

УДК 5574:539.1.04

ИСКУССТВЕННЫЕ (^{90}Sr , ^{137}Cs) И ПРИРОДНЫЕ (^{40}K , ^{232}Th И ^{238}U) РАДИОНУКЛИДЫ В ДНЕПРОВСКОЙ ВОДЕ СЕВЕРО-КРЫМСКОГО КАНАЛА И ОРОШАЕМЫХ ВДОЛЬ НЕГО ПОЛИВНЫХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ УГОДЬЕВ (2022–2023 гг.)¹

© 2025 г. Н. Ю. Мирзоева^а, О. Н. Мирошниченко^{а, *}, И. Г. Сидоров^а,
И. Н. Мосейченко^а, С. И. Архипова^а

^аФедеральное государственное бюджетное учреждение науки “Институт биологии южных морей
им. А.О. Ковалевского РАН”, Севастополь, 299011 Россия

*e-mail: oksaniya_89@mail.ru

Поступила в редакцию 13.03.2024 г.

После доработки 31.07.2024 г.

Принята к публикации 05.12.2024 г.

По итогам исследований 2022–2023 гг. проведена оценка радиоэкологического состояния водной экосистемы Северо-Крымского канала (СКК) в отношении долгоживущих искусственных (^{90}Sr , ^{137}Cs) и естественных (^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th) радионуклидов. Изучена также роль днепровской воды, вновь поступившей в 2022 г. по руслу СКК в Крым, в переносе техногенных и природных радионуклидов на поливные сельскохозяйственные угодья этого региона. Применялись стандартные, принятые в общемировой практике методы радиохимической обработки проб, а также бета- и гамма-спектрометрии. Определено, что спустя 37 лет после аварии на ЧАЭС днепровская вода остается источником вторичного поступления ^{90}Sr (до 427.2 Бк/м³ в растворенной форме) и ^{137}Cs (до 521.9 Бк/кг сухой массы на взвешенном веществе) через СКК на территорию Крыма. Выполненный прогноз показал, что, как минимум, в течение 10 лет после поступления днепровской воды с такими же уровнями удельной активности ^{90}Sr и ^{137}Cs , которые были определены в 2022–2023 гг., развитие поливного сельского хозяйства в Крыму будет радиационно безопасным.

Ключевые слова: Северо-Крымский канал, авария на ЧАЭС, река Днепр, искусственные и природные радионуклиды, орошаемые почвы, поливные растения, прогноз.

DOI: 10.31857/S0321059625030101 EDN: SYGQHR

ВВЕДЕНИЕ

Северо-Крымский канал (СКК) – ороситель-но-обводнительный канал длиной 402.6 км, построен в 1961–1971 гг. для обеспечения устойчивого водоснабжения маловодных и засушливых территорий Херсонской и Крымской областей

советской Украины. Система СКК состоит из магистрального русла, отводных каналов (вода использовалась для полива полей), а также сбросных каналов (осуществлялся сброс остатка воды, использованной для орошения) [4, 19]. СКК берет начало из Каховского водохранилища у г. Таврийска, далее канал идет на юго-восток, имея протяженность в границах Крыма 294 км, заканчивается магистральное русло СКК у села Зеленый Яр (район г. Керчи), восточный Крым [4, 19]. До 2014 г. наполнение СКК водой начиналось в конце марта, завершалась подача воды в ноябре. Для нужд сельского хозяйства в Крыму использовалось ~80% днепровской воды, поступавшей по СКК, в том числе 60% уходило на обеспечение выращивания риса [4, 19, 39].

После аварии на ЧАЭС в 1986 г. с атмосферными осадками на поверхность Черного моря

¹ Исследования по изучению водной экосистемы Северо-Крымского канала и прилегающих территорий выполнены при поддержке РНФ (проект 23-26-00128 “Роль оросительной системы Северо-Крымского канала в процессах переноса долгоживущих радионуклидов чернобыльского происхождения, тяжелых металлов, а также углеводородов с днепровской водой на поливные сельскохозяйственные угодья Крыма”, госрегистрация 123022100021-4). Исследования по изучению морских экосистем выполнены в рамках государственного задания ФИЦ ИнБЮМ (тема “Изучение биогеохимических закономерностей радиоэкологических и хемоэкологических процессов в экосистемах водоемов Азово-Черноморского бассейна в сравнении с другими акваториями Мирового океана и отдельными водными экосистемами их водосборных бассейнов для обеспечения устойчивого развития на южных морях России”, 2024–2026 гг., регистрационный номер 124030100127-7).

и Крыма попали искусственные радионуклиды – 1.7–2.4 ПБк ^{137}Cs и 0.3 ПБк ^{90}Sr [14, 41]. В послеаварийные годы наблюдалось вторичное поступление искусственных радионуклидов в Черное море со стоками рек, прежде всего Днепра и Дуная, а на территорию Крыма – за счет водопользования из СКК [3, 14, 26]. В конце мая 1986 г. в днепровской воде Киевского водохранилища было зарегистрировано 16 радионуклидов, тогда как к концу 1986 г. в воде водохранилища определялись, в основном, радиоизотопы ^{137}Cs и ^{90}Sr . Максимальные концентрации ^{137}Cs в воде р. Днепр отмечены в Киевском водохранилище в 1986 и 1987 гг. – 670 и 360 Бк/м³ соответственно [14, 17]. После аварии на ЧАЭС в воде нижнего Днепра (Каховское водохранилище) наибольшая концентрация ^{90}Sr отмечена весной 1987 г. – 925 Бк/м³ [14, 37]. В 2011 г. в днепровской воде, поступающей по руслу СКК, концентрация ^{90}Sr составляла 54.9 ± 2.7 Бк/м³, ^{137}Cs – $\geq 56.1 \pm 1.1$ Бк/м³ [28].

В погруженных водных растениях Киевского водохранилища удельная активность ^{137}Cs изменялась в диапазоне 507–8788 Бк/кг воздушно-сухой массы (1991–1992 гг.) [14]. Для ^{90}Sr эти значения составили 78.3–730.0 и 2.4–24.9 Бк/кг воздушно-сухой массы для водных растений из Киевского и Каховского водохранилищ соответственно [37].

Концентрации ^{90}Sr в донных отложениях (ДО) Киевского и Каховского водохранилищ менялись в диапазонах соответственно 114.0–822.0 и 38.7–64.7 Бк/кг воздушно-сухой массы [37]. В ДО Киевского водохранилища концентрации ^{137}Cs в течение 3 лет изменялись в следующих диапазонах: в 1986 г. от 173 до 181 Бк/кг сухой массы, в 1987 г. от 74 до 2405 Бк/кг сухой массы, в 1989 г. от 340 до 455 Бк/кг сухой массы [14, 33]. К 2021 г. средние концентрации ^{137}Cs в ДО р. Днепр [24] снизились до 3.2 Бк/кг сухой массы.

Измеренные концентрации природных (^{40}K , ^{232}Th и ^{238}U) радионуклидов в ДО р. Днепр составляли в современный период в среднем 148.0, 7.8, 10.4 Бк/кг сухой массы [24].

После прекращения поступления радионуклидов с атмосферными выпадениями их со-

держание определялось перераспределением и миграцией в компонентах экосистем водосбора Днепра – смывом дождевыми и талыми водами, взаимодействием с почвами и донными отложениями. Непосредственно в речных системах миграция радионуклидов зависела от их физико-химических свойств. Так, для ^{137}Cs , который в пресноводных условиях активно сорбируется взвешенным веществом, отмечаются локальные районы повышенной концентрации в застойных зонах – у плотин, в водохранилищах и т. д., где происходит накопление мелкодисперсных фракций взвеси [1, 20, 24]. В условиях проточных зон радионуклиды, попавшие в речные ДО, со временем были покрыты слоем более чистых осадков, нарушение целостности которого может приводить к вторичному поступлению значительных количеств радионуклидов в речные экосистемы [24, 27].

С января 2010 г. при выведении из эксплуатации водоема-охладителя ЧАЭС [12, 40] его воды с растворенными радионуклидами сбрасывались в реку Припять, попадали в Днепр, каскад днепровских водохранилищ и через СКК – во внутренние водоемы и поливные земли Крыма [12, 40]. Радиоэкологические исследования в районе СКК, начатые сотрудниками ОРХБ в 1991 г., из-за отсутствия финансирования были прекращены в 1995 г. [6, 9, 14–16].

В апреле 2014 г. подача воды в Крым по СКК была прекращена [39]. С возобновлением подачи днепровской воды в Крым 3 марта 2022 г. после 8 лет ее отсутствия в регионе было восстановлено поливное земледелие, включая возделывание риса в северном Крыму [39]. Однако 6 июня 2023 г. произошел подрыв дамбы на Каховской ГЭС. Уровень русла СКК оказался на 1 м выше водозабора после разлива Каховского водохранилища, днепровская вода перестала поступать в систему СКК с 8 июня 2023 г. [21].

Определено [3, 35, 38], что до 2014 г. днепровская вода, приходящая по руслу СКК в Крым, была фактором хронического вторичного радиоактивного загрязнения внутренних водоемов и поливных земель Крымского региона долгоживущими радионуклидами ^{90}Sr и ^{137}Cs . На радиоэкологическое состояние водной экосистемы

СКК, орошаемых почв и выращиваемых поливных растений могут оказывать влияние также природные долгоживущие радионуклиды, такие как ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th , содержание которых в экосистеме СКК и прилегающих территориях практически не изучено [16].

