

УДК 546.36 (268.45)
DOI: 10.7868/S25000640200203

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В НАКОПЛЕНИИ ИСКУССТВЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В АЗОВСКОМ И АРКТИЧЕСКИХ МОРЯХ

© 2020 г. Академик Г.Г. Матишов^{1,2}, В.В. Польшин¹,
Е.Э. Кириллова¹, Г.В. Ильин², И.С. Усягина²

Аннотация. Проанализированы новые данные о концентрации ¹³⁷Cs в воде и донных отложениях Азовского моря. Обсуждаются факторы, определяющие поступление, накопление и перераспределение техногенных радионуклидов в его бассейне. Отмечено значительное снижение их активности в многолетней динамике. Дана сравнительная характеристика радиоэкологического состояния Азовского и североευропейских морей. Значительная роль речного стока, эффектов смыва и миграции радионуклидов с территории водосборного бассейна относится к общим характерным чертам радиационного загрязнения как южных, так и североευропейских морей.

Отмечен более низкий фоновый уровень загрязнения морей Арктики в условиях ослабления глобальной радиационной нагрузки. Это объясняется их свободным водообменом с океаническим бассейном в отличие от Азовского моря. Повышенный фон радиоактивности в Азовском море в основном поддерживается рециркуляцией поступивших после аварии Чернобыльской АЭС радионуклидов. Особое значение в рециркуляции содержащихся в экосистеме техногенных радионуклидов имеет режим поступления в воду взвешенного вещества в период сезонных паводков и особенно при ветровом перемешивании. При этом мутность воды возрастает до максимума, а взмучивание достигает дна, вызывая десорбцию радионуклидов, дифференциацию и переотложение донных осадков.

Специфические для Азовского моря условия смешения пресных и соленых вод, формирование острых градиентов солёности играют важную роль в сорбции и осаждении радионуклидов в этом водоеме. Механика литологической и биологической адсорбции, фиксация и осаждение радиоактивных частиц планктоном, бентосом и другой морской биотой до сих пор очень слабо изучена.

Ключевые слова: радиоактивность, морская среда, донные осадки.

CURRENT TRENDS IN THE ACCUMULATION OF ARTIFICIAL RADIONUCLIDES IN THE SEA OF AZOV AND ARCTIC SEAS

Academician RAS G.G. Matishov^{1,2}, V.V. Polshin¹,
E.E. Kirillova¹, G.V. Ilyin², I.S. Usyagina²

Abstract. New data on the concentration of ¹³⁷Cs in water and bottom sediments of the Sea of Azov are analyzed. The factors determining the entry, accumulation and redistribution of technogenic radionuclides in its basin are discussed. A decrease in their activity in the long-term dynamics is noted. Comparative characteristics of the radioecological state of the Azov and North European seas are provided. A significant role in the river flow, the impact of radionuclides on the territory of the aquifer belongs to the common characteristic features of the radiation exposure of both the Southern and North European seas.

¹ 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, e-mail: matishov_ssc-ras@ssc-ras.ru

² Мурманский морской биологический институт Российской академии наук (Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences, Murmansk, Russian Federation), Российская Федерация, 183010, г. Мурманск, ул. Владимирская, 17

A lower background level of pollution of the Arctic seas is noted under conditions of a weakening global radiation load. This is due to their free water exchange with the ocean basin, in contrast to the Sea of Azov. The increased background of radioactivity in the Sea of Azov is mainly supported by the recycling of radionuclides received after the Chernobyl accident. Of particular importance in the recycling of technogenic radionuclides contained in the ecosystem is the regime of suspended solids entering the water during seasonal floods and, especially, with wind mixing. In this case, the turbidity of the water increases to the maximum, and the agitation reaches the bottom, causing the radionuclides desorption, differentiation and redeposition of bottom sediments.

It was shown that the conditions of mixing fresh and salt waters specific to the Sea of Azov, the formation of sharp salinity gradients, play an important role in the sorption and precipitation of radionuclides in this reservoir. The mechanics of lithological and biological adsorption, fixation, and deposition of radioactive particles by plankton, benthos, and other marine biota are still very poorly studied.

Keywords: radioactivity, marine environment, bottom sediments.

Актуальность исследования радиоактивного загрязнения Азовского моря определяется наличием потенциально опасных источников – Ростовской и Воронежской АЭС. В донных отложениях Азовского моря накапливается больше антропогенных радионуклидов, чем в осадках других морей, расположенных на европейской территории России (рис. 1) [1; 2]. В этой связи назрела необходимость в сравнительном анализе и выявлении исторических тенденций изменения уровня радиоактивного загрязнения акваторий российских арктических и южных морей.

С 1997 г. сотрудники Мурманского морского биологического института Российской академии наук (ММБИ РАН) и Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН) проводят совместный экосистемный мониторинг Азовского моря [1; 2]. Новые данные по гранулометрическому составу донных отложений, содержанию взвеси и активности ^{137}Cs в морской среде получены в ходе экспедиции на научно-исследовательском судне «Денеб» в июле 2019 г.

Пробы воды отбирали с поверхностного горизонта моря. Донные осадки (слой 0–3 см) отобраны с помощью дночерпателя Ван-Вина. В пробах воды активность радиоизотопов цезия определена методом концентрирования на целлюлозном неорганическом сорбенте «Анфеж» (объем пробы 100 л). Измерения активности ^{137}Cs в пробах сорбента и донных отложениях выполнены на спектрометре гамма-излучения InSpector-2000 (Canberra Industries, Inc., США). Анализ спектров выполнен с помощью программного обеспечения Genie-2000. Удельная активность ^{137}Cs в донных отложениях приведена на единицу сухой массы пробы.

