УДК 574.5 : 502.175 : 621.039.7 (285.2 : 470.54)
DOI 10.25016/2541-7487-2018-0-2-70-82

**А.В. Коржавин, В.Н. Трапезникова,
А.В. Трапезников, В.Н. Николкин, А.П. Платаев**

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОЕМА-ОХЛАДИТЕЛЯ БЕЛОЯРСКОЙ АЭС ПОСЛЕ ВВОДА В ЭКСПЛУАТАЦИЮ 4-ГО ЭНЕРГОБЛОКА БН-800

Институт экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук
(Россия, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202)

Актуальность. Ввод в эксплуатацию новых мощностей на действующих атомных электростанциях может быть сопряжен с увеличением радиационной нагрузки на природную среду и человека. На Белоярской атомной станции (БАЭС) в 2016 г. был введен в эксплуатацию 4-й энергоблок БН-800. В качестве водоема-охладителя используется образованное в 1959–1963 гг. Белоярское водохранилище. Перед пуском блока БН-800 в 2014 г. было проведено радиоэкологическое обследование водоема-охладителя, результаты которого опубликованы в № 2 данного журнала за 2016 г.

Цель – в сравнительном аспекте с результатами предыдущих исследований показать влияние пуска энергоблока БН-800 на радиоэкологическое состояние водоема-охладителя.

Методология. Исследованы пробы воды и макрофитов (рдест гребенчатый, роголистник темно-зеленый, спирогира, кладофора) в реперных точках водоема-охладителя.

Результаты и их анализ. Установлено, что содержание ^{137}Cs в воде по сравнению с 2014 г. во всех реперных точках (включая сбросной канал 4-го энергоблока) снизилось в 1,4–5,9 раза. Содержание ^{137}Cs в рдесте гребенчатом из сбросного канала 4-го энергоблока оказалось в 3,1 раза ниже, а ^{90}Sr в 1,4 раза ниже, чем в макрофитах из реки Пышма ниже плотины.

Заключение. Ввод в эксплуатацию энергоблока БН-800 не сопровождался дополнительной радиационной нагрузкой на водохранилище и не оказывает отрицательного влияния на процессы самоочищения водоема после вывода из эксплуатации 1-го и 2-го блоков Белоярской АЭС. Сохранение в дальнейшем природных ресурсов Белоярского водохранилища предполагает систематическое ведение радиоэкологического мониторинга с целью определения уровней содержания долгоживущих радионуклидов в основных природных компонентах водоема-охладителя.

Ключевые слова: радиобиология, чрезвычайная ситуация, атомная электростанция, водоем-охладитель АЭС, энергоблок БН-800, техногенные радионуклиды, вода, макрофиты.

UDC 574.5 : 502.175 : 621.039.7 (285.2 : 470.54)
DOI 10.25016/2541-7487-2018-0-2-70-82

**A.V. Korzhavin, V.N. Trapeznikova,
A.V. Trapeznikov, V.N. Nikolkin, A.P. Plataev**

FIRST RESULTS OF THE RADIOECOLOGICAL RESEARCH OF THE BELOYARSK NPP COOLING POND AFTER THE 4TH UNIT BN-800 COMMISSIONING

Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences
(202, 8 March Str., Ekaterinburg, 620144, Russia)

Relevance. New units commissioning at the operating nuclear power plants may be associated with an increase in the radiation load on environment and human beings. The 4th Unit BN-800 was commissioned at the Beloyarsk nuclear power plant (BNPP) in 2016. The Beloyarsk artificial lake created in 1959–1963 serves as a cooling pond. A radioecological study of the cooling pond was performed in 2014 before the BN-800 Unit commissioning. Its results were published in the issue No. 2 of the present journal in 2016.