Комплексные радиоэкологические исследования (по научным задачам и количеству изучаемых радионуклидов), выполненные авторами статьи в период 2022–2023 гг. в экосистеме СКК и прилегающих к нему сельхозугодий, проводятся впервые за последние 27 лет (с 1995 г.), что определяет их безусловную актуальность.

Цель исследований состояла в оценке современного (2022–2023 гг.) радиоэкологического состояния водной экосистемы СКК в отношении долгоживущих искусственных (^{90}Sr , ^{137}Cs) и естественных (^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th) радионуклидов,

изучении роли днепровской воды СКК в переносе техногенных и природных радионуклидов на поливные сельскохозяйственные (с/х) угодья, расположенные вдоль канала.

Задачи исследований: выполнить отбор проб и определить концентрации искусственных (^{90}Sr , ^{137}Cs) и природных (^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th) радионуклидов в компонентах экосистемы СКК (вода, гидробионты, ДО), поливных почвах, с/х растениях; выявить особенности тенденций распределения по компонентам водной экосистемы СКК, наземных экосистем с/х угодий; провести сравнительный анализ в отношении современного радиоэкологического состояния экосистемы СКК и орошаемых вдоль него поливных с/х экосистем с ранее полученными данными [14]; выполнить предварительный прогноз о безопасности использования днепровской воды, подаваемой по СКК для с/х нужд Крымского региона.



Рис. 1. Картограмма территории отбора проб в районе СКК и орошаемых сельхозугодий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Отбор проб из СКК, поливных почв, расположенных вдоль канала, а также орошаемых культур, выращиваемых на этих почвах, проводился в сухопутных экспедициях в период 2022–2023 гг. Станции отбора проб в районе СКК и их характеристики представлены на рис. 1, в табл. 1.

Объектами исследования в водной экосистеме СКК как его магистрального русла, так и отводных каналов, служили вода, взвешенное вещество (ВВ), ДО, гидробионты, в наземных орошаемых экосистемах – поливные и целинные почвы, расположенные вдоль канала, орошаемые культуры.

Пробоподготовка и радиохимические анализы по определению удельной активности ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{40}K , ^{232}Th и ^{238}U в отобранных природных объектах проводились в лабораториях ОРХБ ФИЦ ИнБЮМ.

Пробы воды объемом 20 л для определения концентрации ^{90}Sr и 100 л для определения ^{137}Cs отбирались в экспедиционных условиях в пластиковые канистры. Отобранный объем воды отделяли от взвешенного вещества фильтрацией через фильтр-картридж с номинальным диаметром пор 0.5 мкм.

Для определения удельной активности ^{90}Sr в водных и наземных растениях отбирали пробы

3–5 кг сырой массы; в моллюсках ≥ 1 кг сырой массы; в рыбах – 3–5 кг сырой массы одного вида. Пробы растений и моллюсков тщательно промывали нативной водой, очищали от механических загрязнений и обрастаний, сушили на фильтровальной бумаге. Для определения удельной активности ^{90}Sr в ДО и почвах отбирались 300–500 г сырой массы каждого образца [14].

Пробы гидробионтов, наземной растительности, донных отложений и почв высушивали в фарфоровой посуде при температуре 100–110°C в течение 24 ч до постоянного веса, затем озоляли в муфельной печи при температуре 450–500°C для удаления органических материалов. Всю золу взвешивали и брали навеску 100–150 г. Зола гидробионтов и наземной растительности растирали в ступке и просеивали через сито с диаметром пор 1 мм. ДО и почвы просеивали через сито в высушенном виде до их озоления [14].

Используемый метод определения ^{90}Sr в объектах окружающей среды соответствует общепринятым в мировой практике [29] и прошел тестирование в рамках международной интеркалибрации [14, 37]. Основные этапы метода определения ^{90}Sr следующие: радиохимическое выделение радионуклида из отобранных проб, радиохимическая очистка от мешающих элементов солянокислого раствора пробы, содержащего ^{90}Sr , выдерживание основного раствора (с добавлением в него 60 мг Y^{+++}) в течение 14–25 сут для накопления дочернего ^{90}Y и наступления доста-

Таблица 1. Характеристика станций отбора проб в районе СКК

Станция	Район исследования	Координаты отбора проб, N – с.ш.; E – в.д.
1М	Магистральное русло (МР) СКК, (район г. Армянска)	46°07'28.370"N; 33°41'42.600"E
2М	МР СКК (район г. Красноперекоска)	45°57'26.084"N; 33°49'18.397"E
3М	МР СКК (район г. Джанкоя), с. Победное	45°45'50.010"N; 34°26'23.017"E
4М	МР СКК (пгт Советский)	45°17'22.800"N; 34°56'77.900"E
5	с. Крепкое (район г. Красноперекоска), рисовые чеки, пшеничное поле	45°55'50.234"N; 33°55'48.116"E 45°55'41.972"N; 33°54'22.108"E
6	СКК, район с. Семисотка	45°14'44.7972"N; 35°33'59.587"E
7	СКК, район с. Ишунь	45°55' N; 33°49' E
8	район с. Ильинка, оросительный канал, пшеничное поле	45°55'419"N; 33°54'223"E 45°48'34" N; 33°48'35" E
9М	МР СКК, НС-3 (насосная станция)	45°20'39.480"N; 36°00'36.420"E
10	Керченское водохранилище	45°20'365"N; 36°02'682"E
11	с. Зоркино	45°32'52" N; 34°42'30" E

точного приближения к радиохимическому равновесию между ^{90}Sr и ^{90}Y . Для времени выдержки 14 сут (336 ч) коэффициент разделения $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ равен 1.0421, для 25 сут (600 ч) – 1.0016 [29]. Измерение активности ^{90}Sr в пробах проводилось по черенковскому излучению его дочернего продукта ^{90}Y , растворенного в объеме 10–15 мл прозрачного раствора 2М HCl, с использованием низкофонового жидкостного сцинтилляционного счетчика (LSC) LKB “Quantulus 1220”, с последующей математической обработкой данных [8, 14, 29]. Для анализа спектра ^{90}Y использовалось стандартное программное обеспечение мультисканального анализатора LKB WALLAC (Spectrum Analysis Program), установленное фирмой-производителем. Время счета каждого образца рассчитывалось в зависимости от предполагаемой активности пробы. Нижний предел определяемой активности (LLD) составляет 0.01–0.04 Бк/кг или Бк/м³ в зависимости от характеристики пробы [29]. Эффективность регистрации черенковского излучения ^{90}Y составляет 42%, ее определяли по измерениям эталонной пробы с известной активностью ^{90}Sr , поставленной Лабораторией контроля и качества МАГАТЭ (Монако) в рамках проекта RER/2/003 [29, 32]. Относительная погрешность полученных результатов $\leq 20\%$.

После счета ^{90}Y проводили его осаждение из раствора в виде $\text{Y}(\text{OH})_3$ 25%-м аммиаком. Гравиметрическим методом и расчетом пропорции между внесенным в пробу и оставшимся в конце радиохимической обработки иттрием определяли его выход (R_y) [14, 29]. Определение стабильного стронция в природных объектах и выхода стронция в растворах после радиохимической обработки проб проводилось эмиссионным пламенно-фотометрическим методом определения массовой концентрации стронция с использованием атомно-абсорбционного спектрометра “Spectra AA-5”. Метод основан на измерении абсолютной интенсивности излучения наиболее чувствительной резонансной линии стронция 460.7 нм при возбуждении его в ацетиленовоздушном пламени. Влияние мешающих компонентов устраняли добавлением в пробу хлористых солей лантана или кальция. Предел обнаружения стронция с доверительной вероятностью $P = 0.95$ состав-

лял 0.5 мг/дм³. Диапазон измерений составлял 0.5–10 мг/дм³ (при массовой концентрации стронция >10 мг/дм³ пробу разбавляли дистиллированной водой). Стабильность работы аппаратуры контролировали путем регулярного повторения анализа серии стандартных растворов через каждые 10–15 проб, а также в начале и конце съемки. Ошибка измерения стабильного стронция на приборе $\leq 2.2\%$ (из расчета стандарта 10 мкг/мл) [14, 29].

Для определения концентрации растворенной формы ^{137}Cs в воде СКК использован сорбционный метод, основанный на пропускании проб воды через два последовательно соединенных адсорбера, импрегнированных ферроцианидом никеля–калия. Активность ^{137}Cs в образцах измеряли на NaI(Tl) гамма-спектрометре с блоком детектирования БДЕГ-100 по дочернему гамма-излучающему радионуклиду $^{137\text{m}}\text{Ba}$, учитывая внешний радиоактивный фон и эффективность регистрации излучения. Относительная погрешность полученных результатов $\leq 20\%$ [34]. Нижний предел определяемой активности (LLD) для растворенной формы ^{137}Cs составляет 0.017 Бк/м³, для взвешенной – 0.061 Бк/кг.

