

СОДЕРЖАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ВОДЕ, ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ И БЕНТОСЕ КАРСКОГО МОРЯ И МЕЛКОВОДНЫХ ЗАЛИВОВ АРХИПЕЛАГА НОВАЯ ЗЕМЛЯ

© 2019 г. Т. А. Горяченкова^а, А. П. Борисов^а, Г. Ю. Соловьева^а, Е. А. Лавринович^а, И. Е. Казинская^а, А. Н. Лигаев^а, А. В. Травкина^а, А. П. Новиков^{а,*}

^аИнститут геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН
Россия, 119991 Москва, ул. Косыгина, 19
*e-mail: novikov@geokhi.ru

Поступила в редакцию 08.11.2018 г.
После доработки 19.03.2019 г.
Принята к публикации 21.03.2019 г.

В ходе экспедиционных исследований на НИС “Академик Мстислав Келдыш” в 2016 году было установлено, что содержание ^{137}Cs в морской воде заливов архипелага Новая Земля и открытом море находятся на уровне, соответствующему глобальным выпадениям (1 Бк/м^3), плутония – несколько выше глобального; активность нептуния на порядок превышает активность плутония ($0.76\text{--}1.89 \text{ Бк/м}^3$), хотя его содержание в глобальных выпадениях почти на два порядка ниже содержания плутония. В донных отложениях Карского моря активность плутония составляет $0.2\text{--}3.8 \text{ Бк/кг}$, ^{137}Cs – $0.5\text{--}6.0 \text{ Бк/кг}$ и максимально высокое в устье р. Енисея (до 21 Бк/кг). Анализ проб бентоса в заливах архипелага Новая Земля показал, что содержание ^{137}Cs и плутония находится ниже предела обнаружения. Содержание нептуния в образцах бентоса составляет $1\text{--}80 \text{ Бк/кг}$ сырого веса. Показано, что содержание нептуния в бентосе является одним из индикаторов радиоактивного загрязнения морской среды.

Ключевые слова: Карское море, радионуклиды, морская вода, донные отложения, бентос
DOI: 10.31857/S0016-752564121261-1268

ВВЕДЕНИЕ

Арктические регионы выполняют важную функцию в стабилизации биосферных процессов и климата на Планете. Известно, что природа Арктической зоны чрезвычайно уязвима к антропогенным вмешательствам в силу замедленного круговорота уровня масс и энергообменов в холодных широтах. Одним из основных источников загрязнения Арктического бассейна являются захороненные ядерные объекты и твердые радиоактивные отходы (ТРО). Затопленные на дне Арктики ТРО представляют собой потенциальную опасность, которая с каждым годом возрастает (Salbu et al., 1997). Источниками радиоактивного загрязнения водной среды Арктического бассейна также являются атмосферные выпадения продуктов аварии на Чернобыльской АЭС, перенос радионуклидов морскими течениями с западноевропейских радиохимических предприятий, перенос реками Обь и Енисей продуктов деятельности ядерно-энергетических комплексов, расположенных на Урале и Сибири (в первую очередь, НПО «Маяк» и Красно-

ярский горно-химический комбинат). Наиболее актуальным направлением современных радиоэкологических исследований Арктического района остается изучение закономерностей поступления техногенных радионуклидов, оценка миграционной способности последних и их накопления в шельфовой зоне. Поэтому целью настоящей работы было продолжение радиоэкологического мониторинга Карского моря, включая мелководные заливы архипелага Новая Земля.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Объекты и методы исследования

Объектами исследования послужили образцы морской воды, донных отложений и бентоса. Пробы отбирали в ходе экспедиционных исследований на НИС “Академик Мстислав Келдыш” в Карском море в июле-августе 2016 г., в мелководных заливах архипелага Новая Земля, а также в устьях рек Оби и Енисея. Отбор проб проводили в местах захоронения радиоактивных отхо-

дов в доступных (по глубине) для прохода судна и проведения грунтозаборных работ (рис. 1).