✉ Коржавин Александр Васильевич – канд. ветеринар. наук, зам. зав. отд. континентальной радиоэкологии, Ин-т экологии растений и животных Урал. отд-ния Рос. акад. наук (Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202), e-mail: bfs_zar@mail.ru;

Трапезникова Вера Николаевна – канд. биол. наук, ст. науч. сотр., Ин-т экологии растений и животных Урал. отд-ния Рос. акад. наук (Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202), e-mail: vera_zar@mail.ru;

Трапезников Александр Викторович – д-р биол. наук, зав. отд. континентальной радиоэкологии, Ин-т экологии растений и животных Урал. отд-ния Рос. акад. наук (Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202), e-mail: vera_zar@mail.ru;

Николкин Виктор Николаевич – науч. сотр., Ин-т экологии растений и животных Урал. отд-ния Рос. акад. наук (Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202), e-mail: bfs_zar@mail.ru;

Платаев Анатолий Петрович – мл. науч. сотр., Ин-т экологии растений и животных Урал. отд-ния Рос. акад. наук (Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202), e-mail: ty1985@mail.ru

Intention. The objective of the work is to show (comparing with the results of the previous research) the effect of the BN-800 Unit commissioning on the cooling pond radioecological state.

Methodology. The samples of water and macrophytes (Potamogeton pectinatus, Ceratophyllum demersum, Spirogyra, Cladophora) were examined at the reference points of the cooling pond.

Results and Discussion. It was found that ^{137}Cs decreased in the water by 1.4–5.9 times in all reference points (including the 4th NPP Unit discharge channel) compared to 2014. Potamogeton pectinatus (from the 4th NPP Unit discharge channel) had 3.1 times less ^{137}Cs and 1.4 times less ^{90}Sr than macrophytes from the Pyshma river area below the dam.

Conclusion. The BN-800 Unit commissioning was not associated with additional radiation load on the artificial lake. It does not deleteriously affect the natural purification processes after the 1st and 2nd BNPP Units decommissioning. The further preservation of the Beloyarsk artificial lake natural resources assumes a systematic radioecological monitoring to determine the level of long-lived radionuclides in main natural components of the cooling pond.

Keywords: radiobiology, emergency situation, nuclear power plant, NPP cooling pond, BN-800 Unit, artificial radionuclides, water, macrophytes.

Введение

Белоярская атомная электростанция им. И.В. Курчатова (БАЭС) расположена в г. Заречный Свердловской области – единственная в России АЭС с разными типами реакторов на одной площадке, самая старая из действующих ныне атомных электростанций. На станции были сооружены 4 энергоблока: 2 – с реакторами на тепловых нейтронах и 2 – с реакторами на быстрых нейтронах. В настоящее время на станции 2 действующих блока: 3-й энергоблок с реактором БН-600, запущенный в эксплуатацию 8 апреля 1980 г. Это первый в мире энергоблок промышленного масштаба с реактором на быстрых нейтронах и 4-й блок БН-800, который также представляет собой крупнейший в мире действующий энергоблок с реактором на быстрых нейтронах.

Реактор БН («быстрые нейтроны») является экспериментальной технологией ядерной индустрии. В физике такой реактор еще называют бридером от английского слова breed, которое переводится «размножать». Блоки типа БН способны производить плутоний. Согласно проекту, в реакторе БН-800 позволяется не только использовать энергетический плутоний, но и перерабатывать оружейный плутоний. Также блок дает возможность утилизировать актиниды из облученного топли-

Introduction

The Beloyarsk nuclear power plant (BNPP) is named in honour of I.V. Kurchatov. It is situated in the city of Zarechny, Sverdlovsk Region (Russia). It is the only NPP in Russia with different types of reactors located in one place as well as the oldest operating NPP. Four power units were constructed at the plant: 2 had thermal neutron reactors and 2 – fast neutron reactors. Two reactors are now in operation. They are the 3rd Unit BN-600 (the first industrial-scale unit with fast neutron reactor in the world) commissioned on 8 April 1980 and the 4th Unit BN-800, the largest fast neutron reactor unit in the world.

