

УДК 551(268.4)+504:574(546.027)

## КОНЦЕНТРАЦИЯ ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОИЗОТОПОВ В БИОТЕ АРКТИЧЕСКОГО ШЕЛЬФА В СОВРЕМЕННЫХ УСЛОВИЯХ (2013–2018 гг.)

© 2020 г. Академик РАН Г. Г. Матишов<sup>1,2</sup>, Г. В. Ильин<sup>1</sup>, И. С. Усягина<sup>1,\*</sup>,  
Д. А. Валуйская<sup>1</sup>, Е. Э. Кириллова<sup>2</sup>

Поступило 20.12.2019 г.

После доработки 27.05.2020 г.

Принято к публикации 28.05.2020 г.

В работе анализируются данные по концентрации и динамике  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в морских организмах на шельфе Арктики в современных условиях (2013–2018 гг.). Показано, что радиационное загрязнение биоты низкое и не представляет опасности для человека. На примере динамики радионуклидного загрязнения макрофитов и рыб сделано предположение о существовании этапов в процессах самоочищения биотической компоненты экосистемы, определенных сменой поколений в популяциях гидробионтов. Наиболее чувствительным к радиационному загрязнению среды и наиболее изученным компонентом морской биоты являются рыбы. В изучении современного радиоактивного загрязнения арктических морей большее внимание следует уделять локальным акваториям, где потенциально возможно повышение концентрации изотопов в результате эпизодических утечек радиоактивных материалов.

*Ключевые слова:* техногенные радионуклиды, гидробионты, макрофиты, зообентос, морские беспозвоночные

DOI: 10.31857/S2686739720090133

Во второй половине XX века среда обитания морских организмов на шельфе Арктики испытывала существенное загрязнение техногенными радионуклидами. Радиоактивные выпадения появились после ядерных испытаний в воздушной и морской среде, сбросов в море радиоактивных отходов, переноса их морскими течениями и стоками сибирских рек. Загрязнение Баренцева моря в 1950–1990 гг. в основном определялось переносом стоков западноевропейских заводов “Селлафилд” и “Ла-Хаг”. Кроме того, в губах Кольского, Мотовского, Святоносского заливов были сконцентрированы опасные радиационные объекты – локальные источники радионуклидов. На загрязнение Карского моря большое влияние оказывали сбросы радиохимических комбинатов “Маяк” и “Томск-7”. Захоронения радиоактивных материалов в заливах Новой Земли – Абросимова, Степового, Цивольки – рассматривались как локальные источники загрязнения. В XXI веке происходит сокращение сбросов и спад концентраций техногенных изотопов в среде. Вместе с тем

современные инциденты на атомных станциях (АЭС “Фукусима-1”), атомных подводных лодках ВМФ РФ (“Комсомолец”, 1989 г.; “Курск”, 2001 г.; АС-12 “Лошарик”, 2019 г.), деятельность атомного флота и плавучих атомных электростанций требуют проведения регулярных радиоэкологических исследований в морях Северного Ледовитого океана.

Индикаторами радиоактивного загрязнения морской среды от локальных источников считаются техногенные изотопы  $^{134}\text{Cs}$ ,  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ,  $^{239,240}\text{Pu}$  и другие в концентрации, превышающей глобальный окружающий фон. Но более актуально и показательно накопление этих радионуклидов в гидробионтах: макрофитах, зообентосе и рыбах [1, 2], многие из которых употребляются в пищу. Согласно СанПин 2.3.2.1078-01, допустимое содержание  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в рыбных продуктах не должно превышать 130 Бк/кг и 100 Бк/кг соответственно. Целью работы был анализ новых данных (2013–2018 гг.) по содержанию  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в гидробионтах арктического шельфа на фоне долговременной динамики загрязнения биоты.