Содержание ^{137}Cs , а также природных гамма-излучающих радионуклидов ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U в предварительно высушенных и измельченных пробах ДО, почв и дополнительно озоленных при температуре 300–400°C пробах гидробионтов и с/х растений определяли с помощью полупроводникового гамма-детектора на основе кристалла сверхчистого германия (НТЦ “РАДЭК”, г. Санкт-Петербург, Россия). Калибровку детектора проводили с использованием стандартных образцов ДО IAEA-315, поставляемых МАГАТЭ [30, 31], размеры и форма которых аналогична исследуемым пробам. Содержание радионуклидов в пробах ДО и почв рассчитывали на сухой вес осадка, в гидробионтах и с/х растениях – на сырой вес. Нижний предел определяемой активности (LLD) полупроводникового гамма-детектора для ^{137}Cs в ДО и почвах составляет 0.1 Бк/кг сухой массы и 0.05 Бк/кг сырой массы для гидробионтов и с/х растений; LLD для ^{40}K – 15 Бк/кг сухой массы и 0.8 Бк/кг сырой массы; LLD для ^{232}Th – 1.5 Бк/кг сухой массы и 0.8 Бк/кг сырой массы; LLD для ^{238}U – 2 Бк/кг сухой массы и

0.1 Бк/кг сырой массы соответственно. Относительная погрешность полученных результатов $\leq 15\%$ [14].

Концентрирующая способность биотических компонентов определялась соотношением удельной активности радионуклида в гидробионтах (культурах) и таковой в воде (орошаемой почве); для абиотических компонентов – в ДО (почвах) к концентрации в воде.

Для определения удельной активности разных радионуклидов в природных объектах была суммарно измерена 121 проба: для ^{90}Sr – 44, для

^{137}Cs – 47, для природных радионуклидов ^{40}K – 10, для ^{232}Th – 10, ^{238}U – 10.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Вода, взвешенное вещество

Результаты определения содержания радионуклида ^{90}Sr в воде, а также ^{137}Cs в воде и на ВВ водной экосистемы СКК представлены в табл. 2.

Определено (табл. 2), что, независимо от сезона отбора проб, в 2022–2023 гг. концентрация искусственных радионуклидов в воде СКК была

Таблица 2. Удельная активность ^{90}Sr в воде, ^{137}Cs в воде и на взвешенном веществе (ВВ) СКК и близлежащих морских акваториях в период 2022–2023 гг. (МР – магистральное русло; прочерк – нет данных; н.п.д. – ниже предела детектирования)

Станция	Место отбора проб	Дата отбора	^{90}Sr , Бк/м ³	^{137}Cs , Бк/м ³	^{137}Cs на ВВ, Бк/кг
1	2	3	4	5	6
1М	СКК МР, район г. Армянска	15.03.2022	427.2 ± 16.4	1.2 ± 0.1	–
		27.04.2022	23.9 ± 2.1	1.3 ± 0.2	0.2 ± 0.02
		27.04.2022	28.3 ± 1.7	–	–
		12.08.2022	22.3 ± 1.7	н.п.д.	95.6 ± 2.1
		06.10.2022	–	–	370.2 ± 5.2
2М	СКК МР, район г. Красноперекопска	08.11.2022	22.3 ± 1.6	0.3 ± 0.1	379.2 ± 5.4
		01.03.2023	12.8 ± 1.2	0.7 ± 0.2	1.9 ± 0.2
		02.06.2023	14.3 ± 1.1	н.п.д.	521.9 ± 7.4
		23.06.2023	22.2 ± 1.7	н.п.д.	27.1 ± 1.6
3М	СКК МР, район г. Джанкоя, с. Победное	02.11.2023	45.3 ± 2.5	–	–
4М	СКК, МР, район пгт Советское	21.06.2022	29.3 ± 1.7	н.п.д.	38.0 ± 4.0
		08.06.2023	18.1 ± 1.5	н.п.д.	110.8 ± 1.6
5	Рисовые чеки (вода), пос. Крепкое	12.08.2022	40.8 ± 2.3	–	–
		02.06.2023	22.9 ± 1.5	–	–
6	СКК МР, район с. Семисотка	27.04.2022	25.4 ± 1.8	–	–
		21.06.2022	22.1 ± 1.5	–	–
7	СКК, Красноперекопский рисовый канал, с. Ишунь	06.10.2022	22.7 ± 1.5	–	–
8	СКК, отводной канал, район с. Ильинка	16.05.2023	15.6 ± 1.3	0.1 ± 0.01	–
		24.08.2023	24.8 ± 1.6	н.п.д.	19.4 ± 1.4
9М	СКК, НС–3 (насосная станция–3), район Зеленоярского водохранилища	19.10.2023	26.3 ± 1.8	–	–
10	Керченское водохранилище	20.10.2023	27.0 ± 1.7	–	–
Морская вода (Черное море) акваторий, прилегающих к исследуемым территориям					
Каркинитский залив, район с. Портового		06.10.2022	8.8 ± 1.3	8.3 ± 0.2	–
		16.05.2023	11.4 ± 1.7	7.2 ± 0.9	–
		24.08.2023	–	11.4 ± 2.3	–
Керченский пролив, район г. Керчи		20.10.2023	10.4 ± 1.4	–	–

на 1–2 порядка для ^{90}Sr и на 1–3 порядка для ^{137}Cs ниже уровней вмешательства для питьевой воды (4.9 Бк/кг для ^{90}Sr и 11 Бк/кг для ^{137}Cs) [11].

Гидробионты

Удельная активность ^{90}Sr и ^{137}Cs в гидробионтах (водной растительности, моллюсках, рыбах) водной экосистемы СКК представлена в табл. 3.

Донные отложения, поливные почвы

В марте 2022 г. исследовали “притопленную” водой наносную почву в экосистеме канала как базу формирования будущих ДО СКК. Отбор сформировавшихся ДО СКК проводился в 2023 г. Концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в ДО СКК и орошаемых почвах, расположенных вдоль канала, представлены в табл. 4.

В почвах вдоль СКК определяли также природные радионуклиды. ^{40}K , изотоп калия, – один из восьми наиболее распространенных в земной коре химических элементов, его среднее содержание (кларк) в биосфере равен 3 г/кг, что соответствует удельной активности 90 Бк/кг [7, 13, 25]. Удельная активность ^{40}K в почвах находится в диапазоне от 153 до 1224 Бк/кг [10]. По исследованиям авторов настоящей статьи, удельная активность ^{40}K в с/х почвах изменялась в пределах 330–850 Бк/кг, что связано с внесением калийных удобрений, в первую очередь таких, как хлористый калий, где содержание калия может

достигать 498 г/кг [5, 23], что соответствует активности $^{40}\text{K} \sim 15$ кБк/кг.

Для целинной почвы и почвы у канала, где внесение удобрений не проводится, содержание ^{40}K было ниже – 350 и 430 Бк/кг, что соответствует уровню содержания этого радионуклида в наземной растительности.

Уран и торий практически полностью образованы изотопами ^{238}U и ^{232}Th , их средняя удельная активность в литосфере равна 30.8 Бк/кг и 52.9 Бк/кг соответственно [2]. Авторами настоящей статьи определено, что концентрация ^{238}U в отобранных почвах вдоль СКК, независимо от их характеристики, изменялась от величины ниже предела детектирования (н.п.д.) до 21.5, для ^{232}Th – от 26.6 до 62.2 Бк/кг сухой массы, была сопоставима со средними содержаниями этих радионуклидов в литосфере.

Выращиваемые культуры

В 2023 г. определены концентрации ^{137}Cs в целом растении пшеницы яровой (9.2 ± 1.7 Бк/кг сырой массы (район с. Ильинка) и 0.1 ± 0.04 Бк/кг сырой массы (район пгт Советский)), а также в молодых растениях риса (1.0 ± 0.1 Бк/кг сырой массы (с. Крепкое)), отобранных с полей, различно удаленных от начала СКК (рис. 1). Измерялась также концентрация ^{137}Cs в корнях пшеницы яровой (пгт Советский). В них концентрация ^{137}Cs составила 6.6 ± 1.8 Бк/кг на су-

Таблица 3. Удельная активность ^{90}Sr и ^{137}Cs в гидробионтах СКК (2022–2023 гг.)