Морскую воду отбирали объемом 120–150 л погружным насосом типа «Малыш» с глубины 1–2 м от поверхности. Для каждого радионуклида отбор морской воды проводился отдельно. Для определения ^{137}Cs в морской воде проводили концентрирование на колонке с волокнистым сорбентом на основе $\text{CoK}_2[\text{Fe}(\text{CN})_6]$. Воду пропускали через колонку со скоростью 350 мл/мин, затем сорбент высушивали при $T=200^\circ\text{C}$ и упаковывали для измерения активности ^{137}Cs в лаборатории ГЕОХИ РАН. Для концентрирования $^{238-240}\text{Pu}$ пробы воды объемом 100 л подкисляли концентрированной HCl до $\text{pH}=2$, добавляли 1 г носителя сульфат $\text{Fe}(\text{III})$, метку ^{242}Pu и осаждали гидроксид железа аммиаком. Осадок $\text{Fe}(\text{OH})_3$ декантировали и собирали для дальнейшей обработки и определения изотопов плутония в лаборатории института ГЕОХИ РАН. Для определения содержания ^{237}Np морскую воду объемом

100 л подкисляли HCl до $\text{pH}=2$ и проводили соосаждение нептуния с диоксидом марганца (MnO_2), последовательно добавляя KMnO_4 и MnCl_2 , далее вводили раствор 10 М NaOH для корректировки значения pH в пределах 8–9 и выдерживали 1 сутки. Величину pH раствора контролировали с помощью переносного pH -метра «Эксперт- pH ». Образовавшийся осадок MnO_2 отфильтровывали, доводя объем водной взвеси до 5 л и в виде жидкого концентрата доставляли в лабораторию для проведения радиохимического анализа методом люминесценции на кристаллофосфорах (Novikov et al., 2016).

Пробы донных осадков отбирали коробчатым пробоотборником (бокскоррер) и трубкой Неймисто и делили на слои по 2 см. Образцы были высушены до воздушно-сухого состояния и гомогенизированы, пробы герметично упаковывали для дальнейшего определения радионуклидов. В лаборатории пробы измельчали, пропускали через сито 1 мм. Пробы дон-

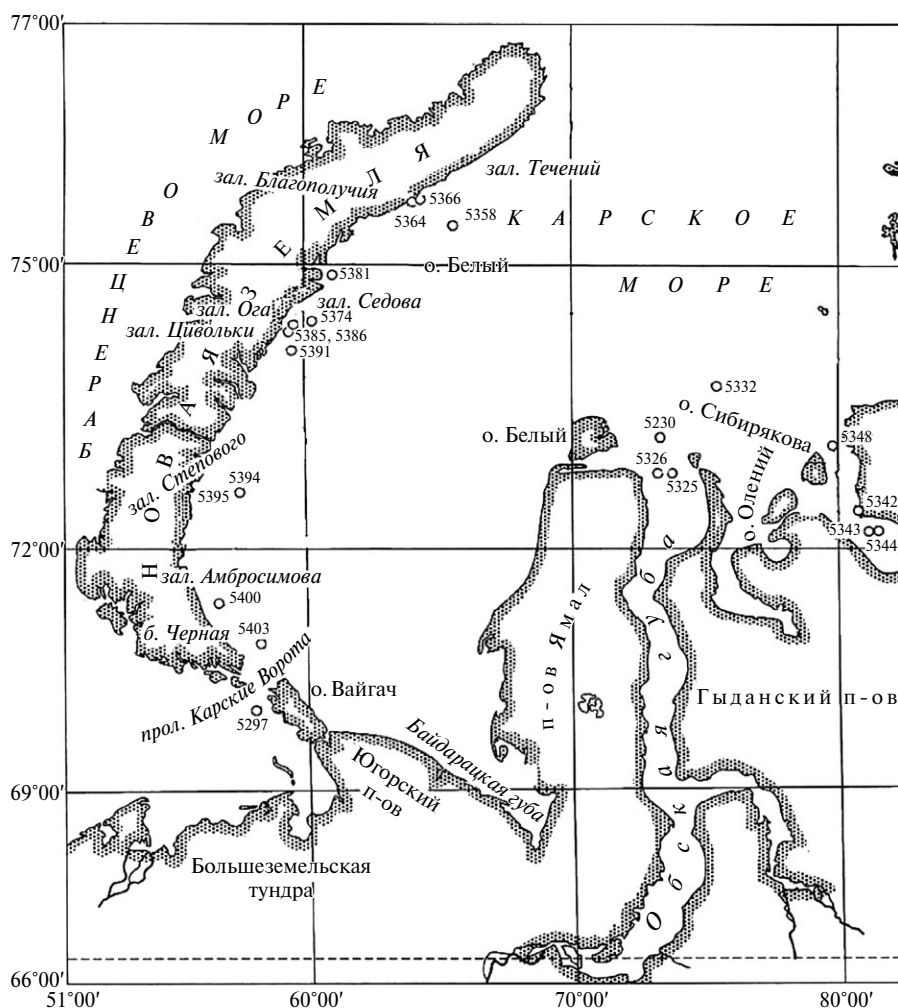


Рис. 1. Схема отбора образцов в Карском море.

