

УДК 551.46:504.054
DOI: 10.7868/S25000640220105

ИЗУЧЕНИЕ РОЛИ ВЫБРОСОВ РОСТОВСКОЙ АЭС В ФОРМИРОВАНИИ ФОНА РАДИОНУКЛИДОВ В МОРСКИХ И ПРЕСНЫХ ВОДОЕМАХ ЮГА РОССИИ

© 2022 г. Академик Г.Г. Матишов^{1,2}, Г.В. Ильин¹, И.С. Усягина¹,
Д.А. Валуйская¹, В.В. Польшин², В.В. Титов², Е.Э. Кириллова²

Аннотация. Выполнена независимая оценка радиоактивного загрязнения морских и пресных водоемов в зоне влияния Ростовской атомной электростанции. Изучен современный фон техногенных радионуклидов в донных осадках по направлению переноса возможных выбросов аэрозолями и водными потоками. Пробы донных отложений были отобраны на приплотинном участке Цимлянского водохранилища, в русле Нижнего Дона вплоть до авандельты реки, на взморье Таганрогского залива в Азовском море, а также на участке северо-западного шельфа Каспийского моря. Проведен радиометрический анализ проб на содержание ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. Данные отчетов об экологической безопасности Ростовской атомной электростанции, результаты совместных работ сотрудников Мурманского морского биологического института Российской академии наук и Южного научного центра Российской академии наук показали, что наблюдаемые в последние годы концентрации ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr являются низкими и не представляют опасности для среды и биоты водоемов юга России. На общем фоне относительное повышение концентраций ¹³⁷Cs происходит в мелких алевритах и глинистых илах (частицы размером 0,05–0,001 мм) на более глубоких участках дна Цимлянского водохранилища. Эта закономерность наблюдается не только в данном водоеме, но характерна для впадин на дне как северных, так и южных морей, и Азовского моря в частности. За счет распада искусственных радиоизотопов со времени запрета испытаний ядерного оружия в атмосфере (1963 г.) и после чернобыльской катастрофы заметно снизился уровень радиационного загрязнения среды (в отдельных случаях в 2–3 раза) и в северных, и в южных морях России. Однако глобальные атмосферные выпадения искусственных радионуклидов устойчиво сохраняются, как и поступление в атмосферу радионуклидов с газоаэрозольными выбросами атомных станций, ядерных установок подводных лодок и других объектов. Рекомендуется проведение регулярного сезонного мониторинга с отбором проб донного осадка и зообентоса в водоемах в зоне влияния Ростовской АЭС.

Ключевые слова: радионуклиды, донные отложения, Цимлянское водохранилище, Нижний Дон, Ростовская АЭС, мониторинг.

STUDY OF THE ROLE OF EMISSIONS FROM ROSTOV NPP IN THE FORMATION OF THE RADIONUCLIDES' BACKGROUND IN MARINE AND FRESHWATER BODIES IN THE SOUTH OF RUSSIA

Academician RAS G.G. Matishov^{1,2}, G.V. Ilyin¹, I.S. Usyagina¹,
D.A. Valuiskaya¹, V.V. Polshin², V.V. Titov², E.E. Kirillova²

Abstract. An independent assessment of the radioactive contamination of the environment of sea and freshwater bodies of water in the zone of influence of the Rostov nuclear power plant was carried out. The modern background of technogenic radionuclides in bottom sediments was studied in the direction of transport

¹ 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, e-mail: gvilyin@mail.ru

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

of possible emissions by aerosols and water flows. For the study, samples of bottom sediments were taken at the appurtenance area of the Tsimlyansk Reservoir, in the bed of the Lower Don up to the river delta, at the delta-front of the Taganrog Bay of the Sea of Azov, as well as at the north-western shelf of the Caspian Sea. A radiometric analysis of the samples for the content of ^{137}Cs and ^{90}Sr was carried out. The data of reports on the environmental safety of the Rostov nuclear power plant, the results of joint work of the employees of the Murmansk Marine Biological Institute of the Russian Academy of Sciences and the Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences showed that the concentrations of ^{137}Cs and ^{90}Sr observed in recent years are low and do not pose a threat for the environment and biosphere of water bodies of southern Russia. At the general background, a relative increase of ^{137}Cs concentrations occurs in small silts and clayey silts (particles with a size of 0.05–0.001 mm) at deeper parts of the bottom of the Tsimlyansk Reservoir. This pattern is observed not only in this reservoir, but is characteristic for depressions on the bottom of both northern and southern seas, and the Sea of Azov, in particular. Due to the decay of artificial radioisotopes since the ban on testing in the atmosphere (1963) and since the date of the Chernobyl disaster, the level of radiation pollution of the environment has noticeably decreased (in some cases by 2–3 times) in the northern and southern seas of Russia. However, global atmospheric fallouts of artificial radionuclides persist steadily, as well as the inflow of radionuclides into the atmosphere with gas-aerosol emissions from nuclear power plants, nuclear plant of submarines and other objects. It is recommended to carry out regular seasonal monitoring with sampling of bottom sediments and zoobenthos in water bodies in the zone of influence of the Rostov NPP.

Keywords: radionuclides, bottom sediments, Tsimlyansk Reservoir, Lower Don, Rostov NPP, monitoring.