<sup>1</sup> Мурманский морской биологический институт  
Российской академии наук, Мурманск, Россия

<sup>2</sup> Федеральный исследовательский центр  
Южный научный центр Российской академии наук,  
Ростов-на-Дону, Россия

\*E-mail: iri70299602@yandex.ru

### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Анализируются данные 2013–2018 гг. по концентрации  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в морских организмах Белого, Баренцева, Карского, Лаптевых и Восточ-

но-Сибирского морей. Сбор образцов выполнялся стандартным оборудованием в соответствии с методиками МАГАТЭ. Пробы прибрежной биоты — макрофитов и мидий, отбирали на литорали во время сизигийного отлива. Отбор донных беспозвоночных проводили в ходе научных экспедиций с борта судна нис “Дальние Зеленцы” с помощью драгирования тралом Сигсби. Вылов рыбы осуществлен тралением с помощью промысловых донного и пелагического тралов. Видовая идентификация биологических объектов выполнена на борту судна специалистами соответствующего профиля. Для анализа были отобраны характерные для каждого моря виды. Загрязнение водорослей-макрофитов исследовали в прибрежье Белого и Баренцева морей, в том числе в губах, где расположены объекты инфраструктуры атомного флота. Рыб отбирали только в Баренцевом и Карском морях.

Радиометрический анализ проб выполнен в лаборатории Мурманского морского биологического института. Активность  $^{137}\text{Cs}$  измерена в счетных образцах на спектрометрах  $\gamma$ -излучения “InSpector-2000”,  $\gamma$ - и рентгеновского излучения “b13237” (фирмы “Canberra”, США). Спектры проанализированы с помощью программного обеспечения Genie-2000. Удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  в пробах определена радиохимическим методом по активности равновесного  $^{90}\text{Y}$  в счетных образцах. Измерения выполнены на установке “LS-6500” (фирмы “Beckman Coulter” США).

### МАКРОФИТЫ

Максимальное накопление радионуклидов в макрофитах происходило в 1980-х годах в результате загрязнения вод Баренцева, Белого, Печорского и Карского морей выбросами заводов “Селлафилда” и Чернобыльской АЭС. Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в водорослях Баренцева моря была повышена до 7–10 Бк/кг сухой массы [3]. Но уже в 1990-х годах было отмечено снижение концентрации радионуклидов в характерных для Кольского прибрежья фукусах и ламинарии. Содержание  $^{137}\text{Cs}$  в них снизилось до 0.4–5.0 Бк/кг, а  $^{90}\text{Sr}$  — до 0.3–3.0 Бк/кг. В губах южной части новоземельского прибрежья и острова Вайгач водоросли содержали  $^{137}\text{Cs}$  0.5–2.5 Бк/кг. Исключение составляли отдельные губы Кольского и Мотовского заливов, где расположены объекты атомного флота — Оленья, Пала, Сайда Западная Лица, Андреева. В этих губах макрофиты имели повышенное содержание  $^{137}\text{Cs}$ , местами возраставшее до 20–46 Бк/кг, а в спектре были обнаружены индикаторы местной утечки изотопов:  $^{134}\text{Cs}$  — 1.2 Бк/кг,  $^{60}\text{Co}$  — 1.6 Бк/кг и  $^{152}\text{Eu}$  — 4.6 Бк/кг. К примеру, на акватории базы “Атомфлота” ламинария аккумулировала

5–13 Бк/кг  $^{137}\text{Cs}$ , а литоральные фукусы — 0.2–1.1 Бк/кг [1].

В Карском море в водорослях, произрастающих в новоземельском заливе Абросимова, содержание  $^{137}\text{Cs}$  также было низким и составляло в фукусах 2–3 Бк/кг, а в ламинарии — около 1.5 Бк/кг [4].

Радионуклиды  $^{239,240}\text{Pu}$  в период 1980–1990 гг. содержались в водорослях Баренцева и Карского морей в концентрации 0.02–0.3 Бк/кг.

Спустя десятилетие, в 2010–2013 гг. в макрофитах еще сохранялся такой же уровень загрязнения. В частности, вдоль Мурманского побережья содержание  $^{137}\text{Cs}$  в ламинариях и фукусах составило 0.4–2.3 Бк/кг сухой массы. В водорослях, собранных в других районах, в том числе в беломорском прибрежье Кольского полуострова, концентрация  $^{137}\text{Cs}$  варьировала от 0.2 до 1.5 Бк/кг, а  $^{90}\text{Sr}$  — от 0.4 до 4.1 Бк/кг [5].

По исследованиям 2014–2018 гг. можно отметить новый период снижения удельной активности радионуклидов в микроводорослях (табл. 1).

