

УДК 546.36(268.45)
DOI: 10.7868/S25000640230305

ДОННЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ДЕЛЬТЫ ДОНА И СОДЕРЖАНИЕ ТЕХНОГЕННЫХ РАДИОНУКЛИДОВ В НИХ

© 2023 г. Академик Г.Г. Матишов^{1,2}, В.В. Польшин¹,
Г.В. Ильин², И.С. Усягина²

Аннотация. До настоящего времени в бассейне Азовского моря наблюдается геохимическая циркуляция искусственных радионуклидов, попавших в природную среду после аварии на Чернобыльской АЭС. Одним из путей их миграции является р. Дон, протекающая по водосборной территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению.

Представленные результаты исследований позволяют изучить закономерности накопления искусственных радионуклидов на отдельных участках дельты Дона и выявить основные факторы, контролирующие этот процесс. Проанализированы новые данные по распределению донных отложений и удельной активности техногенных и природных радионуклидов в них в северной части донской дельты. Установлено, что содержание потенциально опасного техногенного радионуклида ¹³⁷Cs в осадках поверхностного слоя дна проток этого участка дельты характеризуется спектром значений от 1,3 до 43,5 Бк/кг и зависит от литотипа донного грунта. По результатам радиометрических измерений максимумы удельной активности ¹³⁷Cs зафиксированы в тонкодисперсных илистых отложениях, а минимумы – в отложениях, в составе которых преобладает песок с включениями раковинного материала. В распределении техногенного ¹³⁷Cs, как и природных радионуклидов ⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th, отмечена тенденция роста концентраций в направлении от границы взморья к вершине дельты, что связано с условиями транспортировки и аккумуляции осадочного материала.

По результатам проведенных исследований сделан вывод, что удельная активность ¹³⁷Cs в поверхностном слое донных отложений в изученном районе низкая, не вызывающая опасности для морской экосистемы. Полученные новые данные о составе донных отложений и содержании техногенных и природных радионуклидов в них будут полезны при анализе радиоэкологической обстановки в южном регионе России.

Ключевые слова: дельта Дона, Азовское море, радиоактивное загрязнение, техногенные радионуклиды, донные отложения, речной сток.

BOTTOM SEDIMENTS OF THE DON DELTA AND THE CONTENT OF TECHNOGENIC RADIONUCLIDES IN THEM

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

Abstract. To date, the geochemical circulation of artificial radionuclides that got into the natural environment after the Chernobyl accident has been observed in the Azov Sea basin. One of the ways of their migration is the Don River flowing through the catchment area exposed to radioactive contamination.

The presented research results allow us to study the patterns of accumulation of artificial radionuclides in certain areas of the Don Delta and identify the main factors controlling this process. New data on the

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

distribution of bottom sediments and the specific activity of man-made and natural radionuclides in them on the northern flank of the Don delta are analyzed. It was found that the content of the potentially dangerous technogenic radioisotope ^{137}Cs in the sediments of the surface layer of the bottom of the channel in this section of the delta is characterized by a spectrum of values from 1.3 to 43.5 Bq/kg and depends on the lithotype of the bottom soil. According to the results of radiometric measurements, the maxima of its specific activity were recorded in fine silty sediments, and the minima – in sediments, in which sand with inclusions of shell material prevails. In the distribution of technogenic ^{137}Cs , as well as natural radionuclides ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , there is a tendency for concentrations to increase in the direction from the border of the seashore to the top of the delta, which is associated with the conditions of transportation and accumulation of sedimentary material.

In general, according to the results of the conducted studies, it is concluded that the specific activity of ^{137}Cs in the surface layer of bottom sediments in the studied area is characterized as low, not causing danger to the marine ecosystem. The obtained new data on the composition of bottom sediments and the content of man-made and natural radionuclides in them will be useful in analyzing the radioecological situation in the southern region of Russia.

Keywords: Don Delta, Sea of Azov, radioactive pollution, man-made radionuclides, bottom sediments, river runoff.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования радиоактивного загрязнения Азово-Черноморского бассейна определяется необходимостью изучения динамики поступлений техногенных радионуклидов с водосборных площадей рек Дон и Днепр. До настоящего времени на данной территории наблюдается геохимическая циркуляция искусственных радионуклидов, попавших в природную среду после аварии на Чернобыльской АЭС [1–3]. Кроме этого, потенциальным источником радиоактивного загрязнения являются Ростовская, Нововоронежская и Запорожская АЭС. В этой связи очевидна необходимость проведения постоянного мониторинга радиационной безопасности на территории юга России.

Одним из путей миграции искусственных радионуклидов, представляющих потенциальную угрозу для экосистемы Азовского моря, является р. Дон. Границы ее нижнего течения на востоке определены акваторией Цимлянского водохранилища, а на западе – береговой линией Таганрогского залива. При впадении в залив Дон образует дельту, в рукавах и протоках которой аккумулируется часть осадочного материала твердого стока.

Несмотря на то, что процесс накопления радионуклидов в донных отложениях Азовского моря изучался на протяжении последних лет достаточно активно, район донской дельты был практически не охвачен подобными исследованиями. Полученные нами ранее результаты по удельной активности искусственных радионуклидов в Азовском море показали, что гранулометрический состав донных отло-

жений является одним из важнейших параметров, контролирующих уровень радиоактивного загрязнения водной экосистемы. Содержание радионуклидов в исследованных пробах морских осадков повышалось по мере уменьшения размера частиц донного грунта и достигало максимумов в глинистых илах, залегающих в центральной части Азовского моря [4; 5]. Новые данные по распределению основных типов донных отложений в протоках донской дельты позволяют представить общую географическую картину седиментации искусственных радионуклидов и изучить закономерности их накопления на этой площади.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Данные по удельной активности радионуклидов в донных отложениях донской дельты были получены в 2022 г. Отбор проб производился с поверхностного горизонта дна с помощью дночерпателя Ван-Вина на участке дельты, ограниченном с севера рукавом Мертвый Донец, а с юга – рукавом Большая Кутерьма (рис. 1). В полевых условиях осуществляли первичное литологическое описание отобранных проб грунта, после чего их упаковывали в герметичную тару для дальнейших лабораторных исследований.