ВВЕДЕНИЕ

После запрета в 1963 г. испытаний ядерного оружия в атмосфере, космическом пространстве и под водой сохранился глобальный фон радиоактивной пыли в высоких слоях атмосферы [1; 2]. С мая 1986 г. основным источником поступления радиоактивного загрязнения в атмосферу и морскую среду стала аварийная Чернобыльская АЭС [2; 3]. В 2011 г. после аварии на японской АЭС «Фукусима-1» возрос фон атмосферных выпадений в Северном полушарии. На европейской территории России выпадение выбросов АЭС «Фукусима-1» было зафиксировано в конце марта – первой половине апреля 2011 г. [4]. В результате в Ростовской области среднее за год содержание ^{137}Cs в атмосфере увеличилось в 20 раз (до $29,3 \times 10^7$ Бк/м³) [5; 6].

До настоящего времени при эксплуатации и ремонтных работах на АЭС, атомных подводных лодках, прочих ядерных объектах в соответствии с регламентом допустимы нормативные выбросы газоаэрозолей (частицы размером <50 мкм). В практической работе имеют место неплановые и аварийные выбросы радиоактивных инертных газов в окружающую среду.

В спектре техногенной радиоактивности основной потенциал загрязнения и рисков закономерно связывается с относительно долгоживущими и наиболее распространенными радионуклидами ^{137}Cs , ^{90}Sr . В то же время не менее важна роль короткоживущих изотопов ^{134}Cs , ^{133}Xe , ^{131}I , ^{132}I , ^{132}Te и других [2; 6]. При-

мер атмосферного трансграничного переноса ^{134}Cs в северном полушарии после аварий на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) и АЭС «Фукусима-1» определяет актуальность изучения современного фона этого радионуклида в морской среде и биоте.

Цель работы – систематизировать материалы литературных источников и данные радиоэкологических наблюдений Мурманского морского биологического института Российской академии наук (ММБИ РАН) и Южного научного центра Российской академии наук (ЮНЦ РАН), полученные в экспедициях в Азово-Донском бассейне с 1997 г. по настоящее время, на основе этого воссоздать общую географическую картину седиментации искусственных радионуклидов и динамику их концентрации в донных отложениях морей и водоемов юга страны, проследить признаки возможной эмиссии радиоактивных газоаэрозолей Ростовской и Воронежской АЭС. Ставится цель предложить более совершенную методику радиоэкологического мониторинга и размещения точек контроля за пределами 30-километровой зоны наблюдения, опираясь на опыт авторов в исследовании радиационной обстановки в арктических морях, в районах атомных объектов на Новой Земле, Кольском полуострове, в Кольском заливе, в губе Андреева [2; 4; 6].

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследование выполнено на основе обширных наблюдений северных и южных морей, проведен-

