

УДК 574::539.1.04:34.49.23:614.73:76.33.39

ДИНАМИКА РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ПРЕСНОВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ, ПОДВЕРЖЕННЫХ МНОГОЛЕТНЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ В ГРАНИЦАХ НАБЛЮДАЕМОЙ ЗОНЫ

© 2015 г. А. В. Трапезников*, В. Н. Трапезникова, А. В. Коржавин

Институт экологии растений и животных УрО РАН, Екатеринбург

Представлены результаты радиоэкологического исследования шести малых рек, расположенных в зоне наблюдения Белоярской АЭС (БАЭС) и водоема-охладителя атомной станции. Определялась активность 21 радионуклида, а также суммарная α - и β -активность в основных компонентах водных экосистем. Показано, что после вывода из эксплуатации I и II блоков БАЭС содержание ^{60}Co и ^{137}Cs в воде, донных отложениях, ихтиофауне и макрофитах Белоярского водохранилища снизилось в десятки и сотни раз. Фундаментальное значение данного факта заключается в том, что в большом временном диапазоне работают как механизмы самоочищения водной экосистемы от радионуклидов за счет распада радиоактивных веществ, так и механизмы перераспределения радионуклидов из воды в другие компоненты, прежде всего, в донные отложения. Из шести малых рек максимальные уровни содержания радиоактивных веществ отмечены в р. Ольховке, которая в течение ряда лет была подвержена сбросам слаборадиоактивных вод с Белоярской АЭС. В остальных пяти исследованных реках после 47-летнего периода эксплуатации БАЭС содержание радионуклидов в основных компонентах водных экосистем соответствует уровню регионального фона.

Водоем-охладитель АЭС, многолетняя динамика, накопление радионуклидов, вода, ихтиофауна, донные отложения, макрофиты.

DOI: 10.7868/S0869803115020150

Современное развитие энергетики страны невозможно без дальнейшего усиления роли атомной отрасли. Однако при проектировании и строительстве атомных электростанций, вводе новых энергоблоков особенно остро встают вопросы экологической безопасности. И связано это с тем, что в процессе эксплуатации предприятий ядерного топливного цикла произошел ряд техногенных катастроф, которые сопровождались бесконтрольным выбросом радиоактивных веществ в окружающую среду и загрязнением обширных территорий. Здесь прежде всего следует отметить две крупные аварии, произошедшие на атомных электростанциях: в 1986 г. на Чернобыльской АЭС и в 2011 г. – на АЭС “Фукусима-1” в Японии. В Уральском регионе наиболее известны три значительных ядерных инцидента, произошедших на Производственном объединении “Маяк”: прямой сброс жидких радиоактивных отходов в период 1949–1951 гг. в р. Теча, общей активностью 10^{17} Бк. Аварийная ситуация 1957 г. – взрыв емкости-хранилища радиоактивных отходов. Об-

щая площадь загрязненной территории в границах 3.7 ГБк/км² (0.1 Ки/км²) по ^{90}Sr составила 23000 км², из которых около 1000 км² – с плотностью загрязнения 74 ГБк/км² (2 Ки/км²). Аварийная ситуация 1967 г. – ветровая эрозия с берегов оз. Карачай. Площадь следа, ограниченного изолинией 3.7 ГБк/км² (0.1 Ки/км²) по ^{90}Sr , составляла 1800 км² [1]. В связи с этим объективная информация о результатах проведения многолетнего радиоэкологического мониторинга ряда водных экосистем, подверженных длительному воздействию Белоярской атомной электростанции, приобретает особую значимость.

В 2014 г. исполнилось 50 лет со дня пуска первого советской промышленной атомной энергетики – Белоярской АЭС им. И.В. Курчатова. Белоярская атомная электростанция (БАЭС) расположена в Свердловской обл. вблизи таких крупных городов как Екатеринбург и Асбест. Расстояние от областного центра составляет около 60 км. Первый энергоблок с канальным водографитовым реактором на тепловых нейтронах АМБ-100 был введен в эксплуатацию в 1964 г., второй – АМБ-200 – в 1967 г. В 1980 г. был пущен третий энергоблок на быстрых нейтронах

* Адресат для корреспонденции: 624250 г. Заречный, Свердловская обл., а/я 18; тел.: 8 (34377) 3-28-20; факс: 8 (34377) 3-20-70; e-mail: bfs_zar@mail.ru.

БН-600. К 1989 г. первые два блока были выведены из эксплуатации; в настоящее время функционирует только третий энергоблок. В качестве водоема-охладителя АЭС используется Белоярское водохранилище, которое было образовано в 1959–1963 гг. путем зарегулирования русла р. Пышмы в 75 км от ее истока. Протяженность водоема примерно 20 км, ширина – до 3 км. Зеркало водохранилища имеет площадь 47 км² [2]. В настоящее время водоем-охладитель можно охарактеризовать как гидрокарбонатно-кальциевый со средней степенью минерализации и нормальным кислородным режимом. Гидрохимический состав воды довольно однороден по всему водохранилищу, включая район сброса подогретых вод [3].

Поступление радиоактивных веществ от БАЭС во внешнюю среду происходит воздушным (через вентиляционные трубы, в виде принудительного выхлопа пара из барботеров) и водным путем. Кроме воздушных выбросов атомные станции, как правило, производят жидкие сбросы, которые поступают в водные экосистемы. В случае Белоярской АЭС таковыми являются водоем-охладитель и Ольховская болотно-речная экосистема. В Белоярское водохранилище от АЭС открываются три канала: первый – промливневый канал (ПЛК); второй – сбросной канал, в который поступают подогретые воды, прошедшие систему охлаждения АЭС; третий – обводной канал, дренирующий территорию вокруг АЭС. Ольховская болотно-речная экосистема длительное время используется атомной станцией для сброса слаборадиоактивных дебалансных вод (рис. 1).

Как и любая АЭС, Белоярская атомная станция является потенциальным источником загрязнения окружающей среды. Важно понять, какое влияние оказала многолетняя работа БАЭС на уровни содержания радионуклидов в основных компонентах ряда водных экосистем (в том числе и Белоярского водохранилища), находящихся в зоне наблюдения атомной станции, за столь длительный промежуток времени. Имеющаяся информация по радиоактивному загрязнению водных биогеоценозов вблизи действующих АЭС [4–9], как правило, представлена данными за один год или несколько лет. В настоящей работе впервые приведены результаты радиоэкологических исследований водоема-охладителя Белоярской атомной станции за более чем 20-летний период.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Объектами исследования служили шесть небольших рек, находящихся на территории зоны

наблюдения, расположенной в радиусе 15 км от Белоярской АЭС, а также сам водоем-охладитель. В качестве материала исследования были использованы вода, донные отложения, ихтиофауна, макрофиты, а также пойменные почвы (для рек).

Отбор воды проводили в соответствии с ГОСТ 51592–2000 [10] в двух повторностях по 200 литров каждая. В лабораторных условиях пробы выпаривали до сухого остатка. Образцы донных отложений отбирали в соответствии с ГОСТ 17.1.5.01–80 [11] с помощью специального пробоотборника с площадью сечения 38.5 см² до глубины 20–30 см.