Особенностями седиментогенеза, гидрологическим, гидрохимическим и гидробиологическим ре-

жимом открытая часть Азовского моря отличается от акватории Таганрогского залива. Практически весь поступающий в акваторию осадочный материал аккумулируется на ее дне, при этом частицы взвеси подвержены закономерной миграции к центральным районам моря. Распределение взвеси имеет сезонный характер и обуславливается физико-географической обстановкой морского водоема [3; 4]. В период половодий и паводков мутность воды повышается и имеет максимальные значения. Также изменение прозрачности может происходить при ветровом взмучивании во время сгонно-нагонных явлений.

В июле 2019 г. максимальная концентрация взвешенного вещества в морской воде была зафиксирована нами в восточной части Таганрогского залива (рис. 2, табл. 1). От района донского взморья до банки Песчаные острова содержание взвеси менялось от 21,8 до 53,1 мг/л на поверхности и от 21,4 до 48,1 мг/л у дна. По литературным данным, содержание взвеси на взморье во время паводка может достигать более 100 мг/л, а в остальное время года находится в пределах 20–50 мг/л [4].

В открытой части Азовского моря на распределение взвеси влияют рельеф дна, гидродинамический режим, а также биопродуктивность морских организмов. Для периодов штормовой активности типично турбулентное перемешивание практически всей водной толщи, которое сопровождается взмучиванием поверхностного слоя морских осадков. В июле 2019 г. содержание взвеси в поверхностном и придонном горизонтах в центральной части акватории моря изменялось от 2,5 до 10 мг/л (рис. 2).

Процесс радиоактивного загрязнения в Таганрогском заливе происходит в условиях резкого смешения речных и морских вод. При этом соленость

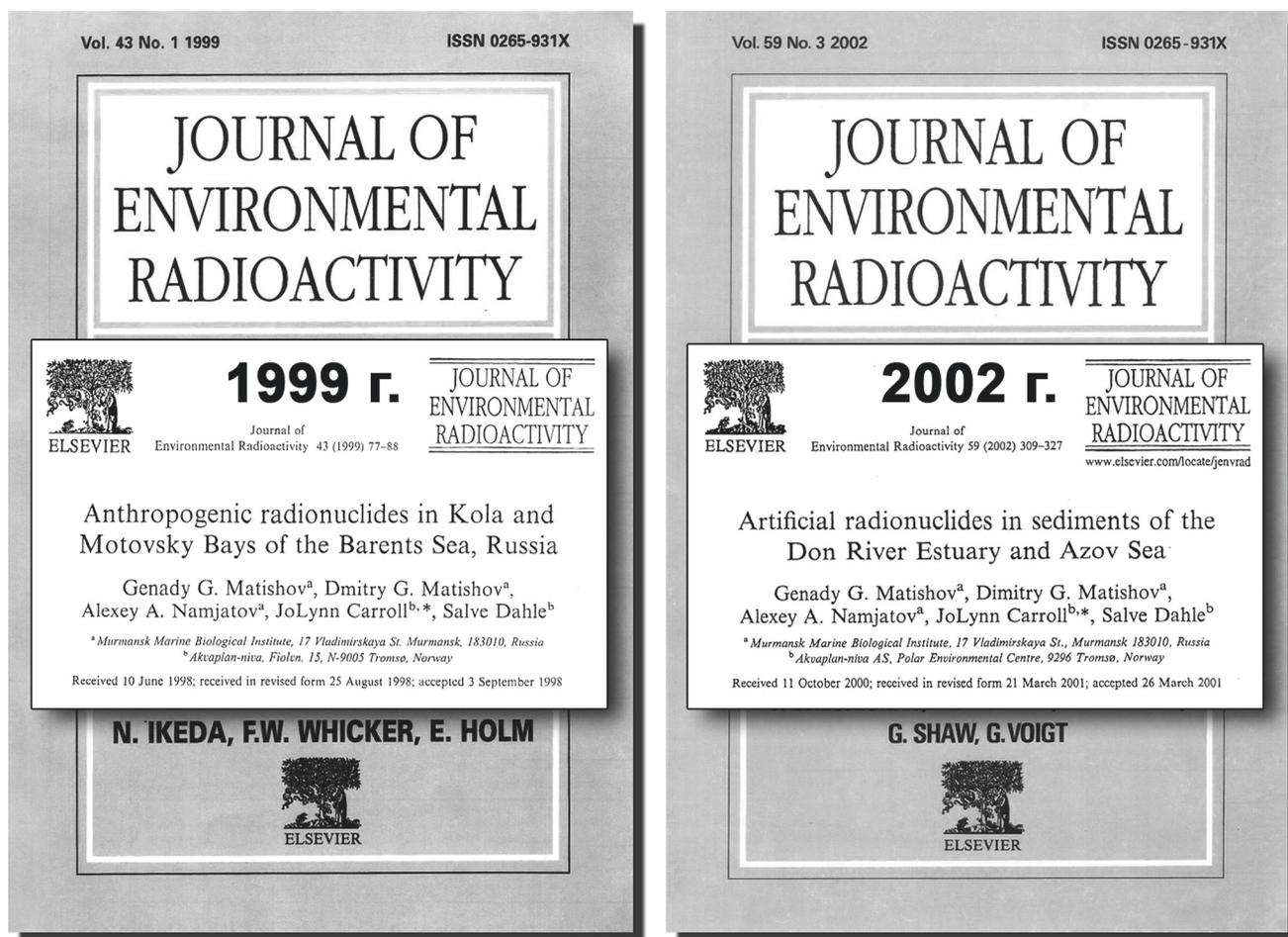


Рис. 1. Первые публикации ММБИ РАН и ЮНЦ РАН по радиоактивному загрязнению Баренцева и Азовского морей в международных журналах.