ных отложений для определения изотопов ^{237}Np и $^{238-240}\text{Pu}$ озоляли в муфельной печи при 450°C , при определении ^{137}Cs пробы донных отложений не подвергались воздействию высоких температур. Для перевода радионуклидов ^{237}Np и $^{238-240}\text{Pu}$ в раствор из озоленных проб или концентратов из природных вод применяли 2-кратную обработку их 7–8 М HNO_3 при длительном кипячении (Novikov, 2010).

Пробы бентоса различной природы до анализа консервировали и хранили в формалине. Образцы высушивали на воздухе, взвешивали для определения веса воздушно сухого образца. Помещали образец биоты в фарфоровые чашки и озоляли в муфельном шкафу при 500°C до полного перевода пробы в озоленное состояние. Взвешивали озоленный образец, определяли потери при озолении. Зола помещали в стеклянные стаканы, проводили выщелачивание радионуклидов 7,5 М HNO_3 при кипячении, 2 раза. Надосадочный кислый раствор отфильтровывали через фильтр “синяя лента”, доводили до определенного объема и проводили определение в нем ^{237}Np .

Содержание ^{137}Cs определяли по линии 661.6 кэВ с помощью гамма-спектрометра с полупроводниковым детектором из особо чистого германия 70×25 мм (Canberra). Для обработки результатов использовали программное обеспечение Genie 2000 (Canberra). Для калибровки по эффективности использовали интеркалибровочный препарат МАРЕР-97-S4 и сертифицированный стандартный образец IAEA-315 (МАГАТЭ).

Выделение изотопов $^{238-240}\text{Pu}$ проводили из азотнокислого раствора методом концентрирования и радиохимической очистки на хроматографической колонке, заполненной анионитом ВП-1АП. Химический выход $^{238-240}\text{Pu}$ определяли

по внесенной в образец метке ^{242}Pu . Счетные мишени готовили электролитическим осаждением на дисках из нержавеющей стали. Активность изотопов плутония измеряли на альфа-спектрометре «Прогресс-альфа».

Нептуний из азотнокислых растворов определяли методом люминесценции, нанесением аликвоты анализируемого раствора на кристаллофосфор – PbMoO_4 (объем анализируемой пробы может варьироваться от 0.02 мл до 0.1 мл) с дальнейшим прокаливанием образца в муфельной печи при 900°C . Измерения проводили на люминесцентном фильтровом анализаторе в ближнем ИК-диапазоне (1713 нм) (Новиков и др., 2009).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Полученные данные по содержанию техногенных радионуклидов в морской воде представлены в табл. 1. Содержание ^{137}Cs в морской воде заливов архипелага Новая Земля и открытом море колеблется в пределах 0.3 ± 0.1 – 1.2 ± 0.2 Бк/м³, что соответствует уровню загрязнения глобальными выпадениями. Активность $^{239,240}\text{Pu}$ в исследованных образцах воды незначительно выше глобального фона и составляет 0.05 ± 0.006 – 0.09 ± 0.01 Бк/м³ (табл. 1). Из литературных источников известно, что содержание $^{239,240}\text{Pu}$ в морской воде, обусловленное глобальными радиоактивными выпадениями, изменяется в широких пределах и составляет 0.002 – 0.05 Бк/м³ (Горяченкова и др., 2000; Travkina et al., 2017). ^{238}Pu в воде не обнаружен, что свидетельствует о низком соотношении изотопов ^{238}Pu и $^{239,240}\text{Pu}$. Для глобальных выпадений в объектах природной среды Северного полушария Земного шара соотношение изотопов $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ достигает 0.08 ± 0.02 . Для топливного и реакторного плутония значения

Таблица 1. Содержание радионуклидов в пробах морской воды, Бк/м³

Номер станции (глубина, м)	Место отбора	Координаты станций		^{137}Cs	$^{239,240}\text{Pu}$	^{237}Np
		широта	долгота			
5366 (150)	Залив Благополучия	75°39'	63°41'	0.8 ± 0.2	-	-
5374 (184)	Залив Седова	74°40'	59°57'	0.8 ± 0.1	0.093 ± 0.010	0.9 ± 0.1
5381 (116)	Залив Ога	74°42'	59°07'	0.3 ± 0.1	-	-
5386 (105)	Залив Цивольки	74°32'	58°16'	0.9 ± 0.1	0.052 ± 0.006	«
5391 (120)	Залив Цивольки	74°10'	59°10'	1.2 ± 0.2	-	1.4 ± 0.2
5394 (340)	Новоземельская впадина	72°22'	57°53'	1.0 ± 0.1	-	-
5395 (34,4)	Залив Степового	72°31'	55°31'	1.1 ± 0.3	0.060 ± 0.006	0.8 ± 0.08
5400 (16,6)	Залив Абросимова	71°52'	55°20'	1.2 ± 0.2	-	-
5403 (226)	Новоземельская впадина	70°53'	58°20'	1.0 ± 0.1	0.075 ± 0.008	1.9 ± 0.2

