

УДК 546.36 (268.45)
DOI: 10.7868/S25001640190404

ДИНАМИКА ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В ЭКОСИСТЕМАХ МОРЕЙ СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА НА РУБЕЖЕ XX–XXI ВЕКОВ. ЧАСТЬ 2. ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ

© 2019 г. Академик Г.Г. Матишов^{1,2}, Г.В. Ильин¹,
И.С. Усягина¹, Е.Э. Кириллова²

Аннотация. Проведен сравнительный анализ многолетней динамики содержания и спектра техногенных радионуклидов в донных отложениях арктического шельфа. По архивным и современным данным оценено радиоактивное загрязнение губ и заливов арктических морей. Современный уровень удельной активности ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в поверхностном слое донных отложений низкий. Максимальное накопление изотопов наблюдалось в глубоководных частях желобов, где в составе осадков преобладает глинистая фракция. В 2012–2018 гг. радиоактивность осадков побережья была выше, чем в открытых районах Баренцева моря, где региональные отличия незначительны. Наиболее загрязнены расположенные близко к источникам загрязнения заливы Кольский (губа Пала, район ФГУП «Атомфлот») и Мотовский (губы Западная Лица, Андреева) в Баренцевом море и Енисейский залив в Карском море. В губах южной части Баренцева моря ¹³⁷Cs содержится в концентрации 1,5–3 Бк/кг, ⁹⁰Sr – 0,6–1,9 Бк/кг. В ледовитых фьордах Шпицбергена, где наблюдается разгрузка талых ледниковых вод и сход айсбергов, концентрация ¹³⁷Cs возрастает до 3–6,5 Бк/кг, а ⁹⁰Sr до 2,6–3 Бк/кг. Перенос атмосферных радионуклидов, накопленных многолетним морским льдом в ядерную эпоху, может являться вторичным источником загрязнения моря. Значительное снижение уровня радиационной загрязненности донных отложений в Баренцево-Карском регионе в XXI веке и сглаживание пространственных градиентов концентрации техногенных радионуклидов не снимает вопросов современных исследований в связи с изменениями факторов загрязнения и возрастающим интересом к освоению арктических экосистем.

Ключевые слова: арктические моря, донные отложения, искусственные радионуклиды, многолетние изменения.

DYNAMICS OF ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN THE ECOSYSTEMS OF SEAS OF THE ARCTIC OCEAN AT THE TURN OF THE 21st CENTURY. PART 2. BOTTOM SEDIMENTS

Academician RAS G.G. Matishov^{1,2}, G.V. Ilyin¹, I.S. Usyagina¹, E.E. Kirillova²

Abstract. A comparative analysis of the long-term dynamics of the spectrum and the content of technogenic radionuclides in the bottom sediments of the Arctic shelf has been carried out. According to archival and modern data, radioactive contamination of the inlets and bays of the Arctic seas is estimated; a low modern level of specific activity of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr in the surface layer of bottom sediments is shown. The maximum accumulation of isotopes was observed in the deep-water parts of the troughs, where the clay fraction dominates in the sediments. In 2012–2018 the coastal precipitation radioactivity was higher than in the open areas of the Barents Sea with insignificant regional differences. The Kola and Motovsky Bays in the Barents Sea and the

¹ Мурманский морской биологический институт Кольского научного центра Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute, Kola Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17, e-mail: usjagina@mmbi.info

² Федеральный исследовательский центр Южный научный центр Российской академии наук (Federal Research Centre the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation), Российская Федерация, 344006, г. Ростов-на-Дону, пр. Чехова, 41

Yenisei Gulf in the Kara Sea are the most polluted being located close to the contamination sources. The specific activity of ^{137}Cs is 1.5–3 Bq/kg in the bays in the south of the Barents Sea, ^{90}Sr – 0.6–1.9 Bq/kg. In the ice fjords of Spitsbergen, in places affected by melt ice and icebergs, the concentration of ^{137}Cs increases up to 3–6.5 Bq/kg, and of ^{90}Sr – to 2.6–3 Bq/kg. It has been indicated that the transfer of atmospheric radionuclides accumulated by the perennial sea ice during the “nuclear” era can be a secondary source of the marine ecosystems pollution. A significant decrease in the level of radiation contamination of bottom sediments in the Barents-Kara Region in the 21st century and the smoothing out of spatial concentration gradients of technogenic radionuclides do not reduce the relevance of research due to the changes in pollution factors and increasing interest in the development of the Arctic ecosystems.

Keywords: Arctic seas, bottom sediments, artificial radionuclides, long-term variability.

*Памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова посвящается
In memory of Corresponding Member RAS D.G. Matishov*

ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ШЕЛЬФА

Радиоактивное загрязнение донных отложений морей Северного Ледовитого океана сформировалось в XX веке после испытаний ядерного оружия на Новой Земле, сбросов жидких радиоактивных отходов атомным флотом, а также поступления с морскими течениями и речным стоком техногенных изотопов с западноевропейских и российских радиохимических предприятий. Следует также отметить, что арктические моря подверглись загрязнению радиоактивными осадками, выпавшими в акватории после аварии на Чернобыльской АЭС, несмотря на значительную удаленность от эпицентра катастрофы. При этом захоронения твердых радиоактивных отходов на шельфе моря и в новоземельских заливах не оказывали значительного влияния на уровень радиоактивности морской среды [1–5].

Загрязнение донных отложений Баренцево-Карского шельфа в 1980–2010-е гг. В 1980–1990-е гг. радиоактивность донных отложений Баренцева, Печорского и Карского морей характеризовалась неравномерностью и относительно низким уровнем. В зависимости от типа осадков удельная активность ^{137}Cs в них изменялась от 4 до 30 Бк/кг. В осадках отдельных заливов и губ, во впадинах шельфа было отмечено более высокое содержание ^{137}Cs – до 100 Бк/кг (рис. 1, табл. 1).

Баренцево, Белое моря. В Баренцевом море в 1990-е гг. вдоль Кольского полуострова, у берегов арктических архипелагов Шпицберген, Новая Земля, Земля Франца-Иосифа, а также на мелководьях Печорского моря с характерными для него песчаными осадками концентрация ^{137}Cs составляла 0,6–6,5 Бк/кг. В алевритах и мелких песках

мелководных участков центральной части моря – Медвежинской, Северо-Канинской, Гусиной банках – концентрации ^{137}Cs не превышали 4 Бк/кг. В приглубых участках – на склонах возвышенностей Персея, Центральной, а также Центрального плато – донные отложения содержали ^{137}Cs от 0,8 до 2,9 Бк/кг. Но в глубинных районах – в глубоководных желобах между банками и во впадинах, для

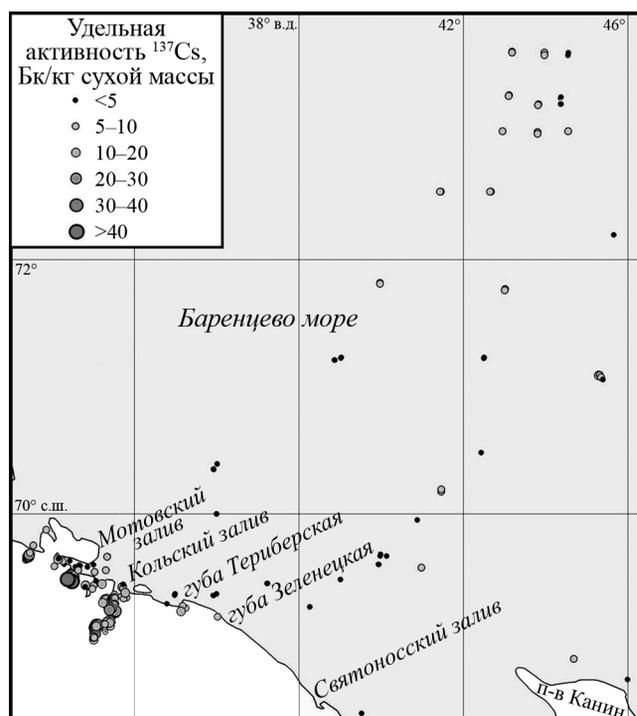


Рис. 1. Удельная активность ^{137}Cs в поверхностном слое донных отложений Баренцева моря по данным ММБИ КНЦ РАН, 1990-е гг.