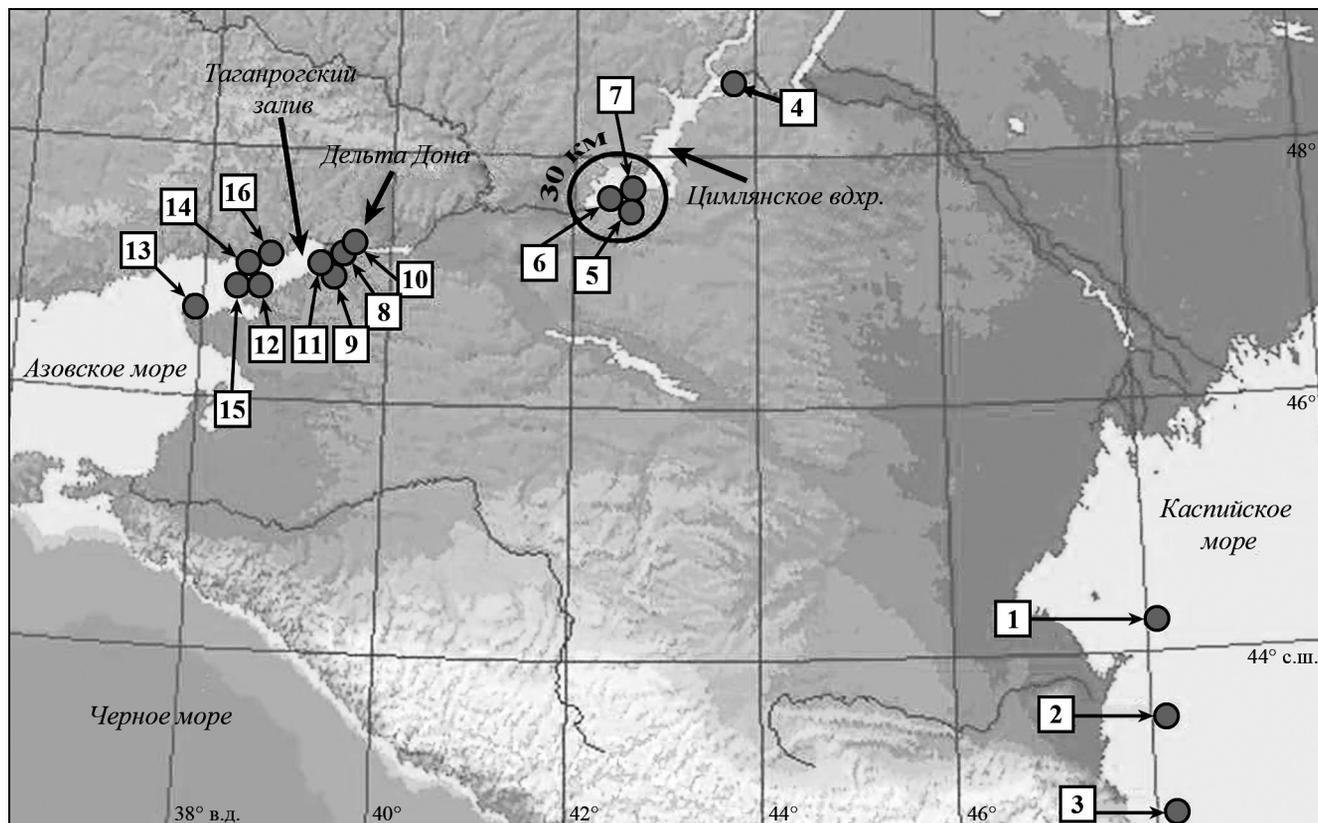


Рис. 1. Картограмма отбора донных отложений в 2019–2020 гг.
Fig. 1. The schematic map of the selection of bottom sediments in 2019–2020.

ных сотрудниками ММБИ РАН (более 1 тыс. измерений за период с 1990-х гг. по 2020 г.), и литературных данных. Для оценки специфики местных источников радиоактивности исследованы пробы, отобранные в непосредственной близости от радиационно опасных объектов. Изучение затруднено относительно низкими концентрациями и локальным распространением загрязнения. Иногда с момента загрязнения до проведения анализа образцов проходит время, равное периоду полураспада короткоживущих элементов [3].

Уникальность настоящей работы состоит в том, что образцы донных осадков были отобраны в Цимлянском водохранилище (с борта научно-исследовательского судна (НИС) «Денеб») на удалении 5–8 км от Ростовской АЭС, в авандельте Дона и на взморье Таганрогского залива на расстоянии 250–300 км, а также на шельфе Каспия в 600 км от АЭС (рис. 1). Следовательно, точки отбора проб были расположены вниз по течению Дона и в направлении воздушного переноса инертных газов на Каспий.

Радиометрический анализ проб выполнен в лаборатории ММБИ РАН. Удельная (объемная) ак-

тивность радиоактивных изотопов цезия измерена на спектрометрах γ -излучения «InSpector-2000», γ - и рентгеновского излучения «b13237» («Caberra», США). Спектры проанализированы с помощью программного обеспечения Genie-2000. Гранулометрический анализ образцов проведен на приборе «Ласка-Т» (Центр коллективного пользования ЮНЦ РАН).

Краткая характеристика Ростовской АЭС. Ростовская атомная электростанция расположена на берегу Цимлянского водохранилища, в 13 км от Волгодонска. Эксплуатируются четыре энергоблока: № 1 – с 2001 г., № 2 – с 2010 г., № 3 – с 2015 г., № 4 – с 2018 г. Газоаэрозольные выбросы ^{60}Co , ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs , ^{133}Xe , ^{135}Xe , ^{138}Xe АЭС поступают в атмосферу через вентиляционные трубы из системы очистки [7]. В 2018 г. радиоактивные газоаэрозольные выбросы Ростовской АЭС в атмосферу составляли от 0,45 до 14,4 % от допустимых. В связи с отсутствием информации о газоаэрозольных выбросах АЭС и данных по содержанию биофильных элементов ^{14}C и ^3H в продуктах питания возможна недооценка дозы облучения [7–10].

Водоем-охладитель Ростовской АЭС, созданный отсечением прибрежного участка Цимлянского водохранилища плотиной с фильтрующей дамбой, имеет площадь 18 км². Объем сброса технических вод в него в 2018 г. составил 199,16 тыс. м³. По данным Ростовской АЭС, в 2018 г. содержание радионуклидов в сбросовых водах было ниже минимально детектируемой активности [7; 8; 10].

Радионуклиды, сброшенные АЭС, проникают в Цимлянское водохранилище с фильтрацией воды из водоема-охладителя через дамбу ($\approx 1,1 \times 10^7$ м³/год). Но мониторинг содержания техногенных радионуклидов аттестованными средствами контроля АЭС проводится лишь в почве и растительности района размещения Ростовской АЭС. За 18-летний период наблюдений содержание ⁹⁰Sr в почве варьировало в узких пределах, от 1,1 до 8,7 Бк/кг, а ¹³⁷Cs – от 5,4 до 18,8 Бк/кг [11]. Солома зерновых культур и зеленая масса трав на контрольных участках в среднем содержали ¹³⁷Cs 0,97–2,0 Бк/кг (при нормативном показателе 400 Бк/кг).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Радиационный мониторинг в 2010–2020 гг. на территории радиусом 30 км от Ростовской АЭС показал сравнительно низкие величины загрязнения [5; 7; 10]. Содержание ¹³⁷Cs в почвах на побережье Цимлянского водохранилища изменялось от 7,5–8,8 до 15 Бк/кг. В зеленых травах и сельскохозяйственных растениях накапливалось от 0,2–0,3 до 0,5 Бк/кг ¹³⁷Cs. Немного выше – 1,34–2,0 Бк/кг – содержание данного радионуклида было отмечено в соломе и сене [7]. Для сравнения отметим, что в 1990-е гг. на побережье Кольского полуострова на юго-востоке Баренцева моря концентрация ¹³⁴Cs в лишайниках изменялась от 0 до 32 Бк/кг сухого веса, а ¹³⁷Cs – от 46 до 530 Бк/кг сухого веса [12].

