

Трансформация радиоактивного загрязнения донных отложений Калининградского залива в период 2011–2023 гг.

В статье представлены данные радиоэкологических исследований донных отложений в российской зоне Вислинского залива в 2011–2023 гг. По результатам исследований удельная активность ^{137}Cs в донных осадках залива находилась в диапазоне 3,9–165 Бк/м³. ^{137}Cs является основным техногенным радионуклидом, который вносит наибольший вклад в загрязнение акватории залива. Загрязнение донных отложений ^{137}Cs определяется перераспределением, в основном, постчернобыльских выпадений. Накопление ^{137}Cs зафиксировано в северной глубоководной части Приморской бухты. По данным наблюдений эффективный период полуснижения активности ^{137}Cs в отложениях залива 10,4–42 лет.

Содержание природных радионуклидов: ^{226}Ra – от 9,0 до 35,3; ^{232}Th – от 3,8 до 43,2; ^{40}K – от 227 до 715 Бк/кг. Удельная активность ЕРН в донных осадках залива не превышала 153 Бк/кг, что значительно ниже установленного безопасного уровня (370 Бк/кг), позволяющего обращение с ними без ограничений.

Установлены зависимости между содержанием ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th в донных отложениях залива с типом осадков.

Ключевые слова:

^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , донные отложения, Калининградский залив.

Т.А.Васюкевич,
Л.С.Нитиевская, М.Р.Ахатова
(Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО»
(«АтлантНИРО»), г. Калининград)

Авария на Чернобыльской АЭС в 1986 г. привела к радиоактивному загрязнению обширных территорий. Летучие изотопы цезия в значительном количестве распространились на огромные расстояния по всей Европе и были обнаружены в большинстве стран и в океанах Северного полушария [1]. Наиболее сильно пострадали области, находящиеся в непосредственной близости от ЧАЭС: северные районы Киевской и Житомирской областей Украины, Гомельская область Белоруссии и Брянская область России. Радиация задела некоторые значительные удаленные от места аварии регионы. Было отмечено повышенное содержание ^{137}Cs в арктических областях России, Норвегии, Финляндии и Швеции. Загрязнению подверглись некоторые районы Польши, Болгарии, Германии, Австрии, Англии. Плотность загрязнения

территории Калининградской области составила от 2 до 10 кБк/м² [2]. Согласно Государственному докладу «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Калининградской области в 2022 г.», с 2019 по 2021 гг. содержание ¹³⁷Cs в почве находилось в диапазоне 1,40–2,02 кБк/м². Там же указано, что на территории области отсутствуют радиационные аномалии и зоны техногенного радиоактивного загрязнения [3]. Однако донные отложения заливов, где аккумулировались многолетние стоки с водосборных территорий, оказались загрязнены значительно сильнее.

В данной работе представлены результаты многолетних радиологических исследований донных отложений Калининградского залива.

Изучение радиоактивности донных отложений водоема имеет важное значение при оценке качества среды обитания водных биоресурсов. Радиоактивное загрязнение донных отложений может оказывать существенное влияние на жизнедеятельность бентосных организмов, являющихся кормом рыб. Благодаря своей большой проникающей способности радионуклиды легко включаются в биологические процессы и, мигрируя по пищевым цепочкам, способствуют дополнительному облучению человека.

Радионуклиды, попадая в водную среду, сорбируются взвешьями и осаждаются, претерпевают радиоактивный распад, накапливаются водной биотой, в результате чего происходит самоочищение воды водоема. Однако аккумуляция радиоактивных элементов в донных отложениях, приводящая к самоочищению воды, при определенных условиях вызывает ее вторичное загрязнение. Этому способствует ветровое перемешивание, вовлекающее верхний слой донных отложений в водную массу; физико-химические, биологические и микробиологические процессы на границе вода–донные отложения [4].

В настоящее время радиоактивному загрязнению водных экосистем посвящено много исследовательских работ отечественных и зарубежных ученых [5-10]. Для Калининградского залива результаты радиологических исследований донных отложений публикуются впервые, что придает актуальность представленным материалам.

Калининградский залив занимает северо-восточную половину Вислинского залива – второго по величине крупнейшего мелководного бассейна лагунного типа, расположенного в юго-восточной части Балтийского моря. Это трансграничный водный объект, испытывающий большую антропогенную нагрузку. Естественным индикатором состояния водных экосистем и уровня техногенного влияния являются, в частности, донные отложения. Наибольший интерес представляет поверхностный слой донных отложений, его динамика и пространственное распределение загрязнителей.

Загрязнение водных объектов происходит не только во время непосредственного выпадения на акваторию, но и в значительной степени за счет длительного процесса смыва радионуклидов с поверхности водосборной территории.

Как активные аккумуляторы радионуклидов, поступающие с водосборов в течение длительного промежутка времени, они являются индикатором экологического состояния территории, своеобразным интегральным показателем уровня загрязненности. Исследование донных отложений позволяет проследить распространение и переотложение радиоактивных загрязнений, изучить динамику накопления загрязнений за длительный период времени.

Цель публикации – анализ результатов радиоэкологического мониторинга Калининградского залива, выполненного специалистами АтлантНИРО с 2011 по 2023 гг.