Fig. 1. The first publications of Murmansk Marine Biological Institute of the Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences and the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences on radioactive contamination of the Barents Sea and the Sea of Azov in international journals.

изменяется от 0,15–5 в кутовой части залива до 9–11 ‰ на выходе в открытое море. В июле 2019 г. в акватории залива была отмечена низкая (1–4 Бк/м³) объемная активность ¹³⁷Cs (рис. 2). В это же время объемная активность ¹³⁷Cs в поверхностных водах открытой части моря составляла порядка 5–6 Бк/м³. В незначительном удалении от берегов объемная активность ¹³⁷Cs в воде изменялась от 1 до 7,2 Бк/м³. В этой связи вполне очевиден эффект смыва и миграции радионуклидов с территории водосборного бассейна. Проведенными ранее исследованиями было установлено, что объемная активность ¹³⁷Cs в воде Таганрогского залива не превышала 5 Бк/м³, а в дельте р. Дон – 2 Бк/м³ [1; 3; 5].

После аварии на Чернобыльской АЭС [6–10] в донных отложениях Азовского моря были зафиксированы ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, и ^{239, 240}Pu [1]. Короткоживущие радиоизотопы ¹³⁴Cs и ⁶⁰Co обнаружены не

были [1; 2]. В 1986 г. удельная активность ¹³⁷Cs в морских осадках Таганрогского залива составляла от 2 до 60 Бк/кг. Следующие два года характеризовались более высоким содержанием ¹³⁷Cs в донных отложениях залива, которое изменялось от 22,2 до 264 Бк/кг [1; 2]. В 2001–2004 гг. удельная активность ¹³⁷Cs находилась в диапазоне от 0,4 до 80 Бк/кг. В донных отложениях с содержанием пелитовой фракции, превышающим 70 %, удельная активность ¹³⁷Cs составляла 75–85 Бк/кг. В алевритах и песках, накапливающихся в мелководных районах с активным гидродинамическим режимом, удельная активность ¹³⁷Cs была <0,3–7,4 Бк/кг [1].

В 2019 г. в донных отложениях Таганрогского залива, отобранных с глубины 4–7 м, содержание ¹³⁷Cs менялось от 10–30 до 45 Бк/кг (рис. 3, табл. 2). В глинистых илах, залегающих на глубинах 4–10 м в центральной части залива, удельная