Эксплуатация Ростовской АЭС в штатном режиме и ввод в действие новых энергоблоков не привели к увеличению содержания техногенных радионуклидов в продукции сельского хозяйства, продуктах питания и объектах окружающей среды [5; 12]. Специалистами Минатома рассчитано, что от выбросов АЭС накопление ¹³⁷Cs в сельскохозяйственной продукции в 20–650 раз ниже, чем от глобальных выпадений (составляет 0,23–2,4 %). За период наблюдений содержание радионуклидов в приземном воздухе и в атмосферных выпадениях в зоне наблюдения Ростовской АЭС находилось ниже минимально детектируемой активности [5; 8].

Вместе с тем следует учесть ряд обстоятельств. Существует потенциальный риск загрязнения воздушной среды, так как на Ростовской АЭС отсутствуют установки пылегазоочистного оборудования [5]. В течение 20 лет эксплуатации Ростовской АЭС наряду с плановыми выбросами в атмосферу не единожды происходили неплановые газоаэрозольные выбросы. Примером может быть аварийный выброс пара 21.10.2021 г. из-за дефекта оборудования на АЭС [7].

Для полноты «атомной истории» укажем на имевший место инцидент 02.08.1987 г. в проливе Маточкин Шар на Новой Земле. Подземный взрыв повлек ощутимый выброс в атмосферу радиоактивных газов с коротким периодом распада. Другой инцидент на Ленинградской АЭС в апреле 1992 г., по предположению экспертов, выглядел следующим образом. В реакторе типа РБМК третьего энергоблока (аналогичном реактору ЧАЭС) целостность одной из кассет с урановым топливом была нарушена. Радиоактивный пар попал в систему фильтров и адсорбции газов. Фильтры не смогли справиться с очисткой пара, и из трубы реактора в атмосферу поступал концентрированный (до 3,5 ПДК) радиоактивный газ. Содержание изотопов йода ¹³¹I в нем в 6 раз превышало предельно допустимые концентрации [2; 5; 7].

Как известно, в обычной практике судоремонта при вскрытии крышек атомных реакторов происходят утечки инертных радиоактивных газов криптон и ксенон с производными от них радионуклидами ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs. Кроме того, в момент остановки или запуска атомного реактора некоторое количество радиоактивных веществ сбрасывается с водой, расширяющейся в контуре охлаждения [12].

В бассейне Азовского моря и в Цимлянском водохранилище после 1986 г. в воде и донных отложениях прослеживался радиоизотоп ¹³⁴Cs – индикатор продуктов выброса ЧАЭС [1; 2]. Содержание этого изотопа в воде Азовского моря в 1986 и 1987 гг. в среднем составляло 8,5 и 9,2 Бк/м³ соответственно. Средняя концентрация ¹³⁴Cs в донных отложениях моря в 1987 г. равнялась 22,1 Бк/кг, а в 1988 г. – 14,4 Бк/кг сухой массы. В Цимлянском водохранилище в большинстве проб (75 %), в которых обнаружен ¹³⁷Cs (17 Бк/кг), изотоп ¹³⁴Cs не наблюдался. В остальных пробах содержание ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs составляло в среднем 8 и 62 Бк/кг соответственно. Значительная часть чернобыльских осадков поступила в морскую акваторию с воздушными потоками во время аварии в 1986 г. Остальная часть ¹³⁷Cs,

а также ^{90}Sr и $^{239,240}\text{Pu}$, очевидно, попала в Азовское море в процессе переотложения и миграции этих веществ по речным системам Приазовья.

Анализ образцов донного осадка из Азовского моря, отобранных в экспедиции ЮНЦ РАН на НИС «Денеб» в июле 2019 г., выявил концентрации ^{137}Cs в пределах 10–65 Бк/кг (рис. 2). Короткоживущие изотопы не были обнаружены. Сегодня для Азовского моря менее очевидна роль глобальных выпадений радиоактивных осадков, порожденных термоядерными испытаниями в атмосфере в 1950–1960-е гг. и чернобыльской аварией.

В 2020 г. в Цимлянском водохранилище с борта НИС «Денеб» пробы донного осадка были отобраны на приплотинном участке на глубинах от 3–5 до 17 м (рис. 1, табл. 1). Донные отложения, мощность которых достигает 1–2 м, представлены на 70 % мелкими алевритами (фракция 0,05–0,01 мм). В таких осадках, накопившихся после пуска ГЭС, ^{137}Cs содержится на уровне 1–6 Бк/кг, а ^{90}Sr – до 4 Бк/кг. На участках дна водохранилища с максимальными глубинами мелкоалевритовые и глинистые илы содержат до 13 Бк/кг ^{137}Cs (табл. 1).