этих соотношений выше. Поэтому как в заливах, так и в открытом море основным источником поступления плутония в морскую воду являются, по-видимому, глобальные выпадения. По результатам проведенной экспедиции в Карское море в 1995 г., содержание $^{239,240}\text{Pu}$ в поверхностной морской воде составляло $0.03 \pm 0.005 - 0.095 \pm 0.01$ Бк/м³ (Горяченкова и др., 2000), что близко к содержанию в воде изотопов $^{239,240}\text{Pu}$, представленных в данной статье (табл. 1).

Активность ^{237}Np в морской воде более чем на порядок превышает активность $^{239,240}\text{Pu}$ (табл. 1), хотя его содержание в глобальных выпадениях ниже или равно содержанию $^{239,240}\text{Pu}$ (Новиков, Павлоцкая, 1989). Растворимость и миграционная способность в гидросфере физико-химических форм нептуния намного выше, чем плутония (Novikov, 2010), поэтому, возможно, источником загрязнения морской воды являются твердые радиоактивные отходы (ТРО), захороненные в заливах. Однако необходимо отметить, что возможная утечка незначительна, так как определенные величины содержания бета- и альфа-активных радионуклидов в морской воде на 2–3 порядка ниже ПДК питьевой воды.

Активность $^{239,240}\text{Pu}$ в донных отложениях Карского моря, включая заливы архипелага Новая Земля, изменяется в широких пределах и составляет $0.21 \pm 0.02 - 3.8 \pm 0.40$ Бк/кг (табл. 2). Полученные результаты не превышают активности $^{239,240}\text{Pu}$ в донных отложениях Северных морей, обусловленного глобальными выпадениями, которые составляет 0.3–4.8 Бк/кг (Горяченкова и др., 2000). Исключение составляет устье реки Енисей, в донных отложениях которого найдено

наиболее высокое содержание $^{239,240}\text{Pu}$ (табл. 2). В некоторых пробах наблюдается повышенное содержание ^{238}Pu , соотношение $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ лежит в пределах 0.2–1.2, что превышает соотношение этих изотопов в объектах природной среды, обусловленное глобальными выпадениями. Наиболее высокое отношение изотопов $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ найдено в образцах донных отложений устья рек Енисей и Оби, что не исключает загрязнения связанного с работой предприятий ядерно-топливного цикла в верхнем течении этих рек. Отношение изотопов $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$ в донных осадках Карского моря, приведенное в статье (Горяченкова и др., 2000), полученное по результатам экспедиции 1995 г., составляет 0,1–1,0, что близко к результатам, приведенным в табл. 2. На примере проб, отобранных на станции 5330, было установлено, что с глубиной содержание ^{238}Pu возрастает до 2 Бк/кг, в то же время содержание $^{239,240}\text{Pu}$ остается постоянным – около 1 Бк/кг. В донных отложениях мелководных заливов архипелага Новая Земля содержание $^{239,240}\text{Pu}$ не превышает его содержания в открытом море (табл. 2).

В образцах донных отложений, отобранных на станциях, приведенных в табл. 2, были проведены измерения содержания ^{237}Np , но результаты получить не удалось, так как активность ^{237}Np оказалась ниже предела обнаружения люминесцентного метода. Однако на станциях 5374, 5391, 5395 и 5403 в морской воде содержание ^{237}Np гораздо выше предела обнаружения (табл. 1), что указывает на более высокую растворимость этого радионуклида по сравнению с $^{238-240}\text{Pu}$ и ^{137}Cs , основным депо которых являются донные отложения.

Таблица 2. Содержание $^{238,239-240}\text{Pu}$ в донных отложениях (0–2 см), Бк/кг