Материал и методика

Радиоэкологические исследования донных отложений проводились в Калининградском заливе – российской части Вислинского залива. В донных осадках изучалось содержание основных естественных радионуклидов (ЕРН), определяющих дозовую нагрузку на придонные организмы: калия-40 (^{40}K), радия-226 (^{226}Ra) и тория-232 (^{232}Th), а также техногенного долгоживущего цезия-137 (^{137}Cs), как наиболее значительного в радиационно-гигиеническом аспекте. Отбор проб производили по стандарту [11], используя дночерпатель Ван Вина, площадь захвата поверхности отложений – $0,25 \text{ м}^2$. Масса пробы составляла не менее 2 кг.

Экспедиционные исследования в Калининградском заливе выполнялись на т/х «Орленок», как правило, ежеквартально по схеме стандартных станций мониторинга (рис.1). Обследовались донные осадки отдельных участков по всей акватории водоема. Всего в 2011–2023 гг. в заливе выполнено 64 экспедиции, проанализировано 690 проб донных осадков залива.

Содержания ЕРН и ^{137}Cs в донных отложениях измеряли на спектрометрическом комплексе «Прогресс-БГ» (блок детектирования NaI(Tl) 63×63, программное обеспечение Прогресс 5.1) согласно МВИ 40090.ЗН700 [12]. Удельная активность радионуклидов в донных отложениях выражена в Бк/кг сухой массы. Относительная погрешность измерений составила 11–30%. Для средних значений полученных величин приведены доверительные интервалы (уровень значимости 0,05).

Результаты

Величины удельной активности радионуклидов в донных осадках Калининградского залива (табл.1) варьируют в широких пределах.

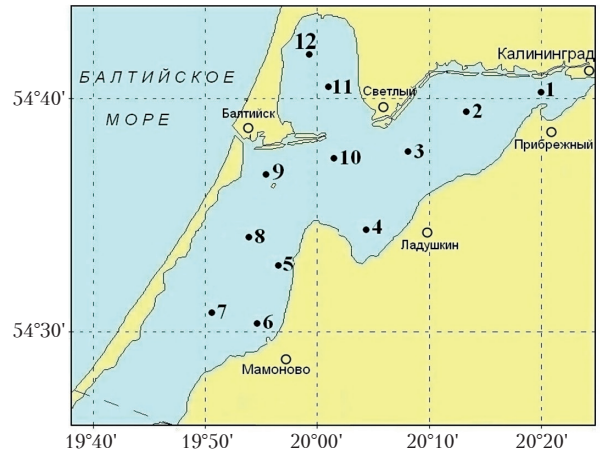


Рис.1. Станции отбора проб в Калининградском заливе.

Обсуждение

Значительная часть естественной радиоактивности грунтов, в т. ч. донных осадков, связана с радионуклидами, которые образуют радиоактивные семейства урана (родоначальник ^{238}U , период полураспада $T_{1/2} = 4,5 \cdot 10^9$ лет) и тория (родоначальник ^{232}Th , $T_{1/2} = 1,4 \cdot 10^{10}$ лет). Содержание ^{238}U , в цепочку распада которого входит ^{226}Ra с $T_{1/2} = 1,6 \cdot 10^3$ лет, в естественной смеси изотопов составляет 99,28%. Существенный вклад в естественную радиоактивность грунтов вносит долгоживущий радиоактивный изотоп ^{40}K ($T_{1/2} = 1,3 \cdot 10^9$ лет).

Калий в природе представлен тремя изотопами, из них радиоактивен только ^{40}K . Его содержание в естественной смеси изотопов всегда постоянно и составляет $0,01167 \pm 0,00004\%$ [5]. Калий является значимым элементом в минеральном обмене животных и растений, в том числе водных, и усваивается любым организмом без изменения изотопного состава.

Одним из приоритетных индикаторов былых ядерных испытаний является ^{137}Cs . Это продукт деления тяжелых ядер, который по степени радиотоксичности относится к группе В (среднетоксичные радионуклиды). Исключительно высокая подвижность ^{137}Cs в биохимических цепочках и длительность пребывания

Табл.1. Удельная активность донных отложений Калининградского залива в 2011–2023 гг.

Год	n	¹³⁷ Cs	²²⁶ Ra	²³² Th	⁴⁰ K
2011	35	6,5–149/82,7±32,2	11,5–34,6/22,8±5,2	8,8–30,6/19,2±6,2	227–676/540±90
2012	58	27,0–154/83,0±28,5	15,0–34,5/23,6±4,8	7,8–33,0/19,5±6,4	382–686/521±75
2013	52	30,8–148/85,5±28,2	17,9–32,3/24,9±3,9	6,8–34,9/20,4±6,3	292–715/550±89
2014	89	5,9–133/75,2±26,7	9,0–35,3/24,0±4,5	3,8–34,0/19,2±5,6	230–660/521±78
2015	46	29,5–150/72,8±28,0	15,7–35,0/22,5±4,3	9,8–33,0/18,9±5,4	360–660/521±68
2016	79	19,6–165/75,0±32,0	12,0–35,0/23,1±4,4	7,7–30,0/19,2 ±5,3	290–690/539±76
2017	35	18,1–142/66,8±28,4	10,7–35,0/23,3±5,4	5,5–27,0/17,1±5,2	300–670/491±82
2018	41	3,9–148/64,4±30,2	11,6–33,4/21,5±4,3	8,0–30,9/18,5±5,8	242–700/528±87
2019	73	29,0–137/66,1±25,1	13,5–35,2/22,3±3,8	8,8–33,3/18,8±5,4	375–714/532±71
2020	55	33,3–129/61,7±22,5	16,0–30,6/23,2±3,7	11,3–32,8/20,3±5,2	421–712/532±70
2021	36	23,5–130/65,6±27,7	16,2–31,2/23,1±3,9	8,5–43,2/18,7±6,3	369–678/524±72
2022	44	23,2–134/56,0±25,7	16,3–30,8/22,4±3,5	8,5–32,2/18,3±5,3	410–694/543±75
2023	47	19,5–149/55,4±25,3	12,9–32,2/22,2±4,1	8,0–28,9/18,1±5,2	305–659/528±76

в биосфере обуславливают повышенное внимание к исследованию поведения радионуклида в природных экосистемах [13].