Станция	Название объекта	Дата отбора	^{90}Sr , Бк/кг, сырой массы	^{90}Sr , K_H	^{137}Cs , Бк/кг, сырой массы
1	2	3	4	5	6
Водные растения					
4М	Рдест пронзеннолистный (<i>Potamogeton perfoliatus</i> L.)	21.06.2022	0.5 ± 0.04	1.7×10^1	8.9 ± 1.2
9М		19.10.2023	48.8 ± 1.2	3.4×10^3	4.0 ± 0.2
4М	Рдест гребенчатый (<i>Stuckenia pectinata</i> (L.) B�erner)	21.06.2022	0.3 ± 0.03	1.0×10^1	1.0 ± 0.1
Моллюски					
2М	Дрейссена (целиком, 0.5–0.7 см) (<i>Dreissena polymorpha</i> , Pallas, 1771)	08.11.2022	35.3 ± 1.6	1.6×10^3	-
4М	Беззубка (<i>Anodonta</i> sp.), створки 6–8 см створки 3–4 см	21.06.2022	395.0 ± 15.1	1.3×10^4	-
		08.06.2023	3.7 ± 0.4	2.0×10^2	-
Рыбы					
2М	Карась серебряный (<i>Carassius gibelio</i>)	02.06.2023	0.2 ± 0.02	1.3×10^1	4.5 ± 0.4

Таблица 4. Удельная активность ^{90}Sr и ^{137}Cs в ДО СКК и орошаемых почвах в 2022–2023 гг. (н.п.д. – ниже предела детектирования)

Станция	Характеристика отобранных проб	Дата отбора	^{90}Sr , Бк/кг, сухой массы	^{90}Sr , K_p	^{137}Cs , Бк/кг, сухой массы
1	2	3	4	5	6
ДО					
1М	Почва, притопленная водой, 0–5 см 5–10 см 10–15 см	27.04.2022	н.п.д. н.п.д. н.п.д.	– – –	– – –
2М	ДО (ил), 0–5 см	08.11.2022	13.2 ± 0.9	5.9×10^2	575.3 ± 6.2
4М	То же	08.06.2023	5.9 ± 1.4	3.3×10^2	12.0 ± 0.1
8	>>	24.08.2023	2.7 ± 0.4	1.1×10^2	130.0 ± 9.0
9М	>>	19.10.2023	12.5 ± 0.8	4.8×10^2	1.2 ± 0.2
3М	>>	02.11.2023	8.0 ± 0.7	1.8×10^2	11.2 ± 1
Почвы					
5	Почва поливная с ростками пшеницы, 0–5 см	01.03.2023	1.2 ± 0.4	9.2×10^1	6.3 ± 0.8
5	Почва, рисовые чеки, 0–5 см	01.03.2023	н.п.д.	–	5.3 ± 0.5
	Почва целинная, 0–5 см	01.03.2023	1.6 ± 0.4	1.3×10^1	н.п.д.
5	Почва целинная, 5–10 см	01.03.2023	1.4 ± 0.4	1.1×10^1	н.п.д.
8	Почва вспаханного поля, 0–5 см	16.05.2023	–	–	15.8 ± 1.4
	Почва под пшеницей, 0–5 см	16.05.2023	–	–	8.2 ± 0.7
11	То же	26.07.2023	–	–	1.8 ± 0.2

хую массу, тогда как в сухой массе стеблей растений концентрация ^{137}Cs была в 10.5 раз ниже. Определено, что удельная активность ^{137}Cs (на сухую массу) в поливных культурах, отобранных с орошаемых полей района с. Зоркино (рис. 1; табл. 1), уменьшалась в ряду: бобы гороха (18.0 ± 1.8 Бк/кг) > зерно ячменя (4.7 ± 0.6 Бк/кг) > зерно пшеницы (3.3 ± 0.4 Бк/кг).

Концентрация ^{90}Sr как в зернах пшеницы, так и в бобах гороха была незначительной и составляла 1.5 ± 0.3 Бк/кг сухой массы и 1.2 ± 0.2 Бк/кг сухой массы.

Известно [5], что содержание калия в наземной растительности в среднем составляет от 7 до 14 г/кг, что соответствует активности ^{40}K , равной 214–428 Бк/кг. Концентрация ^{40}K в бобах гороха и зерне пшеницы и ячменя (с. Зоркино) находилась в диапазоне 1290–1800 Бк/кг сухой массы, в молодых растениях риса – 57 ± 3.1 Бк/кг сырой массы. Детектируемая активность ^{238}U и ^{232}Th была определена только в зерне ячменя, содержание составило 29 и 15 Бк/кг сухой массы соответственно. В молодых растениях риса

концентрация ^{238}U составила 2.3 ± 0.3 , ^{232}Th – 4.7 ± 0.4 Бк/кг сырой массы. Полученные уровни концентраций ^{238}U и ^{232}Th не превышали значений, которые характерны для естественной природной среды и были ниже по сравнению с их содержанием в изучаемых почвах.

ОБСУЖДЕНИЕ

Вода, взвешенное вещество

В марте 2022 г. отмечалось залповое повышение концентрации ^{90}Sr (до 427.2 ± 16.4 Бк/м³) в поступившей в СКК днепровской воде (рис. 2).

Это значение удельной активности ^{90}Sr было в >100 раз выше доаварийных величин в воде р. Днепр и соответствовало концентрациям, отмечаемым в воде Каховского водохранилища и СКК в 1986–1987 гг. [14], что, вероятно, было связано с ремобилизацией ^{90}Sr из ДО и почв во время заградительной дамбы на русле СКК. Значительные концентрации ^{90}Sr наблюдались в воде на рисовых чеках (с. Крепкое): в 2022 г. – 40.8 ± 2.3 Бк/м³ (в 1.8 раза превышало концентрацию радионуклида в магистральном русле), в 2023 г. – 22.9 ± 1.5 Бк м³

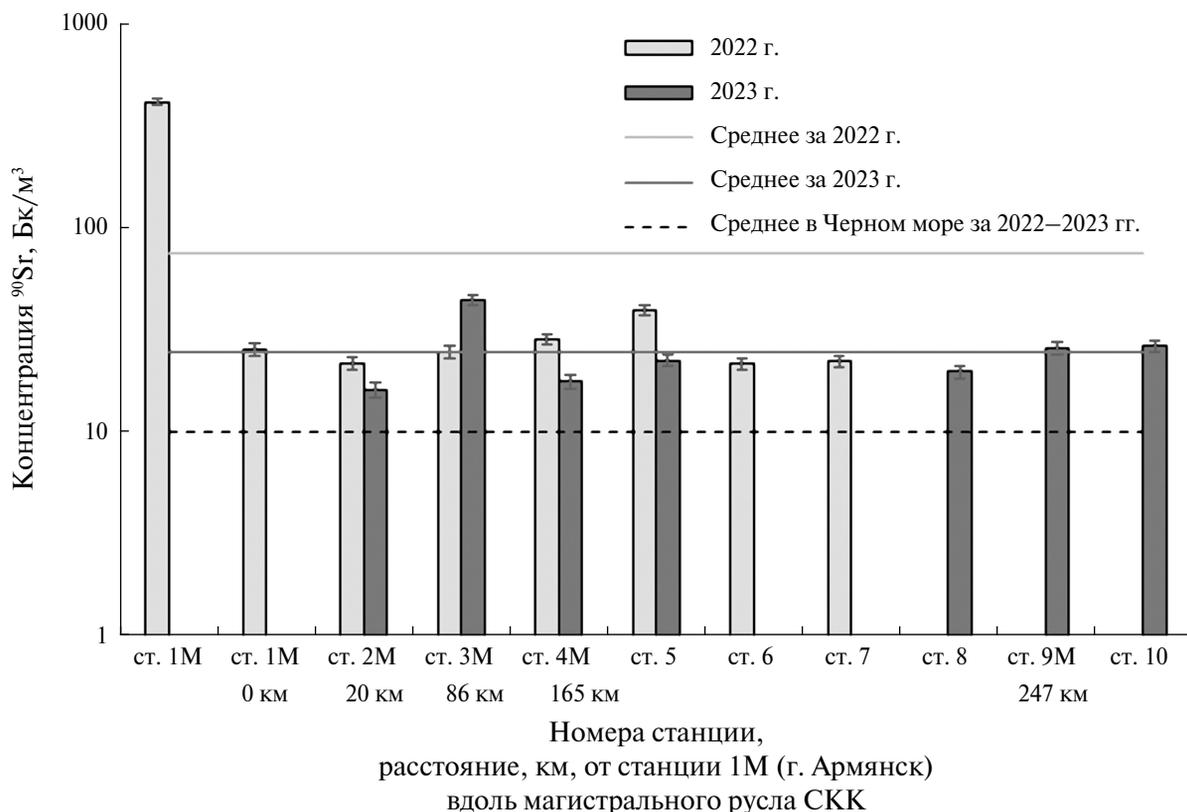


Рис. 2. Концентрация ^{90}Sr в воде на разных станциях русла СКК.

(соответствовало концентрации ^{90}Sr в канале). Это свидетельствует о накоплении ^{90}Sr орошаемой системой рисовых чеков при многократном заливе этих сельскохозяйственных угодий днепровской водой. С апреля 2022 г. и в 2023 г. отмечалась равномерная концентрация ^{90}Sr в днепровской воде (в среднем 77.0 Бк/м³ в 2022 г., 25.2 Бк/м³ в 2023 г.), (рис. 2); т. е. ситуация в отношении загрязнения днепровской воды ^{90}Sr улучшилась в сторону снижения, что свидетельствует о благоприятном прогнозе использования днепровской воды для различных хозяйственных нужд региона Крыма.

По прогнозным оценкам методом, рассмотренным в работах [14, 36], при наличии днепровской воды в русле СКК снижение концентрации ^{90}Sr в днепровской воде СКК до доаварийного уровня произойдет к 2053 г. (рис. 3), т. е. через 30 лет от современного периода.

При этом период уменьшения вдвое концентрации ^{90}Sr (T_{05}) в днепровской воде СКК происходит в течение 9.3 года (при $R^2 = 0.65$); т. е. биогеохимические процессы, происходящие в СКК,

уменьшают время нахождения поставарийного радионуклида ^{90}Sr в воде этой экосистемы в 3.2 раза по сравнению с периодом физического полураспада радионуклида.