Номер станции (глубина в м)	Место отбора	Координаты станций		$^{239,240}\text{Pu}$	^{238}Pu	$^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$
		широта	долгота			
5325 (13.4)	Устье р. Оби	72°10'	74°43'	0.21±0.02	0.21±0.02	1.0
5326 (13.5)	Устье р. Оби (Обская губа)	72°10'	74°17'	0.96±0.09	0.20±0.02	0.2
5330 (17.0)	Устье р. Оби	73°04'	73°27'	0.82±0.09	0.51±0.06	0.6
5332 (29.9)	Карское море	74°15'	75°29'	2.40±0.30	0.61±0.07	0.3
5342 (14.2)	Енисейский залив	72°12'	80°50'	0.31±0.04	0.21±0.02	0.6
5343 (11.0)	Устье р. Енисей	72°05'	81°28'	1.00±0.10	0.32±0.03	0.3
5344 (10.3)	Устье р. Енисей	71°52'	82°11'	3.80±0.40	0.30±0.03	0.1
5348 (28.4)	Эстуарий р. Енисей	73°10'	79°53'	0.53±0.06	0.60±0.06	1.2
5358 (352.0)	Залив Благополучия	75°23'	64°20'	0.54±0.60	0.41±0.05	0.8
5364 (85.0)	Залив Благополучия	75°38'	63°37'	1.20±0.10	0.31±0.03	0.2
5385 (81.0)	Залив Цивольки	74°30'	59°24'	1.10±0.12	0.51±0.05	0.5
5394 (340)	Новоземельская впадина	72°22'	57°53'	2.60±0.32	0.50±0.05	0.2

Таблица 3. Содержание гамма-излучающих радионуклидов в донных отложениях (0–2 см), Бк/кг

Номер станции	Место отбора	Cs-137	Ряд урана-238			
			Th-234	Pb-214	Bi-214	Pb-210
5297	Карские ворота	1.2±0.1	21±2.1	11.5±0.6	8.8±0.6	127±11
5325	Устье р. Оби	6.1±0.5	33±2.9	14.3±0.9	5.2±1.0	132±9
5326	Устье р. Оби (Обская губа)	7.7±0.6	31±4.7	11±2.0	5.7±1.9	178±15
5332	Карское море	0.5±0.1	нпо	14±1.0	10±1.1	58±9
5342	Устье р. Енисей	21.1±0.2	44±5.3	19±1.3	13±1.5	208±20
5343	Устье р. Енисей	18.0±0.2	25±2.0	16±0.8	8.8±0.8	119±8
5344	Устье р. Енисей	6.5±0.1	23±3.3	14.8±1.2	10.8±1.1	102±11
5348	Эстуарий р. Енисей	19.0±0.2	28±2.0	18±1.0	14±0.6	194±12
5349	Карское море	10.5±0.1	27±3.1	25±1.2	15±1.2	217±15
5358	Залив Благополучия	6.0±0.1	32±4.1	30±2.0	21±2.0	303±21
5364	Залив Благополучия	4.6±0.2	39±4.5	35±1.7	24±1.6	152±15
5385	Залив Цивольки	2.1±0.2	51±5.5	35±1.8	23±2	188±19
5394	Новоземельская впадина	5.3±0.6	43±4.0	63±3.0	45±2.3	476±30

Примечания. нпо – ниже предела обнаружения.

Наиболее высокое содержание ^{137}Cs в верхних слоях донных отложений найдено в устье р. Енисей (18.0 ± 0.2 – 21.1 ± 0.2 Бк/кг, в устье р. Оби (6.1 ± 0.5 – 7.7 ± 0.6). В заливах архипелага Новая Земля активность этого радионуклида ниже (табл. 3). Ранее этот факт был отмечен в нескольких работах по мониторингу Карского моря (Travkina et al., 2017; Галимов и др., 1996). Источником поступления этого радионуклида, по-видимому, является деятельность радиохимических производств, расположенных возле гидросистем этих сибирских рек. Однако необходимо отметить, что природная радиоактивность отобранных образцов превышает техногенную составляющую (табл. 3).

По глубине колонок донных отложений (0–15 см) ^{137}Cs распределяется неравномерно (рис. 2). Как правило, имеются максимумы содержания на глубине 3–5 см. Учитывая значения скоростей осадконакопления для данных заливов – 0.16–0.32 см/год (Степанец и др., 2010), это соответствует периоду около 30 лет, т.е. наиболее вероятной причиной загрязнения является Чернобыльская авария.

Гранулометрический и минералогический составы приведенных в табл. 2 и 3 проб донных отложений представлены в работе Кузменковой и др.¹ Авторы указанной статьи заметных

¹ Кузменкова В.В., Крупская В.В., Дурягина Е.В., Семенов И.Н., Винокуров С.Е. Распределение радионуклидов и их сорбционное поведение в поверхностном слое донных осадков Карского моря. Статья публикуется в №11 (2019), *Геохимия*.