Образцы почв и донных отложений высушивали, растирали, а затем озоляли при температуре 450°C в течение 6 ч для удаления органической составляющей, взвешивали и загружали в измерительные кюветы.

Макрофиты (элодея (*Elodea canadensis*), рдест гребенчатый (*Potamogeton pectinatus* L.), рдест пронзеннолистный (*Potamogeton perfoliatus* L.), роголистник темнозеленый (*Ceratophyllum demersum*), ряска малая (*Lemna minor* L.), кладофора (*Cladophora glomerata* (L.) Kütz) отбирали в трех повторностях по 3–5 кг сырой массы на повторность. Растения отмывали от поверхностного загрязнения, взвешивали и высушивали до воздушно-сухого состояния, после чего озоляли в муфельной печи при $t = 450^\circ\text{C}$.

Рыбу: плотва (*Rutilus rutilus*), щука (*Esox lucius*), окунь (*Perca fluviatilis*) отлавливали сетями в трех повторностях по 3 кг сырой массы на пробу, на которую приходилось 30 особей плотвы, 3 щуки, 20 окуней. Тушки рыб (без внутренних органов) подсушивали и озоляли при $t = 450^\circ\text{C}$ в муфельной печи.

В природных образцах были оценены уровни содержания широкого спектра радионуклидов (в том числе и тех, что не были определены ранее): ¹⁴C, ⁶⁰Co, ⁹⁰Sr, ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb, ²¹⁴Pb, ²¹⁰Po, ²¹⁴Po, ²¹⁴Bi, ²²²Rn, ²²⁶Ra, ²²⁸Ra, ²²⁸Th, ²³⁰Th, ²³²Th, ²³⁴U, ²³⁸U, ²³⁸Pu, ²³⁹, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Am, а также суммарная α- и β- активность.

Для определения содержания γ-излучающих радионуклидов в образцах окружающей среды использовали инструментальные методы. Измерения проводили на низкофономом полупроводниковом гамма-спектрометре фирмы “Ortec” (США) с коаксиальной детекторной системой на базе высокоочищенного германия (HPGe) с эффективностью 40% при ошибке измерения не более 15% и нижнем пределе обнаружения ¹³⁷Cs 1 Бк/кг.

Определение ⁹⁰Sr в образцах с низкой активностью проводили после радиохимической обработки с выделением химически чистого осадка

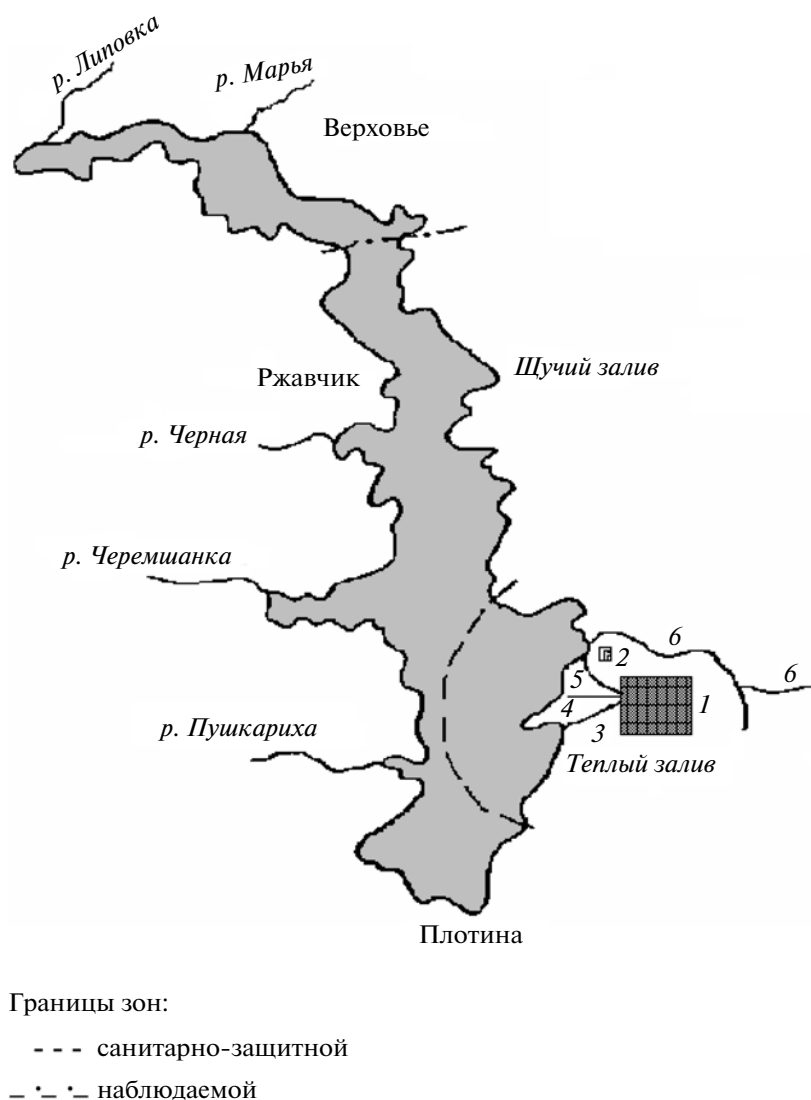


Рис. 1. Схема Белоярского водохранилища: 1 – Белоярская АЭС, 2 – Биофизическая станция, 3 – сбросной канал, 4 – водозаборный канал, 5 – Промливневый канал, 6 – обводной канал.

оксалата стронция, его высушивания, прокаливания, взвешивания и измерения β -активности на малофоновой установке УМФ-2000 с нижним пределом обнаружения 0.4 Бк/кг и статистической ошибкой измерения не более 10%.

Для определения содержания изотопов плутония в пробах почвы и воды использовали методику, разработанную сотрудниками RISØ National Laboratory (Дания) [12]. Определение изотопного состава полученного образца проводили на многоканальном альфа-спектрометре фирмы “Ortec” (США) с поверхностно-барьерными детекторами и программным обеспечением “Alpha Vision-32”. Ошибка счета не превышала 10%, а нижний предел определения составлял 0.01 Бк/кг.

Во всех случаях расчет количественного содержания радионуклидов в водных растениях, почвах и донных отложениях производили на сухую массу, а для образцов ихтиофауны – на сырую массу.

Достоверность результатов достигалась параллельным отбором и исследованием всех образцов природных сред в 2–3 повторностях. Статистическая обработка результатов заключалась в определении среднеарифметического значения и стандартного отклонения среднего арифметического. Результаты, в случае необходимости, обрабатывали с помощью t -критерия и другими общепринятыми способами. Разницу показателей считали достоверной при $p < 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

*Содержание радионуклидов
в воде поверхностных водоемов*

Содержание радионуклидов в воде шести небольших рек, находящихся в зоне наблюдения Белоярской АЭС, а также в Теплом заливе и Промливневом канале, через который поступают дренажные и поверхностные воды с территории атомной станции в Белоярское водохранилище, представлены в табл. 1. Проведен сравнительный анализ уровней содержания ^{60}Co , ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде водоема-охладителя Белоярской АЭС в 70-е и 80-е годы прошлого века и в 2011 г. (табл. 2).