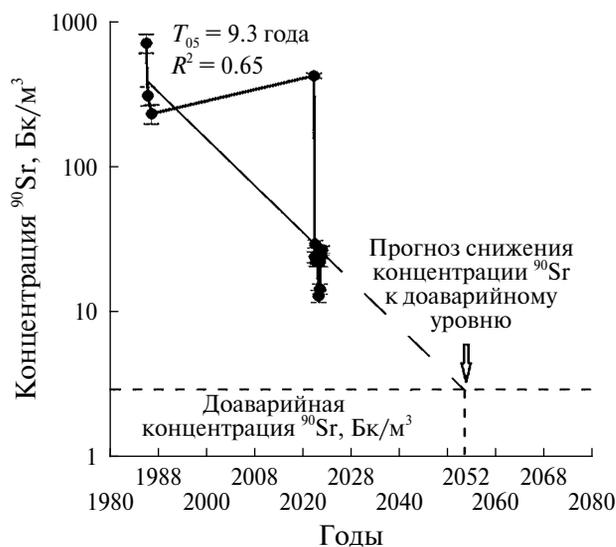


Рис. 3. Прогнозная оценка уменьшения концентрации ^{90}Sr в воде СКК на основе натуральных наблюдений в период 1986–2023 гг.

В 2022–2023 гг. удельная активность растворенной формы ^{137}Cs , поступившего с днепровской водой на территорию Крыма по руслу СКК после восстановления подачи воды в канале, — незначительная (табл. 2) [18], была в 3–13 раз ниже уровней, определяемых в воде СКК в 1992–1995 гг. [14] с учетом коррекции на радиоактивный распад ^{137}Cs . В период 2022–2023 гг. концентрация ^{137}Cs в воде СКК на взвешенном веществе (ВВ) изменялась от 0.2 до 521.9 Бк/кг сухой массы (табл. 2) [18]. Значительные уровни концентрации ^{137}Cs на ВВ в 2022 г. были обусловлены поступлением ^{137}Cs в СКК с литогенным веществом в результате разрушения в 2014 г. дамбы, перекрывающей поступление воды в русло СКК. Отмечено уменьшение концентрации ^{137}Cs на ВВ в воде СКК вдоль русла канала (в 5 раз на расстоянии 150 км от Красноперекоска до пгт Советский). В 2023 г. после разрушения дамбы Каховского водохранилища наблюдалось снижение на порядок уровня концентрации ^{137}Cs на ВВ. Данная тенденция обусловлена извлечением ^{137}Cs компонентами экосистемы СКК по мере удаления от начала крымского участка канала [14].

Таким образом, концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs , определяемые в период 2022–2023 гг. в начале и конце магистрального русла канала, отводных каналах СКК, рисовых чеках, водохранилищах, были значительно (на два-три порядка величин) ниже принятых в РФ норм радиационной безопасности для питьевой воды (4.9 Бк/кг для ^{90}Sr и 11 Бк/кг для ^{137}Cs); т. е. восстановление работы СКК для подачи днепровской воды после подрыва дамбы Каховской ГЭС необходимо и безопасно для развития с/х в Крыму.

В исследуемый период не выявлено влияние поступления днепровской воды по СКК на уровни концентраций ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде прилегающих акваторий Черного моря (табл. 2).

Гидробионты

Отмечено (табл. 3), что накопление ^{90}Sr в водной растительности СКК зависело от режима работы канала (проточная или стоячая вода), вида растений (активность ^{90}Sr и ^{137}Cs в рдесте пронзеннолистном была выше, чем в рдесте гребенчатом). Для *Potamogeton perfoliatus*, который

является индикатором накопления ^{90}Sr в пресных водоемах [14, 37], отмечен эффект накопления ^{90}Sr с 2022 г. (0.5 ± 0.04 Бк/кг сырой массы) по 2023 г. (48.8 ± 1.2 Бк/кг сырой массы). Концентрация ^{137}Cs в рдесте пронзеннолистном в 2022 г. была выше по сравнению с 2023 г., что, вероятно, связано с нахождением ^{137}Cs в воде в 2022 г. в растворенной форме. Отмечаемая в 2023 г. в рдесте пронзеннолистном удельная активность ^{90}Sr была на порядок выше таковой в 1993 г. [14, 37], это свидетельствует о значительном вторичном поступлении ^{90}Sr на территорию Крыма с днепровской водой по руслу СКК после его открытия в 2022 г.

Наибольшие концентрации ^{90}Sr определены в раковинах (6–8 см) моллюсков Беззубка обыкновенная европейская (*Anodonta sp.*), которые вместе с водной растительностью были привнесены в русло канала в 2022 г. (табл. 3). Полученные значения соответствовали уровням концентрации ^{90}Sr в раковинах моллюсков *Anodonta sp.* из Каховского водохранилища, определенным в 1988 г. [14]. Учитывая значительный размер раковин моллюсков, отобранных в СКК в 2022 г., считаем, что *Anodonta sp.* росли при начальной концентрации ^{90}Sr в воде, которая соответствовала таковой для Каховского водохранилища 1987 г.: от 740 до 925 Бк/м³. Вероятно, такого порядка концентрации ^{90}Sr была днепровская вода, которая по руслу СКК поступила в Крым 3 марта 2022 г. У моллюска-годовика *Dreissena polymorpha*, которая выросла и была собрана на стенках магистрального канала в 2022 г. концентрация ^{90}Sr также была значительной и соответствовала таковой для Каховского водохранилища 1994–1997 гг. [14]. Это также может быть связано со значительными концентрациями ^{90}Sr в днепровской воде СКК, поступившей в период 2022–2023 гг. с днепровской водой в русло канала.

Для рыб *Carassius gibelio* концентрации ^{90}Sr были незначительными, при этом концентрации ^{137}Cs были на два порядка выше (табл. 3).

Диапазон коэффициентов накопления (K_n) ^{90}Sr для гидробионтов СКК изменялся в следующих пределах: $n \times 10^1 - n \times 10^3$ — для водных растений; $n \times 10^2 - n \times 10^4$ — для моллюсков; $n \times 10^1$ — для рыб.

Известно, что K_H для гидробионтов Киевского и Каховского водохранилищ в период 1986–2012 гг. изменялись в следующих диапазонах: водные растения – 12.0–1025.0 ($n \times 10^1 - n \times 10^3$), моллюски – 48.8–3000 ($n \times 10^1 - n \times 10^3$), рыбы – 25.0–73.3 ($n \times 10^1$) [14, 37].

Сравнение полученных результатов и литературных данных по K_H ^{90}Sr в гидробионтах различных таксономических групп в целом совпадали в пределах вариабельности с K_H для гидробионтов днепровских водоемов. Различия в верхней границе K_H для моллюсков из СКК и днепровских водохранилищ может объясняться видовым различием исследуемых объектов.

Донные отложения и поливные почвы СКК

Определено (табл. 4, рис. 4), что удельная активность ^{90}Sr в ДО СКК, поливных почвах вдоль канала изменяется в диапазоне от величин ниже предела детектирования (н.п.д.) до 13.2 ± 0.9 Бк/кг сухой массы (с наибольшим значением концентрации ^{90}Sr в ДО СКК в районе г. Красноперекоска).

С учетом того, что концентрации ^{90}Sr в ДО СКК стали иметь фиксируемые значения через

6–7 мес. после поступления воды в канал, то скорость перехода этого радионуклида из воды в ДО СКК составляет 2.2 Бк/кг сухой массы в месяц.

В период работы СКК (до июня 2023 г.) наблюдалась тенденция уменьшения концентрации ^{90}Sr в ДО СКК в зависимости от расстояния ($R^2 = 0.902$) по мере удаления от начала канала (табл. 4, рис. 4). Концентрация ^{90}Sr , определенная в октябре 2023 г. в районе Зеленоярского водохранилища (Ст. 9М), была сопоставима с таковой для начала СКК (рис. 4), что, вероятно, связано с “застойным” эффектом в конечной станции СКК после разрушения Каховской дамбы.

Коэффициенты распределения K_p ^{90}Sr в ДО СКК составили $n \times 10^2$, а в почвах – были на порядок ниже (рис. 4). Эти значения соответствовали результатам, полученным ранее ($K_p - 51-608$) [14, 39].