Fig. 1. Specific activity of ^{137}Cs in the surface layer of the Barents Sea bottom sediments according to data of Murmansk Marine Biological Institute of Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences, the 1990s.

Таблица 1. Динамика содержания ^{137}Cs и ^{90}Sr в донных отложениях Баренцева и Карского морей с 1980 по 2018 г. (Бк/кг сухой массы)
 Table 1. Dynamics of content of ^{137}Cs and ^{90}Sr in the bottom sediments of the Barents and Kara Seas from 1980 to 2018 (Bq/kg of dry weight)

Место отбора проб / Sampling site	Радионуклид Radionuclide	1980-е гг. 1980s	1990-е гг. 1990s	2000-е гг. 2000s	2010–2013	2014–2018			
Баренцево море, открытые части / Barents Sea, open areas	^{137}Cs	10–30	0,2–44	0,3–21	0,3–3,5	0,2–4,2			
	^{90}Sr	–	0,1–0,7	0,1–4,5	0,1–1,0	0,02–5,9			
Баренцево море, побережье / Barents Sea, coastal areas	^{137}Cs	1–40	залив Кольский, р-н РПП «Атомфлот» / Kola Bay, area of «Atomflot»	5–27	залив Кольский, р-н РПП «Атомфлот» / Kola Bay, area of «Atomflot»	<0,2–9,4	залив Кольский / Kola Bay		
		1–16	губа Печорская, губа Байдарцкая / Pechora Bay, Baidaratskaya Bay			1,0	губа Пала / Pala Bay		
		0,5–5	губа Чёшская / Chosha Bay			3,8	р-н РПП «Атомфлот» / Area of «Atomflot»		
		1–13	губа Печенга, губа Териберская, губа Ярнышная / Pechenga Bay, Teriberskaya Bay, Yamyshnaya Bay			0,2–6,7	губа Белокаменная / Belokamennaya Bay		
		2–14	залив Мотовский / Motovskiy Bay			1,1	мыс Тоня (г. Полярный) / Тонья Cape (town of Polyarny)		
		24	губа Оленья, губа Пала / Olenya Bay, Pala Bay			0,2–6,7	губа Териберская / Teriberskaya Bay		
		75–115	губа Андреева / Andreeva Bay			1,3–1,5	губа Ярнышная / Yamyshnaya Bay		
		100–1450	губа Черная / Chernaya Bay			0,2	губа Порчиха / Porchnikha Bay		
						10–260	губа Черная / Chernaya Bay	2,0–2,8	губа Гремиха / Gremikha Bay
							1–2	<0,2–1,1	губа Сайда / Saïda Bay
			–	0,4–0,5	губа Сайда / Saïda Bay				
	^{90}Sr	–	–	1–2	0,1–2,5	прибрежье Кольского полуострова / Kola Peninsula coastal areas			

Окончание табл. 1

Место отбора проб / Sampling site	Радионуклид Radionuclide	1980-е гг. 1980s	1990-е гг. 1990s	2000-е гг. 2000s	2010–2013	2014–2018
Карское море, открытые части / Kara Sea, open areas	^{137}Cs	4–20	10–27	–	0,9–11,6	0,2–5,9
	^{90}Sr	–	0,4–6,0	–	0,2–2,0	–
Карское море, побережье / Kara Sea, coastal areas	^{137}Cs	–	залив Степового Sterovoi Bay залив Енисейский Yenisei Gulf	–	0,4–6,8 губа Обская, губа Тазовская / Gulf of Ob, Taz Estuary	залив Енисейский, губа Обская / Yenisei Gulf, Gulf of Ob
		90	губа Обская / Gulf of Ob	–	губа Обская, губа Тазовская / Gulf of Ob, Taz Estuary	15
	50–100	залив Енисейский Yenisei Gulf	–	0,9–1,7	–	
	10–40	губа Обская / Gulf of Ob	–	–	–	
^{90}Sr	0,3–5,0	губа Обская / Gulf of Ob	–	–	–	–
	2–20	губа Обская / Gulf of Ob	–	–	–	–

которых характерны глинистые отложения, – удельная активность ^{137}Cs была повышена до 7–11 Бк/кг. Более всего повышение выражено в хорошо исследованной южной части моря, где проходят атлантические течения, например в Центральной впадине с глубинами 300–380 м (рис. 1). Очевидно, загрязненные осадки смещаются течениями с поднятий шельфа во впадины. Удельная активность ^{90}Sr в донных осадках составляла 0,1–0,8 Бк/кг. Минимальные значения также были характерны для возвышенностей, максимальные – для впадин. К примеру, на Мурманской банке – в традиционном районе интенсивного рыбного промысла (глубины 120–180 м) – осадки содержали 0,1–0,4 Бк/кг ^{90}Sr .

В 2000-е гг. удельная активность ^{137}Cs в донных отложениях открытых частей Баренцева моря варьировала в диапазоне 0,3–21 Бк/кг, а ^{90}Sr – 0,1–4,5 Бк/кг. В отдельных заливах, связанных с инфраструктурой атомной отрасли, содержание ^{137}Cs было повышено до 30 Бк/кг. Еще более высокая концентрация, до 260 Бк/кг, была отмечена в районе проведения ядерных испытаний – в губе Черной (табл. 1).

В период с 2010 по 2018 г. в связи с уменьшением внешнего поступления радионуклидов максимальная концентрация ^{137}Cs и ^{90}Sr в поверхностном слое осадков снизилась приблизительно в 6 раз (табл. 1). В их распределении более четко обозначились закономерности, определяемые морфологическими и литологическими свойствами участков морского дна – рельефом и типом осадков. Для открытых участков Баренцева моря, где основным породообразующим минералом является кварц, обладающий низкой сорбционной емкостью, характерно минимальное накопление радионуклидов. Содержание ^{137}Cs на таких участках составляет 0,5–2,9 Бк/кг, ^{90}Sr – 0,1–2 Бк/кг. В понижениях дна, где осадки состоят в основном из глинистых минералов, концентрация радионуклидов, как правило, возростала. Например, локальные повышения удельной активности ^{137}Cs до 4,7–8 Бк/кг обнаружены в глубинной части Центральной впадины и в желобах, окаймляющих архипелаги Новая Земля, Земля Франца-Иосифа (рис. 2). Близкие концентрации ^{137}Cs наблюдались в донных отложениях системы подводных впадин Белого моря от р. Северная Двина до Кандалакшского залива. В этих осадках обнаруживались изотопы ^{134}Cs и ^{60}Co , которые указывают на существование местных источников искусственных радионуклидов в Белом море [4; 5].