Радиометрический анализ с определением удельной активности ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{210}Pb проводился в аналитической лаборатории Мурманского морского биологического института Российской академии наук (ММБИ РАН, г. Мурманск, Россия). На этом этапе проходила первичная пробо-

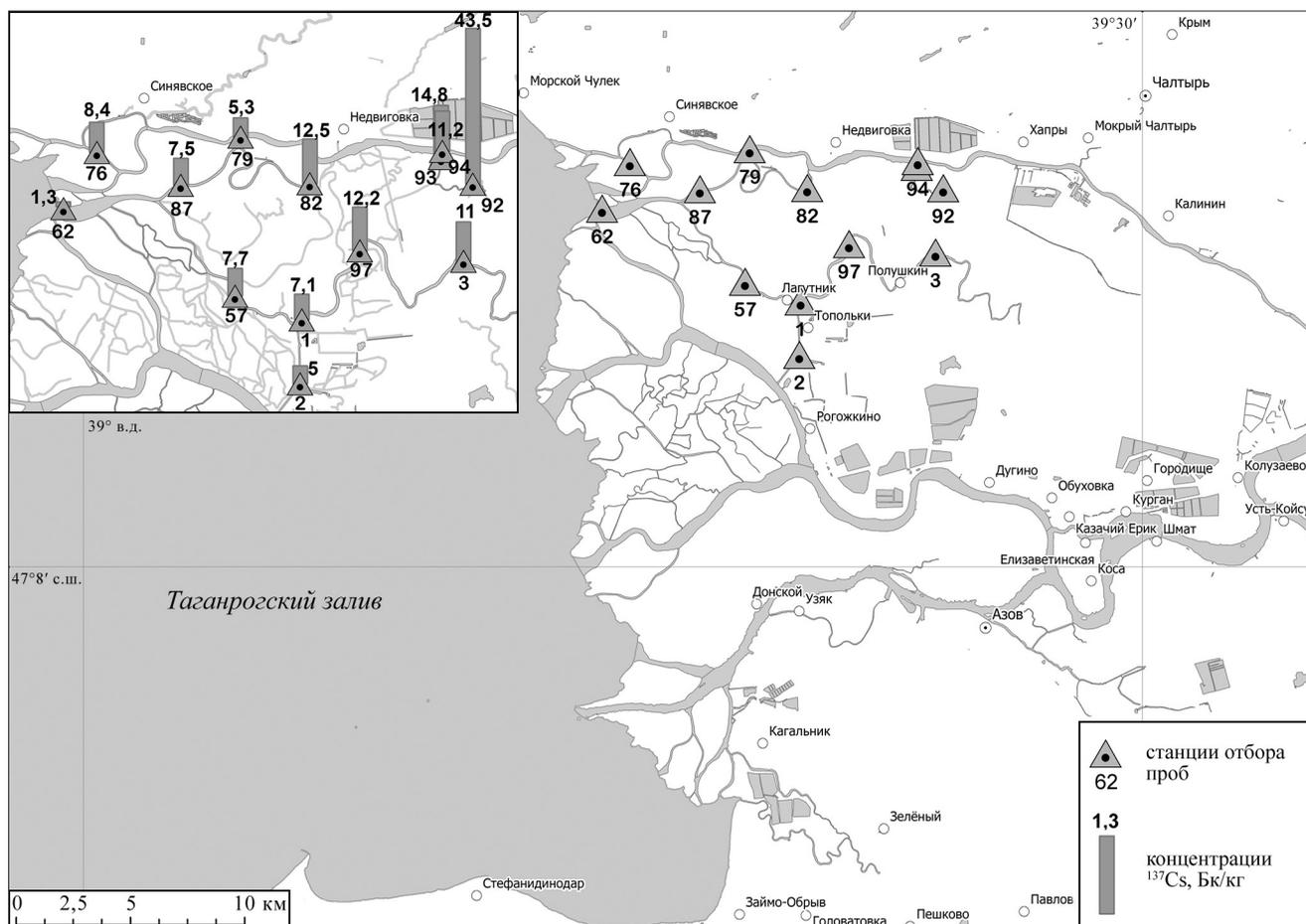


Рис. 1. Районы отбора проб донных отложений и распределение удельной активности ^{137}Cs (Бк/кг) в дельте Дона, 2022 г.

Fig. 1. Bottom sediment sampling areas and ^{137}Cs (Bq/kg) specific activity distribution in the Don Delta, 2022.

подготовка, а именно: взвешивание влажных проб (проб с естественной влажностью), их высушивание при комнатной температуре до сухого состояния (состояния постоянного веса), исключающее потерю органического вещества, повторное взвешивание, измельчение и формирование счетных образцов, удовлетворяющих радиометрическим требованиям.