Для сравнения: в авандельте Дона, в гирле и протоках на глубинах 1–7 м в пробах донного

осадка зафиксированы низкие концентрации ^{137}Cs (0,2–3 Бк/кг) и ^{90}Sr (2,5–4 Бк/кг). В прибрежной осушаемой (0,2–0,3 м) зоне острова Донской в торфянистом болотном грунте в одной из проб содержалось 28 Бк/кг ^{137}Cs (табл. 1).

В кутовой части Таганрогского залива, на глубинах 3–4 м, вблизи донского взморья (250 км от АЭС) мелкоалевритовые и глинистые илы содержат ^{137}Cs 2–12 Бк/кг и ^{90}Sr – 0,3–0,7 Бк/кг (табл. 1, рис. 2). На северо-западном шельфе Каспия (глубины от 2 до 31 м) донные отложения (мелкоалевритовые и глинистые илы) содержат ^{137}Cs от 4 до 8 Бк/кг и ^{90}Sr – от 0,7 до 5,0 Бк/кг.

Регулярный радиоэкологический мониторинг морской среды, проводимый ЮНЦ РАН совместно с ММБИ РАН, дает возможность сравнивать динамику загрязнения южных водоемов по годам, по географическому распределению, по концентрации в зависимости от гранулометрического состава данных отложений (табл. 1). Изучение накоплений ^{137}Cs и ^{90}Sr последовательно в отложениях Цимлянского водохранилища, авандельты р. Дон, кутовой и внешней части Таганрогского залива позволяет проследить их распределение в зависимости от удаленности от места расположения Ростовской АЭС в

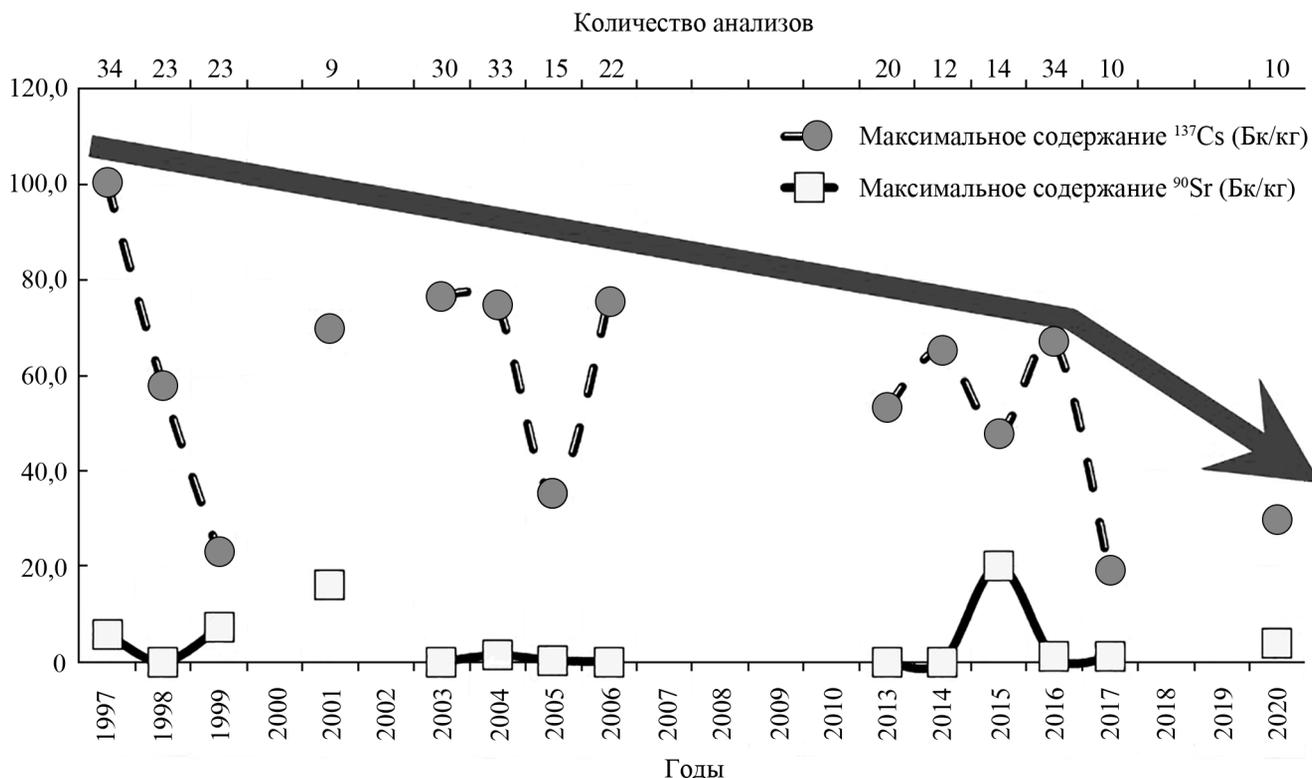


Рис. 2. Тенденция радиоактивного загрязнения донных отложений Азовского моря (период после аварии в Чернобыле).

Fig. 2. The tendency of radioactive contamination of bottom sediments of the Sea of Azov (the period after the Chernobyl accident).

Таблица 1. Удельная активность ^{137}Cs и ^{90}Sr и гранулометрический состав донных отложений Цимлянского водохранилища, Нижнего Дона, Таганрогского залива и Каспийского моря, 2019–2020 гг.