В губах Чупа (Кандалакшский залив), Зеленецкой, Териберской, Ура, Печенга, в Кольском заливе макрофиты содержат от 0.2 до 0.8 Бк/кг  $^{137}\text{Cs}$  и 0.1–1.0 Бк/кг  $^{90}\text{Sr}$ . Исключение составляет загрязненная губа Андреева (Мотовский залив), где расположено хранилище радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива. Талломы ламинарии из разных частей литорали этой губы содержат от 1–2 Бк/кг до 12 Бк/кг сухой массы  $^{137}\text{Cs}$  и от 1–5 до 35 Бк/кг  $^{90}\text{Sr}$ . Локальное поступление радионуклидов в эту губу вызвано аварийной утечкой радиоактивных отходов из хранилища, произошедшей в 1982 г.

### МОРСКИЕ БЕСПОЗВОНОЧНЫЕ

Уровень накопления радионуклидов в организмах морских беспозвоночных — важный индикатор качества водной среды. Однако в литературе недостаточно данных о радиоактивном загрязнении бентоса в период испытаний ядерного оружия в 1950–1960 гг. В 1990-е годы в Баренцевом море в донных беспозвоночных обнаруживали  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{90}\text{Sr}$  и  $^{239,240}\text{Pu}$ . В частности, северная креветка содержала в тканях от 1.6 до 7.9 Бк/кг сырой массы  $^{137}\text{Cs}$ , а морской еж — 1.8 Бк/кг. К началу 2000-х годов концентрация радиоцезия в зообентосе снизилась. В большей части проб (около 200 измерений) его удельная активность была ниже достоверно определяемой величины (<0.1 Бк/кг). По данным норвежских исследователей, лишь в одном образце из 32 проб баренцевоморской креветки был обнаружен  $^{137}\text{Cs}$  в концентрации 0.2 Бк/кг [6]. По данным ММБИ, в морских звездах (губа Оленья) этот изотоп содержался в коли-

**Таблица 1.** Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  и  $^{90}\text{Sr}$  в биоте арктических морей (Бк/кг сырой массы), 2013–2018 гг.

Море	Группа гидробионтов	Биологический вид	Радионуклиды	
			$^{137}\text{Cs}$	$^{90}\text{Sr}$
Баренцево море	рыбы	треска	0.15–0.7	<0.01–1.2
		пикша, сайда	0.1–0.3	<0.01–1.2
		камбала-ерш	0.07–0.25	0.02–0.25
	бентос	морские звезды	<0.2–0.25	0.01–0.05
		мидии (мягкие ткани)	<0.2–1.1	0.13
		морские губки	<0.2–0.25	0.01
		крабы	<0.2–0.25	0.01–0.04
	*макрофиты	фукусы	<0.2–1.0	0.5–1.5
		аскофиллум	<0.2–1.0	0.4
ламинария		0.2–0.8	0.1–1.0	
Карское море	рыбы	навага	<0.2	–
	бентос	морские губки	0.5–2.0	–
		морские звезды	0.2–1.8	1.1–1.4
		горгонарии	0.2–1.3	0.1–1.1
		морские перья (мягкие ткани)	0.6–0.7	0.25–1.6
		равноногие ракообразные	0.2–0.3	0.5–2.5
море Лаптевых	бентос	равноногие ракообразные	<0.2–0.3	0.8–1.4
		морские лилии (мягкие ткани)	0.2	0.8
Восточно-Сибирское море	бентос	равноногие ракообразные (морской таракан)	<0.2–0.3	0.2–0.34
		морские звезды	–	0.1–0.35
		горгонарии	0.1–1.0	0.1
Белое море	бентос	мидии, мягкие ткани	<0.2–0.2	<0.2
	*макрофиты	фукусы	<0.2–0.8	–
		аскофиллум	0.1	–

\* – Удельная активность радионуклидов в водорослях-макрофитах приведена в Бк/кг сухой массы.

честве 0.3 Бк/кг, а в мягких тканях моллюсков – мидии и литорины из различных губ Кольского побережья, – в количестве 0.2–0.5 Бк/кг сырой массы (рис. 1). Удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  в раковинах мидий варьировала от 2.5 Бк/кг у особей, обитавших в губе Ура (Мотовский залив), до 0.64 Бк/кг у особей, обитавших в средней части Кольского залива [1].