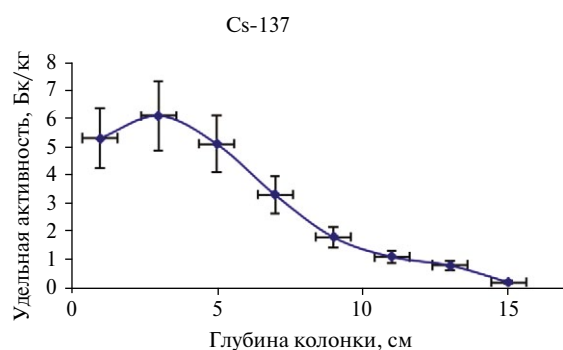


Рис. 2. Распределение ^{137}Cs по глубине донных отложений на примере колонки № 5394.

корреляций между гранулометрическим и минералогическим составом и содержанием ^{137}Cs в донных осадках не обнаружили (рис. 3). Это объясняется широким диапазоном отбора проб от мелководных заливов архипелага Новая Земля через Карское море к эстуариям рек Оби и Енисей (Енисейский залив, Обская губа). Поэтому загрязнение морских донных отложений ^{137}Cs в районе мониторинга определяется несколькими источниками: глобальными выпадениями, терригенным приносом рек и захороненными отходами.

В более ранних работах, проведенных в ГЕОХИ РАН (Stepanets et al., 2007), влияние гранулометрического состава на содержание ^{137}Cs также не наблюдалось. В отличие от ^{137}Cs содержание $^{239,240}\text{Pu}$ в образцах, отобранных в западной части Карского моря, коррелирует с содержанием пелитового ила, преимущественно

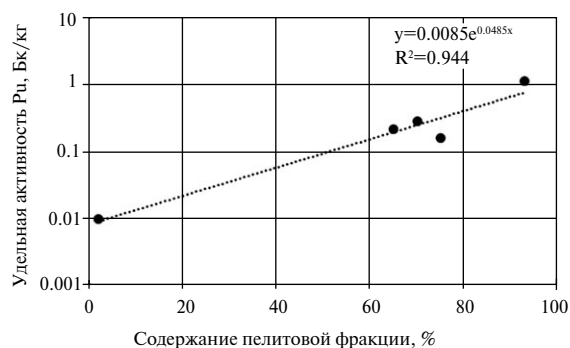


Рис. 3. Удельная активность плутония в образцах донных отложений Карского моря в зависимости от процентного содержания пелитовой фракции.

иллито-сметитового. Анализ проб бентоса показал, что при навеске 100–200 г сырого биоматериала содержание ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ в отобранных образцах находится ниже предела обнаружения (0.1 Бк для ^{137}Cs и 0.001 Бк для $^{239,240}\text{Pu}$). Это свидетельствует о том, что содержание этих радионуклидов в бентосе меньше 1 Бк/кг по ^{137}Cs и 10^{-2} Бк/кг по $^{239,240}\text{Pu}$. Содержание нептуния в некоторых образцах бентоса выше предела обнаружения (табл. 4). Однако это касается только заливов архипелага Новая Земля, в которых происходило захоронение радиоактивных отходов. Наибольшее количество ^{237}Np обнаружено в морских тараканах (*Saduria entomon*), отобранных в заливе Цивольки, представляющих собой хищный и подвижный вид, который питается мелким придонным бентосом. Возможно, этот повсеместно проживающий вид *Saduria entomon* является наиболее чувствительным индикатором радиоактивного загрязнения верхних горизонтов донных отложений. Повышенная концентрация ^{237}Np оказалась и у морских звезд – хищников, питающихся главным образом моллюсками, многощетинковыми червями и другими беспозвоночными.

Таким образом, возможно, содержание ^{237}Np в бентосе является одним из индикаторов радиоактивного загрязнения морской среды наравне с содержанием $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{137}Cs в донных отложениях.

Известно, что объем захороненных отходов в Карском море составил порядка 70% от всего объема морских захоронений СССР (Standing et al., 2008). Для захоронения использовали такие районы Карского моря, как заливы Новой Земли (Течений, Цивольки, Абросимова, Степового, Ога, Благополучия, Седова) и глубоководный район Новоземельской впадины. Вместе с тем необходимо подчеркнуть, что в донных отложениях этих заливов ^{237}Np обнаружен не был. Однако в морской воде его содержание более чем на порядок превышает содержание плутония. Этот факт не вызывает удивления, так как Pu(IV) подвержен глубокой гидролитической полимеризации и прочно сорбируется как на глинистых минералах, так и органических остатках биологического происхождения. В отличие от Pu(IV), у ^{237}Np основное состояние окисления +5 в объектах природной среды, поэтому он более растворим и в водных экосистемах имеет высокие коэффициенты биологического накопления (Болсуновский и др., 2002).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как видно из результатов радиохимического анализа, активность ^{137}Cs в морской воде заливов архипелага Новая Земля и открытом море находится на уровне 1 Бк/м³. Это близко к уровню загрязнения, соответствующему глобальным выпадениям. Активность $^{239,240}\text{Pu}$ в морской воде, отобранной в заливах архипелага Новая Земля, незначительно выше глобального, ^{238}Pu в воде не обнаружен, что свидетельствует о низком соотношении изотопов $^{238}\text{Pu}/^{239,240}\text{Pu}$. Это