При сравнении концентраций ^{60}Co , ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде указанных точек водоема-охладителя в 1976–1987 гг. и уровней содержания радионуклидов в 2011 г. установлено, что объемная активность ^{60}Co в воде Теплового залива за более чем 20-летний период уменьшилась с 250 Бк/м³ до значения меньше, чем 0.3 Бк/м³, т.е. в 800 и более раз. В Промливневом канале содержание данного нуклида изменилось в тот же временной отрезок от 5600 Бк/м³ до 1 Бк/м³, т.е. в 5600 раз. Объемная активность ^{90}Sr в воде Теплового залива за рассматриваемый период изменилась от 61 до 21 Бк/м³, т.е. в 3 раза, а в Промливневом канале содержание этого радионуклида уменьшилось от 160 до 28 Бк/м³, т.е. в 5.7 раза [13].

Объемная активность ^{137}Cs в воде Теплового залива за более чем 20-летний период изменилась от 310 до 2.9 Бк/м³, т.е. уменьшилась более чем в 100 раз, а содержание данного нуклида в воде из Промливневого канала упало с 3240 до 8.4 Бк/м³, т.е. уменьшилась в 386 раз [13].

Максимальная объемная активность ^{137}Cs (67 Бк/м³) приходится на р. Ольховка (табл. 1), в которую в течение многих лет транзитом через Ольховское болото поступали слаборадиоактивные сбросы БАЭС. Далее по мере убывания следует Промливневый канал водоема-охладителя БАЭС (8.4 Бк/м³). Наименьшее же содержание ^{137}Cs отмечено в других реках наблюдаемой зоны БАЭС (от 0.6 Бк/м³ в р. Мезенка до 1.6 Бк/м³ в р. Гагарка). В р. Камышенка объемная активность нуклида ниже 0.48 Бк/м³ (табл. 1). Все приведенные величины существенно ниже уровня вмешательства для питьевой воды, который, согласно НРБ 99/2009, для ^{137}Cs составляет 11000 Бк/м³ [14].

Уровни содержания ^{90}Sr также максимальны в р. Ольховка (60 Бк/м³). Далее следует Промливневый канал (28 Бк/м³). В пробах из остальных рек, а также из Теплового залива водоема-охладителя БАЭС объемная активность данного нуклида в

воде находится в пределах от 6.1 до 23.5 Бк/м³ (табл. 1). Все приведенные величины существенно ниже уровня вмешательства для питьевой воды, который, согласно НРБ 99/2009 для ^{90}Sr , составляет 4900 Бк/м³ [14]. Следует отметить, что значимые количества ^{60}Co в воде удалось обнаружить только в относительно “горячих” точках – в р. Ольховка (2.4 Бк/м³) и в Промливневом канале водоема-охладителя Белоярской АЭС (1.0 Бк/м³). Что касается ^{134}Cs , то уровни его содержания в воде исследуемых рек Белоярского района крайне низки и колеблются от 0.16 до 0.40 Бк/м³ (табл. 1). Это значит, что данный радионуклид поступает в водные экосистемы в очень небольших количествах.

Объемная активность ^{228}Th в воде р. Ольховка находится на максимальном уровне (12.6 Бк/м³). Далее в порядке убывания следуют: р. Камышенка (11.6 Бк/м³) и р. Мезенка (7.8 Бк/м³). Наименьшее содержание данного нуклида в воде зафиксировано в р. Режик (2.0 Бк/м³) (табл. 1).

Наибольшая объемная активность ^{230}Th в воде отмечена также в р. Ольховка (13.3 Бк/м³), а наименьшая – в Промливневом канале БАЭС (2.8 Бк/м³) (табл. 1). Что же касается содержания ^{232}Th в водной среде изучаемых объектов, то она невелика и ее значимые количества находятся в пределах 0.95–1.20 Бк/м³ (табл. 1).

^{234}U удалось определить в трех водных объектах. Объемная активность этого радионуклида находится в пределах от 240 Бк/м³ (Теплый залив Белоярского водохранилища) до 340 Бк/м³ (р. Камышенка). Содержание ^{238}U изменяется незначительно во всех водных объектах от 7.8 до 12.3 Бк/м³. Объемная активность ^{214}Pb в воде близка во всех исследованных реках и в пробах из водоема-охладителя, при этом она варьирует от 4.4 до 7.3 Бк/м³ (табл. 1).

Значения суммарной α -активности находятся в пределах от 13.5 до 50.0 Бк/м³. Что касается суммарной β -активности, то наибольшие значения отмечены в реках Гагарка (162.9 Бк/м³) и Ольховка (154.0 Бк/м³), а наименьшие – в р. Мезенка (43.0 Бк/м³) (табл. 1).

В целом следует отметить, что наивысшие значения содержания различных радионуклидов в воде зафиксированы в р. Ольховка, куда в течение многих лет через Ольховское болото поступали слабоактивные сбросы радионуклидов Белоярской АЭС.

Таблица 1. Содержание радионуклидов в воде из 6 рек в наблюдаемой зоне Белоярской АЭС, а также водоема-охладителя, 2011 г.