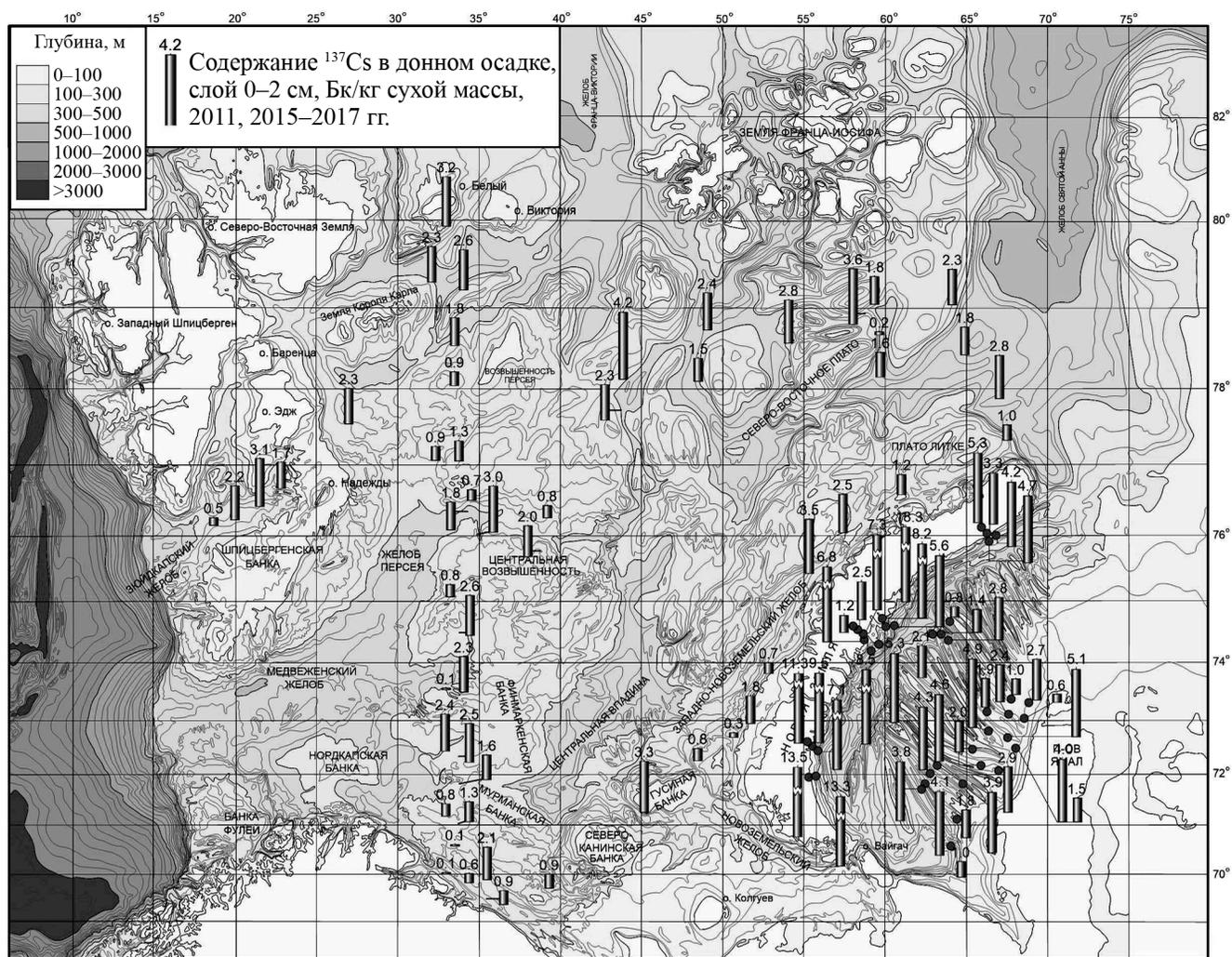


Рис. 2. Удельная активность ^{137}Cs в донных отложениях Баренцева (2015–2017 гг.) и Карского морей (2011, 2013–2016 гг.).
 Fig. 2. Specific activity of ^{137}Cs in the bottom sediments of the Barents Sea (2015–2017) and the Kara Sea (2011, 2013–2016), Bq/kg.

Особое внимание при изучении радиоактивно-го загрязнения арктических морей следует уделить изотопу $^{239,240}\text{Pu}$ ($T_{1/2} = 2,4 \cdot 10^4$ лет), который используют при изготовлении ядерного оружия, а также в качестве топлива в атомных реакторах. В современных донных отложениях Арктики его содержание варьирует в пределах 0,1–3 Бк/кг. По литературным данным, такой уровень концентрации $^{239,240}\text{Pu}$ в осадках формируется в результате глобальных выпадений радионуклида [6; 7]. Более высокие уровни $^{239,240}\text{Pu}$ связывают с его эмиссией из локальных источников. Так, по мере приближения к новоземельским испытательным полигонам содержание $^{239,240}\text{Pu}$ в осадках возрастало до 5–15 Бк/кг. На ограниченных участках юго-восточной части баренцево-морского шельфа и в Южно-Новоземельской впадине содержание $^{239,240}\text{Pu}$ в донных осадках также повышено до 13–15 Бк/кг. Здесь причиной роста

концентраций был перенос в открытое море загрязненных осадков и взвесей с Новой Земли и из губы Черной, где в 1990-е гг. содержание плутония в осадках достигало 5000 Бк/кг. За пределами локального влияния вторичных источников в илистых осадках Центральной впадины концентрация $^{239,240}\text{Pu}$ была значительно ниже – от 0,9 до 3,2 Бк/кг, а в алевритах мелководных районов Печорского моря – от 0,1 до 1 Бк/кг. Донные отложения районов размещения баз военно-морского флота (губы Западная Лица, Сайда, Пала) накопили от 2 до 9 Бк/кг $^{239,240}\text{Pu}$.

Карское море. В 1980-х гг. донные отложения Карского моря в основном характеризовались низким содержанием радионуклидов. Наиболее низкая удельная активность ^{137}Cs , около 2 Бк/кг, была отмечена в отложениях прибрежного новоземельского шельфа и северной части моря. В песчаных и гравийно-галечных осадках мелководной

юго-западной части моря удельная активность ^{137}Cs составляла около 4 Бк/кг. Лишь в некоторых ложбинах с алевритовыми осадками содержание ^{137}Cs было повышено. К примеру, в глубоководном Восточно-Новоземельском желобе и в желобе Святой Анны, открытом к Центральному Арктическому бассейну, на глубинах 500–600 м концентрация ^{137}Cs повышалась до 10–20 Бк/кг [6–9].

В 1990-е гг. стал заметен рост общей радиоактивной загрязненности Карского моря, связанный с деятельностью химических комбинатов по переработке и утилизации радиоактивных отходов. Были выявлены локальные участки повышенного радиоактивного загрязнения донных отложений в Енисейском заливе и Обской губе и в районах захоронения отходов и радиационно-опасных объектов – заливы Абросимова и Степового, где максимальное содержание ^{137}Cs достигало 100 Бк/кг, ^{90}Sr – 20 Бк/кг (табл. 1) [1; 10]. В этот период отмечено также повышенное содержание $^{239,240}\text{Pu}$ (13 Бк/кг) в отложениях Южно-Новоземельской впадины, в которой аккумулировались осадки, транспортируемые в виде взвесей с Новой Земли и из губы Черной.