Определения активности гамма-излучения радионуклидов выполняли по «Методике измерений активности (удельной активности) гамма-излучающих радионуклидов в счетных образцах с применением спектрометра энергии гамма-излучения CANBERRA с программным обеспечением GENIE 2000. ФР.1.38.2016.23695» [6]. Измерения активности гамма-излучающих техногенных и естественных радионуклидов ^{137}Cs , ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th выполнены на гамма-спектрометрической установке InSpector-2000 (Canberra, США) с детектором из чистого германия и на рентгено-гамма-спектроме-

тре b13237 (Canberra, США). Для анализа спектров использовано базовое программное обеспечение Genie-2000. Время измерения каждого образца составляло не менее 24 часов. По результатам измерений концентрацию радионуклидов в исследуемой пробе указывали в расчете на единицу сухой массы осадка.

СОВРЕМЕННЫЕ УСЛОВИЯ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ В ДЕЛЬТЕ ДОНА

Дельта Дона представляет собой удлинённый треугольник неправильной формы, расчленённый многочисленными мелководными рукавами, протоками и ериками. Ее длина по прямой от участка отделения р. Мертвый Донец до Таганрогского залива достигает 30 км, а ширина между крайними рукавами – 22,5 км. Общая площадь дельты составляет 340 км² [7]. По генезису она относится к дельтам выполнения тектонической депрессии и вы-

движения аккумулятивных образований в пределы морского залива за счет речных отложений и приурочена к Ростовскому выступу Украинского щита Восточно-Европейской платформы [8]. Ее современный облик формировался в голоцене на фоне нестабильного уровня Азовского моря. На протяжении последних 4,5 тыс. лет дельта Палео-Дона направленно передвигалась от устья Маныча вниз по течению до своего современного положения [9]. Неоднократные повышения уровня моря приводили к трансгрессиям и сопровождалась перекрытием речных осадков морскими, а его понижения – к регрессиям, а также к размыву отложений речной системой Дона и накоплению аллювия. В результате периодических изменений условий осадконакопления в голоцене в районе расположения современной донской дельты отложилась осадочная толща мощностью около 20 м [10].

По классификации И.В. Самойлова [11] устьевая зона Дона отнесена к много рукавным дельтам с мелководным предустьевым взморьем. Ее современный поверхностный рельеф представляет собой плоскую и слабо наклоненную в сторону моря равнину, в строении которой выделяют приустьевые валы современных и отмерших рукавов и пониженные, местами заболоченные участки островной суши, разделяемые многочисленными мелководными ериками. Наряду с пониженными участками в дельте встречаются возвышающиеся на несколько метров останцы выветривания. В среднем поверхность островов, образующих дельту, не поднимается выше 1 м над меженным уровнем реки. Заметное влияние на изменение уровня оказывают стгно-нагонные колебания, вызываемые преобладающими ветрами. Они воздействуют на морфологию устьевой области Дона, ее гидрологический режим и условия аккумуляции осадочного материала.

В настоящее время территория дельты Дона испытывает высокую антропогенную нагрузку, которая значительно возросла после ввода в строй Цимлянского водохранилища и Азово-Донского морского канала. С момента строительства и начала функционирования Цимлянского гидроузла твердый сток Дона сильно уменьшился – в среднем с 4,4 до 0,19 млн т в год. Помимо этого, после введения в строй в 1927 г. Азово-Донского морского канала произошло перераспределение речного стока между рукавами Большая Каланча и Старый Дон. В результате объем стока по Песчаному гирлу (продолжение рукава Старый Дон), по которому проло-

жена трасса канала, увеличился в 4–5,6 раза. В это же время в мелких протоках в южной части дельты он сократился – от 1,5 до 12 раз. При этом скорость стоковых течений также замедлилась, что в итоге привело к уменьшению водопропускной способности, заилению и постепенному отмиранию некоторых протоков [12]. Также произошло изменение фракционного состава твердого стока. В речной взвеси снизилось содержание частиц песчаной размерности и, напротив, увеличилось содержание пелитовой фракции. В итоге, по данным на начало XXI века, на долю песка во взвеси рукавов дельты Дона приходилось чуть более 3 %, а на долю глинистых частиц – порядка 75 % [13].

В настоящее время наблюдается интенсивное зарастание и заиление протоков дельты и участков устьевого взморья. Выдвижение ее морского края отмечается лишь на локальных участках в районах крупных рукавов. На всем остальном его протяжении фиксируется размыв [14]. По некоторым оценкам, на побережье и в акватории Старого Дона скорость размыва дельты составляет $0,08 \times 10^6$ т/год [13]. В целом изменившиеся под действием антропогенного фактора условия осадконакопления способствуют аккумуляции в протоках и рукавах донской дельты преимущественно илистых осадков различного гранулометрического состава. Площади накопления песков в настоящее время имеют тенденцию к сокращению.

РАДИОАКТИВНОЕ ЗАГРЯЗНЕНИЕ ДЕЛЬТЫ ДОНА

После аварии на Чернобыльской АЭС последовало загрязнение территории водосборного бассейна Азовского моря и его главного пресноводного водотока – р. Дон. В этот период в донных отложениях Азовского моря были отмечены изотопы ^{137}Cs , ^{134}Cs , ^{90}Sr и $^{139, 140}\text{Pu}$ [4]. В 1986 г. выявленное содержание ^{137}Cs в осадках Таганрогского залива изменялось от 2 до 90 Бк/кг и зависело от типа донного грунта. Максимумы содержания ^{137}Cs фиксировались в тонкодисперсных глинистых илах (75–85 Бк/кг), залегающих в центральной части Азовского моря. В мелкоалевритовых илах, выстилающих поверхность дна в центральной части Таганрогского залива, концентрация $^{139, 140}\text{Pu}$ достигала 1,5 Бк/кг.

С начала 2000-х гг. отмечается снижение уровня радиоактивного загрязнения морской акватории.