Точка контроля	Радионуклиды, Бк/м ³													
	¹³⁴ Cs	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	⁶⁰ Co	²²⁶ Ra	²²⁸ Th	²³⁰ Th	²³² Th	²¹⁴ Bi	²⁴¹ Am	²³⁸ Pu	²³⁸ U		
р. Камышенка	0.40 ± 0.30	<0.48	15.3 ± 0.3	<0.17	<2.0	11.6 ± 2.7	11.4 ± 2.2	0.95 ± 0.19	<1.1	<0.5	0.12	9.2 ± 3.9		
р. Гагарка	0.22 ± 0.13	1.63 ± 0.43	23.5 ± 0.5	<0.23	<3.3	3.1 ± 0.5	4.2 ± 0.3	0.97 ± 0.29	<0.4	<0.18	0.03	8.5 ± 3.4		
р. Режик	0.28 ± 0.02	1.41 ± 0.5	6.4 ± 0.85	<0.33	<2.2	2 ± 0.3	9.8 ± 0.3	1.0 ± 0.18	<0.25	0.67 ± 0.27	0.04	9.7 ± 4.5		
р. Мезенка	<0.13	0.64 ± 0.06	11.6 ± 6	<0.27	<4.3	7.8 ± 1.2	7.6 ± 0.8	1.2 ± 0.14	<0.52	<0.22	0.23	7.8 ± 3.6		
Белоярское вдхр. Промливневый канал	0.19 ± 0.14	8.42 ± 0.67	28.0 ± 5	1.06 ± 0.22	<2.0	6.4 ± 0.52	2.8 ± 0.17	<1.9	<0.24	<0.23	<0.19	11.3 ± 5.6		
Белоярское вдхр. Теплый залив	<0.15	2.93 ± 0.21	21.0 ± 2	<0.3	<3.9	8.2 ± 1	8.7 ± 0.8	<3.6	<0.46	<0.2	0.187	12.3 ± 3.7		
р. Ольховка	0.16 ± 0.07	67.02 ± 2.38	60.0 ± 1	2.42 ± 0.13	<13.9	12.6 ± 3.5	13.3 ± 2.1	<13.5	<1.7	<0.12	0.422	8.2 ± 4.2		
р. Каменка	<0.17	<0.22	6.1 ± 0.3	<0.29	<5.5	6.79 ± 1.2	11.5 ± 1.2	<5.5	<0.68	0.29 ± 0.27	<0.51	9.4 ± 3.3		
Точка контроля	Радионуклиды, Бк/м ³													
	²¹⁴ Pb	²³⁴ U	^{239, 240} Pu	²²⁸ Ra	²²² Rn	²¹⁰ Pb	²¹⁰ Po	²¹⁴ Po	¹⁴ C	α-активность	β-активность			
р. Камышенка	6.5 ± 1.6	340 ± 190	0.35	<0.75	<3000	<22	<22	<22	<7.3	37.7 ± 7.7	64.5 ± 0.5			
р. Гагарка	6.7 ± 0.57	<57	0.0056	<0.75	<3000	<28	<28	<28	<7.3	38.6 ± 12.3	162.9 ± 16.5			
р. Режик	7 ± 0.13	<140	0.024	<0.75	<3000	<30	<30	<30	<7.3	41.5 ± 7.2	77.3 ± 6.2			
р. Мезенка	5.3 ± 0.6	300 ± 125	0.015	<0.75	<3000	<19	<19	<19	<7.3	33.2 ± 5.6	43.4 ± 3			
Белоярское вдхр. Промливневый канал	4.4 ± 0.52	<77	0.015	<0.75	<3000	<26	<26	<26	15.6 ± 4.7	50.2 ± 18.3	107.5 ± 2.5			
Белоярское вдхр. Теплый залив	6.9 ± 0.7	240 ± 100	0.024	<0.75	<3000	<20	<20	<20	18.3 ± 5.5	49.3 ± 0.5	117.8 ± 5			
р. Ольховка	6.9 ± 0.4	<190	0.17	<0.75	<3000	<30	<30	<30	25.3 ± 7.6	36.4 ± 0.5	154.6 ± 0.5			
р. Каменка	7.3 ± 0.87	<89	0.34	<0.75	<3000	<43	<43	<43	<7.3	13.5 ± 1.8	13.2 ± 3.1			

Таблица 2. Содержание ^{60}Co , ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде Белоярского водохранилища в 1976–1987 гг. и в 2011 г. (Бк/м³)

Место отбора проб	^{60}Co		^{90}Sr		^{137}Cs	
	1976–1987 гг.	2011 г.	1976–1987 гг.	2011 г.	1976–1987 гг.	2011 г.
Теплый залив	250	<0.3	61	21	310	2.9
Промливневый канал БАЭС	5600	1	160	28	3240	8.4

Таблица 3. Содержание радионуклидов в донных отложениях из 6 рек наблюдаемой зоны Белоярской АЭС, а также водоема-охладителя, 2011 г.

Точка контроля	Радионуклиды, Бк/кг						
	^{134}Cs	^{137}Cs	^{90}Sr	^{60}Co	^{226}Ra	^{228}Th	^{230}Th
р. Ольховка	<0.39	418.7 ± 17.1	30.03 ± 0.17	<0.78	<12.6	166.2 ± 6	41.1 ± 2.5
р. Мезенка	<1.24	3.0 ± 0.4	24.55 ± 0.15	<0.42	296 ± 73	173.5 ± 7	46.4 ± 3.9
р. Каменка	0.71 ± 0.44	4.2 ± 1.3	9.42 ± 0.59	<0.67	124 ± 60	198.7 ± 15	94.6 ± 11
р. Гагарка	0.83 ± 0.67	9.8 ± 2.2	12.14 ± 0.59	<1.05	<17	<2.1	38.3 ± 3.8
р. Камышенка	1.43 ± 1.12	29.4 ± 5.0	41.77 ± 0.68	9.82 ± 3.06	<41	140.6 ± 12	56.5 ± 6
Белоярское вдхр. Промливневый канал	3.24 ± 1.71	465.5 ± 10.2	49.35 ± 1.71	27.24 ± 4.31	<45	<1.2	47.2 ± 8
р. Режик	0.93 ± 0.32	3.4 ± 0.9	22.07 ± 0.13	<0.42	<8.7	180.4 ± 3	68.7 ± 4
Белоярское вдхр. Теплый залив	<1.54	194.8 ± 8.4	52.73 ± 0.33	10.33 ± 3.71	<55	<20.1	69.4 ± 7

Точка контроля	Радионуклиды, Бк/кг					
	^{232}Th	^{214}Bi	^{241}Am	^{210}Pb	^{228}Ra	β-активность
р. Ольховка	60.6 ± 5	<1.6	<0.76	<100	53.9 ± 4.3	432.2 ± 8.5
р. Мезенка	89.7 ± 10	<3.5	<0.71	<100	79.8 ± 10.1	356.3 ± 18.3
р. Каменка	91.3 ± 13	<6.9	<0.63	<100	81.2 ± 12.7	281.2 ± 26.4
р. Гагарка	45.9 ± 5	<2.2	<0.92	<100	40.8 ± 4.2	228.1 ± 59.7
р. Камышенка	73.9 ± 14	<5.9	3.9 ± 2	<100	65.7 ± 12.7	372.8 ± 76.4
Белоярское вдхр. Промливневый канал	81.2 ± 20	<5.7	4.4 ± 2.5	<100	72.2 ± 18.9	775.4 ± 29.6
р. Режик	81.0 ± 3	<1.2	<0.46	<100	72.0 ± 2.6	414.7 ± 10.6
Белоярское вдхр. Теплый залив	20.1 ± 11	<7	<2.8	<100	18.5 ± 9.8	385.6 ± 21.2

Содержание радионуклидов в донных отложениях поверхностных водоемов

Уровни содержания природных и искусственных радионуклидов, величины суммарной β-активности в донных отложениях рек, а также Теплового залива и Промливневого канала Белоярского водохранилища, зарегистрированные в 2011 г., представлены в табл. 3.

При сравнении усредненных концентраций ^{60}Co , ^{90}Sr и ^{137}Cs в донных отложениях Теплового за-

лива водоема-охладителя Белоярской АЭС в 1980-е годы и уровней содержания радионуклидов в 2011 г. (рис. 2) показано, что за более чем 20-летний период содержание ^{60}Co в донных отложениях Теплового залива (затопленная почва) уменьшилось с 2410 до 10 Бк/кг, т.е. в 240 раз. За это же время концентрация данного радионуклида в донных грунтах Промливневого канала изменилась от 9770 до 27 Бк/кг и стала меньше в 362 раза [13].