Загрязнение Балтийского моря в результате аварии на Чернобыльской АЭС, в силу длительности и меняющейся интенсивности радиоактивных атмосферных выпадений, было неравномерным, что отражено на картах плотности выпадений ¹³⁷Cs на европейскую территорию [2]. Итоговое загрязнение поверхностных вод Балтийского моря в 1986–1988 гг. представлено в отчете МАГАТЭ [14].

В процессе аварийных выпадений в апреле–мае 1986 г. наибольшему загрязнению подверглись акватории Ботнического и центральной части Финского залива. В силу своих физических и химических особенностей, доминирующим в этом загрязнении оказался ¹³⁷Cs. Поступивший на поверхность моря радионуклид вследствие комплекса гидрологических процессов в дальнейшем практически равномерно перераспределится по всей акватории Балтийского моря.

С течением времени радиоактивное поверхностное загрязнение в результате смыва дождевыми и талыми водами переносится ручья-

ми и протоками в водоемы, где может аккумулироваться в донных отложениях.

В небольшой по глубине и объему вод Вислинский залив через широкий Балтийский пролив поступает морская вода. С открытием в 2022 г. судоходного канала на польской территории Вислинской косы появился дополнительный источник морской воды в заливе. Исходя из проектных размеров (глубина 5 м, ширина 40 м по дну и 80 м по поверхности), площадь поперечного сечения канала на порядок меньше площади поперечного сечения Балтийского пролива. Поступление речной воды происходит в основном из р. Преголя и из меньших по значимости рек: Прохладная, Нельма, Мамоновка и Ногат (правый рукав р. Вислы). Соленость залива изменяется в течение года и главным образом зависит от направления ветра. Приток морских вод является значимым фактором, определяющим сезонную и пространственную изменчивость уровня загрязнения. На уровень загрязнения воды залива существенное влияние оказывает подъем высокоактивных взвесей во время штормов.

Основным источником осадочного материала в Калининградском заливе являются

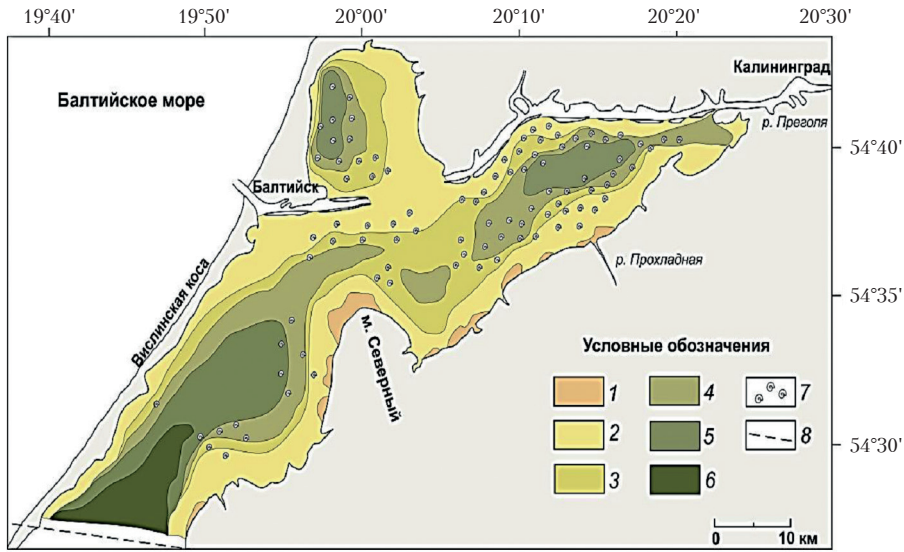


Рис.2. Карта поверхностного (0–7 см) слоя донных отложений Калининградского залива. 1 – валуно-галечный материал; 2 – песок; 3 – песок илистый; 4 – ил песчанистый; 5 – ил; 6 – ил глинистый; 7 – ракушечник; 8 – государственная граница.

твердые стоки рек и выносы, поступающие с морскими водами через Балтийский пролив.

Донные осадки залива представлены преимущественно илами, глинистыми и песчаными, и песками, во многом с примесью ила [15] (рис.2).

В табл.2 представлены результаты определения удельной активности ЕРН в донных отложениях Калининградского залива в 2011–2023 гг.

Распределение ЕРН в поверхностном слое донных отложений Калининградского залива определяется типом донных осадков. Минимальное содержание радиоактивного ^{40}K 227–290 Бк/кг характерно для донных осадений песчаных участков залива ст. 10 на входе в Приморскую бухту и ст. 11 в южной части Приморской бухты. Максимальные значения активности ^{40}K 663–715 Бк/кг определены в донных отложениях северной

Табл.2. Удельная активность ЕРН в донных отложениях Калининградского залива в 2011–2023 гг.