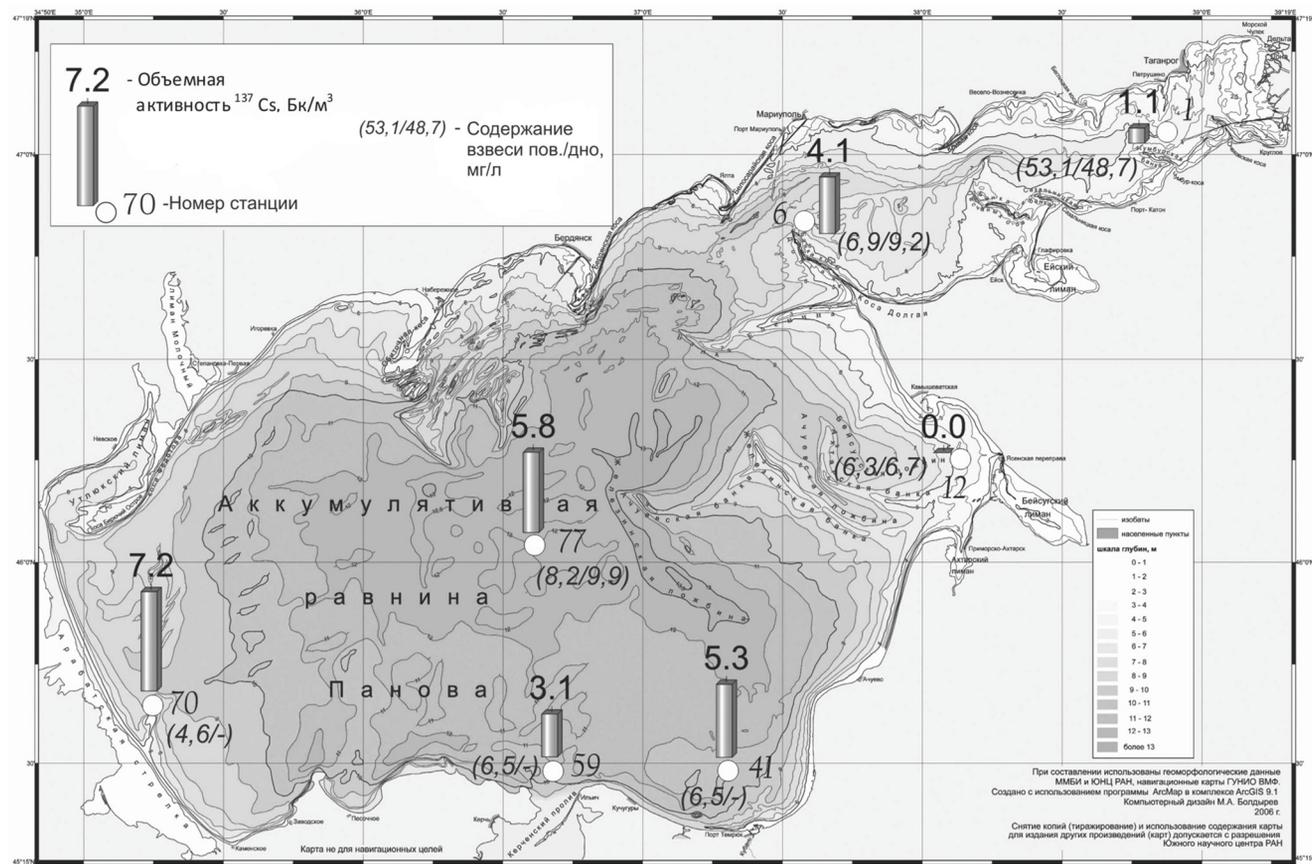


Рис. 2. Содержание взвеси и объемная активность ¹³⁷Cs в воде Азовского моря (июль 2019 г.).
 Fig. 2. Suspension content and volumetric activity of ¹³⁷Cs in the water of the Sea of Azov (July 2019).

Таблица 1. Содержание взвеси в поверхностном и придонном слое Азовского моря (июль 2019 г.). Станции показаны на рисунках 2 и 3
 Table 1. The content of the total suspension in the water of the Sea of Azov (July 2019). The stations are shown in Figures 2 and 3

№ станции / Station number	1		2		3		4		6		12		15		21		26		59		63		66		68		70		75		77		80	
	Поверхность / Surface	Дно / Bottom																																
Содержание общей взвеси, мг/л / The content of the total suspension, mg/l	53,1	48,7	21,8	21,4	-	-	6,1	8,6	6,9	9,2	6,3	6,7	2,5	-	9,0	-	6,7	8,8	6,5	-	4,0	5,0	2,5	4,0	-	-	4,6	-	5,2	6,3	8,2	9,9	4,2	6,5

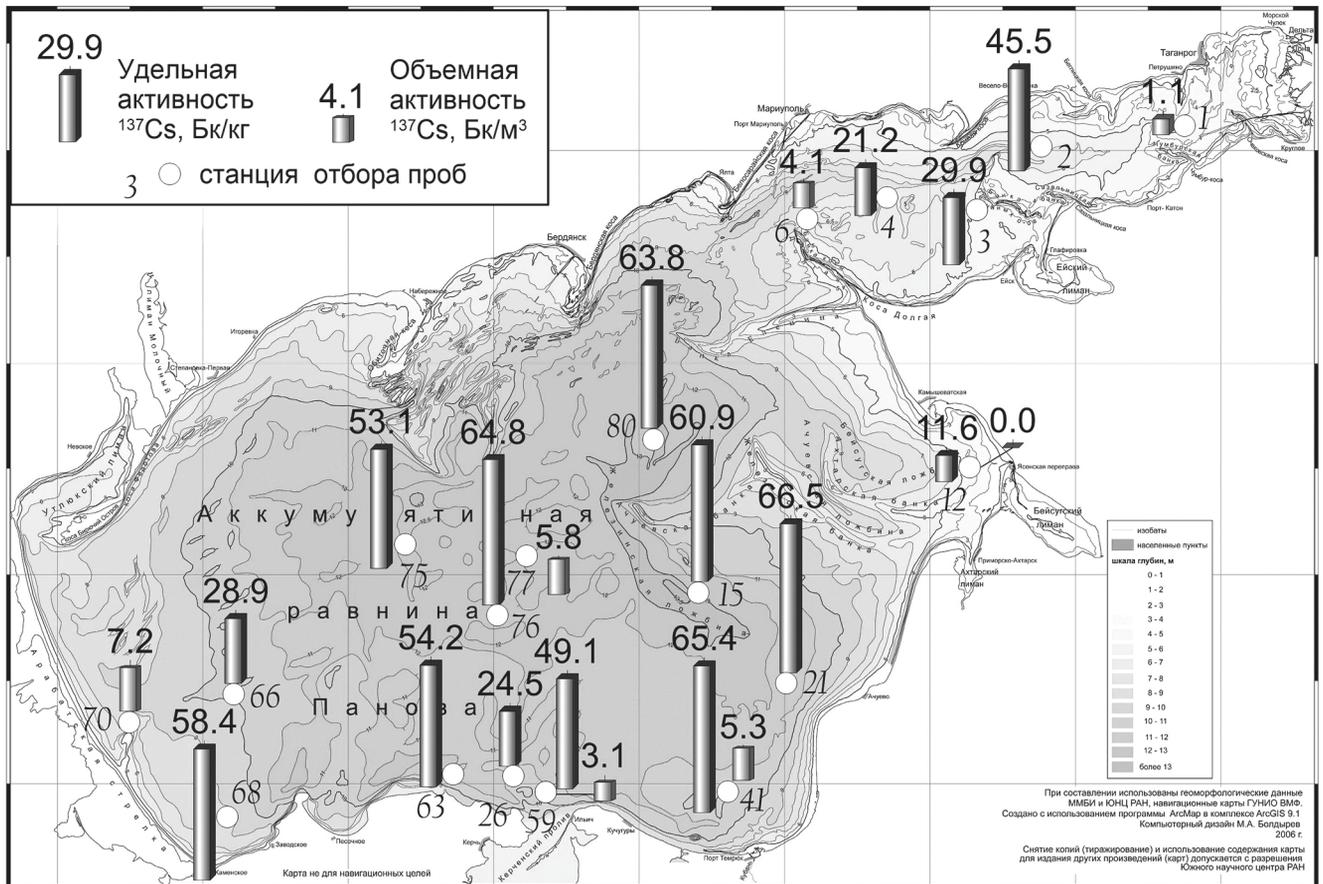


Рис. 3. Удельная и объемная активность ^{137}Cs в Азовском море (июль 2019 г.).
Fig. 3. Specific and volumetric activity of ^{137}Cs in the Sea of Azov (July 2019).