Reactor BN (from Russian “fast neutrons”) is an experimental technology in nuclear industry. This type of reactor is also called breeder in physics (from English “breed”). BN units can produce plutonium. According to the project, BN-800 can both use energy plutonium and recycle weapon plutonium. Moreover, it provides opportunity for utilising actinides of irradiated fuel from fuel reactors. BN-800 is considered to be a safe unit; the reactor is equipped with an additional emergency protection system. Its work is based on passive elements which become active with environment temperature rising. The reactor project corresponds to all environmental requirements. Thus, documentation has specified reduction in

✉ Aleksandr Vasil’evich Korzhavin – PhD Veterinary Sci., Deputy Head of the Department of Continental Radioecology, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (202, 8 March Str., Ekaterinburg, 620144, Russia), e-mail: bfs_zar@mail.ru;

Vera Nikolaevna Trapeznikova – PhD. Biol. Sci., Senior Research Associate, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (202, 8 March Str., Ekaterinburg, 620144, Russia), e-mail: vera_zar@mail.ru;

Aleksandr ViktorovichTrapeznikov – Dr. Biol. Sci., Head of the Department of Continental Radioecology, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (202, 8 March Str., Ekaterinburg, 620144, Russia), e-mail: vera_zar@mail.ru;

Viktor Nikolaevich Nikolkin – Research Associate, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (202, 8 March Str., Ekaterinburg, 620144, Russia) (202, 8 March Str., Ekaterinburg, 620144, Russia), e-mail: bfs_zar@mail.ru;

Anatolij Petrovich Plataev – Junior Research Associate, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (202, 8 March Str., Ekaterinburg, 620144, Russia), e-mail: ty1985@mail.ru

ва реакторов на тепловых нейтронах. БН-800 считается безопасной установкой, реактор оборудован дополнительной системой аварийной защиты. Она работает на основе пассивных элементов, которые активизируются при повышении температуры окружающей среды. Проект реактора соответствует всем экологическим требованиям. Так, документацией предусмотрено сокращение потребления атмосферного кислорода и органического топлива, утилизация продуктов деления ядерных материалов и других радиоактивных отходов. Энергоблок призван существенно расширить топливную базу атомной энергетики и минимизировать радиоактивные отходы за счет организации замкнутого ядерно-топливного цикла [2, 4–6].

Первые два блока с водографитовыми канальными реакторами АМБ-100 и АМБ-200 функционировали в 1964–1981 гг. и 1967–1989 гг. и были остановлены в связи с выработкой ресурса. Топливо из реакторов выгружено и находится на длительном хранении в специальных бассейнах выдержки, расположенных в одном здании с реакторами. В рамках вывода 1-го и 2-го блоков из эксплуатации с 2017 г. начался вывоз ядерного топлива. Все технологические системы, работа которых не требуется по условиям безопасности, остановлены. В работе находятся только вентиляционные системы для поддержания температурного режима в помещениях и система радиационного контроля, работа которых круглосуточно обеспечивается квалифицированным персоналом. В апреле 2014 г. начаты работы по разбору реакторов.

Проект реактора БН-800 прошел все экспертизы и проверки. Результаты всех проверок были положительными. И уже в 1997 г. была выдана лицензия Госатомнадзора России на установку реактора. Новый 4-й энергоблок БАЭС с реактором БН-800 27 июня 2014 г. был выведен на минимальный контролируемый уровень мощности. 10 декабря 2015 г. блок № 4 включен в сеть и выработал первую электроэнергию в энергосистему Урала. 17 сентября 2016 г. энергоблок № 4 с реактором БН-800 выведен на 100 % мощности, а 31 октября 2016 г. – сдан в промышленную эксплуатацию.

Как и любая АЭС, БАЭС является потенциальным источником загрязнения окружающей среды. Выход радиоактивных веществ во внешнюю среду может происходить во время штатной работы АЭС, а чаще всего при возникновении нештатных ситуаций. За период эксплуатации БАЭС было несколько аварий и серьезных неисправностей. Первая авария произошла 29 мая 1976 г., когда на 2-м блоке при выходе его на мощность после срабатывания аварийной защиты реак-

consumption of atmospheric oxygen and organic fuel, utilisation of nuclear materials fission products and other radioactive wastes. The unit is meant to broaden considerably the nuclear power industry fuel base and minimise radioactive wastes by organising closed nuclear fuel cycle [2, 4–6].