ЕРН	№ ст.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
	<i>n</i>	62	60	59	52	55	54	60	57	70	57	58	46
^{226}Ra	min-max	17,4–23,3	19,5–32,4	17,4–32,3	15,3–32,2	12,9–35,0	20,6–35,2	19,4–35,3	16,9–32,6	14,4–27,1	12,0–30,5	9,0–25,5	20,0–35,0
	$\bar{x} \pm S$	23,3±3,2	24,7±2,6	23,5±3,0	22,1±2,9	25,4±4,0	28,7±3,1	26,0±3,0	22,4±3,9	20,3±2,8	18,6±3,0	17,9±2,9	25,1±3,6
^{232}Th	min-max	14,9–24,8	14,5–25,6	9,9–28,3	15,5–23,6	9,0–31,6	18,2–43,2	18,3–32,6	10,1–32,6	8,8–22,7	7,2–17,8	3,8–18,5	15,2–24,7
	$\bar{x} \pm S$	19,3±2,2	20,9±2,4	19,4±2,7	18,8±1,7	22,6±3,6	28,8±3,7	24,9±3,0	16,8±4,4	15,3±3,4	11,2±2,0	11,6±2,7	20,5±2,1
^{40}K	min-max	375–594	401–650	420–626	410–593	305–689	520–715	510–690	423–654	382–598	290–482	227–550	469–663
	$\bar{x} \pm S$	500±43	547±56	552±42	501±45	575±60	640±41	591±39	506±54	509±37	419±37	438±69	594±43

Примечание: \bar{x} – среднее арифметическое, S – стандартное отклонение, min-max – пределы колебаний, n – количество образцов.

Табл.3. Удельная активность ¹³⁷Cs в донных отложениях Калининградского залива в 2011–2023 гг.

Год	№ ст.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2011	min-max	56,4–93,7	81,4–98,9	47,4–78,7	61,6–68,2	70,2–81,7	106–126	96,1–136,3	70,8–149	44,4–88,8	31,3–50,8	6,5–101,6	-
	$x \pm S$	78,4±19,5	87,6±9,8	60,3±16,4	64,9±4,7	76,8±5,9	119,3±11,5	120,7±18,4	109,6±32,8	73,9±20,1	41,5±9,9	52,2±47,7	-
	n	3	3	3	2	3	3	3	4	4	4	3	3
2012	min-max	56,3–99,8	72,1–114	48,8–92,4	54,6–76,4	67–87,3	75,8–122	48,1–131	59,2–129	45–154	34,5–40,9	27–59,9	86,1–132
	$x \pm S$	79,6±16,1	85,4±19,3	73,6±22,4	65,3±10,9	78,0±8,4	101,1±23,4	91,6±30,0	105,6±31,4	88,4±31,1	37,0±3,4	49,9±15,5	109,8±23,9
	n	6	4	3	3	4	4	6	4	13	3	4	4
2013	min-max	52,3–82,6	71,1–117	73,7–111	67,1–74,6	88,3–113	84,6–124,5	78,2–112	62–131	53–115	30,8–45,7	35–63,8	90,7–148
	$x \pm S$	70,3±11,3	93,6±22,8	93,1±15,8	69,6±3,4	101,5±10,2	105,6±16,9	96,2±13,5	102,9±30,4	83,8±25,0	37,4±6,2	48,4±15,1	123,9±24,2
	n	5	4	5	4	4	4	5	4	5	4	4	4
2014	min-max	51–72	6–102	52–104	64–72	42–82	99–115	57–98	65–133	52–99	27,3–37,6	5,9–63	101–132
	$x \pm S$	64,3±7,5	79,9±16,4	70,1±16,4	67,3±2,7	67,6±13,7	105,9±6,6	76,9±13,5	104,1±32,3	77,4±20,9	32,3±3,4	51,5±18,8	114,6±11,8
	n	8	8	8	6	7	7	7	7	8	8	8	7
2015	min-max	46,3–82	63–109	60,3–82	53,2–70	55,4–71	55,8–129	68–96	67–77	51,6–109	29,5–32,4	46,0–55,6	132–150
	$x \pm S$	67,6±15,5	82,3±21,3	68,4±9,3	63,7±8,2	65,6±8,1	97,6±30,9	80,3±14,3	71,3±4,3	76,5±26,6	30,6±1,3	52,0±4,1	141,0±9,0
	n	4	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	3
2016	min-max	49–93	61–88	49,5–66	57–75	56–84	104–118	78–91	56–116	46–121	19,6–32,9	42,6–82	136–165
	$x \pm S$	60,4±14,7	70,7±10,3	55,8±5,5	64,7±6,7	69,4±9,4	109,5±5,6	83,6±4,6	79,7±25,0	67,7±27,7	28,7±4,6	55,7±13,7	149,1±12,7
	n	7	7	7	6	7	6	7	6	7	6	6	7
2017	min-max	35,6–60,0	57–82	44,6–56,6	57,8–63,9	62–76	82–124	70–98	54–79	43,8–75	25,0–33,0	18,1–48,6	131–142
	$x \pm S$	51,2±13,5	65,7±14,2	50,7±6,0	61,2±3,1	69,7±7,1	105,7±21,5	86,3±14,6	67,0±12,5	62,7±16,4	30,1±4,5	38,2±17,4	136,5±7,8
	n	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2
2018	min-max	34–72,4	57,1–68	36,6–65,6	50,9–72	35,2–65	94–114	67–122	59–129	48–86	26–30,1	3,9–41,4	118–148
	$x \pm S$	57,1±16,4	61,3±5,0	53,3±12,3	61,0±10,6	54,7±16,9	101,7±10,8	88,3±29,5	86,7±37,2	66,9±15,6	28,6±1,8	31,6±18,5	133,0±21,2
	n	4	4	4	3	3	3	3	3	4	4	4	2
2019	min-max	47,4–80,3	47,7–81	51,2–65,3	55,7–66	64,1–77,3	89,5–120	84–105	51,4–55,9	36,8–69,7	29,0–38,5	29,5–43,6	90–137
	$x \pm S$	62,0±11,8	58,3±10,8	56,3±5,2	59,7±4,2	69,6±4,8	100,5±12,3	92,5±8,4	54,1±2,0	55,0±14,2	33,5±3,6	38,0±5,3	115,0±17,6
	n	6	7	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
2020	min-max	34,9–83,2	44,8–84,4	45,7–62,3	53,2–64,4	59,9–75,5	78,9–100,6	73,9–97,9	47,0–60,0	36,1–91,6	33,3–36,8	34,7–41,0	108–129
	$x \pm S$	50,5±19,0	63,0±18,9	53,3±6,5	57,8±4,6	69,7±7,2	90,0±9,2	87,9±8,7	52,6±5,0	65,2±22,9	34,8±1,3	38,8±2,4	118,5±14,8
	n	5	5	5	5	4	4	5	5	5	5	5	2