Таблица 1. Показатели удельной активности радионуклидов в донных отложениях дельты Дона, 2022 г.
Table 1. Indicators of specific activity of radionuclides in the bottom sediments of the Don Delta, 2022

Номер станции / Station number	¹³⁷ Cs Бк/кг Bq/kg	⁴⁰ K Бк/кг Bq/kg	²²⁶ Ra Бк/кг Bq/kg	²³² Th Бк/кг Bq/kg	Характеристика донных отложений Characteristics of bottom sediments
1	7,1 ± 0,4	602 ± 23	17,9 ± 0,8	21,0 ± 1,2	Песок мелкозернистый алевритово-илистый с включениями растительного и ракушечного детрита / Fine-grained aleuritic-silty sand with inclusions of plant and shell detritus
2	5,0 ± 0,3	453 ± 22	19,1 ± 0,9	20,1 ± 1,0	Алеврит песчано-илистый с включениями растительного и ракушечного детрита / Sandy-silty aleurite with inclusions of plant and shell detritus
3	11,0 ± 0,8	383 ± 31	13,6 ± 1,1	18,3 ± 1,5	Песчанистый алевритово-глинистый ил с единичными включениями растительного и ракушечного детрита. Обводненный. Цвет темно-серый / Sandy aleuritic-clay silt with single inclusions of plant and shell detritus. Watered. Color dark gray
57	7,7 ± 0,6	678 ± 35	25,3 ± 1,3	28,9 ± 1,6	Песчанистый алевритово-глинистый ил. Цвет серо-зеленый. С включениями растительного и ракушечного детрита / Sandy aleuritic-clay silt. Color gray-green. With inclusions of plant and shell detritus
62	1,3 ± 0,2	299 ± 19	13,4 ± 0,7	13,7 ± 0,8	Песок илистый мелкозернистый, обводненный. Цвет серый, по поверхности с зеленоватым оттенком. Отмечаются включения ракушечного материала / Fine-grained silty sand, watered. Gray color, with a greenish tinge on the surface. With inclusions of shell material
76	8,4 ± 0,4	446 ± 22	18,4 ± 0,9	23,6 ± 1,1	Ил алевритово-глинистый с большим содержанием ракушечного материала (около 50 %) / Aleuritic-clay silt with a high content of shell material (about 50%)
79	5,3 ± 0,3	318 ± 17	15,8 ± 0,7	14,0 ± 0,6	Песчанистый алевритовый ил с включениями растительного и ракушечного материала. Цвет темно-серый. Обводненный / Sandy aleuritic silt with inclusions of plant and shell material. Dark gray color. Watered
82	12,5 ± 0,5	659 ± 28	25,7 ± 1,0	29,5 ± 1,1	Песчанистый алевритово-глинистый ил с единичными включениями растительного и ракушечного детрита. Обводненный. Цвет темно-серый / Sandy aleuritic-clay silt with single inclusions of plant and shell detritus. Watered. Color dark gray
87	7,5 ± 0,6	590 ± 31	24,4 ± 1,2	24,3 ± 1,2	Алеврит песчано-илистый с включениями растительного и ракушечного детрита. Цвет темно-серый / Sandy-silty aleurite with inclusions of plant and shell detritus. Color dark gray

Номер станции / Station number	¹³⁷ Cs Бк/кг Bq/kg	⁴⁰ K Бк/кг Bq/kg	²²⁶ Ra Бк/кг Bq/kg	²³² Th Бк/кг Bq/kg	Характеристика донных отложений Characteristics of bottom sediments
92	43,5 ± 2,2	754 ± 43	27,4 ± 1,6	33,3 ± 2,1	Алеврит песчано-илистый с включениями растительного и ракушечного детрита. Цвет серо-зеленый / Sandy-silty aleurite with inclusions of plant and shell detritus. Color gray-green
93	14,8 ± 0,4	875 ± 36	29,8 ± 1,3	29,1 ± 1,3	Песчанистый алевритово-глинистый ил с включениями растительного и ракушечного детрита. Обводненный. Цвет темно-серый / Sandy aleuritic-clay silt with inclusions of plant and shell detritus. Watered. Color dark gray
94	11,2 ± 0,9	1217 ± 85	37,0 ± 2,5	51,7 ± 3,8	Алевритово-глинистый ил. Цвет темно-серый. Отмечаются включения ракушечного материала / Aleuritic-clay silt. Color dark gray. Inclusions of shell material are noted
97	12,2 ± 1,4	776 ± 49	34,0 ± 2,3	39,5 ± 2,5	Глинистый ил. Цвет темно-серый до черного. Обводненный. Отмечаются единичные включения ракушечного материала / Clay silt. Color dark gray to black. Watered. Single inclusions of shell material are noted

Несмотря на это, до настоящего времени в глинистых и алевритово-глинистых илах центральной части Азовского моря, залегающих в интервале глубин 10–13 м, сохраняется высокая удельная активность ¹³⁷Cs (50–65 Бк/кг). В алевритово-глинистых илах Таганрогского залива концентрация ¹³⁷Cs находится на уровне 20–45 Бк/кг. В песчано-илистых алевритах, залегающих в восточной части залива на глубинах 4–5 м, отмечается снижение концентрации ¹³⁷Cs до 11 Бк/кг [5].

При относительном понимании процесса накопления радионуклидов в Азовском море остается недостаточно изученным радиоактивное загрязнение сопредельных территорий, и в частности дельта р. Дон. На сегодняшний день имеются лишь единичные наблюдения на устьевом участке этой реки [15].