The first two units with water-cooled graphite-moderated channel reactors AMB-100 and AMB-200 operated in 1964–1981 and 1967–1989. They were stopped due to fuel exhaustion. The fuel was discharged from them and placed for a long storage into special spent fuel pools in the same building where the reactors are situated. Removal of the nuclear fuel started from 2017 in the framework of the 1st and 2nd units decommissioning. All manufacturing systems which functioning is unnecessary according to the safety terms were stopped. Ventilation for temperature control within the building and radiation control are the only systems functioning and they are maintained by highly skilled personnel. Reactors demolition process started in April 2014.

The BN-800 Unit project underwent all inspections and tests. The results of all tests were positive. Federal Nuclear and Radiation Safety Authority of Russia (Gosatomnadzor) issued a licence for BN-800 construction in 1997. The new 4th BNPP Unit with BN-800 reactor achieved minimum controlled power on 27 June 2014. It was connected and generated its first electricity into the Ural Power Grid on 10 December 2015. BN-800 achieved 100 % capacity on 17 September 2016 and was commissioned on 31 October 2016.

Any NPP including BNPP is a potential source for environment contamination. Radioactive substances may be released uncontrolled into the ambient medium during the NPP routine operations, but more often during emergency situations. There were several accidents and serious damages during BNPP operation. The first accident happened on 29 May 1976. Fuel rod array of several ten channels was damaged after reactor safety tripping at power ascension in the 2nd unit. Regarding its potential hazard and delivered property damage, this accident is considered as severe; post-accident recovery works continued about 9 months. The first 2 days showed an increased gas-aerosol escape which, nevertheless, was acceptable according to sanitary regulations SP No. 38/3–68 (not more than 5-fold single escape). Short-time gamma background increase was observed along the

тора возникло повреждение тепловыделяющей сборки (ТВС) нескольких десятков каналов. С точки зрения потенциальной опасности и нанесенного материального ущерба, эта авария относится к разряду тяжелых – восстановительные работы длились около 9 мес. В течение первых 2 сут наблюдался повышенный газоаэрозольный выброс, но при этом он не превысил допустимого 5-кратного одноразового выброса по СП № 38/3–68. Кратковременное увеличение гамма-фона наблюдалось по ходу распространения факела и не превышало в г. Заречном 40–80 мкР/ч. В дальнейшем, в период с 1978 по 1990 г. на 2-м и 3-м энергоблоках были еще несколько нарушений нормальной эксплуатации блоков, которые не приводили к радиационному воздействию на население и окружающую среду [1].

Вышесказанное подтверждает необходимость осуществления постоянного радиоэкологического мониторинга за объектами, расположенными на прилегающей к действующей АЭС территории. В качестве водоема-охладителя БАЭС используется Белоярское водохранилище, которое было образовано в 1959–1963 гг. путем зарегулирования русла реки Пышма. Радиоэкологическое обследование водоема-охладителя перед пуском блока БН-800 (нулевой уровень) было проведено в 2014 г., результаты которого опубликованы в № 2 данного журнала за 2016 г. Цель данной работы – в сравнительном аспекте провести анализ результатов обследования Белоярского водохранилища до и после пуска БН-800 для выяснения влияния нового энергоблока на радиоэкологическое состояние водоема-охладителя.

Материал и методы

Координаты точек отбора проб определяли при помощи спутниковой навигационной системы GPS (табл. 1). Пробы воды для анализов на содержание радионуклидов отбирали в полиэтиленовые емкости и сразу подкисляли азотной кислотой, предотвращая сорбцию радионуклидов на стенках сосудов. Для получения объективных результатов все пробы воды отбирали в двух повторностях по 150 л в каждой. Подготовка проб воды заключалась в выпаривании воды до сухого остатка. Сухой остаток помещали в муфельную печь при t = 450 °С на 8 ч. После остывания остаток растирали пестиком до мелкодисперстного порошка.