активность цезия-137 была в пределах 30–45 Бк/кг (рис. 3). После чернобыльской аварии удельная активность ^{137}Cs в мелкоалевритовых илах в этом районе моря составляла 30–60 Бк/кг, а максимально зафиксированная – на уровне 100 Бк/кг [1; 2]. Таким образом, для этого района моря очевидна тенденция к увеличению содержания техногенных радионуклидов от берегов к осевой зоне залива.

В настоящее время наибольшей удельной активностью (в пределах 50–65 Бк/кг) характеризуются глинистые и алевритово-глинистые осадки центральной части Азовского моря, залегающие на глубине от 10 до 13 м. После аварии на Чернобыльской АЭС здесь отмечались более высокие уровни удельной активности ^{137}Cs , достигавшие 80 Бк/кг (рис. 1).

Сопоставление результатов исследований динамики радиоактивного загрязнения морей Северного Ледовитого океана (Норвежского, Баренцева, Карского, Лаптевых, Белого) и южных (Азовского, Черного) позволило установить общие закономерности и тенденции накопления короткоживущих

(^{137}Cs , ^{90}Sr) и долгоживущих (239 , ^{240}Pu) радионуклидов с учетом периода их полураспада [1–10].

В результате аварии на Чернобыльской АЭС значительная часть радиоактивных осадков поступила в азовскую акваторию воздушным путем. Некоторые изотопы (^{137}Cs , ^{90}Sr , 239 , ^{240}Pu) попадали в море в результате миграции по Дону и речным системам Приазовья.

В донных отложениях Азовского моря, залегающих в 4–6 см под поверхностью дна, удельная активность ^{137}Cs достигает 127 Бк/кг. Их накопление соотносится с максимумом радиоактивного загрязнения акватории моря после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. Второе высокое значение (88,4 Бк/кг), зафиксированное в отложениях в 8–10 см под поверхностью дна, вероятно, связано с испытаниями ядерного оружия, происходившими в 1950–60-х гг. [2; 3].

Радиоактивное загрязнение арктических морей во второй половине XX века в основном определялось объемами стоков радиохимических заводов («Селлафилд», «Ла-Хаг» и т.д.). Происхождение ча-

Таблица 2. Гранулометрический состав, удельная активность ^{137}Cs в донных отложениях и содержание взвеси в Азовском море (июль 2019 г.). Станции показаны на рисунках 2 и 3
Table 2. Granulometric composition, specific activity of ^{137}Cs in bottom sediments and suspension content in the Sea of Azov (July 2019). The stations are shown in Figures 2 and 3

№ станции Station number	Глубина моря, м Sea depth, m	^{137}Cs , Бк/кг Bq / kg	Тип донных отложений Type of sediment	Гранулометрический состав донных отложений, % / Granulometric composition of bottom sediments, %	
				0,1–0,01 мм (алеурит) / 0,1–0,01 mm (aleurite)	<0,01 мм (пелит) / <0,01 mm (pelite)
2	6	45,5 ± 7,8	Ил алеуритово-глинистый / Aleurite-clayey silt	39,04	60,96
3	5,2	29,9 ± 5,2	Ил алеуритово-глинистый с включениями гидротроилита / Aleurite-clayey silt with inclusions of hydrotroilite	–	–
4	6,6	21,2 ± 3,8	Ил алеуритово-глинистый с примесью ракушечного материала / Aleurite-clayey silt mixed with shell material	37,1	62,9
12	4,8	11,6 ± 2,8	Алеурит песчано-илистый с включениями ракушечного материала (в основном ракушечный детрит) / Sandy-silty siltstone with inclusions of shell material (mainly shell detritus)	–	–
15	12,6	60,9 ± 10,6	Ил глинистый. Цвет темно-серый, до черного. Отмечаются примазки гидротроилита и запах H_2S . Единичные включения ракушечного материала / Clayed silt. Dark gray – black color. Hydrotroilite greases and H_2S odor are noted. Single inclusions of shell material	31,6	68,4
21	11,6	66,5 ± 10,7	Ил глинистый. Цвет темно-серый, до черного. Отмечаются примазки гидротроилита и запах H_2S . Единичные включения ракушечного материала / Clayed silt. Dark gray – black color. Hydrotroilite greases and H_2S odor are noted. Single inclusions of shell material	–	–
26	7	24,5 ± 5,2	Ил песчаный алеуритово-глинистый, сильно известковый (за счет большого количества ракушечного материала) / Aleurite-clayey sandy silt, highly calcareous (due to the large amount of shell material)	–	–
59	10,6	24,5 ± 9,3	Ил глинистый. Цвет темно-серый, до черного. Отмечаются примазки гидротроилита и запах H_2S . Единичные включения ракушечного материала / Clayed silt. Dark gray – black color. Hydrotroilite greases and H_2S odor are noted. Single inclusions of shell material	30,14	69,86
63	11,6	54,2 ± 9,1	Ил глинистый. Цвет темно-серый, до черного. Отмечаются примазки гидротроилита и запах H_2S . Включения ракушечного материала в пределах 10 % от объема отобранной пробы(в основном содержится в виде детрита с серым налетом по поверхности створок) / Clayed silt. Dark gray – black color. Hydrotroilite greases and H_2S odor are noted. Inclusions of shell material within 10% of the sample volume (mainly contained in the form of detritus with a gray coating on the surface of the valves)	–	–