Как показали наши исследования, проведенные в северной части донской дельты, пространственное размещение донных отложений на этом участке в первую очередь зависит от морфологического строения, глубины и степени водопроточности проток. Для донных наносов характерно присутствие примеси песчаного материала, содержание которого увеличивается от тальвега

русел к берегу. На участках береговой зоны с зарослями водной растительности отмечается интенсивное накопление илистых осадков характерного темно-серого и черного цвета. Под воздействием сгонно-нагонных явлений отложения могут неоднократно взмучиваться и, переходя во взвешенное состояние, переноситься водным потоком.

В целом условия осадконакопления на исследованной площади способствуют аккумуляции отложений относительно схожего гранулометрического состава, которые в основном представлены песчано-илистыми алевритами с включениями растительного и ракушечного детрита и песчанистыми алевритово-глинистыми илами, также содержащими включения детрита органического происхождения. Смена в составе отложений отмечается в непосредственной близости от места впадения рукавов в Таганрогский залив и в широких протоках с сильным течением, где илы замещаются илистыми мелко- и среднезернистыми песками, также содержащими в виде включений ракушу и ракушечный детрит.

Концентрация потенциально опасного техногенного радионуклида ¹³⁷Cs в отложениях северной части дельты находится на относительно низ-

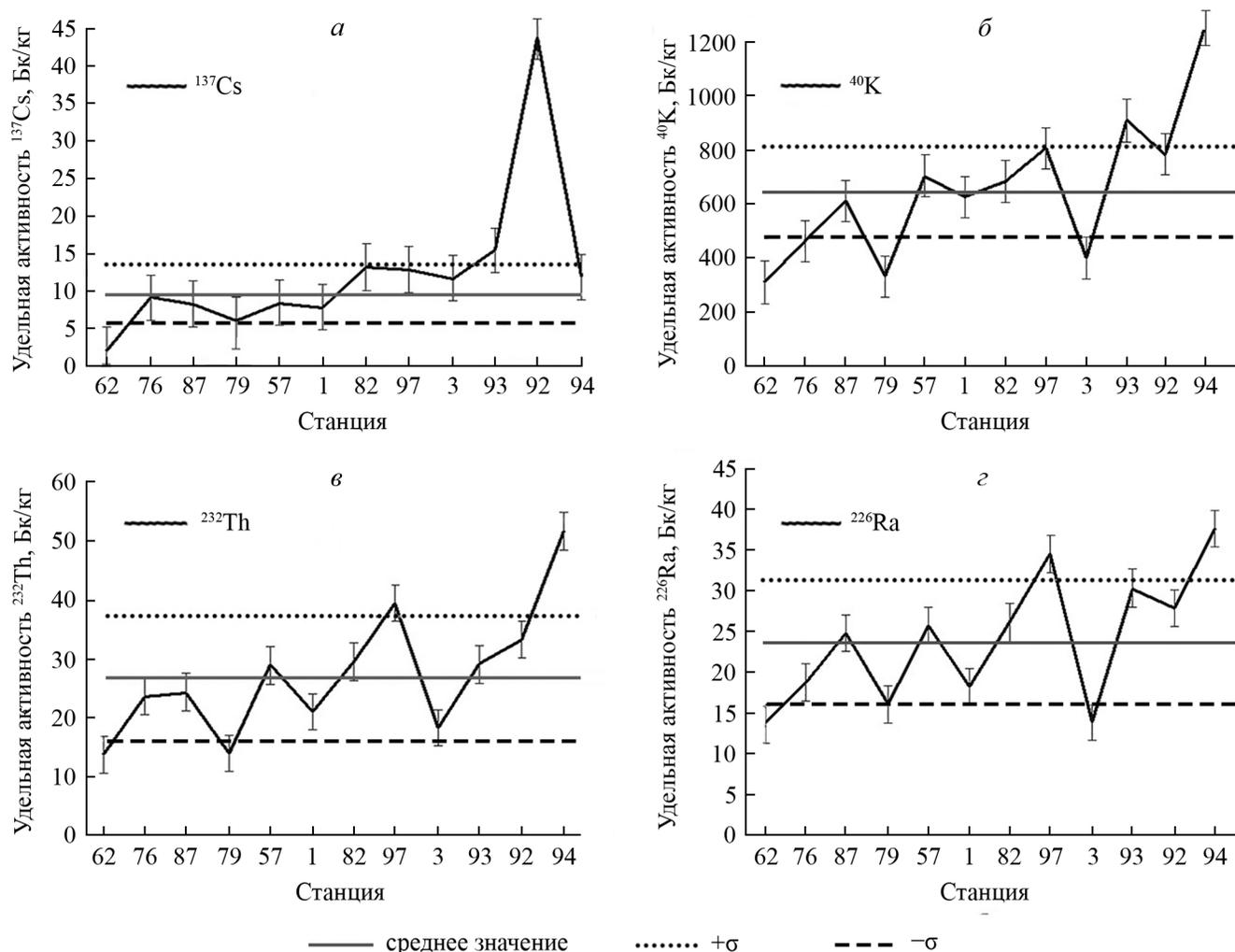


Рис. 2. Характеристика изменений удельной активности радионуклидов в донных отложениях дельты Дона в направлении от устья к вершине, 2022 г.: *а* – динамика удельной активности ^{137}Cs , Бк/кг; *б* – динамика удельной активности ^{40}K , Бк/кг; *в* – динамика удельной активности ^{232}Th , Бк/кг; *г* – динамика удельной активности ^{226}Ra , Бк/кг.