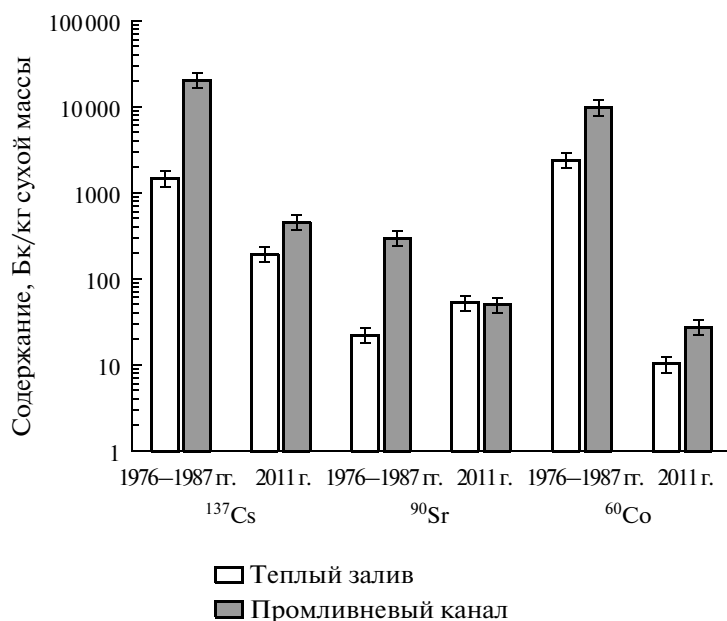


Рис. 2. Содержание ^{60}Co , ^{90}Sr и ^{137}Cs в донных отложениях (затопленная почва) Белоярского водохранилища в 1976–1987 гг. и в 2011 г.

Содержание ^{90}Sr в донных отложениях Теплового залива, наоборот, увеличилось с 22.4 до 52.7 Бк/кг, а концентрация этого радионуклида в грунтах Промливневого канала уменьшилась с 300 до 49.3 Бк/кг [13].

Уровень содержания ^{137}Cs в затопленной почве Теплового залива за рассматриваемый многолетний период уменьшился в 7 раз с 1490 до 195 Бк/кг. За этот же отрезок времени концентрация данного радионуклида в донных грунтах Промливневого канала изменилась в 44 раза: с 20460 до 466 Бк/кг [13].

Таким образом, содержание ^{60}Co и ^{137}Cs в донных отложениях как Теплового залива, так и Промливневого канала за период с 1980-х годов по 2011 г. уменьшилось в десятки и сотни раз, что связано с выводом из эксплуатации I и II блоков БАЭС. Уровень поступления ^{90}Sr в водоем-охладитель был значительно ниже, поэтому здесь нет однозначной картины.

По результатам исследования 2011 г. (табл. 3), максимальное содержание ^{137}Cs в донных отложениях (465 Бк/кг) приходится на Промливневый канал водоема-охладителя, затем следует р. Ольховка (418.7 Бк/кг). Далее в порядке убывания идут Теплый залив Белоярского водохранилища (195 Бк/кг), р. Камышенка (29 Бк/кг), р. Гагарка (10 Бк/кг). Самые же низкие значения ^{137}Cs в донных отложениях наблюдались в р. Режик (3.4 Бк/кг) и р. Мезенка (3.0 Бк/кг).

Уровни содержания ^{90}Sr в водных грунтах максимальны в двух точках водоема-охладителя БАЭС – Теплоем заливе (52.7 Бк/кг) и Промливневом канале (49.3 Бк/кг). Затем идут р. Камышенка (41.8 Бк/кг), р. Ольховка (30.0 Бк/кг), р. Мезенка (24.6 Бк/кг) и р. Режик (22.1 Бк/кг). Наименьшая концентрация ^{90}Sr зафиксирована в донных отложениях р. Каменка (9.4 Бк/кг).

Следует отметить, что ^{60}Co в донных отложениях обнаружен только в трех точках – в Промливневом канале Белоярского водохранилища (27.0 Бк/кг), Теплоем заливе (10.3 Бк/кг) и в р. Камышенка (9.8 Бк/кг).

Что же касается ^{134}Cs , то уровни его содержания в донных отложениях низки. Максимальные значения зафиксированы в Промливневом канале БАЭС (3.2 Бк/кг) и р. Камышенка (1.4 Бк/кг).

^{230}Th распределяется в донных грунтах исследуемых водных экосистем достаточно равномерно. Его содержание находится в диапазоне от 38.3 Бк/кг (р. Гагарка) до 94.6 Бк/кг (р. Каменка).

Концентрация ^{232}Th в донных отложениях указанных водных объектов находится примерно на том же уровне, что и ^{230}Th и также изменяется очень значительно – от 20.1 Бк/кг в Теплоем заливе Белоярского водохранилища до 91.3 Бк/кг в р. Каменка. Содержание ^{228}Th в донных грунтах выше и колеблется от 140.6 Бк/кг (р. Камышенка) до 198.7 Бк/кг (р. Каменка). ^{226}Ra обнаружен в донных отложениях всего лишь двух рек – Мезенки (296 Бк/кг) и Каменки (124 Бк/кг).

Таблица 4. Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в макрофитах из 6 рек наблюдаемой зоны Белоярской АЭС, а также водоема-охладителя, 2011 г.

Точка контроля	Радионуклиды, Бк/кг	
	^{90}Sr	^{137}Cs
р. Ольховка (рдест гребенчатый)	44.9 ± 1.4	2059.2 ± 97.3
р. Режик (элодея)	50.2 ± 1.2	3.5 ± 0.6
р. Мезенка (рдест пронзеннолистный)	25.3 ± 5.6	1.9 ± 0.5
р. Камышенка (элодея)	24.0 ± 0.8	1.6 ± 0.3
р. Каменка (элодея)	32.2 ± 1.0	1.84 ± 0.4
р. Гагарка (ряска малая)	23.8 ± 0.2	1.7 ± 0.2
Теплый залив (роголистник темнозеленый)	40.2 ± 1.7	30.2 ± 1.7
Промливневый канал (клагофора)	57.9 ± 0.2	1.95 ± 0.1
Промливневый канал (рдест гребенчатый)	127.6 ± 0.4	52.5 ± 0.9

Суммарная β -активность в водных грунтах максимальна в Промливневом канале БАЭС (775 Бк/кг), а минимальна в р. Гагарка (228 Бк/кг).

Содержание радионуклидов в водных растениях

В табл. 4 приведены данные по содержанию ^{90}Sr и ^{137}Cs в водных растениях исследованных рек, а также в Теплом заливе и Промливневом канале Белоярского водохранилища. Обращает на себя внимание повышенное содержание ^{137}Cs в пробе рдеста гребенчатого из р. Ольховка (2059 Бк/кг). Ольховка, как уже было отмечено выше, в течение многих лет была подвержена сбросам жидких радиоактивных отходов низкого уровня. В целом же для большинства рек содержание ^{137}Cs в водных растениях невелико и находится в пределах от 1.6 до 3.5 Бк/кг.