Table 1. The specific activity of ^{137}Cs and ^{90}Sr and granulometric composition of bottom sediments of the Tsimlyansk Reservoir, the Lower Don, Taganrog Bay and the Caspian Sea, 2019–2020

№ станции Station No	Глубина, м Depth, m	Удельная активность радионуклидов в донных отложения, Бк/кг сухой массы / Specific activity of radionuclides in bottom sediments, Bq/kg of dry weight		Гранулометрический состав, % Granulometric composition, %					
		^{137}Cs	^{90}Sr	песок sand (1–0,1 mm)	алеврит siltstone		глинистые илы clayey silt		
					крупный / large (0,1–0,05 mm)	мелкий / small (0,05–0,01 mm)	крупные / large (0,01–0,005 mm)	мелкие / small (0,005–0,001 mm)	тонкие / thin (<0,001 mm)
1	31,1	8,3	3,07	0,25	2,28	48,87	30,31	18,06	0,23
2	10,7	7,0	5,10	0,74	6,23	60,31	21,50	11,11	0,11
3	1,9	4,4	0,66	8,99	21,52	62,30	6,36	0,89	4,22
4	5,0	4,5	–	0,06	1,39	39,51	33,74	24,84	0,45
5	3,1	1,1	0,98	0,84	6,18	65,14	19,56	8,18	0,09
6	17,3	13,2	3,88	2,13	15,22	76,10	5,26	0,44	–
7	11,8	4,7	2,74	0,12	4,90	76,11	16,17	2,70	–
8	3,0	2,1	2,52	0,57	3,20	40,67	28,42	26,64	0,50
9	–	19,5	–	21,67	1,68	43,76	32,53	21,51	0,34
10	7,1	3,0	3,74	0,10	1,30	38,79	33,75	25,60	0,46
11	–	28,3	1,92	0,04	0,80	28,78	34,19	35,59	0,59
12	4,5	30,0	<0,2	0,12	1,18	33,53	31,24	33,04	0,90
13	–	2,5	0,51	–	0,37	19,74	31,21	47,10	1,57
14	3,9	2,5	0,72	0,25	2,25	48,56	30,52	18,22	0,19
15	4,1	5,9	1,86	0,54	3,42	39,34	29,29	27,03	0,39
16	3,6	11,6	0,32	0,21	2,03	41,58	28,39	27,09	0,73

бассейне Дона. Важные особенности сорбционной емкости тонкодисперсных (0,01–0,001 мм) осадков выявляет гранулометрический анализ и определение концентрации радиоактивных элементов.

ВЫВОДЫ

Для совершенствования контроля за регламентными и аварийными газоаerosольными выбросами в зоне влияния Ростовской АЭС требуется организовать регулярный сезонный мониторинг с отбором проб донных осадков и зообентоса на участке Цимлянского водохранилища, прилегающем к плотине. Для полноты представлений о радиационной ситуации при мониторинге следует учитывать следующие физико-географические обстоятельства:

1. В течение года в Ростовской области господствуют ветры восточных румбов, направленные в сторону Цимлянского водохранилища.

2. В случае утечек с АЭС инертных короткоживущих радиоактивных газов (ксенон, радон,

криптон и др.) грунтовые съемки вблизи плотины водохранилища необходимо проводить по более частой по сравнению с отдаленными участками водоема сетке станций.

3. В случае выпадения на водную поверхность загрязнителей их перенос будет направлен вниз по течению к плотине водоема.

4. В современных условиях наибольшая скорость осадконакопления (2–5 см в год) и самая высокая концентрация ^{137}Cs зафиксированы в мелких алевритах и глинистых илах (частицы размером 0,05–0,001 мм) в понижениях дна водоема. Эта закономерность характерна не только для понижений дна Цимлянского водохранилища, но и для всех впадин на дне северных и южных морей. В Азовском море наибольшее накопление ^{137}Cs (до 100 Бк/кг) и ^{90}Sr (до 5 и более Бк/кг) после аварии на ЧАЭС отмечено в открытой, самой глубокой (7–13 м) части моря. Именно в этой части водоема после многократного переотложения аккумулируются мелкие алевриты и глинистые илы.

5. Учитывая высокую скорость седиментации в понижениях дна перед плотиной, необходимо отбирать пробы отложений как на поверхности осадка, так и послойно из грунтовых колонок до 2 м. Подобная практика применяется в Енисейской и Обской губах, а также в губах Кольского залива [2; 3].

Все вышеизложенное приводит к следующим выводам. Наблюдаемые в последние 50 лет концентрации ^{137}Cs и ^{90}Sr являются низкими и не представляют опасности для биоты южных водоемов. За счет распада искусственных радионуклидов со времени запрета (1963 г.) испытаний ядерного оружия в атмосфере и после чернобыльской катастрофы заметно (в отдельных случаях в 2–3 раза) снизился уровень радиационного загрязнения среды северных и южных морей России (рис. 2). Од-