В 2023 г. в почвах рисовых чеков концентрации ^{90}Sr на начало подачи воды в СКК были ниже предела детектирования, что связано со смывом верхнего слоя почвы в море (Каркинитский залив) при сбросе воды с рисовых чеков во время сбора его урожая. Это требует дополнительных

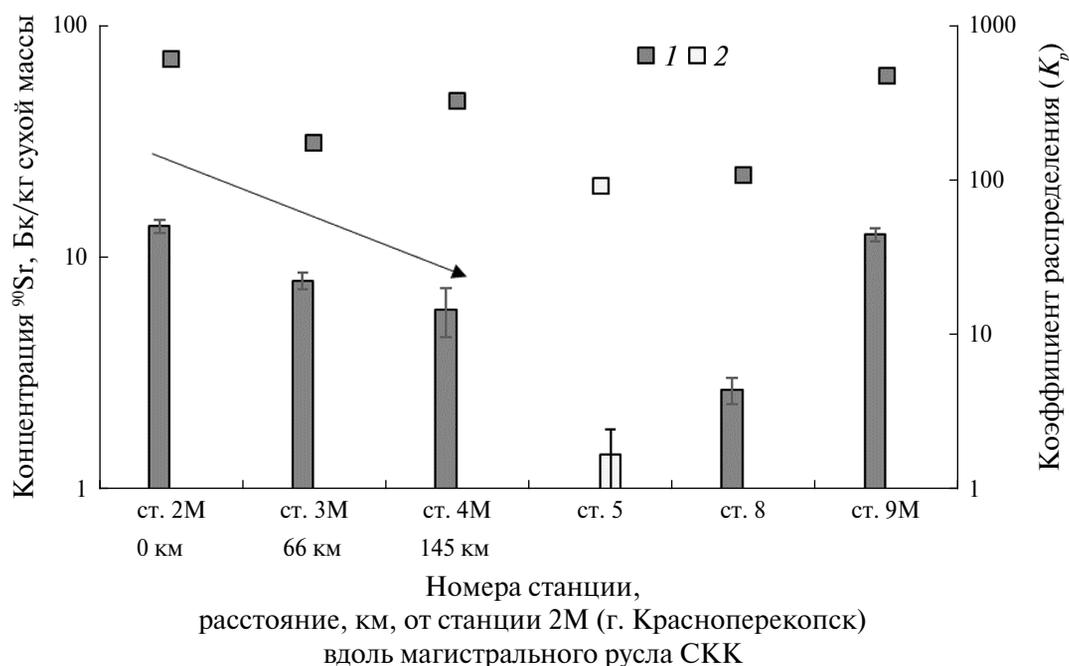


Рис. 4. Концентрация ^{90}Sr в ДО СКК (серые столбцы) и почвах (белый столбец); коэффициенты распределения ^{90}Sr в ДО (1), в почвах (2).

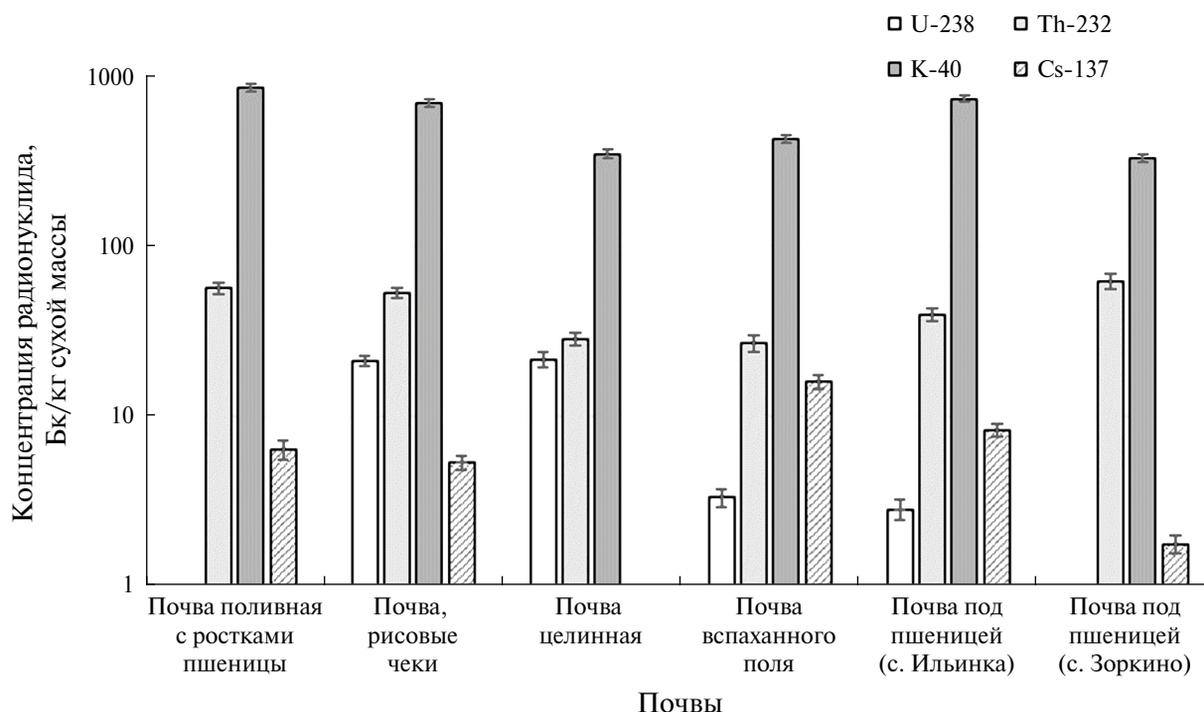


Рис. 5. Концентрация ^{137}Cs и природных радионуклидов в почвах.

исследований ДО Каркинитского залива в районе сброса вод с рисовых чеков.

Концентрация ^{137}Cs в ДО СКК была в диапазоне от 1.2 до 575.3 Бк/кг сухой массы (табл. 4).

Максимальный уровень концентрации ^{137}Cs в ДО наблюдался в ноябре 2022 г. в начале магистрального русла СКК (г. Красноперекосп) и был почти в 33 раза выше по сравнению со средним уровнем 1995 г. [14].

В ноябре 2022 г. наблюдались соизмеримые значения на ВВ в канале в том же районе отбора проб (табл. 2), что свидетельствует о том, что взвешенная фракция, поступающая с днепровской водой из Херсонской области в крымский участок СКК, является источником ^{137}Cs в ДО [18].

В августе 2023 г. максимальная концентрация ^{137}Cs (130.0 ± 9.0 Бк/кг сухой массы) измерена в ДО в отводном канале СКК в районе с. Ильинка (табл. 4). Это значение было в 4 раза ниже максимальных значений ^{137}Cs в ДО магистрального русла СКК в 2022 г. (табл. 4), что, видимо, свя-

зано с прекращением подачи днепровской воды в июне 2023 г. в русло канала после разрушения дамбы Каховского водохранилища.

Распределение удельной активности ^{137}Cs , ^{40}K , ^{238}U и ^{232}Th в почвах, отобранных вдоль русла СКК (табл. 4), показано на рис. 5.

Максимальная концентрация ^{137}Cs в почвах у русла СКК составила 15.8 Бк/кг, на поливных с/х землях уровни концентрации ^{137}Cs были в 2–3 раза ниже, чем в ДО (табл. 4, рис. 5). Концентрация ^{137}Cs с рисовых чеков и в почвах под с/х культурами остается на уровне значений 1992–1995 гг. [14]. Более низкие концентрации ^{137}Cs на орошаемых водой СКК почвах, по сравнению с целинными землями, объясняются различными факторами, такими как аккумуляция радионуклида почвой и выращиваемыми на ней культурами, а также агромелиоративными мероприятиями [14].

Наибольшие уровни концентрации природных радионуклидов в почвах были приурочены к радионуклиду ^{40}K (рис. 5), вместе с тем их содержание соответствовало фоновым значениям [2, 10].

Содержания природных ^{238}U и ^{232}Th в почвах (рис. 5) были сопоставимы со средним содержанием этих радионуклидов в литосфере [2]. Значения для ^{238}U были на 2–4 порядка, а для ^{232}Th – в 16–37 раз меньше санитарных норм, установленных НРБ-99/2009 [11].

Сельскохозяйственные культуры

Результаты исследования показали (рис. 6), что в бобах и зерне изучаемых с/х культур концентрации ^{137}Cs были в 3–19 раз и ^{90}Sr в 11 раз ниже значений ПДК, предъявляемых для пищевого зерна, а также в 10–57 и 80 раз соответственно ниже ПДК для фуражного зерна [22].

Определено (рис. 6), что в урожае 2023 г. концентрация ^{137}Cs в бобах гороха была в 5.5 раз выше концентрации этого радионуклида в зерне пшеницы. Это подтверждает тот факт, что бобовые культуры накапливают, как минимум, в 2 раза больше радионуклидов, чем зерновые.

Удельная активность ^{40}K в бобах гороха, зерне ячменя и пшеницы яровой были практически одинаковыми, независимо от района отбора проб. В зерне риса концентрация ^{40}K была в 2 раза ниже, что, вероятно, связано с особенностями агротехнологии и физиологии культуры

риса. Концентрация ^{40}K в зернах всех изучаемых культур, а также содержание ^{238}U и ^{232}Th в культурах риса и ячменя (рис. 6) находились в диапазоне величин, определяемых для наземных растений в биосфере [5].

Концентрирующая способность бобов гороха, зерен ячменя и пшеницы в отношении природных ^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th и искусственного радионуклида ^{137}Cs из орошаемых почв представлена в табл. 5.