Максимальная концентрация ^{90}Sr в макрофитах зафиксирована в рдесте гребенчатом, отобранном в Промливневом канале (128 Бк/кг). В остальных точках уровень содержания данного радионуклида колеблется от 24 (элодея из р. Камышенки) до 58 Бк/кг (клагофора из Промливневого канала водоема-охладителя).

Сравнительная оценка уровней содержания радионуклидов в водных растениях, отобранных на Белоярском водохранилище в разные годы, представлена на рис. 3. Так, концентрация ^{137}Cs в роголистнике темно-зеленом из Теплового залива (1980-е годы) составляла 344 Бк/кг сухой массы, а содержание данного радионуклида в роголистнике из того же залива в 2011 г. равнялось 30 Бк/кг сухой массы, т.е. уменьшилось в 11.5 раз. Содержание ^{137}Cs в рдесте гребенчатом из Промливне-

вого канала БАЭС (1980-е годы) составляло 20090 Бк/кг сух. массы, а в 2011 г. – 525. Бк/кг сух. массы. Таким образом, уровень содержания радионуклида снизился в 383 раза [13]. Как и в случае с роголистником темнозеленым это произошло после выведения I и II блоков БАЭС из эксплуатации.

Совсем иная картина наблюдается при накоплении макрофитами ^{90}Sr . Так, уровень содержания радионуклида в роголистнике темнозеленом из Теплового залива водоема-охладителя в 1980-е годы составлял 20.1 Бк/кг в пересчете на сухой вес (рис. 3), а содержание ^{90}Sr в водных растениях этого же вида из Теплового залива БАЭС в 2011 г. равнялось 40.2 Бк/кг сух. массы, т.е. за многолетний период концентрация радионуклида возросла в 2 раза. Уровень содержания ^{90}Sr в рдесте гребенчатом, отобранном из Промливневого канала в 1980-е годы, составлял 92 Бк/кг, а концентрация данного радионуклида в растениях этого вида в 2011 г. равнялась 128 Бк/кг, из чего следует, что она увеличилась в 1.4 раза [13]. Это можно объяснить тем, что механизм поступления стронция-90 совсем иной, чем для ^{137}Cs . Если последний радионуклид поступает в водоем-охладитель через Промливневый канал, то ^{90}Sr имеет, в основном, глобальное происхождение.

Содержание радионуклидов в ихтиофауне

Данные по уровням содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в рыбах различных видов, отобранных в 2011 г. из шести рек наблюдаемой зоны Белоярской АЭС, а также водоема-охладителя, представлены в табл. 5. Сравнительная оценка концентрации ^{137}Cs в представителях ихтиофауны Белоярского

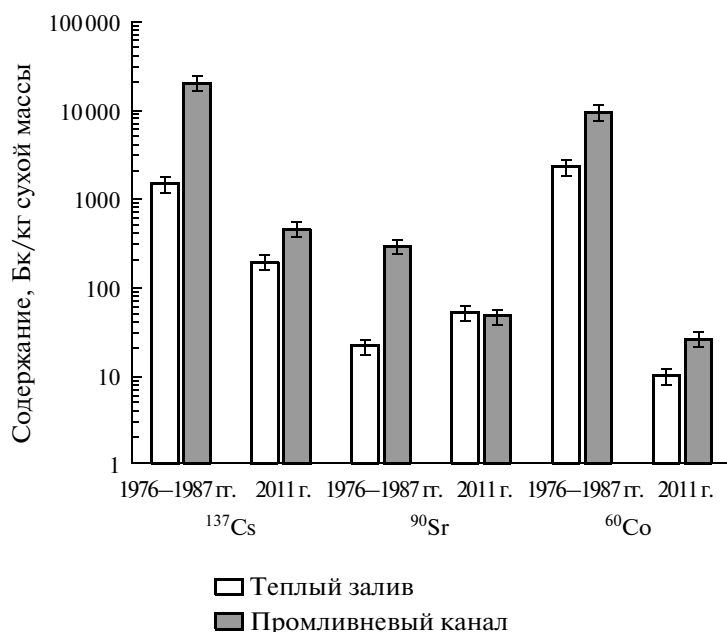


Рис. 3. Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в макрофитах Белоярского водохранилища в 1976–1987 гг. и в 2011 г.

водохранилища, зафиксированной в 1977 г., и величины содержания этого радионуклида в рыбах, отмеченные в 2011 г., дана на рис. 4.

Содержание ^{137}Cs в щуке из водоема-охладителя БАЭС (1977 г.) составляло 113 Бк/кг, а в 2011 г. равнялось 12.8 Бк/кг, при этом оно уменьшилось в 8.8 раза. Концентрация радионуклида в щуке из шести рек наблюдаемой зоны АЭС была значи-

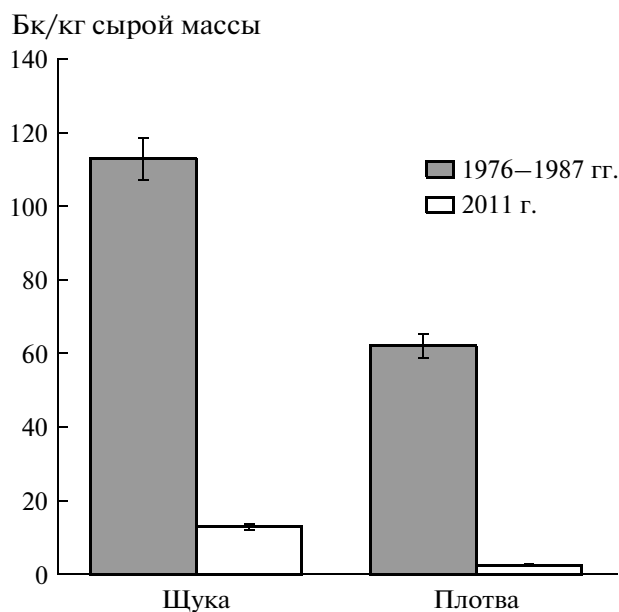


Рис. 4. Содержание ^{137}Cs в икhtiофауне Белоярского водохранилища в 1976–1987 гг. и в 2011 г.

тельно ниже и колебалась в пределах от 0.6 до 2.0 Бк/кг [13].

Эффект такой же направленности можно проследить на примере плотвы (рис. 4). Так, содержание ^{137}Cs в плотве, отловленной на Белоярском водохранилище в 1977 г., составляло 62.0 Бк/кг, а в 2011 г. варьировало от 2.4 до 2.5 Бк/кг, т.е. уменьшилась в 25.8 раза. В то же время концентрация ^{137}Cs в плотве, отловленной в 6 реках из наблюдаемой зоны БАЭС, была ниже и изменялась в пределах от 0.8 до 2.1 Бк/кг [13].

Содержание радионуклидов в пойменных почвах рек наблюдаемой зоны Белоярской АЭС

Уровни содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в пойменных почвах рек Ольховка, Гагарка и Мезенка представлены на рис. 5.