Окончание табл. 2

№ станции Station number	Глубина моря, м Sea depth, m	¹³⁷ Cs, Бк/кг Bq / kg	Тип донных отложений Type of sediment	Гранулометрический состав донных отложений, % / Granulometric composition of bottom sediments, %	
				0,1–0,01 мм (алеврит) / 0,1–0,01 mm (aleurite)	<0,01 мм (пелит) / <0,01 mm (pelite)
66	10,2	28,9 ± 4,9	Ил глинистый. Цвет темно-серый, до черного. Отмечаются примазки гидротроилита и запах H ₂ S. Включения ракушечного материала (в основном содержится в виде детрита с серым налетом по поверхности створок) / Clayed silt. Dark gray – black color. Hydrotroilite greases and H ₂ S odor are noted. Inclusions of shell material (mainly contained in the form of detritus with a gray coating on the surface of the valves)	22,79	77,21
68	8,6	58,4 ± 9,1	Ил глинистый. Цвет темно-серый, до черного. Отмечаются примазки гидротроилита и запах H ₂ S. Единичные включения ракушечного материала / Clayed silt. Dark gray – black color. Hydrotroilite greases and H ₂ S odor are noted. Single inclusions of shell material	25,41	74,59
75	12,6	53,1 ± 8,3	Ил глинистый. Обводненный. Цвет серый / Clayed silt. Watered. The color is gray	–	–
76	12	64,8 ± 10,8	Ил глинистый. Цвет темно-серый, до черного. Отмечаются примазки гидротроилита и запах H ₂ S. Единичные включения ракушечного материала. По поверхности створок серо-черный налет / Clayed silt. Dark gray – black color. Hydrotroilite greases and H ₂ S odor are noted. Single inclusions of shell material. With gray-black coating on the surface of the valves	24,32	75,68
80	12	63,8 ± 11,7	Ил глинистый. Цвет темно-серый, до черного. Отмечаются примазки гидротроилита и запах H ₂ S. Единичные включения ракушечного материала / Clayed silt. Dark gray – black color. Hydrotroilite greases and H ₂ S odor are noted. Single inclusions of shell material	–	–

сти радиоактивных изотопов было связано с атомными испытаниями в атмосфере, а впоследствии – с аварией на Чернобыльской АЭС.

Удельная активность ¹³⁷Cs в зависимости от типа осадков изменялась от 0,1 до 20 Бк/кг. Исключение составляли отдельные заливы и губы Новой Земли, Кольского полуострова, а также впадины шельфа, осадки которых содержали от 30 до 100 Бк/кг ¹³⁷Cs. В 2010–2017 гг. донные отложения открытых акваторий Баренцева и Карского морей характеризовались минимальным содержанием искусственных радиоизотопов. В 1980 г. удельная активность ¹³⁷Cs в водах Северного моря достигала 120 Бк/м³, а Баренцева моря – от 10 до 40–90 Бк/м³ (рис. 4).

В 1986–2010 гг. в Азовском море содержание ¹³⁷Cs снижалось от максимума в 20–150 до 0,1–26,7 Бк/м³ [1; 2].

В последние годы объемная активность ¹³⁷Cs в арктических и южных морях России находится на минимальном уровне. Так, например, в водах Центрального Полярного бассейна, Баренцева, Карского морей и моря Лаптевых она составляет в среднем 2 Бк/м³ [11]. Это обусловлено общностью источников радиоактивного загрязнения, наиболее значимые из которых – глобальные атмосферные выпадения и перенос радионуклидов атлантическими водными массами от западноевропейских радиохимических предприятий («Селлафилд» и др.). За-