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
2021	min-max	33,1- 67,6	49,4- 53,6	47,3- 57,7	60,8- 64,9	64,7- 72,2	89,5- 111	64,4- 95,1	51,7- 92,9	50,8- 62,5	23,5- 34,5	37,7- 40,8	127- 130
	$x \pm S$	48,8± 17,5	51,2± 2,2	53,9± 5,8	62,9± 2,1	68,0± 3,8	99,1± 10,9	83,3± 16,5	66,0± 23,3	56,9± 5,9	29,7± 5,6	39,4± 1,6	128,3± 1,5
	<i>n</i>	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
2022	min-max	26,8- 43,1	46,2- 50,4	45,2- 3,8	50,3- 70,3	45,3- 84,4	87,7- 98	62,5- 88,3	44,9- 55,9	30,2- 52,3	23,2- 30,2	33,5- 41,8	96- 134
	$x \pm S$	35,4± 8,0	48,0± 1,9	50,8± 4,0	59,4± 10,1	63,8± 19,6	92,0± 5,4	73,2± 11,0	49,7± 5,2	41,5± 9,7	27,3± 3,0	38,3± 3,6	120,7± 21,4
	<i>n</i>	4	4	4	3	3	3	4	4	4	4	4	3
2023	min-max	32,9- 41,8	42,5- 48,9	42,3- 49,6	46- 56,1	19,5- 82,9	72,6- 104	59,6- 83,4	51,1- 61,8	32,9- 48,8	28,3- 30,8	32,4- 43,5	85,3- 149
	$x \pm S$	35,5± 4,2	45,1± 3,1	44,8± 3,3	50,7± 4,2	59,5± 28,4	88,4± 15,1	71,4 ±12,7	85,8± 5,1	42,0± 7,1	29,6± 1,3	40,6± 5,5	116,1± 31,9
	<i>n</i>	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3
2011-2023	min	26,8	42,5	36,6	46	19,5	55,8	48,1	44,9	30,2	19,6	3,9	85,3
	max	99,8	117	111	76,4	113	129	136,3	149	154	50,8	101,6	165
	$x \pm S$	59,8± 17,8	68,6± 19,1	61,4± 16,3	62,1± 7,1	70,2± 15,2	101,7± 15,2	87,1± 18,4	77,8± 29,9	69,7± 25,1	32,2± 5,2	44,8± 16,0	125,3± 20,3
	<i>n</i>	62	60	59	52	55	54	60	57	70	57	58	46

Примечание: x – среднее арифметическое, S – стандартное отклонение, min-max – пределы колебаний, n – количество образцов.

части Приморской бухты и глубоководных частей залива. Количество ^{226}Ra в грунтах залива лежит в интервале 9,0–35,3 Бк/кг, ^{232}Th – в пределах 3,8–43,2 Бк/кг. Максимальные уровни зарегистрированы в пробах илов и глинистых илов.

В то время как содержание ЕРН в донных осадках сохранялось стабильным, уровни содержания ^{137}Cs заметно менялись (табл.3).

На протяжении 11 лет наблюдений удельная активность ^{137}Cs в донных отложениях Калининградского залива изменялась в диапазоне от 3,9 до 165 Бк/кг. Широкий диапазон значений ^{137}Cs объясняется различной аккумуляющей способностью донных отложений: максимальную проявляют мелкодисперсные илы, в них депонирована большая часть цезия чернобыльского происхождения, поступающего на протяжении многих лет с водосборного бассейна. Илистые осадки покрывают более 40% площади дна залива, все углубления в западной части Приморской бухты, юго-западной и восточной частях залива.

По результатам среднегодовых значений рассчитаны периоды полуснижения удельной активности ^{137}Cs на станциях наблюдения (табл.4).

На рис.3 станции объединены в зональные группы со сходными характеристиками динамики радиоактивного загрязнения.

Наиболее быстрое снижение удельной активности ^{137}Cs зафиксировано на станциях 1, 2 – зоне активного влияния притока речных вод Преголи; 8, 9, 10 – районов активного внедрения морских вод через Балтийский канал. Несколько ниже, но вполне заметная, скорость снижения активности на ст. 3 и 11. Т. к. преимущественным носителем активности является мелкодисперсная фракция, легко взмучиваемая и переносимая течениями и штормами, снижение активности наиболее заметно в зонах ускоренного водообмена. Следует отметить, что эффективное снижение активности происходит как за счет механического выноса радионуклидов, так и за счет их физического распада. Учитывая, что период

Табл. 4. Эффективные $T_{эфф}$ и физические $T_{1/2}$ периоды полуснижения удельной активности ^{137}Cs в донных отложениях Калининградского залива в 2011–2023 гг.

