters in the assessment of radiological impacts on Arctic marine biota. *Arctic*, 2004,

- vol. 57, no. 3, pp. 279–289. <http://dx.doi.org/10.14430/arctic505>
7. Gwynn J. P., Nikitin A. I., Shershakov V. M., Heldal H. E., Lind B., Teien H.-C., Lind O. C., Sidhu R. S., Bakke G., Kazennov A., Grishin D., Fedorova A., Blinova O., Sværen I., Liebig P. L., Salbu B., Wendell C. C., Strålberg E., Valetova N., Petrenko G., Katrich I., Logoyda I., Osvath I., Levy I., Bartocci J., Pham M. K., Sam A., Nies H., Rudjord A. L. Main results of the 2012 joint Norwegian–Russian expedition to the dumping sites of the nuclear submarine K-27 and solid radioactive waste in Stepovogo Fjord, Novaya Zemlya. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, vol. 151, pt. 2, pp. 417–426. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.02.003>
 8. ICRP Publication 108. Environmental protection: The concept and use of reference animals and plants. *Annals of the ICRP*, 2008, vol. 38, nos 4–6, 242 p.
 9. ICRP Publication 124. Protection of the environment under different exposure situations. *Annals of the ICRP*, 2014, vol. 43, no. 1, 58 p.
 10. ICRP Publication 136. Dose coefficients for non-human biota environmentally exposed to radiation. *Annals of the ICRP*, 2017, vol. 46, no. 2, 136 p.
 11. Jensen L. K., Steenhuisen F., Standing W., Chen J., Leppanen A.-P., Nikitin A. I., Kryshev A. I., Gudnason K., Gwynn J., Stocki T., Joensen H. P. Monitoring of radioactivity in the Arctic. In: *AMAP Assessment 2015: Radioactivity in the Arctic*. Oslo, Norway : AMAP, 2016, pp. 35–57.
 12. Kryshev A. I., Sazykina T. G. Comparative analysis of doses to aquatic biota in water bodies impacted by radioactive contamination. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2012, vol. 108, pp. 9–14. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2011.07.013>
 13. Kryshev A. I., Sazykina T. G., Katkova M. N., Buryakova A. A., Kryshev I. I. Modelling the radioactive contamination of commercial fish species in the Barents Sea following a hypothetical short-term release to the Stepovogo Bay of Novaya Zemlya. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2022, vol. 244–245, art. no. 106825 (9 p.). <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2022.106825>
 14. Kryshev I. I., Sazykina T. G., Strand P., Brown J. E. Concentration factors of radionuclides in arctic marine biota. In: *Proceedings From the 5th International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic and Antarctic*, St. Petersburg, 16–20 June, 2002. Østerås : NRPA, 2002, pp. 322–325.
 15. Sazykina T. G., Kryshev A. I. Manifestation of radiation effects in cold environment: Data review and modeling. *Radiation and Environmental Biophysics*, 2011, vol. 50, iss. 1, pp. 105–114. <https://doi.org/10.1007/s00411-010-0336-7>
 16. Sazykina T. G., Kryshev A. I. Lower thresholds for lifetime health effects in mammals from high-LET radiation – Comparison with chronic low-LET radiation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, vol. 165, pp. 227–242. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.10.013>
 17. *Sediment Distribution Coefficients and Concentration Factors for Biota in the Marine Environment*. Vienna : IAEA, 2004, 95 p. (IAEA Technical Reports Series ; no. 422).

DETERMINATION OF CONTROL LEVELS OF RADIONUCLIDES ENSURING ACCEPTABLE ENVIRONMENTAL RISK IN THE BARENTS SEA WATER AND BOTTOM SEDIMENTS

N. A. Rosnovskaya, A. I. Kryshev, and I. I. Kryshev

Research and Production Association “Typhoon”, Obninsk, Russian Federation

E-mail: rosnovskaya@rpatyphoon.ru

To assess the radioecological situation, criteria were developed ensuring acceptable environmental risk – control levels of radionuclides in the components of the natural ecosystem. The method was applied to evaluate the control levels of technogenic radionuclides in the Barents Sea water and bottom sediments. If these levels are not exceeded, marine biota is considered protected from radioactive contamination. Local concentration factors of ^{137}Cs , ^{90}Sr , and ^{239}Pu in the Barents Sea biota

were estimated using the data of long-term observations. Moreover, the reference organisms were selected – a fish (cod), mollusc (mussel), aquatic plant (fucus), and marine mammal (harp seal). The values of ^{137}Cs , ^{239}Pu , and ^{90}Sr concentration factors were, respectively, as follows ($\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$): in fish, 93, 262, and 12; in molluscs, 51, 1,180, and 21; in aquatic plants, 69, 732, and 19; and in marine mammals, 63, 222, and 14. The values of the water–sediment distribution coefficients of ^{137}Cs , ^{239}Pu , and ^{90}Sr were 426, 189,600, and 443 $\text{L}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. For most radionuclides and the reference organisms from the Barents Sea, the values of radionuclide concentration differ from the global average reference values. For the period of 1992–2020, there is no pronounced temporal trend for the concentration factors of all technogenic radionuclides in the Barents Sea fish; this indicates the establishment of equilibrium in the distribution of radioactivity between the components of the Arctic marine ecosystem. The control levels of radionuclides were as follows: in the Barents Sea water ($\text{Bq}\cdot\text{L}^{-1}$), 115 for ^{137}Cs , 439 for ^{90}Sr , and 0.124 for $^{239,240}\text{Pu}$; in the Barents Sea bottom sediments ($\text{kBq}\cdot\text{kg}^{-1}$ fresh weight), 48.9 for ^{137}Cs , 194 for ^{90}Sr , and 23.6 for $^{239,240}\text{Pu}$. The contamination index for both water and bottom sediments of the Barents Sea was calculated using the monitoring data and reference levels. In 2006–2020, its values were several orders of magnitude lower than 1 and did not tend to increase or decrease. In terms of marine biota protection, the main contributor to the contamination index for the Barents Sea water is $^{239,240}\text{Pu}$ (up to 75 %) while the main contributor to the contamination index for the Barents Sea bottom sediments is ^{137}Cs (up to 90 %). To date, the ratio of the contributions of technogenic radionuclides to the contamination index for the Barents Sea water and bottom sediments is stable.

Keywords: Arctic, Barents Sea, water, bottom sediments, biota, control level, concentration factor, distribution coefficient, radionuclide