Fig. 2. Changes in the specific activity of radionuclides in the bottom sediments of the Don Delta directed from the mouth to its top, 2022: *a* – dynamics of specific activity ^{137}Cs , Bq/kg; *б* – dynamics of specific activity ^{40}K , Bq/kg; *в* – dynamics of specific activity ^{232}Th , Bq/kg; *г* – dynamics of specific activity ^{226}Ra , Bq/kg.

ком уровнем и в среднем изменяется в диапазоне 5–15 Бк/кг сухой массы. Незначительный разброс концентраций позволяет оценивать общую радиологическую ситуацию на участке по средней концентрации – $8,8 \pm 1,2$ Бк/кг. По данным наблюдений, проведенных в период 2018–2021 гг., в районе взморья также наблюдались близкие значения активности ^{137}Cs – около 2 Бк/кг, а в протоках дельты Дона – до 3 Бк/кг [16].

Минимальная удельная активность ^{137}Cs (1,3 Бк/кг) регистрируется в районах впадения крупных рукавов дельты в Таганрогский залив, где преимущественно аккумулируется песчаный материал. Тенденция роста его содержания отмечается в отложениях, в составе которых преобладают

частицы пелитовой и алевритовой размерности. Максимумы концентрации ^{137}Cs (43,5 Бк/кг) зафиксированы в наносах, отобранных в русле слабoproточного и мелководного ерика Лютик, где при глубине около 1 м поверхностный слой осадков сложен песчано-илистым алевритом, содержащим включения ракушечного и растительного детрита (табл. 1).

В профилях распределения природных радионуклидов ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{210}Pb просматривается аналогичная тенденция роста их удельной активности с запада на восток (табл. 1, рис. 2). Осредненные для северной части дельты Дона значения удельной активности техногенных и природных радионуклидов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Статистические характеристики содержания техногенных и природных радионуклидов в донных отложениях дельты Дона, 2022 г.**Table 2.** Statistical characteristics of the content of man-made and natural radionuclides in the bottom sediments of the Don Delta, 2022

Характеристика Characteristic	Радионуклиды, Бк/кг Radionuclides, Bq/kg				
	¹³⁷ Cs	²²⁶ Ra	²³² Th	²¹⁰ Pb	⁴⁰ K
Среднее / Average	8,81	23,22	26,69	75,34	620,67
Минимум / Minimum	1,30	13,40	13,70	23,80	299,00
Максимум / Maximum	14,80	37,00	51,70	123,00	1217,00
Стандартная ошибка / Standard error	1,20	2,11	2,93	8,84	76,78
Стандартное отклонение / Standard deviation	3,97	7,59	10,58	26,52	265,96
Дисперсия выборки / Sample variance	15,77	57,61	111,93	703,57	70734,97

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радиоактивное загрязнение бассейна Азовского моря в настоящее время определяется концентрацией техногенных радионуклидов, циркулирующих в экосистеме после аварии на Чернобыльской АЭС. Сорбируясь взвесью, они переносятся на значительное расстояние и в дальнейшем накапливаются в донных осадках. В результате последующего волнового взмучивания и воздействия течений содержание потенциально опасных для природной среды техногенных радиоизотопов в системе вода – донные отложения подвержено изменениям, требующим постоянного мониторинга.

Одним из путей миграции радионуклидов в регионе является р. Дон, которая при впадении в Таганрогский залив Азовского моря образует много рукавную дельту. В настоящее время эта территория находится под действием высокой антропогенной нагрузки. Дноуглубительные работы и зарегулирование донского стока кардинальным образом повлияли на процесс современного осадконакопления. Сокращение твердого стока Дона и уменьшение его фракционного состава способствуют более интенсивному накоплению на дне многочисленных протоков и гирл донской дельты тонкодисперсных илистых отложений.

По данным, полученным в ходе изучения донных отложений северной части донской дельты, было установлено, что в настоящее время содержание радиоизотопа ¹³⁷Cs в этом районе характеризу-

ется спектром значений от 1,3 до 43,5 Бк/кг и зависит от типа донного грунта. Максимумы удельной активности ¹³⁷Cs отмечаются в тонкодисперсных илистых отложениях, залегающих на дне мелководных заиленных протоков донской дельты. Минимальные концентрации радиоцезия фиксируются в мелкозернистых песках, содержащих примесь ракушечного материала и распространенных на участке морского края дельты. В распределении как техногенных (¹³⁷Cs), так и природных (⁴⁰K, ²²⁶Ra, ²³²Th) радионуклидов отмечена тенденция роста концентраций в направлении от приморской части к вершине дельты.

В целом с момента аварии на Чернобыльской АЭС и до настоящего времени отмечается тенденция к уменьшению удельной активности ¹³⁷Cs. Его концентрация в донных осадках характеризуется как низкая, не вызывающая острой опасности для экосистемы.

Публикация подготовлена в рамках выполнения тем НИР ГЗ ЮНЦ РАН «Анализ исторических данных с целью обоснования системы мониторинга биогеохимических циклов в бассейне Азовского моря с учетом региональных особенностей», № государственной регистрации 122101100083-5, «Влияние глобальных палеоэкологических и палеогеографических событий на состояние биогеоценозов и человеческих популяций южных регионов Северной Евразии в позднем кайнозое», № 122011900166-9, государственного задания ММБИ РАН, а также гранта РНФ № 22-17-00243.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булгаков В.Г., Уваров А.Д., Гниломедов В.Д., Каткова М.Н., Епифанов А.О., Вакуловский С.М. 2021. Результаты исследования радиоактивного загрязнения почв Брянской обла-

сти. В кн.: *Радиоэкологические последствия радиационных аварий – к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС: Сборник докладов международной научно-практической конференции, Обнинск, 22–23 апреля 2021 г.* Обнинск, ФГБНУ ВНИИРАЭ: 46–48.