В 2010–2013 гг. загрязнение осадков приобрело весьма мозаичный характер. Удельная активность ^{137}Cs в осадках шельфа составила 1–12 Бк/кг, а ^{90}Sr – 0,2–2 Бк/кг (табл. 1). Максимальная активность изотопов отмечалась в мелких алевритах и глинистых илах Восточно-Новоземельского желоба, в донных отложениях Обской и Тазовской губ, испытывающих влияние сбросов химических комбинатов.

Результаты измерений современных уровней накопления ^{137}Cs представлены на рисунке 2. На общем, казалось бы, мозаичном фоне техногенной радиоактивности прослеживается установившаяся после стабилизации внешних поступлений закономерность. В частности, более высокие концентрации ^{137}Cs (5–13 Бк/кг) свойственны донным осадкам прибрежного шельфа Новой Земли вблизи захоронений ядерных отходов [11]. Область концентраций 2–4,5 Бк/кг локализована в осадках склона Восточно-Новоземельского желоба и густо пересеченной эрозионными желобами пологой равнины юго-западной части моря. Такая концентрация цезия определяется его выносом из Баренцева моря через пролив Карские ворота, а также системой течений, образующих здесь локальный круговорот и способствующих аккумуляции отложений рельефом дна. На более мелководных участках шельфа Карского моря в удалении от источников радиационного загрязнения концентрация ^{137}Cs понижена до 0,5–2 Бк/кг.

ТИПЫ ЗАЛИВОВ ПО СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ДОННЫХ ОСАДКОВ

В 1999 г. была предложена классификация радиоактивного загрязнения заливов и губ морей Полярного бассейна [6]. В основу градации были положены степень загрязнения и спектр искусственных радионуклидов в донных отложениях этих водоемов. Учитывались географическое положение, площадь водосборного бассейна, близость к источникам техногенных изотопов, таких как базы атомного флота, места захоронения радиоактивных отходов и др. (рис. 3). В настоящее время с изменением значимости источников и уровней загрязнения классификация должна подвергнуться критическому анализу.

Одним из главных факторов радиоактивного загрязнения побережья арктических морей является речной сток, в который попадают как глобальные атмосферные выпадения, поступающие с водосборного бассейна, так и локальные выбросы изотопов на объектах промышленной инфраструктуры [8]. В эстуариях и дельтах рек с обширным водосбором удельная активность ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$ в донных отложениях закономерно выше, чем в устьях малых рек.

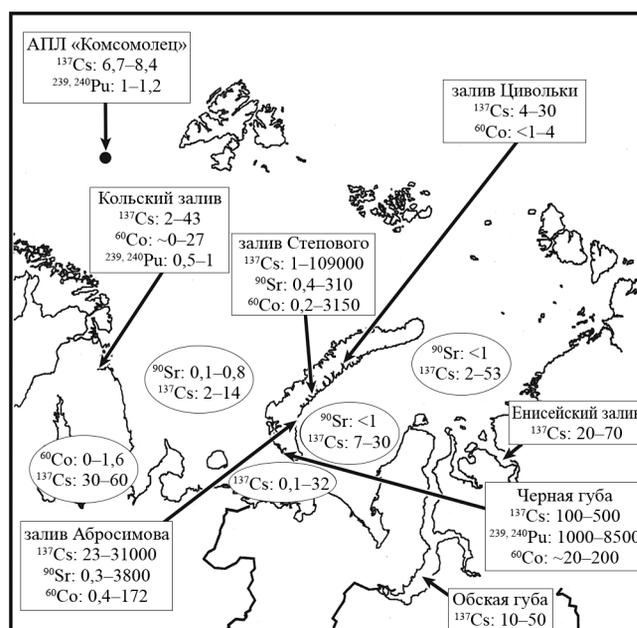


Рис. 3. Удельная активность ^{137}Cs , ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$ в донных отложениях губ и заливов Баренцево-Карского морского бассейна, первая половина 1990-х гг. [19].

Fig. 3. Specific activity of ^{137}Cs , ^{90}Sr and $^{239,240}\text{Pu}$ in the bottom sediments of the bays and gulfs of the Barents-Kara Sea Basin, first half of the 1990s [19].

Динамику радиоактивного загрязнения и возникающие тенденции в разных типах губ и заливов побережья арктических морей можно выявить при сравнении имеющихся данных за периоды 1980–1990-х гг. и начала XXI века. Рассмотрим наиболее показательные акватории, на которые оказали непосредственное влияние ядерные испытания, сбросы и захоронения радиоактивных отходов, инфраструктура атомного флота.

Губа Черная. Губа Черная Баренцева моря – южная площадка Новоземельского ядерного полигона, место испытаний подводных зарядов. Исследования, проведенные в 1992 г. [6], позволили установить, что главные загрязнители донных отложений – трансурановые элементы $^{239, 240}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{137}Cs и ^{60}Co . Концентрация ^{137}Cs на разных участках губы и прилегающих акваторий варьировала от 100 до 500 Бк/кг, а по некоторым данным – до 1450 Бк/кг. Содержание $^{239, 240}\text{Pu}$ в донных осадках разных участков губы изменялось от 1000 до 8500 Бк/кг, составляя в среднем около 5000 Бк/кг. Изотопы ^{60}Co в осадках содержались в значительно меньшей концентрации – 20–200 Бк/кг [6; 9].

Максимальные уровни этих изотопов наблюдались в алевроитовых осадках образующей губу впадины (80–100 м) (рис. 3). Повышенная активность $^{239, 240}\text{Pu}$ в донных отложениях на удаленных от полигона участках моря указывала на то, что процесс осадконакопления происходил под влиянием притока $^{239, 240}\text{Pu}$ во время и после испытаний ядерного оружия под водой. По мере приближения к полигону содержание $^{239, 240}\text{Pu}$ в осадках шельфа возрастает [6].

Заливы Абросимова, Степового, Цивольки. Эти губы восточного побережья Новой Земли стали атомными могильниками. В 1980–1990-х гг. на локальных участках губ вблизи от захороненных в губах контейнеров наблюдались высокие концентрации ^{137}Cs (до 100 кБк/кг), ^{90}Sr (до 4 кБк/кг) и ^{60}Co (до 3 кБк/кг). Такие высокие концентрации были обусловлены стоками с территории водосборов этих губ, и, вероятно, поступлением «горячих» радиоактивных частиц в донные отложения при захоронении радиационно опасных объектов атомного флота. По мере удаления от объектов захоронения удельная активность радионуклидов в осадках заметно уменьшалась [11–13].

Во внутренней части залива Степового донные отложения вблизи затопленных реакторов и контейнеров с отходами характеризовались высоким содержанием ^{137}Cs (1,6–109 кБк/кг), ^{60}Co (0,3–3,2 кБк/кг),

^{90}Sr (47–310 Бк/кг) и $^{239, 240}\text{Pu}$ (6–15 Бк/кг). Закономерно, что более высокие концентрации изотопов отмечались в илистых отложениях замкнутых котловин залива [6].

К настоящему времени удельная активность техногенных радионуклидов значительно снижена, и уровень концентраций ^{137}Cs составляет 5–13 Бк/кг.

Кольский и Мотовский заливы. Это крупные фьордовые долины, в прибрежной зоне которых размещена инфраструктура атомного флота: базы военно-морского флота, Федеральное государственное унитарное предприятие «Атомфлот», хранилища радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива.