Макрофиты (рдест гребенчатый, роголистник темно-зеленый, спирогира, кладофора) отбирали по 3–5 кг сырой массы на повторность. Растения отмывали от загрязнений, взвешивали и высушивали до воздушно-сухого состояния, после чего озоляли в муфельной печи при t = 450 °С.

flame travel and did not exceed 40–80 μR/hr in Zarechny. Later on there were also several damages in the 2nd and 3rd units within 1978–1990 which did not lead to irradiation of population and environment [1].

The above mentioned information confirms the necessity of constant radioecological monitoring of the objects located at the operating NPP territory. The Beloyarsk artificial lake created in 1959–1963 by construction of a dam in the Pyshma River serves as a cooling pond for BNPP. A radioecological study of the cooling pond was performed in 2014 before the BN-800 Unit commissioning (zero level). Its results were published in the issue No. 2 of the present journal in 2016. The objective of the work is to compare the results of the Beloyarsk artificial lake studies before and after the BN-800 Unit commissioning to determine the effect of the new unit on the cooling pond radioecological state.

Materials and Methods

Geographic coordinates for sampling points were defined using GPS (Table 1). Water samples for radionuclides analysis were collected into polyethylene containers and acidified straight away with hydrogen nitrate preventing radionuclides sorption on containers walls. Water was sampled in an amount of 150 L, twice to get unbiased results. Samples preparation involved water evaporation to solid residue state. The solid residue was placed into the muffle oven at t = 450 °C for 8 hr. After cooling down the residue was pestled to finely dispersed powder.

Macrophytes (Potamogeton pectinatus, Ceratophyllum demersum, Spirogyra, Cladophora) were sampled in 3–5 kg of the raw mass, also repeatedly. The plants were washed clean, weighed and dried to air-dried state, then ashed in the muffle oven at t = 450 °C.

Instrumental methods were used to detect ^{137}Cs in samples of the environmental media. The measurements were done using low-background semiconductor gamma-spectrometer “Ortec” (the USA) with coaxial detection system based on highly purified germanium (HPGe), with 40 % efficiency, measurement error less than 10 % and lower detection limit 0.005 Bq/kg considering water concentration.

^{90}Sr was detected in samples with low activity using radiochemical method based

Для определения содержания ^{137}Cs в образцах природных сред использовали инструментальные методы. Измерения проводили на низкофоновом полупроводниковом гамма-спектрометре фирмы «Ortec» (США) с коаксиальной детекторной системой на базе высокоочищенного германия (HPGe) с эффективностью 40 % при ошибке измерения не более 10 % и нижнем пределе обнаружения с учетом концентрирования воды 0,005 Бк/кг.

Определение ^{90}Sr в образцах с низкой активностью проводили радиохимическим методом, основанном на выщелачивании химических элементов 6-нормальной соляной кислотой с последующим осаждением оксалатов щелочно-земельных элементов и выделением из раствора оксалатов ^{90}Sr в виде карбонатов. Содержание ^{90}Sr определяли по дочернему ^{90}Y. Измерение β-активности проводили на малофоновой установке УМФ-2000 с нижним пределом обнаружения с учетом концентрирования 0,02 Бк/кг и статистической ошибкой измерения не более 10 %.

Достоверность результатов достигали параллельным отбором и исследованием образцов природных сред в двух повторностях. Статистическая обработка результатов заключалась в определении среднеарифметического значения и среднего квадратичного отклонения (M ± σ). Оценку достоверности различий данных, полученных в 2014 г. и в 2017 г., проводили с использованием двухвыборочного t-критерия Стьюдента для независимых выборок с уровнем статистической значимости 0,05.

Результаты и их анализ

Содержание техногенных радионуклидов в пробах воды. Содержание основных техногенных радионуклидов в воде Белоярского водохранилища представлено в табл. 1.