нако так называемые глобальные выпадения искусственных радионуклидов устойчиво сохраняются. В мире работает более 150 АЭС, объединяющих около 440 действующих энергоблоков. Можно предположить, что в XXI веке глобальный радиационный фон поддерживается в том числе за счет поступления в атмосферу радионуклидов с газозольными выбросами атомных станций, ядерных установок подводных лодок и других ядерных объектов. Роль указанного источника радиации требует детального изучения в условиях роста интереса к развитию ядерной энергетики в мире.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ № 19-05-50099 (сотрудники ЮНЦ РАН) и темы Госзадания ММБИ РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Израэль Ю.А. 1989. *Антропогенная экология океана*. М., Гидрометеиздат: 527 с.
- Матишов Г.Г., Матишов Д.Г. 2001. *Радиационная экологическая океанология*. Апатиты, изд-во КНЦ РАН: 417 с.
- Никитин А.И., Катрич И.Ю., Кабанов А.И., Чумичев В.Б., Смагин В.М. 1991. Радиоактивное загрязнение Северного Ледовитого океана по результатам наблюдений в 1985–1987 гг. *Атомная энергия*. 71(2): 169–172.
- Матишов Г.Г., Ильин Г.В., Касаткина Н.Е., Усягина И.С., Павельская Е.В. 2012. К оценке воздействия аварийных выбросов АЭС «Фукусима-1» на моря Западной Арктики (на примере Баренцева моря). *Доклады Академии наук*. 446(4): 448–452.
- Коновалов А.В., Коновалов М.А. 2020. Исследование экологической безопасности Ростовской АЭС по выбросам в атмосферный воздух. *Труды РГУПС*. 2(51): 50–52.
- Матишов Г.Г., Ильин Г.В., Усягина И.С. 2021. Основные источники ^{134}Cs в Баренцевом и Карском морях (1960–2020 гг.). *Доклады Академии наук*. 500(1): 64–69. doi: 10.31857/S2686739721090140
- Исамов Н.Н., Санжарова Н.И., Нуштаева В.Э., Панов А.В., Кузнецов В.К., Губарева О.С., Алешкина Е.Н., Гешель И.В., Сидорова Е.В., Емлютина Е.С., Фадеев М.Ю., Музалевская И.А., Урсу Н.В. 2020. Радиационно-экологический мониторинг в зоне размещения Ростовской АЭС. В кн.: *Труды ФГБНУ ВНИИРАЭ. Вып. 3. Мониторинг природных и аграрных экосистем в районах расположения атомных электростанций*. Обнинск, изд-во ФГБНУ ВНИИРАЭ: 134–157.
- Бессонов О.А., Давыдов М.Г., Марескин С.А., Малаева Т.Ю., Страдомская Е.А. 1994. Содержание радионуклидов в донных отложениях Цимлянского водохранилища. *Атомная энергия*. 77(1): 48–51.
- Рябинин А.И., Белявская В.Б., Долотова И.С. 1992. Техногенные радионуклиды и стронций в Азовском море в 1987–1988 гг. В кн.: *Труды Государственного океанографического института. Вып. 205*. М., Гидрометеиздат: 96–105.

- Бубликова И.А., Березина Е.А., Хандурина Е.С. 2014. Анализ влияния Ростовской АЭС на содержание ^{137}Cs в природных объектах тридцатикилометровой зоны. *Глобальная ядерная безопасность*. 3(12): 5–10.
- Абраменко М.И., Анисимова Н.А., Ардити Р.Р., Архипова О.Е., Афанасьев Д.Ф., Белоконов О.А., Беляев А.Г., Бердников С.В., Беспалов А.В., Беспалова Л.А., Буфетова М.В., Воловик С.П., Ворович И.И., Гаргопа Ю.М., Громов В.В., Данелия М.Е., Дудкин С.И., Задорожная Н.С., Ивлиева О.В., Ильин Г.В., Кривошукский Д.А., Ковалева Г.В., Крукиер Л.А., Кузнецов А.В., Кузнецова И.С., Куропаткин А.П., Ларионов В.В., Лихтанская Н.В., Любин П.А., Любина О.С., Макаревич П.Р., Матишов Д.Г., Милютин Н.П., Мирзоян З.А., Моисеев Д.В., Намятов А.А., Пирумова Е.И., Ружинская М.Д., Сазыкина М.А., Свистунова И.В., Селютин В.В., Сенина И.Н., Сорокина В.В., Степаныч О.В., Сурков Ф.А., Тимошкина Н.Н., Тютюнов Ю.В., Хрусталев Ю.П., Чикин А.Л., Чистяков В.А., Чихачев А.С., Шабас И.Н., Лебедева Н.В. 2001. *Среда, биота и моделирование экологических процессов в Азовском море*. Апатиты, изд-во КНЦ РАН: 413 с.
- Сивинцев Ю.В., Вакуловский С.М., Васильев А.П., Высоцкий В.Л., Губин А.Т., Данилян В.А., Кобзев В.И., Крышев И.И., Лавковский С.А., Мазокин В.А., Никитин А.И., Петров О.И., Пологих Б.Г., Скорик Ю.И. 2005. *Техногенные радионуклиды в морях, омывающих Россию: радиологические последствия удаления радиоактивных отходов в арктические и дальневосточные моря («Белая книга-2000»)*. М., ИздАТ: 624 с.

REFERENCES

- Izrael' Yu.A. 1989. *Antropogennaya ekologiya okeana*. [Anthropogenic ecology of an ocean]. Moscow, Gidrometeoizdat: 527 p. (In Russian).
- Matishov G.G., Matishov D.G. 2001. *Radiatsionnaya ekologicheskaya okeanologiya*. [Radiation ecological oceanology]. Apatity, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences: 417 p. (In Russian).