2. Бурякова А.А., Крышев И.И., Павлова Н.Н., Каткова М.Н. 2021. Современное состояние радиоэкологической обстановки на территориях чернобыльского следа в Брянской области. В кн.: *Радиоэкологические последствия радиационных аварий – к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС: Сборник докладов международной научно-практической конференции, Обнинск, 22–23 апреля 2021 г.* Обнинск, ФГБНУ ВНИИРАЭ: 48–51.
3. Крышев И.И., Бурякова А.А., Павлова Н.Н., Сазыкина Т.Г., Крышев А.И. 2021. Оценка экологического риска Чернобыльской аварии на загрязненных участках территории России (1986–2020). В кн.: *Радиоэкологические последствия радиационных аварий – к 35-ой годовщине аварии на ЧАЭС: Сборник докладов международной научно-практической конференции, Обнинск, 22–23 апреля 2021 г.* Обнинск, ФГБНУ ВНИИРАЭ: 88–90.
4. Матишов Г.Г., Усягина И.С., Польшин В.В. 2015. Динамика загрязнения Азовского моря изотопом ¹³⁷Cs в 1966–2013 гг. *Доклады Академии наук.* 460(6): 716–721. doi: 10.7868/S0869565215060237
5. Матишов Г.Г., Польшин В.В., Ильин Г.В., Усягина И.С. 2020. Динамика радиационного фона в российских морях (новые данные по Азовскому морю). *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле.* 493(2): 83–87. doi: 10.31857/S2686739720080125
6. Методика измерений активности (удельной активности) гамма-излучающих радионуклидов в счетных образцах с применением спектрометра энергии гамма-излучения CANBERRA с программным обеспечением GENIE 2000. ФР.1.38.2016.23695. 2015. *Федеральный информационный фонд по обеспечению единства измерений.* URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/16/items/302615> (дата обращения: 4.07.2023).
7. Самохин А.Ф. 1958. *Река Дон и ее притоки: научно-популярный очерк.* Ростов н/Д, изд-во РГУ: 120 с.
8. *Геология СССР, том 46, Ростовская, Волгоградская, Астраханская области и Калмыцкая АССР. Геологическое описание.* 1970. М., Недра: 666 с.
9. Беркович К.М., Тимофеева В.В. 2007. Морфология и направленные деформации русла Нижнего Дона. *Геоморфология.* 3: 54–62. doi: 10.15356/0435-4281-2007-3-54-62
10. Зайцев А.В., Зеленщиков Г.В. 2009. Голоцен дельты Дона. В кн.: *Геология, география и экология океана. Материалы международной научной конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Д.Г. Панова (Ростов-на-Дону, 8–11 июня 2009 г.).* Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 124–126.
11. Самойлов И.В. 1952. *Устья рек.* М., Географгиз: 527 с.
12. Польшин В.В., Толочко И.В., Сушко К.С., Московец А.Ю., Бирюкова С.В. 2021. Изменение палеоландшафтов в эпоху голоцена под влиянием природных и антропогенных процессов на примере акватории Таганрогского залива и прилегающего участка дельты Дона. *Наука Юга России.* 17(2): 49–56. doi: 10.7868/S25000640210205
13. Бессонов О.А., Давыдов М.Г., Зеленщиков Г.В., Казьмина Л.Н. 2009. Поведение терригенного осадочного вещества в системе «Цимлянское водохранилище – Нижний Дон – Таганрогский залив». В кн.: *Геология, география и экология океана. Материалы международной научной конференции,* посвященной 100-летию со дня рождения Д.Г. Панова (*Ростов-на-Дону, 8–11 июня 2009 г.*). Ростов н/Д, изд-во ЮНЦ РАН: 32–36.
14. Матишов Г.Г., Польшин В.В., Дюжова К.В., Сушко К.С., Титов В.В. 2017. Результаты комплексных исследований голоценовых отложений Таганрогского залива Азовского моря. *Наука Юга России.* 13(4): 43–59. doi: 10.23885/2500-0640-2017-3-4-43-59
15. Матишов Г.Г., Матишов Д.Г., Намятов А.А., Рисик Н.С., Буфетова М.В. 2000. Радиоактивное загрязнение морской среды. В кн.: *Закономерности океанографических и биологических процессов в Азовском море.* Мурманск, изд-во КНЦ РАН: 369–399.
16. Матишов Г.Г., Польшин В.В., Ильин Г.В., Усягина И.С. 2022. Влияние газоаэрозольных выбросов Ростовской АЭС на радиационный фон южных водоемов. *Доклады Российской академии наук. Науки о Земле.* 503(2): 172–177. doi: 10.31857/S2686739722040119