Наибольший K_p ($n \times 10^1$) отмечен для ^{137}Cs в бобах гороха. Исследования показали (табл. 5), что накопление радионуклидов в урожае с/х культур зависело от вида культур и характеристики изучаемых радионуклидов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В 2022 г. уровни концентрации ^{90}Sr в днепровской воде магистрального русла СКК соответствовали таковым в 1986–1987 гг., в 2023 г. превышали доаварийные уровни в 5–10 раз. ^{137}Cs в воде СКК в основном находился на взвешенном веществе (521.9 Бк/кг сухой массы). Результаты настоящих исследований показали, что спустя 37 лет после аварии на ЧАЭС днепровские воды, протекающие по СКК, все еще являются радио-

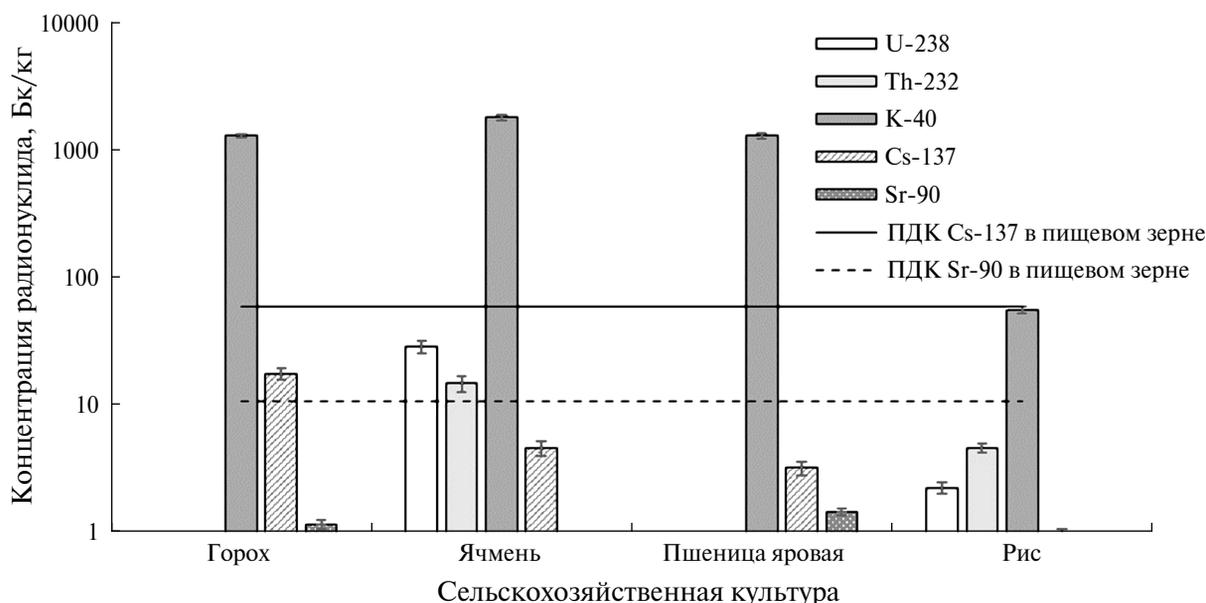


Рис. 6. Содержание ^{90}Sr , ^{137}Cs и природных радионуклидов в урожае сельскохозяйственных культур, орошаемых водой СКК.

Таблица 5. Коэффициент распределения K_p радионуклидов между культурами и почвой

Культура	^{238}U	^{232}Th	^{40}K	^{137}Cs
Горох	—	—	$n \times 10^0$	$n \times 10^1$
Ячмень	—	$n \times 10^{-1}$	$n \times 10^0$	$n \times 10^0$
Пшеница	—	—	$n \times 10^0$	$n \times 10^0$

экологическим фактором, обеспечивающим вторичное поступление поставарийных (^{90}Sr , ^{137}Cs) радионуклидов из зоны ЧАЭС по р. Днепр через СКК на территорию Крыма. По прогнозным оценкам получено, что при возобновлении подачи днепровской воды в СКК снижение концентрации ^{90}Sr в воде канала до доаварийного уровня произойдет к 2053 г.

В гидробионтах наибольшие концентрации отмечены для искусственного радионуклида ^{90}Sr (в 2022 г. — в моллюске *Anodonta sp.*, в 2023 г. — в рдесте пронзеннолистном). Эти концентрации на порядок превышали таковые для этих гидробионтов, отмечаемые в СКК и Каховском водохранилище в 1992–1994 гг., что свидетельствует о значительном вторичном поступлении ^{90}Sr на территорию Крыма с днепровской водой по руслу СКК после его открытия в 2022 г. Диапазон коэффициентов накопления (K_H) ^{90}Sr для гидробионтов СКК изменялся в следующих пределах: $n \times 10^1$ – $n \times 10^3$ — для водных растений; $n \times 10^2$ — $n \times 10^4$ — для моллюсков; $n \times 10^1$ — для рыб.

В период 2022–2023 гг. концентрация ^{137}Cs в ДО СКК как в магистральном русле, так и в отводных каналах была в 6–33 раз выше по сравнению со средним уровнем 1995 г., что свидетельствует о непосредственном вкладе взвешенного вещества днепровской воды в поступление ^{137}Cs в донные отложения канала. Концентрация ^{137}Cs с рисовых чеков и в почвах под с/х культурами остается на уровне 1992–1995 гг. Удельная активность ^{90}Sr в ДО СКК и поливных почвах вдоль канала была незначительной, на порядок ниже, чем в 1992–1994 гг. Определена скорость перехода ^{90}Sr из воды в ДО СКК, которая составляет 2.2 Бк/кг сухой массы в месяц. Время перехода растворенных загрязнителей различной природы из воды в ДО СКК составляет ≤ 6 мес. с момента подачи днепровской воды по руслу канала.

Уровни удельной активности природных радионуклидов (^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th) в почвах и культурах сельхозугодий Крыма, орошаемых водой из СКК, соответствовали уровням для естественной природной среды.

Определено, что в урожае всех изучаемых с/х культур концентрации ^{137}Cs были в 3–19 раз и ^{90}Sr — в 11 раз меньше ПДК, предъявляемых для пищевого зерна, а также в 10–57 раз и 80 раз соответственно ниже ПДК для фуражного зерна.

Прогнозные оценки, основанные на анализе результатов, полученных в 2022–2023 гг., в отношении загрязнения и распределения искусственных (^{90}Sr и ^{137}Cs) и природных (^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th) радионуклидов в водной экосистеме СКК, наземных экосистемах орошаемых полей, свидетельствуют, что, как минимум, в течение 10 лет после поступления днепровской воды с такими же уровнями содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs возможно проводить успешное развитие поливного сельского хозяйства в Крыму; т. е. восстановление работы СКК для подачи днепровской воды в Крым (после подрыва плотины на Каховской ГЭС) необходимо и безопасно для развития с/х в Крыму.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеева Т.Н., Шаншеева Т.П., Шур А.В. Оценка радиологической ситуации на пойменных лугах рек Днепр и Сож на территории Могилевской области // Вестн. Белорусской гос. сельскохозяйственной акад. 2016. С. 96–99.
2. Виноградов А.П. Средние содержания химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры // Геохимия. 1962. Вып. 7. С. 555–571.
3. Гулин С.Б., Мирзоева Н.Ю., Лазоренко Г.Е., Егоров В.Н., Трапезников А.В., Сидоров И.Г., Проскурнин В.Ю., Поповичев В.Н., Бей О.Н., Родина Е.А. Современная радиологическая ситуация, связанная с режимом функционирования Северо-Крымского канала // Радиационная биология. Радиэкология. 2016. Т. 56. № 6. С. 647–654.
4. Денисова А.И., Тимченко В.М., Нахшина Е.П., Новиков Б.И., Рябов А.К., Басс Я.И. Гидрология и гидрохимия Днепра и его водохранилищ. К.: Наукова думка, 1989. 216 с.