Из этих результатов видно, что пойменные почвы реки Ольховки загрязнены ^{137}Cs . Содержание данного радионуклида в пойменных почвах почти на порядок величин выше, чем в других реках. При этом концентрация ^{90}Sr в пойме р. Ольховка соответствует его содержанию в поймах рек, не подверженных радиоактивному загрязнению.

В шести малых реках, расположенных в зоне наблюдения БАЭС (Ольховка, Каменка, Камышенка, Гагарка, Режик и Мезенка), уровни содержания радиоактивных веществ (исследован 21 радионуклид, а также суммарная α - и β -активность)

максимальны в р. Ольховка, которая в течение ряда лет была подвержена сбросам слаборадиоактивных вод с Белоярской АЭС. В остальных пяти исследованных реках концентрация радионуклидов в основных компонентах водных экосистем в целом соответствует уровню регионального фона.

ОБСУЖДЕНИЕ

В работе [3] на основании результатов натуральных исследований было показано, что основным депо радионуклидов в пресноводных водоемах являются донные отложения, а в реках – пойменные почвы и донные отложения пойменных водоемов, которые поглощают более 80% радиоактивных веществ, затем следует водная компонента (в пределах от долей процента до 20%) и, наконец, гидробионты (так, макрофиты могут аккумулировать, в общей сложности, доли процента от суммарной активности в водоеме).

На протяжении более чем 20-летнего периода было отмечено существенное снижение содержания радионуклидов в основных компонентах водоема-охладителя Белоярской АЭС. Так, объемная активность ^{60}Co в воде Теплого залива водоема-охладителя уменьшилась в 800 и более раз, в Промливневом канале – в 5600 раз. Объемная активность ^{137}Cs в воде Теплого залива уменьшилась более чем в 100 раз, а в воде из Промливневого канала снизилось в 386 раз. Объемная активность ^{90}Sr в тех же точках снизилась в 3 и 5.7 раза соответственно.

Также значительно уменьшилось содержание радионуклидов в донных отложениях водоема. Содержание ^{60}Co в донных отложениях Теплого залива (затопленная почва) уменьшилось в 240 раз, в донных грунтах Промливневого канала в 362 раза. Уровень содержания ^{137}Cs в затопленной почве Теплого залива уменьшился в 7 раз, в донных грунтах Промливневого канала – в 44 раза.

Столь существенные изменения радиоэкологического состояния водоема-охладителя в 2011 г. по сравнению с 1976–1987 гг. стали возможны под влиянием ряда причин. Во-первых, вывод из эксплуатации I и II блоков Белоярской АЭС. Во-вторых, как результат работы в большом временном диапазоне механизмов самоочищения водной экосистемы от радионуклидов за счет распада радиоактивных веществ, а также механизмов перераспределения радионуклидов из воды в другие компоненты, прежде всего – в донные отложения.

Улучшение радиоэкологического состояния водоема-охладителя существенно повлияло на содержание радионуклидов в водной раститель-

Таблица 5. Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в иктофауне из 6 рек наблюдаемой зоны Белоярской АЭС, а также водоема-охладителя, 2011 г.

Точка контроля	Радионуклиды, Бк/кг	
	^{90}Sr	^{137}Cs
р. Камышенка (щука)	5.28 ± 0.61	0.99 ± 0.07
р. Гагарка (щука)	3.23 ± 0.38	2.05 ± 0.19
р. Мезенка (щука)	4.03 ± 0.23	1.86 ± 0.39
р. Каменка (щука)	1.58 ± 0.71	1.52 ± 0.15
р. Режик (щука)	2.08 ± 0.83	1.83 ± 0.20
р. Ольховка (щука)	1.07 ± 0.22	0.58 ± 0.16
р. Гагарка (плотва)	2.94 ± 0.21	0.83 ± 0.09
р. Мезенка (плотва)	2.35 ± 0.19	1.23 ± 0.17
р. Режик (плотва)	1.58 ± 0.11	2.12 ± 0.22
р. Ольховка (плотва)	2.38 ± 0.07	1.22 ± 0.09
Белоярское вдхр. БФС (окунь)	3.26 ± 0.21	3.43 ± 0.15
Белоярское вдхр. (плотва)	2.74 ± 0.12	2.44 ± 0.21
Белоярское вдхр. Теплый залив (плотва)	3.47 ± 0.26	2.46 ± 0.19
Белоярское вдхр. Промливневый канал (окунь)	3.76 ± 0.35	6.68 ± 0.28
Белоярское вдхр. Промливневый канал (плотва)	1.76 ± 0.15	3.18 ± 0.24
Белоярское вдхр. (щука)	6.12 ± 0.43	12.84 ± 0.82

ности и рыбе. Так, концентрация ^{137}Cs в роголистнике темно-зеленом из Теплого залива уменьшилась по сравнению с 1980-ми годами в 11.5 раз, в

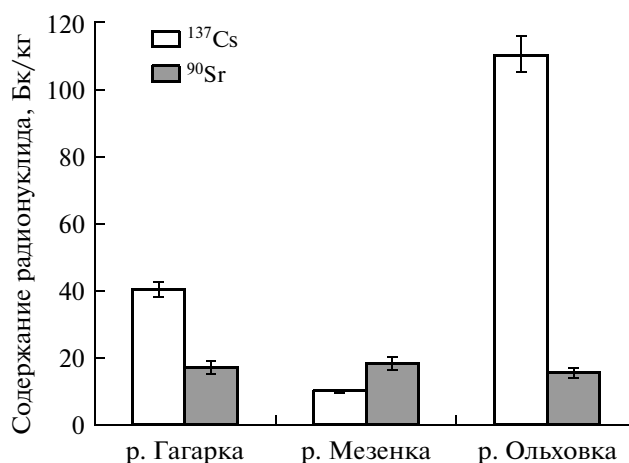


Рис. 5. Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в пойменных почвах ряда рек из наблюдаемой зоны Белоярской АЭС, 2011 г.

рдесте гребенчатом из Промливневого канала снизилась в 383 раза. Содержание ^{137}Cs в щуке из водоема-охладителя БАЭС уменьшилось в 8.8 раза, а в плотве — в 25.8 раза.

Из обследованных рек максимальные уровни объемной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr отмечены в р. Ольховка, в которую в течение многих лет транзитом через Ольховское болото поступали слаборадиоактивные сбросы БАЭС. При этом все приведенные величины существенно ниже уровня вмешательства для питьевой воды, который, согласно НРБ 99/2009, для ^{137}Cs составляет 11 000, для ^{90}Sr — 4900 Бк/м³ [14].