Таблица 4. Содержание ^{237}Np в отобранных образцах бентоса Карского моря, Бк/кг

Номер станции	Место отбора	Название биоматериала	^{237}Np , Бк/кг сырого веса
5364	Залив Благополучия	<i>Saduria entomon</i> (морской таракан)	1.3 ± 0.2
5374	Залив Седова	<i>Stenodiscus crispatus</i> (морские звезды)	27.2 ± 3.3
5391	Залив Цивольки	<i>Saduria entomon</i>	80.6 ± 11.8
5394	Новоземельская впадина	<i>Amphipoda krill</i> (ракообразные)	2.4 ± 0.3
5403	Новоземельская впадина	<i>Polychaeta</i> (многощетинковые черви)	1.7 ± 0.2

указывает на то, что в морской воде, как в заливах, так и открытом море, основным источником поступления плутония являются, по видимому, глобальные выпадения. Активность ^{237}Np в морской воде на порядок превышает активность $^{239,240}\text{Pu}$ (0.8–1.9 Бк/м³), в то время как в составе глобальных выпадений количество нептуния в объектах окружающей среды ниже или равно содержанию плутония. Можно предположить, что, поступая в морскую воду из различных источников, радионуклиды $^{239,240}\text{Pu}$ и ^{237}Np ведут себя по-разному: ^{237}Np как более растворимый элемент остается в водной среде, в то время как $^{239,240}\text{Pu}$ соосаждается в составе минеральных взвесей и органического вещества морской воды и депонируется в донных осадках.

В донных отложениях активность $^{239,240}\text{Pu}$ оказалась невысокой (0,2–3,8 Бк/кг). Активность ^{137}Cs – максимально высокая в устье р. Енисей и составляет в среднем из 4 проб 16 Бк/кг. Количество наиболее растворимого радионуклида – ^{237}Np – в донных отложениях ниже предела обнаружения.

По глубине колонок ^{137}Cs распределяется неравномерно. Как правило, имеются максимумы содержания на глубине 3–5 см. Учитывая значения скоростей осадконакопления для данных заливов – 0.16–0.32 см/год, это соответствует периоду около 30 лет, т.е. наиболее вероятной причиной загрязнения является Чернобыльская авария.

Анализ проб бентоса показал, что содержание ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ в отобранных образцах находится ниже предела обнаружения. Активность ^{237}Np в образцах бентоса выше предела обнаружения (1–80 Бк/кг сырого веса). Однако это касается только заливов архипелага Новая Земля, в которых происходило захоронение радиоактивных отходов. Тем не менее, возможно, содержание ^{237}Np в бентосе является одним из индикаторов радиоактивного загрязнения морской среды наравне с содержанием плутония и ^{137}Cs в донных отложениях.

Источник финансирования

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-00310 и частично по госзаданию № 0137-2019-0010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Болсуновский А.Я., Ермаков А.И., Бургер М. (2002) Накопление техногенными радионуклидами водных

растений реки Енисей. *Радиационная биология. Радиоэкология* **42** (2), 194–199.

Галимов Э.М., Лаверов Н.П., Степанец О.В., Коди́на Л.А. (1996) Предварительные результаты эколого-геохимического исследования Арктических морей России (по материалам 22 рейса НИС «Академик Борис Петров»). *Геохимия* (7), 579–597.

Горяченкова Т.А., Казинская И.Е., Емельянов В.В., Степанец О.В., Мясоедов Б.Ф. (2000) Содержание плутония в воде и донных отложениях в Карском море. *Радиохимия* **41** (3), 265–268.

Новиков А.П., Лавринович Е.А., Могилевский А.Н., Фабелинский Ю.И. (2009) Люминесцентный анализ подземных вод Карачаевского ореола загрязнения на содержание и формы нахождения в них нептуния. *Радиохимия* **51** (5), 469–472.

Новиков Ю.П., Павлоцкая Ф.И. (1989) Нептуний в окружающей среде и методы его определения. *Радиохимия* **31** (6), 134–139.