3. Nikitin A.I., Katrich I.Yu., Kabanov A.I., Chumichev V.B., Smagin V.M. 1991. Radioactive contamination of the Arctic Ocean, based on observations in 1985–1987. *Soviet Atomic Energy*. 71(2): 687–690.
4. Matishov G.G., Il'in G.V., Kasatkina N.E., Usyagina I.S., Pavel'skaya E.V. 2012. Assessment of impact from the Fukushima Nuclear Plant accidental emission on Western Arctic seas (Barents Sea case study). *Doklady Earth Sciences*. 446(2): 1185–1189. doi: 10.1134/S1028334X12100042
5. Konovalov A.V., Konovalov M.A. 2020. [Investigation of the environmental safety of the Rostov NPP in terms of emissions into the air]. *Trudy Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya*. 2(51): 50–52. (In Russian).
6. Matishov G.G., Ilyin G.V., Usyagina I.S. 2021. Main Sources of ¹³⁴Cs in the Barents and Kara Seas (1960–2020). *Doklady Earth Sciences*. 500(1): 761–765. doi: 10.1134/S1028334X21090142
7. Isamov N.N., Sanzharova N.I., Nushtaeva V.E., Panov A.V., Kuznetsov V.K., Gubareva O.S., Aleshkina E.N., Geshel' I.V., Sidorova E.V., Emlyutina E.S., Fadeev M.Yu., Muzalevskaya I.A., Ursu N.V. 2020. [Radiation and environmental monitoring in the area of the Rostov NPP]. In: *Trudy FGBNU VNIIRAE. Vyp. 3. Monitoring prirodnykh i agrarnykh ekosistem v rayonakh raspolozheniya atomnykh elektrostantsiy*. [Proceedings of All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology. Iss. 3. Monitoring of natural and agricultural ecosystems in areas of nuclear power plants locations]. Obninsk, All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology: 134–157. (In Russian).
8. Bessonov O.A., Davydov M.G., Mareskin S.A., Malaeva T.Yu., Stradomskaya E.A. 1994. Radionuclide content in bottom deposits of the Tsimlyansk reservoir. *Atomic Energy*. 77: 540–542.
9. Ryabinin A.I., Belyavskaya V.B., Dolotova I.S. 1992. [Technogenic radionuclides and strontium in the Sea of Azov in 1987–1988]. In: *Trudy gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta. Vyp. 205*. [Proceedings of the State Oceanographic Institute. Iss. 205]. Moscow, Gidrometeoizdat: 96–105. (In Russian).
10. Bublikova I.A., Berezina E.A., Khandurina E.S. 2014. [Research of the Rostov NPP Influence on the ¹³⁷Cs Contents in Environmental Objects]. *Global Nuclear Safety*. 3(12): 5–10. (In Russian).
11. Abramenko M.I., Anisimova N.A., Arditi R.R., Arkhipova O.E., Afanas'ev D.F., Belokon' O.A., Belyaev A.G., Berdnikov S.V., Bespalov A.V., Bespalova L.A., Bufetova M.V., Volovik S.P., Vorovich I.I., Gargopa Yu.M., Gromov V.V., Daneliya M.E., Dudkin S.I., Zadorozhnaya N.S., Ivlieva O.V., Il'in G.V., Krivolutskiy D.A., Kovaleva G.V., Krukier L.A., Kuznetsov A.V., Kuznetsova I.S., Kurapatkin A.P., Larionov V.V., Likhtanskaya N.V., Lyubin P.A., Lyubina O.S., Makarevich P.R., Matishov D.G., Milyutina N.P., Mirzoyan Z.A., Moiseev D.V., Namyatov A.A., Pirumova E.I., Ruzhinskaya M.D., Sazykina M.A., Svistunova I.V., Selyutin V.V., Senina I.N., Sorokina V.V., Stepan'yan O.V., Surkov F.A., Timoshkina N.N., Tyutyunov Yu.V., Khrustalev Yu.P., Chikin A.L., Chistyakov V.A., Chikhachev A.S., Shabas I.N., Lebedeva N.V. 2001. *Sreda, biota i modelirovanie ekologicheskikh protsessov v Azovskom more*. [Environment, biota and modeling of ecological processes in the Sea of Azov]. Apatity, Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences: 413 p. (In Russian).
12. Sivintsev Yu.V., Vakulovskiy S.M., Vasil'ev A.P., Vysotskiy V.L., Gubin A.T., Danilyan V.A., Kobzev V.I., Kryshev I.I., Lavkovskiy S.A., Mazokin V.A., Nikitin A.I., Petrov O.I., Pologikh B.G., Skorik Yu.I. 2005. *Tekhnogennyye radionuklidy v moryakh, omyvayushchikh Rossiyu: radioekologicheskie posledstviya udaleniya radioaktivnykh otkhodov v arkticheskie i dal'nevostochnyye morya* ("Belaya kniga-2000"). [Technogenic radionuclides in the seas washing Russia: radioecological consequences of the disposal of radioactive waste in the Arctic and Far Eastern seas ("White Book-2000")]. Moscow, Izdat: 624 p. (In Russian).

Поступила 19.11.2021