В Карском море, в Восточно-Новоземельской впадине и на мелководье ямальского шельфа (рис. 1) разные виды зообентоса: амфиподы, полихеты, морские звезды, офиуры содержали  $^{137}\text{Cs}$ , концентрация которого варьировала в диапазоне 0.2–2.0 Бк/кг. Концентрация  $^{90}\text{Sr}$  в них также составляла от 0.2 до 2.5 Бк/кг. В указанном интервале величин более высокая удельная активность отмечена в губках – фильтраторах морской воды и голотуриях – типичных грунтофагах. В эпизо-

дах в тканях голотурии обнаруживалось до 6.8 Бк/кг  $^{137}\text{Cs}$ .

Современный (2013–2018 гг.) уровень загрязнения донной фауны еще более снизился. Гама-русы и моллюски (мидии и литорины), обитающие в губах баренцевоморского побережья (Терриберская, Зеленецкая, Йоканьга и др.) и Кольского залива (мыс Абрам, губы Белокаменная, Сайда, Пала), содержат в тканях не более 0.1–0.4 Бк/кг  $^{137}\text{Cs}$ . Но вблизи источников загрязнения, например, в губе Андреева, современная концентрация  $^{137}\text{Cs}$  в мягких тканях мидий остается повышенной и по данным 2014 г. составляет 9.3 Бк/кг, а  $^{90}\text{Sr}$  – 0.1 Бк/кг.

### МОРСКИЕ РЫБЫ

В 1960–1990 гг. наиболее детально исследовалось загрязнение важных промысловых рыб:

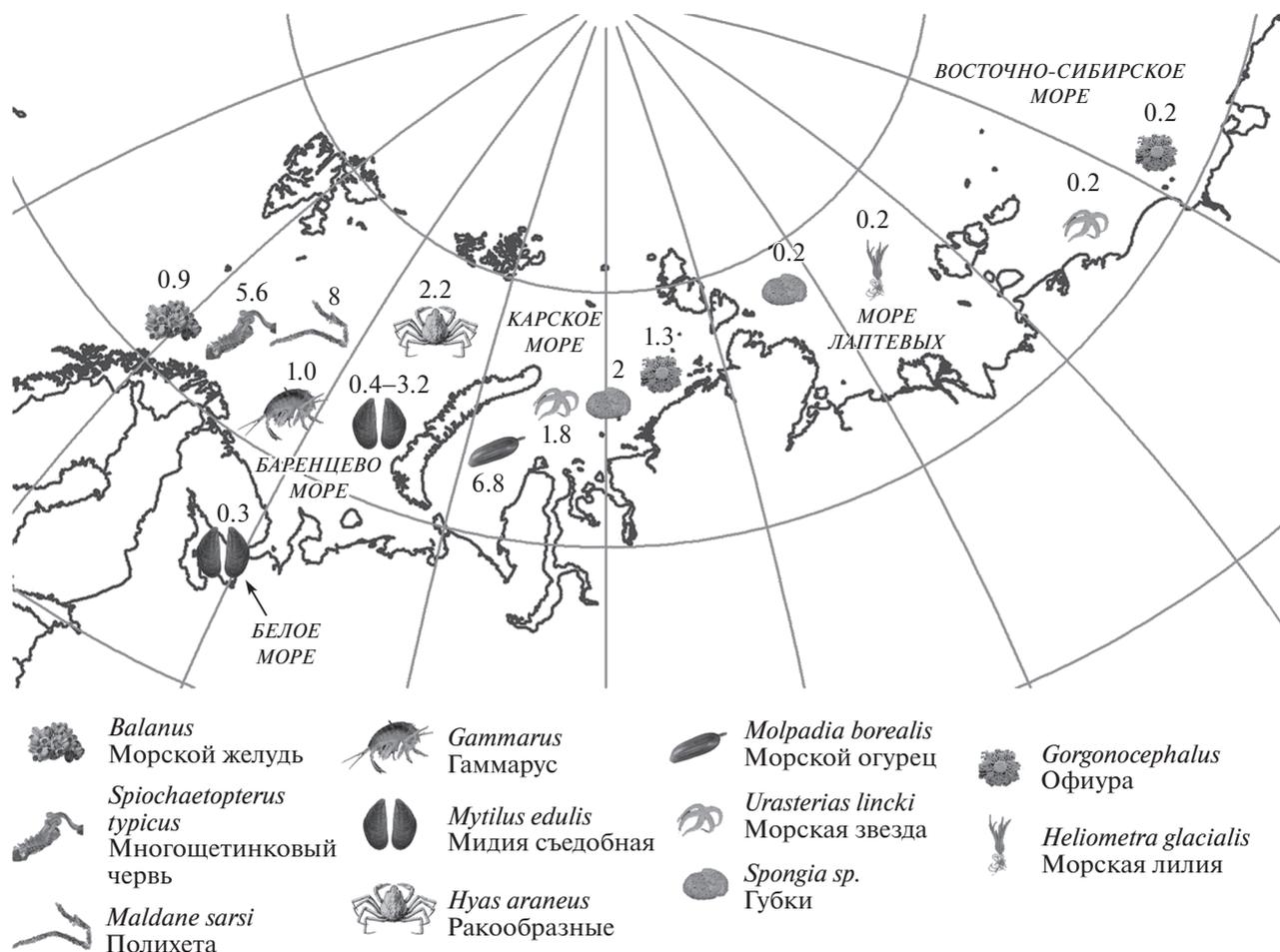


Рис. 1. Удельная активность  $^{137}\text{Cs}$  в донной фауне арктического шельфа (2000–2018 гг.).

трески, сайды, пикши. В исследованиях [2, 7, 8] было показано, что после новоземельских ядерных испытаний суммарная альфа- и бета-актив-

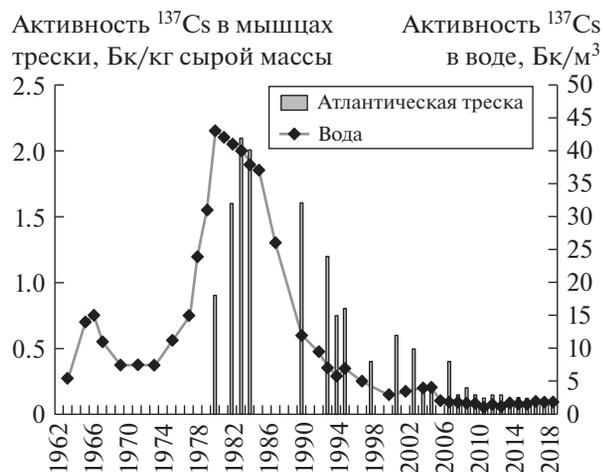


Рис. 2. Многолетняя динамика удельной активности  $^{137}\text{Cs}$  в мышцах трески и водной массе Баренцева моря по данным ММБИ.

ность в рыбах снижалась от 90 Бк/кг сырой массы в 1963 г. до 10 Бк/кг — в 1968 г. и до 1 Бк/кг — в 1979 г.

На рис. 2 показана общая многолетняя динамика содержания гамма-излучающего  $^{137}\text{Cs}$  в мышечной ткани рыб на примере трески.

Следующий после интенсивных ядерных испытаний пик радионуклидного загрязнения рыб пришелся на 1980-е годы вместе с пиком загрязнения вод Норвежского и Баренцева морей. Это повышение было сопряжено с колебаниями стоков комбината “Селлафилд”. Однако содержание  $^{137}\text{Cs}$  в рыбах не поднималось выше 3.5 Бк/кг [2]. Из анализа осредненных данных следует, что динамика радиационного загрязнения рыб приобрела устойчивую тенденцию к снижению в начале 1990-х годов. Изменение концентраций радионуклидов в рыбах происходило с задержкой относительно снижения загрязненности воды приблизительно на 3–5 лет. Такая задержка вызвана, по-видимому, биологическими, популяционными факторами, главным из которых является смена поколений в рыбных популяциях. Рыбная молодь не попадает в промысловые уловы. К концу

2010-х годов линия тренда изменчивости концентраций вышла на плато и отображала минимальную концентрацию  $^{137}\text{Cs}$  в треске, которая на протяжении последнего десятилетия варьирует от 0.1 до 0.3 Бк/кг. Удельная активность  $^{90}\text{Sr}$  в мышечной массе в эти годы варьировала от следовых значений (<0.01 Бк/кг) до 1.2 Бк/кг. Это на два порядка меньше предельно допустимой концентрации, установленной СанПин (2.3.2.1078-01) для пищевой рыбной продукции.