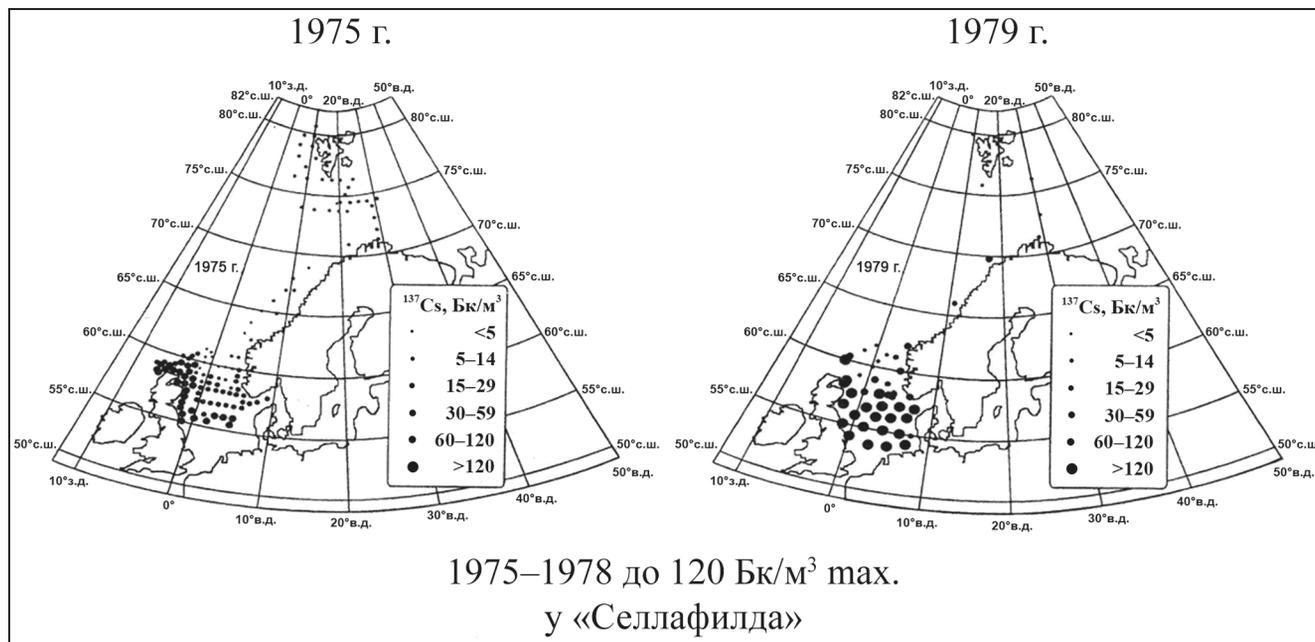


Рис. 4. Уровень загрязнения вод (^{137}Cs) Северного моря в 1970-е гг. вследствие радиоактивных стоков с заводов «Селлафилд».
Fig. 4. Water pollution level (^{137}Cs) of the North Sea in the 1970s due to radioactive waste from Sellafield plants.

фиксированный к настоящему времени уровень радиоактивного загрязнения вод Азовского моря ^{137}Cs снизился до 0,5–5 Бк/м³.

Влияние топографии дна и гранулометрического состава морских осадков при локальном перераспределении радиоактивной взвеси на шельфе является определяющим. Глинистые илы – это типичные донные отложения впадин и желобов (глубины 150–500 м) арктических гляциальных шельфов и относительно замкнутых морских водоемов (Азовского, Белого, Балтийского морей). В любой ситуации в северных и южных морях в глинистых илах будет отмечаться самый высокий уровень содержания радиоактивных элементов.

В настоящее время в зависимости от строения дна могут наблюдаться 2–3-кратные различия в содержании радионуклидов в разных частях одного водоема. Обычно в донных отложениях на банках Баренцева и Карского морей удельная активность ^{137}Cs , как и ^{90}Sr , составляет от 0,3 до 1,8 Бк/кг, а во впадинах – 1–3 Бк/кг. В центральной части Азовского моря зафиксированы самые высокие уровни радиоактивного загрязнения морских осадков ^{137}Cs – до 50–70 Бк/кг (рис. 3).

Для Азовского моря очевиден эффект замкнутости водоема и дренажа реками территорий, подвергшихся радиоактивному загрязнению. Активность ^{137}Cs в осадках и воде Азовского моря главным образом определяется наличием в отложениях

фракций пелита и мелкого алеврита). При штормовом взмучивании глинистые илы, содержащие относительно повышенные концентрации радиоизотопов, могут стать важным источником вторичного радиоактивного загрязнения морских вод.

После аварии на Чернобыльской АЭС, по нашим наблюдениям, проводившимся с 1997 г., намечилось устойчивое снижение содержания антропогенных радионуклидов. К 2019 г. концентрация искусственных изотопов в разных частях Азовского моря в зависимости от литологического состава грунта и солености морской воды снизилась в несколько раз.

В условиях глобальных выпадений искусственных радионуклидов глинистые илы являются надежным (объективным) индикатором современного радиационного фона. Независимо от географического положения моря указанная закономерность нарушится при условии действующих локальных источников. По мере сокращения сбросов радиоактивных отходов с предприятий фиксируемый уровень активности радионуклидов в воде и донных отложениях снижается [11].

Соленость морских вод играет значительную роль в миграции искусственных радионуклидов. Классификация вод по солености имеет определенный порядок: питьевая – 0,4–1,0 ‰; пресная (речная) – 0,4–2,0 ‰; слабосоленоватая – 2,0–4,0 ‰; солоноватая – 4,0–8,0 ‰; высокосоленоватая (морская) –

8,0–18,0 ‰; соленая (океаническая) – 18,0–35,0 ‰. В пресных водах радиоизотопы мигрируют преимущественно в составе взвешенного вещества, а в соленых водах Северного Ледовитого океана и в южных морях – в растворенной форме [1; 6; 7; 12].

Механика сорбции в морской среде до сих пор описана на уровне предварительных суждений. Существуют предположения о влиянии солености на адсорбционную способность глинистых частиц. Есть понятие «критической солености» в пределах 5,0–8,0 ‰ для границ разделения морских и пресноводных организмов. В связи с этим ставится вопрос о литологической и биологической адсорбции, о фиксации и осаждении радиоактивных частиц планктоном, бентосом и другой морской биотой, о

специфике сорбции взвесью искусственных радионуклидов в условиях смешения пресной и морской воды. Новые дополнительные знания будут полезны при прогнозировании радиационных процессов в случаях инцидентов на атомных объектах.