ВЫВОДЫ

1. После вывода из эксплуатации I и II блока БАЭС объемная активность ^{60}Co в воде Теплового залива Белоярского водохранилища уменьшилась в 800 и более раз, а ^{137}Cs — более чем в 100 раз. В Промливневом канале содержание ^{60}Co в воде упало в 5600 раз, а объемная активность ^{137}Cs снизилась в 386 раз. Объемная активность ^{90}Sr в воде Теплового залива за рассматриваемый период уменьшилась в 5.7 раза. Фундаментальное значение данного факта заключается в том, что в большом временном диапазоне работают как механизмы самоочищения водной экосистемы от радионуклидов (за счет распада радиоактивных веществ), так и механизмы перераспределения радионуклидов из воды в другие компоненты, прежде всего, в донные отложения.

2. Содержание ^{60}Co в донных отложениях Теплового залива (затопленная почва) за более чем 20-летний период уменьшилось в 240 раз, ^{137}Cs — в 7 раз. За это же время концентрация ^{60}Co в донных грунтах Промливневого канала снизилась в 362 раза, ^{137}Cs — в 44 раза. Содержание ^{90}Sr в донных отложениях Теплового залива, наоборот, увеличилось с 22.4 до 52.7 Бк/кг, а в грунтах Промливневого канала уменьшилось с 300 до 49.3 Бк/кг.

3. Наиболее высокое содержание ^{137}Cs в рдесте гребенчатом было отмечено в р. Ольховка, которая в течение многих лет была подвержена сбросам жидких радиоактивных отходов низкого уровня с БАЭС. Содержание ^{137}Cs в роголистнике темно-зеленом из Теплового залива Белоярского водохранилища за период 1980-е годы — 2011 г. уменьшилось в 11.5 раз, в рдесте гребенчатом из Промливневого канала за этот период снизилось в 383 раза. Концентрация ^{90}Sr в роголистнике темно-зеленом из Теплового залива водоема-охладителя за указанный период, напротив, возросла в 2 раза. Это можно объяснить тем, что механизм поступления ^{90}Sr иной, чем для ^{137}Cs , который по-

ступает в водоем-охладитель через Промливневый канал. В отличие от последнего, ^{90}Sr имеет в основном глобальное происхождение.

4. Содержание ^{137}Cs в щуке из Белоярского водохранилища за наблюдаемый период уменьшилось в 8.8 раза. Эффект такой же направленности прослеживается на примере плотвы, содержание ^{137}Cs в которой снизилось в 25.8 раза.

5. Из шести малых рек, расположенных в зоне наблюдения БАЭС, уровни содержания радиоактивных веществ максимальны в р. Ольховка, которая в течение ряда лет была подвержена сбросам слаборадиоактивных вод с Белоярской АЭС. В остальных пяти исследованных реках после 47-летнего периода эксплуатации БАЭС содержание радионуклидов (исследован 21 нуклид) в основных компонентах водных экосистем, в целом, соответствует уровню регионального фона.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы фундаментальных исследований Президиума РАН “Комплексная программа УрО РАН”, проект № 15-2-4-12.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуканов В.Н., Волобуев П.В., Дрожко Е.Г. и др. Генезис и концепция Государственной программы Российской Федерации по радиационной реабилитации Уральского региона. Екатеринбург, 1993. С. 4–5.
2. Ленченко В.Г., Сажина Л.А., Шилкова Е.В. Санитарно-гигиенический очерк реки Пышмы и Белоярского водохранилища // Мат. XIII научн. сессии Свердловского НИИ гигиены труда и профпатологии, Свердловск, 1964. С. 102–106.
3. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н. Радиоэкология пресноводных экосистем / Под ред. Б.В. Тестова, П.В. Волобуева. Екатеринбург: Изд-во УрГСХА, 2006. С. 51, 134, 211, 328.
4. Smedile E., Queirazza G. Uptake of ^{60}Co and ^{137}Cs in different components of a river ecosystem connected with discharges of a nuclear power station // Radioecol. And Energy Resour.: Proc. 4th Nat. Symp. Radioecol., Corvallis, OR, 12–14 May 1975. Stroudsburg, PA, 1976. P. 1–8.
5. Smedile E., Queirazza G., Guzzi L. et al. Nuclear power station discharge: radioecological methodologies // Health Phys. 1980. V. 38. № 1. P. 105–106.
6. Буянов Н.И. Концентрация ^{90}Sr и ^{137}Cs в районе сброса теплых вод Кольской АЭС // Экология. 1981. № 3. С. 66–70.
7. Куликов Н.В. Экология и атомная энергетика // Экология. 1981. № 4. С. 5–11.
8. Куликов Н.В. Проблемы радиоэкологии водоемов-охладителей АЭС // Радиационная безопасность и защита АЭС / Под ред. Ю.А. Егорова. Вып. 7. М.: Энергоатомиздат, 1982. С. 185–188.
9. Кузьменко М.И., Волкова Е.Н., Кленус В.Г. и др. Радиоактивное загрязнение Днепра и его водохрани-

- лищ и некоторые гидроэкологические мероприятия после аварии на Чернобыльской АЭС // Гидробиол. журн. 1992. Т. 28. № 6. С. 86–94.
10. Вода. Общие требования к отбору проб. ГОСТ 51592-2000. М.: ИПК Изд-во стандартов, 2000. С. 1–31.
 11. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность. ГОСТ 17.1.5.01-80. М.: Изд-во стандартов, 1980. С. 1–5.
 12. *Chen Q., Aarkrog A., Nielsen S. P. et al.* Determination of plutonium in environmental samples by controlled valence in anion exchange // *J. Radioanalyt. Nucl. Chem.* 1993. V. 172. № 2. P. 281–288.
 13. *Чеботина М.Я., Трапезников А.В., Трапезникова В.Н. и др.* // Радиоэкологические исследования Белоярского водохранилища / Под ред. В.Н. Большакова. Свердловск: Изд-во УрО РАН, 1992. С. 19–31, 42, 50, 64.
 14. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. М., 2009. С. 77.

Поступила в редакцию
5.06.2014

Dynamics of Radioecological State of the Fresh-Water Ecosystems Affected by a Long-Term Impact from Nuclear Power Plant in the Frontiers of the Zone under Observation

A. V. Trapeznikov, V. N. Trapeznikova, A. V. Korjavin

*Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 624250 Russia;
e-mail: vera_zar@mail.ru*

The results of radioecological studies of six small rivers situated in the surveillance zone of the Beloyarskaya NPP (BNPP) and around the cooling pond of the power plant are presented. 21 radionuclides and the total α - and β -activity were studied in the main components of the aquatic ecosystems. It is shown that after the 1st and 2nd BNPP blocks decommissioning the content of ^{60}Co and ^{137}Cs in the Beloyarskoye storage pond water, sediments, fish fauna and macrophytes dropped tens and hundreds of times. The fundamental importance of this fact is that in a large range of time the aquatic ecosystem mechanism of self-purification from radionuclides is working due to radioactive substances decay as well as redistribution of radionuclides from water to other components, primarily to the sediments. Of 6 small rivers the maximum levels of radioactive substances is found in the river Olkhovka, which for several years has been subjected to the low-level radioactive water discharges from Beloyarskaya NPP. The radionuclide content in the main components of the aquatic ecosystems of the other five rivers studied after BNPP 47-year operation period corresponds to the regional background.