В 1990-е гг. в донных отложениях заливов наряду с распространенными радионуклидами ^{137}Cs и ^{90}Sr нередко обнаруживали изотопы плутония. В глинистых осадках центральной части Кольского залива вблизи г. Североморска содержание $^{239, 240}\text{Pu}$ достигало 5,7 Бк/кг, а изотопа ^{238}Pu – 0,12 Бк/кг [6; 14; 15]. Распределение ^{137}Cs в отложениях Мотовского и Кольского заливов было весьма неоднородным, его концентрация на разных участках варьировала от 1 до 40 Бк/кг. Эпизодически в акватории заливов обнаруживали изотоп ^{60}Co (0,5–1 Бк/кг).

По наблюдениям последних лет (2013–2017 гг.), уровень радиоактивного загрязнения в Кольском и Мотовском заливах существенно изменился в сторону снижения концентрации всех искусственных радионуклидов. Распределение изотопов по акваториям заливов характеризуется большой неоднородностью (рис. 4).

В отложениях Мотовского залива удельная активность ^{137}Cs варьирует от 1 до 5 Бк/кг, а ^{90}Sr – от 0,1 до 2 Бк/кг. Средняя удельная активность ^{137}Cs изменялась от 2,5 Бк/кг в 2014 г. до 2 Бк/кг в 2017 г. Средняя концентрация ^{90}Sr в эти годы оставалась почти неизменной – 0,9 и 0,8 Бк/кг сухого осадка соответственно. Изотопы ^{238}Pu и $^{239, 240}\text{Pu}$ в Мотовском заливе были отмечены лишь вблизи устья губы Западная Лица (1,5–2,5 Бк/кг сухой массы).

В осадках Кольского залива удельная активность ^{137}Cs варьирует от 1 до 9 Бк/кг, а ^{90}Sr – от 0,2 до 1,9 Бк/кг. Наличие порога в устьевой части определяет накопление осадочного материала в ковше залива. В соответствии с этим концентрация радионуклидов повышена в донных осадках средней и северной частей залива. В среднем удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr составляет 4,6 и 0,6 Бк/кг сухого осадка соответственно. Другие радиоактивные элементы, характерные для отходов атомной промыш-

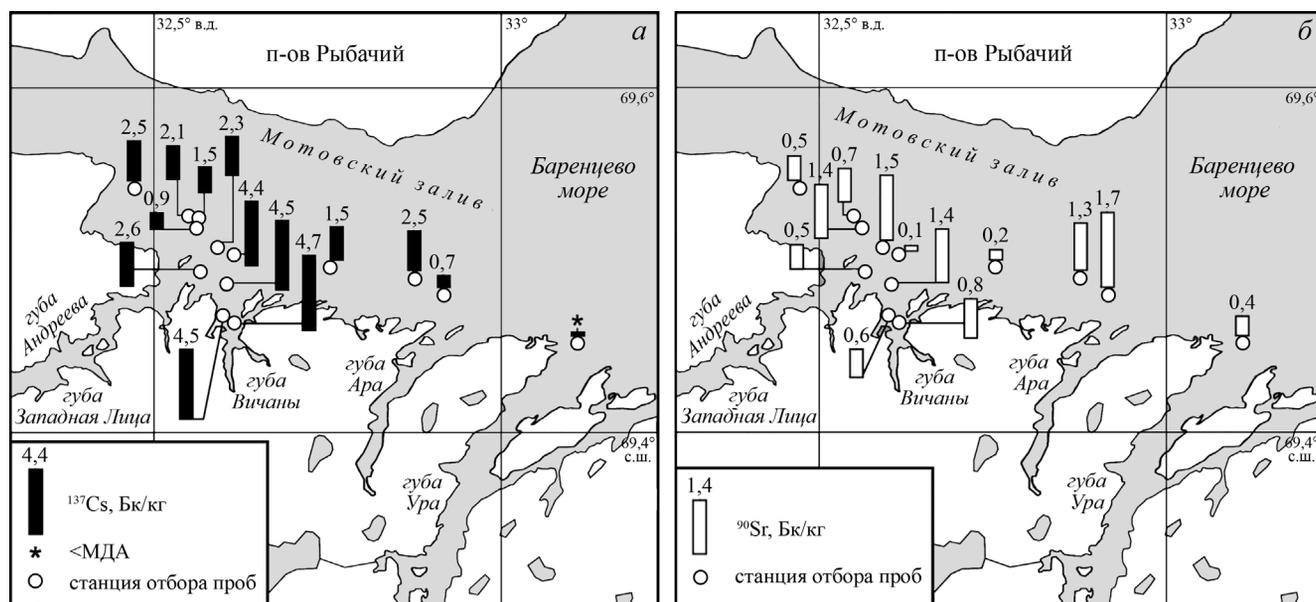


Рис. 4. Удельная активность ^{137}Cs (а) и ^{90}Sr (б) в донных отложениях Мотовского залива. 2014 г. МДА – минимальная детектируемая активность радионуклида.

Fig. 4. Specific activity of ^{137}Cs (a) and ^{90}Sr (б) in the bottom sediments of the Motovskiy Bay, 2014. MDA – minimum detected activity of radionuclide.

ленности, такие как ^{60}Co , ^{152}Eu и ^{241}Am , встречались в осадках обоих заливов единично в следовом количестве.

Губы Сайда, Пала, Екатерининская гавань, Западная Лица. Эти губы традиционно используются для базирования военно-морского флота. В 1990-е гг. в губе Сайда вблизи площадки хранения реакторных отсеков утилизированных подводных лодок донные отложения содержали ^{137}Cs (3–34 Бк/кг), ^{60}Co (0,7–12 Бк/кг) и $^{239,240}\text{Pu}$ (1,6 Бк/кг). В губе Оленья, где расположен судоремонтный завод «Нерпа», в алевритовых осадках концентрация ^{137}Cs , ^{60}Co и $^{239,240}\text{Pu}$ составляла 2–14, 1–12 и 1,6 Бк/кг соответственно. Максимальные уровни наблюдались в донных отложениях губ Пала, Оленья и Екатерининской гавани (район г. Полярный) [6; 15].

Согласно данным, полученным в губе Западная Лица (1997 г.), которая морфологически включает в себя и небольшую губу Андреева, содержание ^{137}Cs достигало значений 75–115 Бк/кг, ^{60}Co – 6–33 Бк/кг, ^{247}Am – до 4 Бк/кг [6; 8]. Антропогенные радионуклиды были обнаружены в поверхностном и в глубинных (до 20 см) слоях осадка. Концентрация ^{137}Cs изменялась по глубине грунтового керна от 115 Бк/кг в верхнем слое до 20 Бк/кг в нижнем слое колонки. В устье губы, выходящей в Мотовский залив, в мелкопесчаных и алевритовых осадках содержание ^{137}Cs составляло 1–50 Бк/кг, ^{60}Co – от 0,5 до 4 Бк/кг и $^{239,240}\text{Pu}$ – около 2 Бк/кг. Накопление радио-

нуклидов в осадках губы было вызвано не только расположением объектов действующего атомного военного флота, но в том числе и аварийной ситуацией в хранилище радиоактивных отходов в губе Андреева. Отложения в других крупных губах Мотовского залива, используемых флотом, Ура и Ара, кроме распространенного изотопа ^{137}Cs содержали $^{239,240}\text{Pu}$ в низкой концентрации – 1,4–2,2 Бк/кг.