REFERENCES

1. Bulgakov V.G., Uvarov A.D., Gnilomedov V.D., Katkova M.N., Epifanov A.O., Vakulovsky S.M. 2021. [Results of the study of radioactive contamination of the soils of the Bryansk Region]. In: *Radioekologicheskie posledstviya radiatsionnykh aviariy. Sbornik докладov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Obninsk, 22–23 aprelya 2021 g.* [Radioecological consequences of radiation accidents – to the 35th anniversary of the Chernobyl accident: Proceedings of the international research and practice conference, Obninsk, Russia, 22–23 April, 2021]. Obninsk, All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology: 46–48. (In Russian).
2. Buryakova A.A., Kryshev I.I., Pavlova N.N., Katkova M.N. 2021. [Current state of radioecological situation on the territory of the Chernobyl radioactive trace in the Bryansk Region]. In: *Radioekologicheskie posledstviya radiatsionnykh aviariy. Sbornik докладov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Obninsk, 22–23 aprelya 2021 g.* [Radioecological consequences of radiation accidents – to the 35th anniversary of the Chernobyl accident: Proceedings of the international research and practice conference, Obninsk, Russia, 22–23 April, 2021]. Obninsk, All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology: 48–51. (In Russian).
3. Kryshev I.I., Buryakova A.A., Pavlova N.N., Sazykina T.G., Kryshev A.I. 2021. [Environmental risk assessment of the Chernobyl accident in polluted areas of Russia (1986–2020)]. In: *Radioekologicheskie posledstviya radiatsionnykh aviariy. Sbornik докладov mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Obninsk, 22–23 aprelya 2021 g.* [Radioecological consequences of radiation accidents – to the 35th anniversary of the Chernobyl accident: Proceedings of the international research and practice conference, Obninsk, Russia, 22–23 April, 2021]. Obninsk, All-Russian Research Institute of Radiology and Agroecology: 88–90. (In Russian).
4. Matishov G.G., Usyagina I.S., Pol'shin V.V. 2015. Long-term dynamics of Sea of Azov contamination with the ¹³⁷Cs isotope (1966–2013). *Doklady Earth Sciences.* 460(2): 198–202. doi:10.1134/S1028334X15020221
5. Matishov G.G., Polshin V.V., Ilyin G.V., Usyagina I.S. 2020. Dynamics of background radiation in Russian seas (new data

- on the Sea of Azov). *Doklady Earth Sciences*. 493(2): 640–644. doi: 10.1134/S1028334X20080127
6. [Method of measuring the activity (specific activity) of gamma-emitting radionuclides in counting samples using the CANBERRA gamma radiation energy spectrometer with GENIE 2000 software. FR.1.38.2016.23695]. 2015. *Federalnyy informatsionnyy fond po obespecheniyu edinstva izmereniy*. Available at: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/16/items/302615> (accessed 4 July 2023). (In Russian).
 7. Samokhin A.F. 1958. *Reka Don i ee pritoki: nauchno-populyarnyy ocherk*. [The Don River and its tributaries: popular science essay]. Rostov-on-Don, Rostov State University: 120 p. (In Russian).
 8. *Geologiya SSSR, tom 46, Rostovskaya, Volgogradskaya, Astrakhanskaya oblasti i Kalmytskaya ASSR. Geologicheskoe opisaniye*. [Geology of the USSR, volume 46, Rostov, Volgograd, Astrakhan regions and Kalmyk ASSR. Geological description]. Moscow, Nedra: 666 p. (In Russian).
 9. Berkovitch K.M., Timofeyeva V.V. 2007. [Lower Don riverbed morphology and deformation trend]. *Geomorfologiya*. 3: 54–62. (In Russian). doi: 10.15356/0435-4281-2007-3-54-62
 10. Zaytsev A.V., Zelenshchikov G.V. 2009. [Holocene of the Don Delta]. In: *Geologiya, geografiya i ekologiya okeana. Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya D.G. Panova*. [Geology, geography and ecology of the ocean. Materials of the international scientific conference dedicated to the 100th anniversary of D.G. Panov (Rostov-on-Don, Russia, June 8–11, 2009)]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 124–126. (In Russian).
 11. Samoylov I.V. 1952. *Ust'ya rek*. [Estuaries of rivers]. Moscow, Geografiz: 527 p. (In Russian).
 12. Polshin V.V., Tolochko I.V., Sushko K.S., Moskovets A.Yu., Biryukova S.V. 2021. [The change of paleolandscapes in the Holocene epoch under the influence of natural and anthropogenic processes on the example of the water area of the Taganrog Bay and the adjacent section of the Don Delta]. *Nauka Yuga Rossii*. 17(2): 49–56. doi: 10.7868/S25000640210205
 13. Bessonov O.A., Davydov M.G., Zelenshchikov G.V., Kaz'mina L.N. 2009. [Behavior of terrigenous sedimentary matter in the Tsimlyansk Reservoir – Nizhny Don – Taganrog Bay system]. In: *Geologiya, geografiya i ekologiya okeana. Materialy mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 100-letiyu so dnya rozhdeniya D.G. Panova*. [Geology, geography and ecology of the ocean. Materials of the international scientific conference dedicated to the 100th anniversary of D.G. Panov (Rostov-on-Don, Russia, June 8–11, 2009)]. Rostov-on-Don, Southern Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences: 32–36. (In Russian).
 14. Matishov G.G., Pol'shin V.V., Dyuzhova K.V., Sushko K.S., Titov V.V. 2017. [Results of complex studies of Holocene deposits of the Taganrog Bay of the Sea of Azov]. *Nauka Yuga Rossii*. 13(4): 43–59. doi: 10.23885/2500-0640-2017-3-4-43-59
 15. Matishov G.G., Matishov D.G., Namyatov A.A., Risik N.S., Bufetova M.V. 2000. [Radioactive contamination of the marine environment]. In: *Zakonomernosti okeanograficheskikh i biologicheskikh protsessov v Azovskom more*. [Regularities of oceanographic and biological processes in the Sea of Azov]. Murmansk, Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences: 369–399. (In Russian).
 16. Matishov G.G., Polshin V.V., Ilyin G.V., Usyagina I.S. 2022. Influence of gas aerosol emissions of the Rostov Nuclear Power Plant on the radiation background of southern waters. *Doklady Earth Sciences*. 503(2): 220–225. doi: 10.1134/S1028334X22040110

Поступила 30.05.2023