№ ст.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$T_{эфф}$	11,3	11,7	17,8	42,0	30,3	41,8	30,7	10,4	12,7	10,4	22,1	11550
R^2	0,85	0,93	0,59	0,65	0,37	0,61	0,43	0,80	0,80	0,80	0,49	$5 \cdot 10^{-6}$
$T_{1/2}$	18	19	44	-105	-3465	-107	-1386	16	22	16	85	-30

полураспада ^{137}Cs 30,0 лет, можно оценить с какой скоростью происходит физический (механический) $T_{1/2}$ вынос данного загрязнителя по районам наблюдений. На станциях 5 и 7 снижение активности происходило только за счет радиоактивного распада нуклида. На ст. 4 и 6 скорость поступления радионуклида превышала скорость его распада, а на ст. 12 вообще не было отмечено снижение удельной активности за годы наблюдений, что говорит об активной аккумуляции в глубоководных районах Приморской бухты данного загрязнителя.

Оседание радионуклидов техногенного характера зависит от многих факторов: содержания радионуклидов в водной среде, аккумулирующей способности грунта, подвижности самих радионуклидов, химических и биологических процессов, происходящих в водоеме. Результаты радиологических исследований показали, что концентрация ^{137}Cs в илистых отложениях в 1,5–3 раза выше, чем в песчаных. Среднее содержание ^{137}Cs в илистых осадках находилось в интервале 59,8–125,3 Бк/кг, в песчаных – 32,2–44,8 Бк/кг.

Значения удельной активности цезия в донных отложениях залива значительно превышают аналогичные показатели, характерные для почв прибрежных территорий [3].

Анализ полученных данных показал, что загрязнение донных отложений Калининградского залива неравномерно и определяется перераспределением в основном постчернобыльских выпадений. Современные уровни удельной активности ^{137}Cs в донных отложениях

залива сопоставимы с содержанием данного радионуклида в илистых осадках глубоководных впадин юго-восточной Балтики – одного из наиболее радиоактивно загрязненных морей [16].

Вклад гамма-излучения ^{137}Cs , даже в наиболее загрязненных им донных осадках моря и заливов, в формирование доз внешнего излучения придонных организмов многократно ниже естественной радиоактивности, обусловленной наличием природных ^{40}K , ^{232}Th и ^{226}Ra .

ЕРН создают ионизирующее излучение, которое может представлять угрозу безопасности населения. В случае использования перемещаемых грунтов в ходе строительства причалов, дамб, дноуглубительных работах и т. п., обязательным является анализ соответствия радиологических показателей грунтов требованиям п.5.3.4 Норм радиационной безопасности [17]. Оценить уровень безопасности можно по удельной эффективной активности ЕРН ($A_{эфф}$). $A_{эфф}$ является интегральным параметром, учитывает удельный вклад отдельных природных радионуклидов в формирование дозы внешнего гамма-излучения и рассчитывается по формуле:

$$A_{эфф} = A_{Ra} + 1,3A_{Th} + 0,09A_k,$$

где A_{Ra} , A_{Th} и A_k – удельная активность ^{226}Ra , ^{232}Th и ^{40}K соответственно.

Рассчитанная удельная активность ЕРН в донных осадках залива не превышала 156 Бк/кг, что значительно ниже установленного безопасного уровня (370 Бк/кг), позволяющего обращение с ними без ограничений.