Губы Андреева и Малая Андреева. Радиоэкологическое состояние этих малых губ, входящих в береговую систему губы Западная Лица, заслуживает отдельного рассмотрения, так как здесь располагается хранилище радиоактивных отходов, включая отработавшее ядерное топливо. Акватория этой губы является зоной радиационного риска. Морфологически эти губы представляют собой одну губу, разделенную береговым выступом – мысом, на котором еще в 1961 г. было создано хранилище радиоактивных отходов. Современные исследования, проведенные Мурманским морским биологическим институтом Кольского научного центра РАН (ММБИ КНЦ РАН) в 2010–2014 гг., показали, что в результате деятельности хранилища участки побережья загрязнены изотопами ^{137}Cs , ^{90}Sr , ^{238}Pu , $^{239,240}\text{Pu}$. Наиболее сильному загрязнению были подвержены донные осадки на участках постоянной разгрузки грунтовых вод [16]. В литоральных осадках вдоль морского периметра хранилища РАО удельная активность ^{137}Cs варьировала от 15

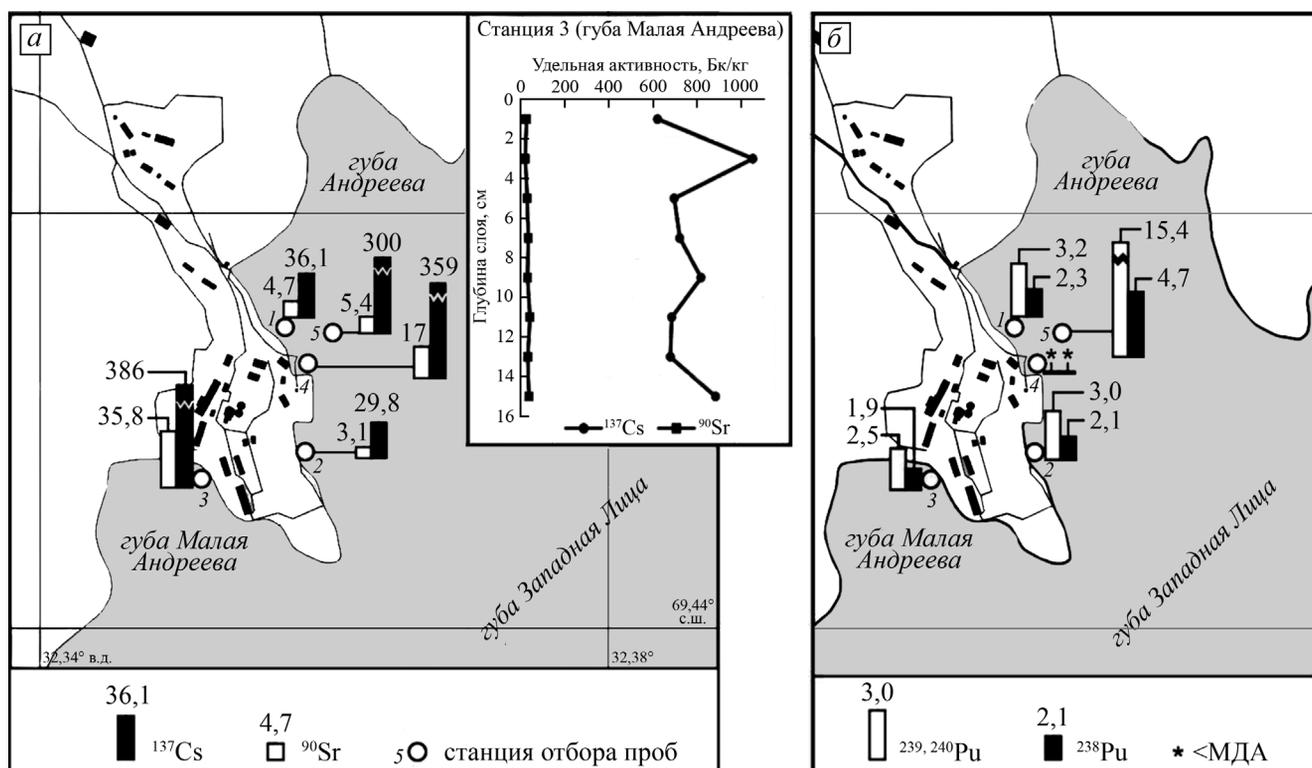


Рис. 5. Удельная активность ^{137}Cs , ^{90}Sr (а) и $^{239,240}\text{Pu}$ (б) в донных отложениях губы Андреева, 2014 г.
Fig. 5. Specific activity of ^{137}Cs , ^{90}Sr (a) and $^{239,240}\text{Pu}$ (b) in the bottom sediments of the Andreeva Bay, 2014.

до 140 Бк/кг, а ^{90}Sr – от 3 до 12 Бк/кг сухой массы в зависимости от литотипа донных отложений. Закономерный рост удельной активности ^{137}Cs (более 300 Бк/кг) отмечен ниже литоральной отмели, на глубинах более 10–15 м, где накапливаются жидкие илы (рис. 5). Длительная утечка радионуклидов привела к загрязнению осадков не только в современном слое (0–1 см), но и глубже по профилю грунтового керна. В исследованной 16-сантиметровой колонке высокая концентрация ^{137}Cs , 600–1000 Бк/кг, устойчиво сохраняется до последнего горизонта, 16 см.

Енисейский залив и Обская губа. Основную роль в загрязнении этих заливов играли плановые и аварийные сбросы отечественных радиохимических предприятий «Маяк», «Красноярск-26» и Сибирского химкомбината. Сбросы осуществлялись в реки, принадлежащие водосборному бассейну Карского моря, и в итоге попадали в заливы, образованные главными реками – Енисеем и Обью. В результате этого в 1990-е гг. донные отложения в этих водоемах содержали расширенный спектр радионуклидов и повышенные уровни изотопов ^{60}Co (0,5–6 Бк/кг), ^{90}Sr (3–20 Бк/кг), $^{239,240}\text{Pu}$ (1–60 Бк/кг) и ^{137}Cs (40–100 Бк/кг). Сибирские реки дренируют

огромные водосборные бассейны, смывая в заливы вместе с терригенным материалом радионуклиды, выпавшие из атмосферы на водосборный бассейн (табл. 1). В грунтовых колонках удельная активность радиоцезия прослеживалась до горизонта 40 см, при этом его концентрация варьировала от 20 Бк/кг в верхнем слое осадка до 11–12 Бк/кг в слоях 40–20 см [6; 8]. Исследования выявили значительное снижение активности ^{137}Cs (0,4–6,8 Бк/кг) и ^{90}Sr (0,9–1,7 Бк/кг) в донных осадках Енисейского залива и Обской губы в период с 1995 по 2016 г.

Двинский, Онежский и Кандалакшский заливы. Заливы Белого моря представляют особую группу водоемов, в которых в 1990-х гг. отмечалась повышенная (20–70 Бк/кг) концентрация ^{137}Cs . Основным источником поступления изотопа в Белое море были глобальные выпадения радиоактивных веществ из атмосферы. Миграция радионуклидов с суши в море осуществлялась главным образом по речной системе Северной Двины. Однако в отдельных случаях определенную роль играли локальные источники загрязнения. Подтверждением этому служит обнаружение в жидких поверхностных илах Кандалакшского залива ^{60}Co (1,7 Бк/кг) и повышенной концентрации ^{137}Cs (до 45 Бк/кг).

Однако в настоящее время, по данным наблюдений 2018 г., в осадках Кандалакшского залива (губа Чула и прилегающая акватория) концентрация ^{137}Cs значительно снизилась и составила 0,9–1,8 Бк/кг, а в Онежском заливе – 2,5 Бк/кг. Другие антропогенные радионуклиды обнаружены не были.