В 2018 г. рыбы основных промысловых видов — треска, пикша, сайда, камбала-ерш в прибрежной зоне Баренцева моря, включая Кольский залив, и в Печорском море, мало отличались по содержанию радионуклидов. В их мышцах содержание  $^{137}\text{Cs}$  составляло около 0.2 Бк/кг, а  $^{90}\text{Sr}$  — около 1.2 Бк/кг сырой массы.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, анализ водорослей-макрофитов, бентосных организмов и промысловых рыб, обитающих в современной обстановке в морях Полярного бассейна, позволяет заключить, что радиационное загрязнение биоты низкое и не представляет опасности для человека. На примере макроводорослей и рыб можно предположить, что в процессе очищения биотических сообществ от радионуклидного загрязнения в целом имеет место этапность, связанная со сменой поколений в популяциях. Наиболее чувствительным к радиационному загрязнению среды и наиболее изученным компонентом морской биоты являются рыбы. Основная роль в формировании современного радиационного фона в морях Северного Ледовитого океана принадлежит локальным источникам радиации и трансграничной циркуляции техногенных радионуклидов. В специальных исследованиях нуждаются локальные акватории,

где потенциально возможно повышение их концентрации в результате утечек радиоактивных материалов. Зависимости содержания радионуклидов в гидробионтах и воде или в донных отложениях в районах моря различной загрязненности требуют экспериментальной проверки.

### ИСТОЧНИКИ ФИНАНСИРОВАНИЯ

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60249 “Радиоактивное загрязнение и вторичные источники антропогенных изотопов в морях Северного Ледовитого океана на рубеже XX–XXI веков”, а также в рамках темы НИР ММБИ КНЦ РАН № госрегистрации АААА–А18–118030690062–0.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Matishov D.G., Matishov G.G.* Radioecology in the Northern European Seas. B.: Springer, 2004. 335 p.
2. *Foyn L., Svaren I.* // Environmental Radioactivity in the Arctic / Ed. P. Strand, A. Cooke. Ostersund. 1995. P. 215–220.
3. *Strand P., Nikitin A., Rudjord A.L., et al.* // J. Environ. Radioactivity. 1994. № 25. P. 99–112.
4. *Strand P.* Radioactivity, AMAP, Assessment Report: Arctic Pollution Issues, Oslo. 1998. P. 526–552.
5. *Матушов Г.Г., Матушов Д.Г., Усягина И.С. и др.* // ДАН. 2014. Т. 458. № 4. С. 473–479.
6. *Sickel M.A., Selnas T.D., Christensen G.C., et al.* Radioactivity in the Marine Environment // Rep. from the National surveillance program. Strallvern Rapport. 1995. P. 23–24.
7. Arctic Pollution Issues: A State of the Arctic Environment Report. AMAP Arctic, Oslo: Monitoring and Assessment Programme. 1997. 188 p.
8. *Kershaw P.J., Baxter A.J.* Deep-Sea Res P.(II): Top. Stud. // In Oceanography. 1995. 42 (6) P. 1413–1448.

## CURRENT LEVELS OF ARTIFICIAL RADIOISOTOPES IN BIOTA FROM THE ARCTIC CONTINENTAL SHELF (2013–2018)

Academician of the RAS G. G. Matishov<sup>a,b</sup>, V. G. Ilyin<sup>a</sup>, I. S. Usyagina<sup>a,#</sup>,  
D. A. Valuyskaya<sup>a</sup>, and E. E. Kirillova<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation

<sup>b</sup> Southern Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation

#E-mail: iri70299602@yandex.ru

The paper analyzes data on the concentration and dynamics of  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{90}\text{Sr}$  in marine organisms in modern conditions on the Arctic shelf (2013–2018). It is shown that the radiation pollution of the Arctic sea biota is low and poses no danger to humans. On the example of the dynamics of radionuclide contamination of macrophytes and fish, it is assumed that there are stages in the processes of self-purification of the biotic component of the ecosystem determined by the change of generations in the populations of hydrobionts. Fish are the most sensitive to radiation pollution and the most studied component of marine biota. In the study of modern radioactive contamination of the Arctic seas, greater attention should be paid to local waters, where the concentration of isotopes as a result of episodic leaks of radioactive materials is potentially increased.

*Keywords:* technogenic radionuclides, hydrobionts, macrophytes, zoobenthos, marine invertebrates