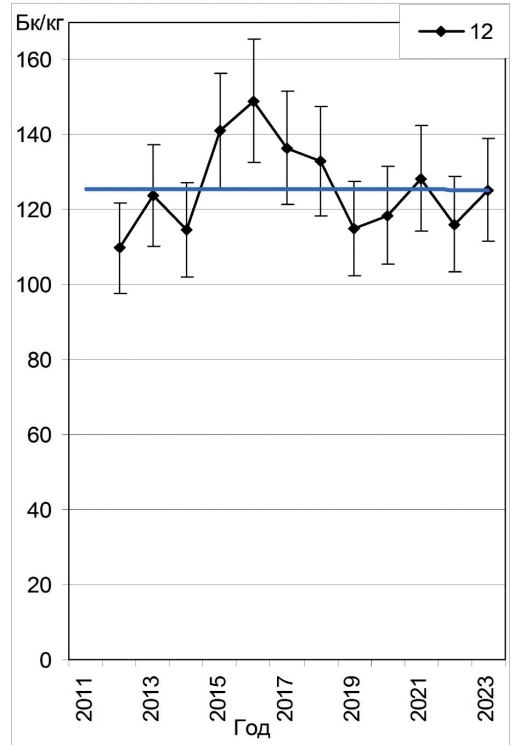
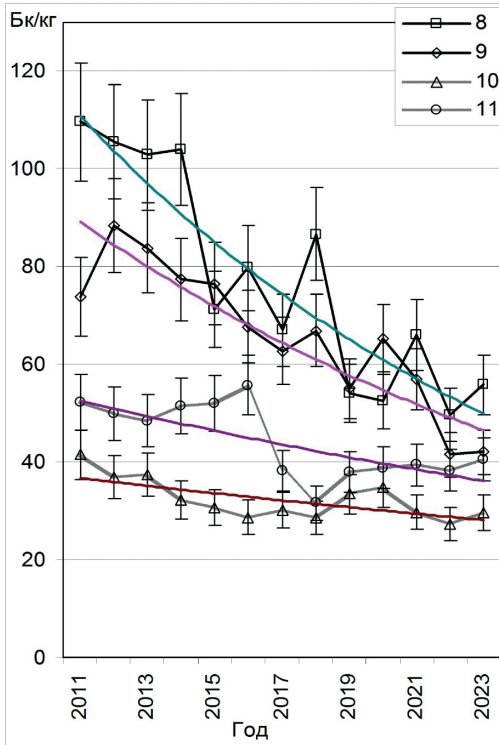
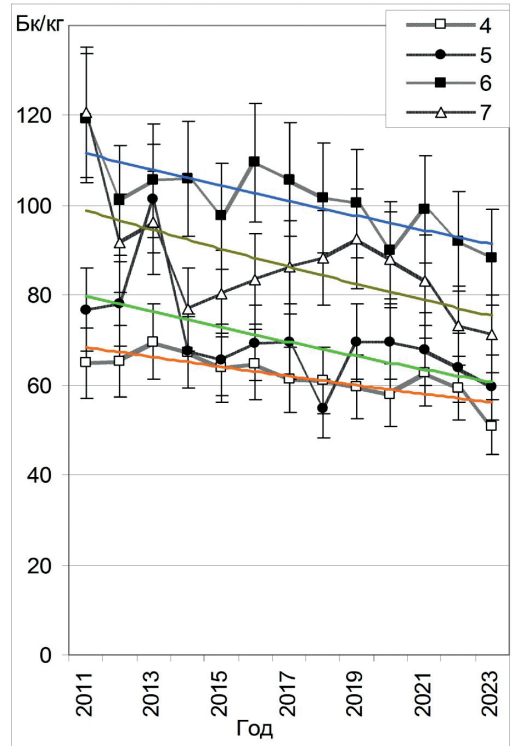
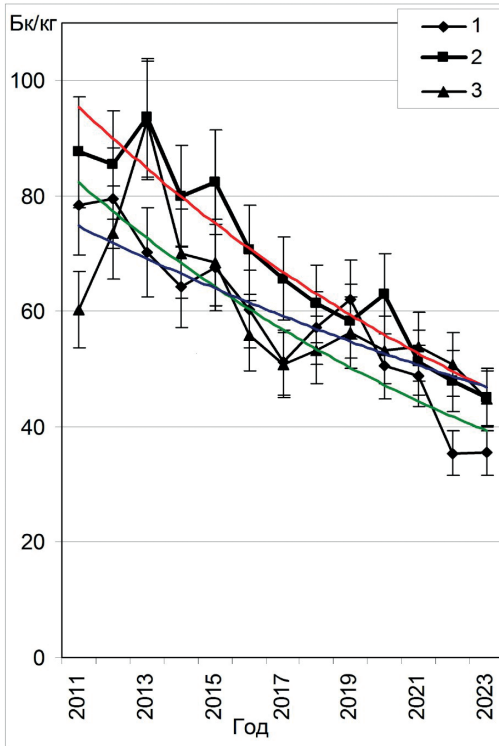


Рис.3. Удельная активность ^{137}Cs в донных отложениях Калининградского залива в 2011–2023 гг. Номер графика соответствует номеру станции отбора проб (рис.1).

Заключение

Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АтлантНИРО») осуществляет регулярный радиоэкологический мониторинг Калининградского залива, что позволяет оценивать состояние водоема в условиях антропогенного воздействия. Проведенные в 2011–2023 гг. исследования на всей акватории дают возможность выявить многолетние тренды перераспределения радиоактивного загрязнения донных осадков залива.

Результаты исследований показали, что общие закономерности распределения ^{137}Cs в Калининградском заливе определяются не столько расположением источников его поступления, сколько естественными факторами и процессами: геоморфологическими и литологическими особенностями дна, гидродинамическим режимом, уровнем солености водоема и водообменом с Балтийским морем.

В поверхностном слое донных отложений максимальная активность ^{137}Cs (133–165 Бк/кг) зафиксирована в глубоководной северо-западной части Приморской бухты. Этот факт объясняется сорбцией радионуклида из придонного слоя вод тонкодисперсными илистыми отложениями и аккумуляцией илистого материала, привнесенного с осадками с водосборного бассейна. Минимальные значения активности отмечены в песчаных осадках станций

10 и 11 – зонах обслуживания Калининградского канала с проведением дноуглубительных работ.

Современные донные отложения Калининградского залива, особенно в глубоководных его частях, имеют повышенную удельную активность ^{137}Cs , о чем свидетельствуют и результаты сопоставления с другими акваториями, такими как прибрежные районы Кольского полуострова, акватории Карского, Баренцева, Азовского и Черного морей [18-20]. Главным источником радионуклида, присутствующего в поверхностных слоях донных отложений, являются радиоактивные выпадения, связанные с аварией на Чернобыльской АЭС. За прошедшие 11 лет наблюдений удельная активность ^{137}Cs в проточных зонах снизилась в 2 раза как вследствие радиоактивного распада, так и выноса наиболее загрязненной мелкодисперсной фракции в застойные зоны водоема и в Балтийское море через Балтийский канал.

Донные отложения играют важную роль в накоплении и переносе радиоактивных веществ в границах географического района, в связи с чем существует необходимость в мониторинге удельной активности радионуклидов для возможности оценки их воздействия на окружающую среду и человека.