В Двинском заливе, вблизи устья р. Двины, современный уровень удельной активности ^{137}Cs изменяется в интервале 2–5 Бк/кг сухого осадка. В некоторых пробах в слое донного осадка до 20 см [17] обнаруживался изотоп ^{134}Cs (от 1 до 4 Бк/кг), поступление которого, вероятнее всего, определяется деятельностью судоремонтного завода «Звездочка» в Северодвинске.

Губы открытого побережья. В 1990-е гг. подавляющая часть относительно небольших губ и заливов арктического побережья, таких как Териберская, Зеленецкая, Ярнышная, Печерская и Чёшская (южная часть Баренцева моря), Норденшельда, Глазова, Иностранцева (архипелаг Новая Земля), Исфьорд, Хорсунд, Бельсунд (Шпицберген) и других, имели низкие уровни радиоактивного загрязнения. Донные отложения содержали ^{137}Cs от 1 до 15 Бк/кг, изотопы ^{60}Co и $^{239, 240}\text{Pu}$ в радиационном спектре осадков отсутствовали. Это можно объяснить очень ограниченными водосборными бассейнами этих губ, в том числе покрытыми обширными ледниками (главным образом на Шпицбергене и Новой Земле). В современный период, по данным 2015–2018 гг., в осадках указанных заливов и губ сохраняется низкое содержание радионуклидов. В губах южной части Баренцева моря ^{137}Cs содержится в концентрации 1,5–3 Бк/кг, ^{90}Sr – 0,6–1,9 Бк/кг. В ледовитых

губах Шпицбергена, где в последние годы наблюдается интенсивная разгрузка талых ледниковых вод и сход айсбергов, концентрация ^{137}Cs возрастает до 3–6,5 Бк/кг сухого осадка, а ^{90}Sr – 2,6–3 Бк/кг [18]. Подобные явления обнаружены в прибрежной зоне Новой Земли [19].

Таким образом, значительное снижение уровня радиационной загрязненности донных отложений в Баренцево-Карском регионе в XXI веке и сглаживание пространственных градиентов концентрации техногенных радиоизотопов не снимает необходимости современных исследований в связи с изменениями факторов загрязнения и возрастающим интересом к освоению морских арктических акваторий. В специальных обследованиях нуждаются локальные участки российских морей, насыщенные ядерными энергоустановками, на которых потенциально возможны относительно высокие уровни искусственных изотопов. Следовательно, возникает необходимость расширения и углубления (детализации) исследований и накопления данных первичных наблюдений.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках реализации проекта № 18-05-60249 «Радиоактивное загрязнение и вторичные источники антропогенных изотопов в морях Северного Ледовитого океана на рубеже XX–XXI веков»; частично – рамках госзадания ММБИ КНЦ РАН, № госрегистрации АААА-А18-118030690062-0, а также темы госзаданий ЮНЦ РАН, № госрегистрации АААА-А18-118122790121-5 и № госрегистрации 01201363186.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Щипа Е., Павлова Л.Г. 1994. Радиоактивное загрязнение среды и биоты на Новой Земле вследствие испытаний ядерного оружия. *Доклады Академии наук*. 337(6): 824–826.
2. Føyn L., Sværen I. 1995. The Barents Sea, its fisheries and the past and present status of radioactive contamination and its impact on fisheries. In: *Environmental Radioactivity in the Arctic. Proceedings of the Second International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic (Oslo, Norway, 21–25 August 1995)*. Østerås, Scientific Committee of the Environmental Radioactivity in the Arctic: 215–220.
3. Ilus E., Ikäheimonen T.K., Saxén R., Suomela M., Gavrilov V.M., Gedeonov L.I., Gritchenka Z.G., Ivanova L.M., Tishkov V.P., Reshetov V.V. 1991. *Study of radioactive substances in the Baltic Sea in 1986–1987. Report STUK-B-VALO 69*. Helsinki, Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety: 23 p.
4. Ilus E., Sjöblom K.-L., Ikäheimonen T.K., Saxen R., Klemola S. 1993. *Monitoring of radionuclides in the Baltic Sea in 1989–1990. Supplement 10 to Annual Report STUK-A89. STUK-A103*. Helsinki, Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety: 35 p.
5. Rissanen K., Ikäheimonen T.K., Matishov D.G., Matishov G.G. 1999. Radionuclide concentrations in sediments, soil and plant samples from the archipelago of Franz Joseph Land, an area affected by the Chernobyl fallout. In: *Materials of the 4th International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic (Edinburgh, 20–23 September 1999)*. Oslo, Norwegian Radiation Protection Authority: 325–327.
6. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г. 2001. *Радиационная экологическая океанология*. Апатиты, изд-во КНЦ РАН: 417 с.
7. Матишов Г.Г., Касаткина Н.Е., Леппанен А.-П., Матишов Д.Г., Солтапе Д. 2011. Новые данные о содержании изотопов плутония в грунтах Баренцева моря. *Доклады Академии наук*. 440(5): 696–700.
8. Кузнецов Ю.В., Ревенко Ю.А., Легин В.К., Раков Н.А., Жидков В.В., Савицкий Ю.В., Тишков В.П., Поспелов Ю.Н., Егоров Ю.М. 1994. К оценке вклада реки Енисей в общую радиоактивную загрязненность Карского моря. *Радиохимия*. 36(6): 546–552.