Публикация подготовлена в рамках выполнения темы НИР ГЗ ЮНЦ РАН № 01201363186 и проекта РФФИ № 19-05-50099 «Микромир» (Г.Г. Матишовым, В.В. Польшиным, Е.Э. Кирилловой), а также при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-05-60249 и по госзаданию ММБИ РАН, № госрегистрации АААА-А18-118030690062-0 (Г.Г. Матишовым, Г.В. Ильиным, И.С. Усягиной).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г. 2002. *Радиационная экологическая океанология*. Апатиты, изд-во КНЦ РАН: 417 с.
2. Матишов Г.Г., Усягина И.С., Польшин В.В. 2015. Динамика загрязнения Азовского моря изотопом ^{137}Cs в 1966–2013 гг. *Доклады Академии наук*. 460(6): 716–721. doi: 10.7868/S0869565215060237
3. Матишов Д.Г., Матишов Г.Г., Буфетова М.В., Касаткина Н.Е., Моисеев Д.В. 2003. Радиоэкологические исследования Азовского моря (по результатам экспедиции 2001 года). *Доклады Академии наук*. 391(2): 247–249.
4. Хрусталев Ю.П., Щербakov Ф.А. 1974. Позднечетвертичные отложения Азовского моря и условия их накопления. *Ростов н/Д, изд-во РГУ*: 149 с.
5. Il'in G.V., Kasatkina N.E., Moiseev D.V., Usyagina I.S. 2017. Infrastructure objects of the nuclear fleet as sources of radioactive contamination of the Barents Sea: waste repository in Guba Andreeva. *Atomic Energy*. 122(2): 131–137. doi: 10.1007/s10512-017-0247-7
6. Израэль Ю.А., Цыбань А.В. 1989. *Антропогенная экология океана*. Л., Гидрометеиздат: 528 с.
7. Израэль Ю.А., Цыбань А.В., Вакуловский С.М. 1994. Радиоактивное загрязнение морей и океанов. *Метеорология и гидрология*. 10: 15–23.
8. *Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2011 году*. 2012. Обнинск, Тайфун: 297 с.
9. *Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2012 году*. 2013. Обнинск, Тайфун: 344 с.
10. Крылов А.Л., Носов А.В., Киселев В.П. 2011. Анализ коэффициента накопления ^{137}Cs в донных отложениях поверхностных водных объектов. *Метеорология и гидрология*. 1: 48–57.
11. Матишов Г.Г., Касаткина Н.Е., Усягина И.С. 2019. Техногенная радиоактивность вод Центрального Полярного бассейна и смежных акваторий Арктики. *Доклады Академии наук*. 485(1): 93–98. doi: 10.31857/S0869-5652485193-98
12. *Пути миграции искусственных радионуклидов в окружающей среде. Радиоэкология после Чернобыля*. 1999. М., Мир: 512 с.
1. Matishov D.G., Matishov G.G. 2001. *Radiatsionnaya ekologicheskaya okeanologiya*. [Radiation Ecological Oceanology]. Apatity, Kola Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 417 p. (In Russian).
2. Matishov G.G., Usyagina I.S., Pol'shin V.V. 2015. Long-term dynamics of Sea of Azov contamination with the ^{137}Cs isotope (1966–2013). *Doklady Earth Sciences*. 460(2): 198–202. doi: 10.1134/S1028334X15020221
3. Matishov D.G., Matishov G.G., Bufetova M.V., Kasatkina N.E., Moiseev D.V. 2003. Radioecological studies in the Sea of Azov (results of expedition in 2001). *Doklady Earth Sciences*. 391(5): 763–765.
4. Khrustalev Yu.P., Shcherbakov F.A. 1974. *Pozdnechetvertichnye otlozheniya Azovskogo morya i usloviya ikh nakopleniya*. [Late Quaternary sediments of the Sea of Azov and conditions for their accumulation]. Rostov-on-Don, Rostov State University: 149 p. (In Russian).
5. Il'in G.V., Kasatkina N.E., Moiseev D.V., Usyagina I.S. 2017. Infrastructure objects of the nuclear fleet as sources of radioactive contamination of the Barents Sea: waste repository in Guba Andreeva. *Atomic Energy*. 122(2): 131–137. doi: 10.1007/s10512-017-0247-7
6. Izrael' Yu.A., Tsyban' A.V. 1989. *Antropogennaya ekologiya okeana*. [Anthropogenic Ocean Ecology]. Leningrad, Gidrometeoizdat: 528 p. (In Russian).
7. Izrael' Yu.A., Tsyban' A.V., Vakulovsky S.M. 1994. [Radioactive contamination of seas and oceans]. *Meteorologiya i gidrologiya*. 10: 15–23. (In Russian).
8. *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv v 2011 godu*. [The radiation situation in Russia and neighboring countries in 2011]. 2012. Obninsk, Tayfun: 297 p. (In Russian).
9. *Radiatsionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nykh gosudarstv v 2012 godu*. [The radiation situation in Russia and neighboring countries in 2012] 2013. Obninsk, Tayfun: 344 p. (In Russian).
10. Krylov A.L., Nosov A.V., Kiselev V.P. 2011. [Analysis of accumulation factor of cesium-137 in bottom sediments of surface water bodies]. *Meteorologiya i gidrologiya*: 48–57. (In Russian).

11. Matishov G.G., Kasatkina N.E., Usyagina I.S. 2019. Technogenic radioactivity of waters in the Central Arctic Basin and adjacent water areas. *Doklady Earth Sciences*. 485(1): 288–292. doi: 10.1134/s1028334x19030073
12. *Puti migratsii iskusstvennykh radionuklidov v okruzhayushchey srede. Radioekologiya posle Chernobylya. [Ways of migration of artificial radionuclides in the environment. Radioecology after Chernobyl]*. 1999. Moscow, Mir: 512 p. (In Russian).

Поступила 29.04.2020