Согласно НРБ 99/2009 [3], уровни вмешательства при содержании в воде отдельных радионуклидов составляют: ^{90}Sr – 4,90 Бк/кг, ^{137}Cs – 11,0 Бк/кг. Таким образом, содержание в воде Белоярского

on chemicals leaching with 6-normal hydrochloric acid with further alkaline-earth elements oxalates subsidence and ^{90}Sr disengagement out of oxalates solution in the form of carbonates. ^{90}Sr content was defined using daughter radionuclide ^{90}Y. в-activity was measured using low-background facility UMF-2000 with lower detection limit 0.02 Bq/kg considering concentration and statistical measurement error less than 10 %.

Study validity was achieved by means of parallel sampling and repeated research. The results were statistically processed with counting average meaning and standard mean error (M ± s). Significance of differences in data obtained in 2014 and 2017 was evaluated using Student's unpaired t-test with a significance level of 0.05.

Results and Discussion

Artificial radionuclides in water samples. Main artificial radionuclides in water of Beloyarsk cooling pond are presented in Table 1.

According to the radiation safety standards NRB 99/2009 [3], the intervention levels for specific water radionuclides are the following: ^{90}Sr – 4.90 Bq/kg, ^{137}Cs – 11.0 Bq/kg. Thus, amounts of the indicated radionuclides in the water of the Beloyarsk cooling pond are considerably lower than the intervention levels. ^{137}Cs volumic activity is three times as low and ^{90}Sr – twice as low as the intervention levels.

Figure 1 shows the change in artificial radionuclides concentration in the water of the Beloyarsk cooling pond from 2014 (zero level before the 4th BNPP unit commissioning) to 2017 (after the 4th BNPP unit commissioning). It demonstrates a ^{137}Cs decrease in all reference points over the indicated period. Thus, the radionuclide volumic ac-

Таблица 1

Контрольные точки отбора проб воды и макрофитов

Table 1. Water and Macrophytes Sampling Control Points

Место отбора проб Sampling Site	Предполагаемый источник поступления радионуклидов в водоем Supposed Source of Radionuclides in the Water Basin	Географические координаты точек отбора проб Sampling Points Geographic Position
р. Пышма ниже плотины The Pyshma River, area lower the dam	Интегральный сброс из водохранилища Integral discharge from the artificial lake	N 56° 78,833′; E 61° 30,865′
Район Биофизической станции Biophysical station area	Обводной канал Diversion channel	N 56° 84,045′; E 61° 31,062′
Сбросной канал 4-го энергоблока 4th NPP Unit discharge channel	4-й энергоблок 4th NPP Unit	N 56° 87,233′; E 61° 27,847′
Теплый залив Warm Bay	1-, 2-й и 3-й энергоблоки 1st, 2nd and 3rd NPP Units	N 56° 82,493′; E 61° 32,774′

водохранилища указанных радионуклидов значительно ниже уровня вмешательства. Объемная активность ^{137}Cs на три порядка величин ниже уровня вмешательства, содержание ^{90}Sr – ниже уровня вмешательства на два порядка величин.

На рис. 1 показано изменение содержания техногенных радионуклидов в воде Белоярского водохранилища с 2014 г. (нулевой уровень перед пуском 4-го энергоблока) до 2017 г. (после ввода в эксплуатацию 4-го блока БАЭС). Показано, что во всех реперных точках за указанный период произошло снижение содержания ^{137}Cs. Так, в сбросном канале 4-го энергоблока объемная активность радионуклида снизилась в 1,4 раза, в районе Биофизической станции – в 5,9 раза ($p < 0,05$), в Теплом заливе – в 5,3 раза ($p < 0,05$), а в реке Пышма ниже плотины – в 3 раза ($p < 0,05$).

Изменения содержания ^{90}Sr в воде водохранилища за указанный период менее значительны и в отличие от ^{137}Cs не имеют общей тенденции, характерной для всех реперных точек (табл. 2). Так, в воде Теплого залива содержание ^{90}Sr осталось практически на прежнем уровне, в воде сбросного канала 4-го блока хоть и увеличилось на 21 %, но в пределах статистической погрешности. В реперных точках, расположенных в районе Биофизической станции и на реке Пышма, объемная активность ^{90}Sr уменьшилась в 1,8 ($p < 0,05$) и 2,2 раза ($p < 0,05$) соответственно.