9. Stepanets O.V., Borisov A.P., Solov'eva G.Yu. 1999. Distribution of anthropogenic radionuclides in the estuaries of Ob and Yenisei rivers Adjacent Kara Sea. *Berichte zur Polarforschung*. 300: 132–140.
10. Strand P., Nikitin A., Rudjord A.L., Salbu B., Christensen G., Føyn L., Kryshev I.I., Chumichev V.B., Dahlgaard H., Holm E. 1994. Survey of artificial radionuclides in the Barents Sea and the Kara Sea. *Journal of Environmental Radioactivity*. 25(1–2): 99–112. doi: 10.1016/0265-931X(94)90010-8
11. Travkina A.V., Goryachenkova T.A., Borisov A.P., Solovieva G.Y., Ligaev A.N., Novikov A.P. 2017. Monitoring the environmental contamination of Kara Sea and shallow bays of Novaya Zemlya. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 311(3): 1673–1680. doi: 10.1007/s10967-016-5163-0
12. Nielsen S.P., Strand P. 1995. Doses to man from dumping of radioactive waste in the Arctic Seas. In: *Proceedings of the Second International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic (Oslo, Norway, 21–25 August 1995)*. Østerås, Statens Straalevern: 156–158.
13. Gwynn J.P., Heldal H.E., Gåfvert T., Blinova O., Eriksson M., Sværen I., Brungot A.L., Strålberg E., Møller B., Rudjord A.L. 2012. Radiological status of the marine environment in the Barents Sea. *Journal of Environmental Radioactivity*. 113: 155–162. doi: 10.1016/j.jenvrad.2012.06.003
14. Baklanov A., Bergman R., Segerstahl B. 1996. *Radioactive sources in the Kola Region: Actual and potential radiological consequences for man. IASA, Final Report, December 1996*. Laxenburg: 260 p.
15. Rissanen K., Ikäheimonen T.K., Matishov D.G., Matishov G.G. 1998. Radioactivity levels in Kola Bay. *Radiation Protection Dosimetry*. 75(1–4): 223–228. doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a032234
16. Матишов Г.Г., Ильин Г.В., Усягина И.С., Моисеев Д.В., Далё С., Касаткина Н.Е., Валуйская Д.А. 2017. О влиянии хранилища радиоактивных отходов в губе Андреева на загрязнение экосистемы Баренцева моря. *Доклады Академии наук*. 472(5): 590–595. DOI: 10.7868/S086956521705019X
17. Kriauciunas V.V., Iglovsky S.A., Bazhenov A.V., Kuznetsova I.A., Shakhova E.V., Druzhinin S.V. 2018. ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra in bottom sediments of the Dvina Bay on the White Sea (the Suhoe Sea Gulf). *Arctic Environmental Research*. 18(4): 148–154. doi: 10.3897/issn2541-8416.2018.18.4.148
18. Матишов Г.Г., Ильин Г.В., Усягина И.С., Валуйская Д.А., Дерябин А.А. 2018. Результаты морских радиоэкологических исследований фьордов Западного Шпицбергена. *Доклады Академии наук*. 480(3): 353–358. doi: 10.7868/S0869565218150203
19. Мирошников А.Ю., Флинт М.В., Дубинина Е.О., Асадулин Э.Э., Щука С.А., Усачева А.А. 2018. Изменение радиационного состояния донных отложений Енисейского залива. *Доклады Академии наук*. 483(6): 673–676. doi: 10.31857/S086956520003455-3
20. Føyn L., Sværen I. 1995. The Barents Sea, its fisheries and the past and present status of radioactive contamination and its impact on fisheries. In: *Environmental Radioactivity in the Arctic. Proceedings of the Second International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic (Oslo, Norway, 21–25 August 1995)*. Østerås, Scientific Committee of the Environmental Radioactivity in the Arctic: 215–220.
21. Ilus E., Ikäheimonen T.K., Saxén R., Suomela M., Gavrilov V.M., Gedeonov L.I., Gritchenka Z.G., Ivanova L.M., Tishkov V.P., Reshetov V.V. 1991. *Study of radioactive substances in the Baltic Sea in 1986–1987. Report STUK-B-VALO 69*. Helsinki, Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety: 23 p.
22. Ilus E., Sjöblom K.-L., Ikäheimonen T.K., Saxén R., Klemola S. 1993. *Monitoring of radionuclides in the Baltic Sea in 1989–1990. Supplement 10 to Annual Report STUK-A89. STUK-A103*. Helsinki, Finnish Centre for Radiation and Nuclear Safety: 35 p.
23. Rissanen K., Ikäheimonen T.K., Matishov D.G., Matishov G.G. 1999. Radionuclide concentrations in sediments, soil and plant samples from the archipelago of Franz Joseph Land, an area affected by the Chernobyl fallout. In: *Materials of the 4th International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic (Edinburgh, 20–23 September 1999)*. Oslo, Norwegian Radiation Protection Authority: 325–327.
24. Matishov G.G., Matishov D.G. 2001. *Radiatsionnaya ekologicheskaya okeanologiya. [Radiation Ecological Oceanology]*. Apatity, Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 417 p.
25. Matishov G.G., Kasatkina N.E., Leppanen A.-P., Matishov D.G., Solatie D. 2011. New data on the concentration of plutonium isotopes in the sediments of the Barents Sea. *Doklady Earth Sciences*. 440(2): 1445–1448.
26. Kuznetsov Yu.V., Revenko Yu.A., Legin V.K., Rakov N.A., Zhidkov V.V., Savitskii Yu.V., Tishkov V.P., Pospelov Yu.N., Egorov Yu.M. 1995. Contribution from the Yenisei River to the total radioactive contamination of the Kara Sea. *Radiochemistry*. 36(6): 603–617.
27. Stepanets O.V., Borisov A.P., Solov'eva G.Yu. 1999. Distribution of anthropogenic radionuclides in the estuaries of Ob and Yenisei rivers Adjacent Kara Sea. *Berichte zur Polarforschung*. 300: 132–140.
28. Strand P., Nikitin A., Rudjord A.L., Salbu B., Christensen G., Føyn L., Kryshev I.I., Chumichev V.B., Dahlgaard H., Holm E. 1994. Survey of artificial radionuclides in the Barents Sea and the Kara Sea. *Journal of Environmental Radioactivity*. 25(1–2): 99–112. doi: 10.1016/0265-931X(94)90010-8
29. Travkina A.V., Goryachenkova T.A., Borisov A.P., Solovieva G.Y., Ligaev A.N., Novikov A.P. 2017. Monitoring the environmental contamination of Kara Sea and shallow bays of Novaya Zemlya. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 311(3): 1673–1680. doi: 10.1007/s10967-016-5163-0
30. Nielsen S.P., Strand P., 1995. Doses to man from dumping of radioactive waste in the Arctic Seas. In: *Proceedings of the Second International Conference on Environmental Radioactivity in the Arctic (Oslo, Norway, 21–25 August 1995)*. Østerås, Statens Straalevern: 156–158.
31. Gwynn J.P., Heldal H.E., Gåfvert T., Blinova O., Eriksson M., Sværen I., Brungot A.L., Strålberg E., Møller B., Rudjord A.L. 2012. Radiological status of the marine environment in the Barents Sea. *Journal of Environmental Radioactivity*. 113: 155–162. doi: 10.1016/j.jenvrad.2012.06.003

REFERENCES

1. Matishov G.G., Matishov D.G., Shchiba E., Pavlova L.G. 1994. [Radioactive contamination of the environment and biota on the Novaya Zemlya due to nuclear weapons tests]. *Doklady Akademii nauk*. 337(6): 824–826. (In Russian).

14. Baklanov A., Bergman R., Segerstahl B. 1996. *Radioactive sources in the Kola Region: Actual and potential radiological consequences for man. IIASA, Final Report, December 1996*. Laxenburg: 260 p.
15. Rissanen K., Ikäheimonen T.K., Matishov D.G., Matishov G.G. 1998. Radioactivity levels in Kola Bay. *Radiation Protection Dosimetry*. 75(1–4): 223–228. doi: 10.1093/oxfordjournals.rpd.a032234
16. Matishov G.G., Ilyin G.V., Usyagina I.S., Moiseev D.V., Dahle S., Kasatkina N.E., Valuyskaya D.A. 2017. The effect of radioactive waste storage in Andreev bay on contamination of the Barents Sea ecosystem. *Doklady Earth Sciences*. 472(2): 220–225. doi: 10.1134/S1028334X17020155
17. Kriauciunas V.V., Iglovsky S.A., Bazhenov A.V., Kuznetsova I.A., Shakhova E.V., Druzhinin S.V. 2018. ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{40}K , ^{232}Th , ^{226}Ra in bottom sediments of the Dvina Bay on the White Sea (the Suhoie Sea Gulf). *Arctic Environmental Research*. 18(4): 148–154. doi: 10.3897/issn2541-8416.2018.18.4.148
18. Matishov G.G., Ilyin G.V., Usyagina I.S., Valuyskaya D.A., Deryabin A.A. 2018. Results of marine radioecological study of fjords of Western Spitsbergen. *Doklady Earth Sciences*. 480(1): 679–684. doi: 10.1134/S1028334X18050252
19. Miroshnikov A.Yu., Flint M.V., Dubinina E.O., Asadulin En.E., Shchuka S.A., Usacheva A.A. 2018. Changes in the Radiation State of Bottom Sediments in Yenisei Gulf. *Doklady Earth Sciences*. 483(2): 1582–1586. doi: 10.1134/S1028334X1812019X

Поступила 28.06.2019