Степанец О.В., Борисов А.П., Травкина А.В., Соловьева Г.Ю., Владимиров М.В., Алиев Р.А. (2010) Использование радионуклидов Pb-210 и Cs-137 для геохронологии современных осадков арктического бассейна в местах захоронения твердых радиоактивных отходов. *Геохимия* (4), 424–429.

Stepanets O.V., Borisov A.P., Travkina A.V., Solov'eva G.Y., Vladimirov M.V., Altev R.A. (2010) Application of the ^{210}Pb and ^{137}Cs radionuclides in the geochronology of modern sediments at the storage sites of solid radioactive wastes in the Arctic basin. *Geochem. Int.* **48** (4), 398–402.

Novikov A.P. (2010) Migration and concentration of artificial radionuclides in environmental objects. *Geochem. Int.* **48**(13), 1263–1388.

Novikov A.P., Fabelinsky Yu.I., Lavrinovich E.A., Goryachenkova T.A., Grechnikov A.A. (2016), Speciation and determination of actinides in the Environment. *Geochem. Int.*, **54**(13), 1196-1209.

Salbu B., Nikitin A., Strand P., Christensen G., Chumichev V., Lind B., Fjellidal H., Bergan T., Rudjord A., Sickel M., Valetova N., Foyn L. (1997) Radioactive contamination from dumped nuclear waste in the Kara Sea—results from joint Russian-Norwegian expeditions in 1992-1994. *Science Tot. Environ.* (202), 185–198.

Standing W.J., Stepanets O., Brown J.E., Dowdall M., Borisov A., Nikitin A. (2008) Radionuclide contamination of sediment deposits in the Ob and Yenisey estuaries and areas of the Kara Sea. *J. Environ. Radioact.* (99), 665–670.

Stepanets O., Borisov A., Ligaev A., Solovjeva G., Travkina A. (2007) Radioecological investigations in shallow bays of the Novaya Zemlya Archipelago in 2002-2005. *J. Environ. Radioact.* (96), 130–137.

Travkina A.V., Goryachenkova T.A., Borisov A.P., Solovieva G.Yu., Ligaev A.N., Novikov A.P. (2017) Monitoring of environmental contamination of Kara Sea and shallow bays of Novaya Zemlya. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* **311** (3), 1673–1680.

CONTENT OF TECHNOGENIC RADIONUCLIDES IN WATER, BOTTOM SEDIMENTS AND BENTHOS OF THE KARA SEA AND SHALLOW BAYS OF THE NOVAYA ZEMLYA ARCHIPELAGO

© 2019 T. A. Goryachenkova^a, A. P. Borisov^a, G. Yu. Solov'eva^a, E. A. Lavrinovich^a,
I. E. Kazinskaya^a, A. N. Ligaev^a, A. V. Travkina^a, A. P. Novikov^{a,*}

^aVernadsky Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of Russian Academy of Sciences
Russia, 119991 Moscow, Kosygin Street, 19

*e-mail: novikov@geokhi.ru

Received: 08.11.2018

Received version received: 19.03.2019

Accepted: 21.03.2019

During the expedition on the Akademik Mstislav Keldysh research vessel in 2016 year it was established that the content of radioactive cesium in the sea water of the Novaya Zemlya archipelago bays and open sea are at a level corresponding to the global fallout (1 Bq/m³). Plutonium content in water is slightly higher. The activity of neptunium

in water is an order of magnitude higher than the activity of plutonium (0.76–1.89 Bq/m³), although its content in global fallout is almost two orders of magnitude lower than the plutonium content. The plutonium content in the bottom sediments of the Kara Sea is 0.2–3.8 Bq/kg. The content of radioactive cesium is as high as possible in the mouth of the Yenisei River (up to 21 Bq/kg) Analysis of benthic samples showed that the content of radioactive cesium and plutonium in samples taken in the bays of the Novaya Zemlya archipelago is below the detection limit. The neptunium content in the benthos samples is above the detection limit and amounts to 1–80 Bq/kg wet weight. It was showed that the content of neptunium in benthos is one of the indicators of radioactive contamination of the marine environment.

Keywords: Kara Sea, radionuclides, sea water, bottom sediments, benthos

(For citation: Goryachenkova T.A., Borisov A.P., Solov'eva G.Yu., Lavrinovich E.A., Kazinskaya I.E., Ligaev A.N., Travkina A.V., Novikov A.P. Content of Technogenic Radionuclides in Water, Bottom Sediments and Benthos of the Kara Sea and Shallow Bays of the Novaya Zemlya Archipelago. *Geokhimiya*. 2019;64(12):1261–1268. DOI: 10.31857/S0016-752564121261-1268)