Литература

1. Израэль Ю.А. Радиоактивное загрязнение природных сред в результате аварии на Чернобыльской атомной станции. К 20-летию аварии. Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН Гидрометеоздат, 1990. 296 с.
2. Атлас загрязнения Европы цезием после Чернобыльской аварии. Научн. руководитель Ю.А. Израэль. Люксембург: Люксембургское бюро для официальных изданий европейских сообществ; Комиссия европейских сообществ, 1998. 71 с.

3. Государственный доклад «О состоянии санитарно-эпидемиологического благополучия населения в Калининградской области в 2022 году». Руководитель – гл. гос. сан. врач по Калининградской области Бабура Е.А. Калининград, 2023. 238 с.
4. Чечко В.А., Топчая В.Ю. Многолетняя динамика состава верхнего слоя донных отложений в неглубоком водоеме лагунного типа (на примере Калининградского залива Балтийского моря) // Научный журнал «Известия КГТУ». 2023. № 71. С. 147-158.
5. Сапожников Ю.А., Алиев Р.А., Калмыков С.Н. Радиоактивность окружающей среды. М: БИНОМ, 2006. 286 с.
6. Степанов А.В., Тишков В.П., Пантелеев Ю.А., Гаврилов В.М. Радиоактивное загрязнение Балтийского моря после аварии на ЧАЭС // Труды Радиового института им. В.Г. Хлопина. 2009. Т. 14. С. 156-170.
7. Рябов И.Н. Радиоэкология рыб водоемов в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС. М.: Товарищество научных изданий КМК. 2004. 215 с.
8. Пивоваров Ю.П., Михалев В.П. Радиационная экология. М.: «Академия», 2004. 240 с.
9. Апплби Л.Дж., Девелл Л., Мишра Ю.К. Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля. Пер. с англ. под редакцией Ф. Уорнера и Р. Харрисона. М.: Мир, 1999. С. 512.
10. E. Plus, «The Chernobyl accident and the Baltic Sea», *Boreal Environmental Research*, vol. 12. pp. 1-10, 2007.
11. ГОСТ 17.1.5.01-80. Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. М.: ИПК Издательства стандартов, 2002. 6 с.
12. МВИ 40090.3Н700. Методика измерения активности радионуклидов с использованием сцинтилляционного гамма-спектрометра с программным обеспечением «Прогресс».
13. Радиобиология. М.: Колос, 1999. 384 с.
14. Worldwide marine radioactivity studies (WOMARS). Radionuclide levels in oceans and seas. Final report of a coordinated research project. IAEA-TECDOC-1429. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2005, 187 pp. IAEA. URL: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/TE_1429_web.pdf (дата обращения: 17.02.2017).
15. Чечко В.А., Топчая В.Ю., Бабаков А.Н. Новая карта донных осадков Калининградского залива Балтийского моря // Научный журнал «Известия КГТУ». 2023. № 69. С. 44-56.
16. Васюкевич Т.А., Нитиевская Л.С. Радиоактивность воды и донных осадков Балтийского моря в июле–августе 2020 г. // Труды АтлантНИРО. 2021. Том 5, № 1(1). Калининград: АтлантНИРО. С. 28-36.
17. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы. М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
18. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г. Радиационная экологическая океанология. Апатиты: Кольский НЦ РАН. 2001. 417 с.
19. Среда, биота и моделирование экологических процессов в Азовском море. Коллектив авторов – Апатиты: изд. Кольского научного центра РАН, 2001. 413 с.
20. Демьшев С.Г., Запелалов А.С., Кубряков А.И., Чудиновских Т.В. Эволюция поля концентрации цезия-137 в Черном море после прохождения чернобыльского облака // Метеорология и гидрология. 2001. Вып. 10. С. 49-61.

Transformation of Radioactive Contamination of the Bottom Sediments in the Kaliningrad (Vistula) Lagoon Between 2011 and 2023

Vasyukevich Tatiana, Nitievskaya Liliya, Akhatova Marina (Atlantic branch of the VNIRO (AtlantNIRO), Kaliningrad, Russia)

Abstract. The article presents the data of radioecological research of the bottom sediments in the Russian zone of the Vistula Lagoon in 2011–2023. According to research, the specific activity of ^{137}Cs in the bottom sediments of the Lagoon was in the range of 3,9–165 Bq/m³. ^{137}Cs is the main technogenic radionuclides that makes the greatest contribution to the pollution of the Lagoon. Contamination of the bottom sediments with ^{137}Cs is determined by the redistribution of mainly post-Chernobyl fallout. The ^{137}Cs accumulation was recorded in the northern deep-water part of the Primorskaya Bay. According to observations, the effective half-life of ^{137}Cs activity in the sediments of the Lagoon is 10,4–42 years.

The content of natural radionuclides is: ^{226}Ra – from 9,0 to 35,3; ^{232}Th – from 3,8 to 43,2; ^{40}K from 227 to 715 Bq/kg. The NRN specific activity in the sediments of the Lagoon did not exceed 153 Bq/kg, which was significantly lower than the established safe level (370 Bq/kg), allowing their handling without restrictions.

The correlations between the content of ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th in the bottom sediments of the Lagoon were established with the type of sediment.

Keywords: ^{137}Cs , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , bottom sediments, Kaliningrad (Vistula) Lagoon.

Т.А.Васюкевич (зав.лаб.), Л.С.Нитиевская (вед.спец.), М.Р.Ахатова (ст.спец.)
Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АтлантНИРО»), г. Калининград

Контакты: тел. +7 4012 92547; e-mail: vasyukevich@atlant.vniro.ru