Содержание радионуклидов в водных растениях. Водные растения поглощают поступающие

tivity decreased by 1.4 times in the 4th NPP Unit discharge channel, by 5.9 times in the Biophysical station area, by 5.3 times in the Warm Bay and by 3 times in the Pyshma River area lower the dam.

As for the changes in ^{90}Sr content in the water of the cooling pond, they are less significant over the indicated period and, unlike ^{137}Cs, do not have general tendency typical for all reference points (Table 2). Thus, ^{90}Sr stayed practically the same in the water of the Warm Bay, and, though increased by 21 % in the water of the 4th NPP Unit discharge channel, stayed within statistical error. ^{90}Sr volumic activity decreased by 1.8 and 2.2 times in the reference points of the Biophysical station area and the River Pyshma, respectively.

Radionuclides in aquatic plants. Aquatic plants absorb radionuclides released into the water environment. In this regard the concentration of many radionuclides may stay high enough in plants tissues for a long period of time exceeding their concentration in water by several orders of magnitude [8]. ^{90}Sr and ^{137}Cs content in aquatic plants of the Beloyarsk cooling pond is presented in Table 3.

Four plant species of the cooling pond were selected for research in 2017. They are Potamogeton pectinatus, Ceratophyl-

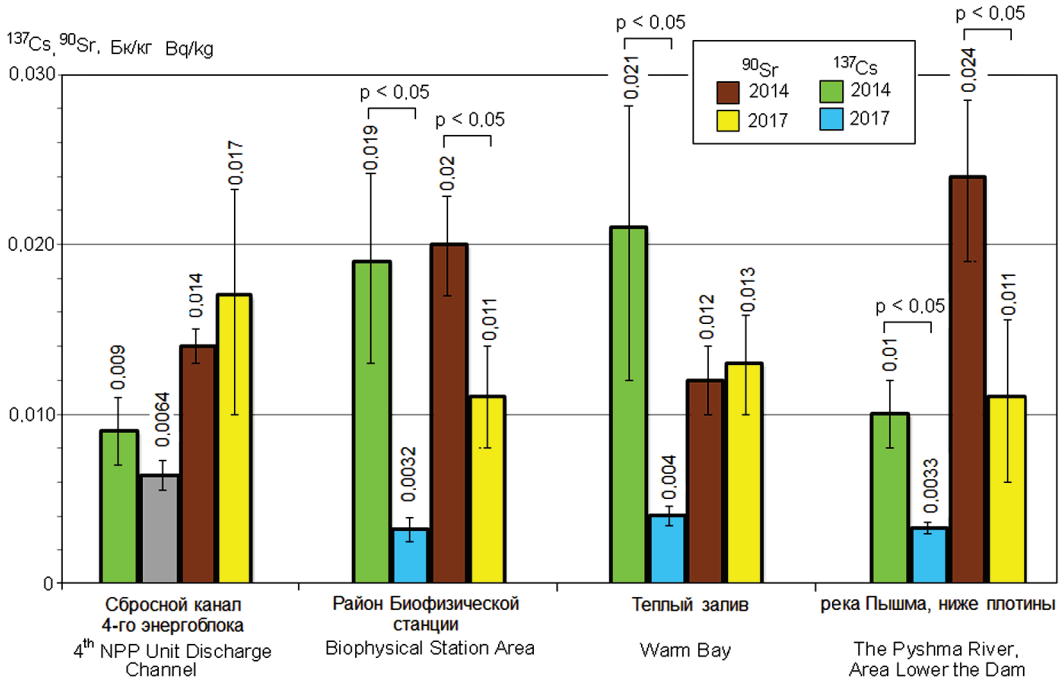

Рис. 1. Содержание радионуклидов в воде водоема-охладителя Белоярской АЭС в 2014 г. и 2017 г.