5. *Добровольский В.В.* Основы биогеохимии: Учебник для студентов высших учебных заведений. М.: Академия, 2003. 400 с.
6. *Егоров В.Н., Поликарпов Г.Г., Лазоренко Г.Е., Мирзоева Н.Ю., Коротков А.А.* Радиоэкологические исследования Крымского региона после аварии на Чернобыльской АЭС // Актуальные вопросы развития инновационной деятельности в государствах с переходной экономикой. Симферополь: СОНАТ, 2001. С. 59–63.
7. *Иванов В.В.* Экологическая геохимия элементов: Справочник. Кн. 1. М.: Недра, 1994. 304 с.
8. *Иванова Л.М.* Метод одновременного определения стронция-90, цезия-137 и церия-144 в морской воде // Радиохимия. 1967. Т. 9. № 5. С. 622–633.
9. *Кулебакина Л.Г.* Миграция радионуклидов из чернобыльской зоны в мелиоративные системы юга Украины // Материалы нац. конф. “Радиоэкологические и экономико-правовые аспекты землепользования после аварии на Чернобыльской АЭС”. К.: СОПС АНУ, 1991. С. 179–183.
10. *Минеев В.Г.* Агрохимия. Учебник. М.: МГУ, Колос, 2004. 720 с.
11. Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009. Санитарные правила и нормативы СанПин 2.6.1.2523-09. Утв. Постановлением Главного гос. сан. врача РФ от 7 июля 2009 года № 47.
12. Об Общегосударственной программе снятия с эксплуатации Чернобыльской АЭС и превращения объекта “Укрытие” на экологически безопасную систему ВР Украины Программа. Закон от 15.01.2009 № 886-VI. Действует с 01.01.2019. <http://zakon.rada.gov.ua/go/886-17> (дата обращения: 24.11.2023)
13. *Перельман А.И.* Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972. 424 с.
14. *Поликарпов Г.Г., Егоров В.Н., Гулин С.Б., Стокозов Н.А., Лазоренко Г.Е., Мирзоева Н.Ю., Терещенко Н.Н., Цыцугина В.Г., Кулебакина Л.Г., Поповичев В.Н., Коротков А.А., Евтушенко Д.Б., Жерко Н.В., Малахова Л.В.* Радиоэкологический отклик Черного моря на чернобыльскую аварию // Под ред. *Г.Г. Поликарпова, В.Н. Егорова*. Севастополь: ЭКОСИ–Гидрофизика, 2008. 667 с.
15. *Поликарпов Г.Г., Лазоренко Г.Е., Коротков А.А., Мирзоева Н.Ю.* Роль взвешенного вещества и донных отложений водной экосистемы Северо-Крымского канала в миграции ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{238}Pu и $^{239+240}\text{Pu}$ // Докл. НАН Украины. 1995. № 7. С. 135–139.
16. *Поповичев В.Н.* Содержание ^{137}Cs и ^{40}K в объектах внешней среды северо-западной части Крыма // Тез. докл. II-го Радиобиологического съезда. К.: Пушино, 1993. Ч. 3. С. 827–828.
17. *Романенко В.Д., Кузьменко М.И., Дробот П.И., Кленус В.Г., Насвит О.И.* Радиоактивное загрязнение днепровских водохранилищ в результате аварии на ЧАЭС (1986–1987 гг.) // Радиационные аспекты Чернобыльской аварии. 1989. С. 9–16.
18. *Сидоров И.Г., Мирошниченко О.Н., Мирзоева Н.Ю., Мосейченко И.Н., Вахрушев М.О.* ^{137}Cs в водной экосистеме Северо-Крымского канала по результатам экспедиционных исследований 2022–2023 гг. // Актуальные вопросы водных и прибрежных экосистем. Сб. материалов всерос. конф., посвященной 90-летию со дня рождения О.Г. Миронова. Севастополь: ФИЦ ИнБЮМ, 2023. С. 33–34.
19. *Соколов А.А.* Гидрография СССР (Воды суши). Л.: Гидрометеиздат, 1964. 535 с.
20. *Сологуб Э.В., Бусько Е.Г.* Оценка радиоактивного воздействия на отдельные компоненты биоты по уровню загрязнения радионуклидами озер различного типа Гомельской области // Сучасні виклики і актуальні проблеми науки, освіти та виробництва. 2020. С. 44.
21. Теракт на Каховской ГЭС: какие угрозы он создал Крыму. <http://rg.ru/2023/06/08/tech...!?ysclid=lpqm3gwhes694395428> (дата обращения: 27.11.2023)
22. ТР ТС 015/2011. Технический регламент Таможенного союза о безопасности зерна (с изменениями 2023 г.) <https://mskstandart.ru/upload/file/015-2011-o-bezopasnosti-zerna.pdf?ysclid=ltiqis9a71340288946> (дата обращения: 08.03.2024)
23. *Ягодин Б.А., Жуков Ю.П., Кобзаренко В.И.* Агрохимия. М.: Колос, 2002. 584 с.
24. *Alokhina T., Gudzenko V.* Distribution of radionuclides in modern sediments of the rivers flowing into the Dnieper-Bug Estuary. 2021.
25. *Audi G., Kondev F.G., Wang M., Huang W.J., Naimi S.* The NUBASE2016 evaluation of nuclear properties // Chinese Phys. C. 2017. V. 41. № 3. P. 030001.
26. *Beresford N., Fesenko S., Konoplev A., Skuterud L., Smith J.T., Voigt G.* Thirty years after the Chernobyl accident: what lessons have we learnt? // J. Environ. Radioact. 2016. V. 157. P. 77–89.
27. *Boilley D., Pigrée A., Barbey P.* Chernobyl heritage and the E-40 trans-Europe waterway // Association pour le Contrôle de la Radioactivité dans l’Ouest. 2020.
28. *Gulin S.B., Mirzoyeva N.Y., Egorov V.N., Polikarpov G.G., Sidorov I.G., Proskurnin V.Y.* Secondary ra-

- dioactive contamination of the Black Sea after Chernobyl accident: recent levels, pathways and trends // *J. Environ. Radioact.* 2013. V. 124. P. 50–56.
29. *Harvey B.K., Ibbett R.D., Lovett M.B., Williams K.J.* Analytical procedures for the determination of strontium radionuclides in environmental materials. № МАFF-АЕРАМ-5. Ministry of Agriculture. 1989.
30. IAEA. Catalogue for reference materials and inter-comparison exercises 1998/1999. Analytical Quality Control Services. Vienna: IAEA, 1998. 64 p.
31. IAEA/MEL/61 Report on the Intercomparison RUN IAEA-315 Radionuclides in marine sediment 1992–1996 / *Eds S. Ballestra, H. Pettersson, J. Gastaud, P. Parsi, D. Vas.* Vienna: IAEA, 1998. 93 p.
32. Instrument description “Quantulus 1220”. LKB Wallac, Pharmacia Wallac Oy. 1989. 350 p.
33. *Karachev I.I., Geets V.I., Nagovitsina L.I., Sikorenko-Gusar V.V., Varbanets A.N., Sorokobatkina V.D.* Expose doses to population due to radiocaesium migration through ecological chain including water–sediment–fish–man // Seminar of IUR Soviet branch “Radiocology and counter–measures”. Kiev: Acad. Sci. Uk. SSR, 1991. 16 p.
34. *Miroshnichenko O.N., Mirzoeva N.Yu., Sidorov I.G.* ^{137}Cs in abiotic components of ecosystems of the Crimean salt lakes: sources of inflow, features of distribution and elimination // *Fundamental and Applied Limnol.* 2022. V. 195. № 4. P. 275–295.
35. *Mirzoyeva N.Yu., Arkhipova S.I., Kravchenko N.V.* Sources of inflow and nature of redistribution of ^{90}Sr in the salt lakes of the Crimea // *J. Environ. Radioact.* 2018. V. 188. P. 38–46.
36. *Mirzoeva N.Yu., Arkhipova S.I., Proskurnin V.Yu., Miroshnichenko O.N., Moseichenko I.N.* Features of ^{90}Sr behavior in Crimean lakes with different salinity of their water environment // *Acta Geochim.* 2022. V. 42. P. 89–102.
37. *Mirzoyeva N.Yu., Egorov V.N., Polikarpov G.G.* Distribution and migration of ^{90}Sr in components of the Dnieper River basin and the Black Sea ecosystems after the Chernobyl NPP accident // *J. Environ. Radioact.* 2013. V. 125. P. 27–35.
38. *Mirzoeva N., Shadrin N., Arkhipova S., Miroshnichenko O., Kravchenko N., Anufrieva E.* Does salinity affect the distribution of the artificial radionuclides ^{90}Sr and ^{137}Cs in water of the saline lakes? A case of the Crimean Peninsula // *Water.* 2020. V. 12. 349.
39. *Mirzoeva N., Tereshchenko N., Korotkov A.* Artificial Radionuclides in the System: Water, Irrigated Soils, and Agricultural Plants of the Crimea Region // *Land.* 2022. V. 11. Iss. 9. 1539.
40. *Sato H., Gusyev M., Veremenko D., Laptev G., Shibasaki N., Zheleznyak M., Kirieiev S., Nanba K., Onda Yu.* Evaluating changes in radionuclide concentrations and groundwater levels before and after the cooling pond drawdown in the Chernobyl Nuclear Power Plant vicinity // *Sci. Total Environ.* 2023. V. 872. P. 161997.
41. *Talerko M., Garger E., Lev T., Nosovskyi A.* Atmospheric Transport of Radionuclides Initially Released as a Result of the Chernobyl Accident // *Behavior of Radionuclides in the Environment II: Chernobyl.* Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd., 2020. P. 3–75.

**Artificial (^{90}Sr , ^{137}Cs) and natural (^{40}K , ^{232}Th and ^{238}U) radionuclides
in the Dnieper water of the North Crimean Canal and irrigated agricultural lands
along it (2022–2023)**

N. Yu. Mirzoeva^a, O. N. Miroshnichenko^{a,*}, I. G. Sidorov^a, I. N. Moseichenko^a, S. I. Arkhipova^a

*^aA.O. Kovalevsky Institute of Biology of the Southern Seas of RAS
Sevastopol, 299011 Russia*

**e-mail: oksaniya_89@mail.ru*

Based on the results of research conducted in 2022–2023, the radioecological state of the aquatic ecosystem of the North Crimean Canal (NCC) was assessed in relation to long-lived artificial (^{90}Sr , ^{137}Cs) and natural (^{40}K , ^{238}U , ^{232}Th) radionuclides. The role of Dnieper water, which was re-supplied to Crimea in 2022 via the NCC, in the transfer of artificial and natural radionuclides to irrigated agricultural land in this region was also studied. Standard methods of radiochemical processing of samples, as well as beta and gamma spectrometry, accepted in world practice, were used. It was found that 37 years after the Chernobyl accident, Dnieper water remains a source of secondary supply of ^{90}Sr (up to 427.2 Bq/m³ in dissolved form) and ^{137}Cs (up to 521.9 Bq/kg of suspended solids) through the NCC to the territory of Crimea. The completed forecast showed that, at least for 10 years after the arrival of the Dnieper water with the same levels of activity concentration of ^{90}Sr and ^{137}Cs , which were determined in 2022–2023, the development of irrigated agriculture in the Crimea will be radiation-safe.

Keywords: the North Crimean Canal, the Chernobyl NPP accident, the Dnieper River, artificial and natural radionuclides, irrigated soils, irrigation plants, forecast.