Fig. 1. Radionuclides Content in the Water of the Beloyarsk NPP Cooling Pond in 2014 and 2017.

Таблица 2

Содержание радионуклидов в воде Белоярского водохранилища

Table 2. Radionuclides Content in the Water of the Beloyarsk Artificial Lake

Место отбора проб Sampling Site	Проба Sample	Радионуклид, Бк/кг Radionuclide, Bq/kg	
		^{137}Cs	^{90}Sr
Сбросной канал 4-го энергоблока 4th NPP Unit discharge channel	Повторная № 1 Repeated sample No.1	0.0073 ± 0.00068	0.024 ± 0.002
	Повторная № 2 Repeated sample No.2	0.0055 ± 0.00045	0.010 ± 0.0007
	Средняя Average sample	0.0064 ± 0.0009	0.017 ± 0.007
Район Биофизической станции Biophysical station area	Повторная № 1 Repeated sample No.1	0.0025 ± 0.00037	0.014 ± 0.0009
	Повторная № 2 Repeated sample No.2	0.0039 ± 0.00034	0.008 ± 0.0005
	Средняя Average sample	0.0032 ± 0.0007	0.011 ± 0.003
Теплый залив Warm Bay	Повторная № 1 Repeated sample No.1	0.0045 ± 0.00031	0.010 ± 0.0007
	Повторная № 2 Repeated sample No.2	0.0034 ± 0.00045	0.016 ± 0.001
	Средняя Average sample	0.0040 ± 0.0006	0.013 ± 0.003
р. Пышма, ниже плотины The Pyshma River, area lower the dam	Повторная № 1 Repeated sample No.1	0.0029 ± 0.00039	0.006 ± 0.0004
	Повторная № 2 Repeated sample No.2	0.0036 ± 0.00028	0.016 ± 0.001
	Средняя Average sample	0.0033 ± 0.00035	0.011 ± 0.005

в водную среду радионуклиды, при этом концентрация многих из них в тканях растений может длительное время поддерживаться на высоком уровне, превышающем на порядки величин их концентрацию в воде [8]. Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в водных растениях Белоярского водохранилища показано в табл. 3.

В 2017 г. на водохранилище отобраны для исследования четыре вида водной растительности: рдест гребенчатый, роголистник темно-зеленый, спирогира, кладофора. Показательно, что в ряде реперных точек для исследования удалось отобрать аналогичные виды растений. Рдест гребенчатый отобран в сбросном канале 4-го блока и реке Пышма. Установлено, что в растениях из реки Пышма содержание ^{90}Sr в 1,4 раза, а ^{137}Cs в 3,1 раза выше, чем в рдесте гребенчатом из сбросного канала 4-го блока. Роголистник темно-зеленый исследован в районе Биофизической станции и Теплом заливе. При этом содержание ^{137}Cs в 2,7 раза выше в растениях, отобранных из Теплого залива, а содержание ^{90}Sr, напротив, в 1,7 раза оказалось выше в роголистнике в районе Биофизической станции.

В 2014 г. из-за неблагоприятных погодных условий в достаточном количестве удалось отобрать и исследовать только два вида водных растений: роголистник темно-зеленый из Теплого залива и рдест гребенчатый из Промливневого канала.

lum demersum, Spirogyra and Cladophora. It is revealing that it was possible to select similar plant species in a number of reference points. Potamogeton pectinatus was sampled in the 4th NPP Unit discharge channel and the Pyshma River. It is found that plants from the Pyshma River had 1.4 times ^{90}Sr and 3.1 times ^{137}Cs higher concentration than Potamogeton pectinatus from the 4th NPP Unit discharge channel. Ceratophyllum demersum was studied in the Biophysical station area and the Warm Bay. Herewith, ^{137}Cs concentration was 2.7-fold higher in the plants from the Warm Bay in contrast to ^{90}Sr which appeared to be 1.7-fold higher in Ceratophyllum from the Biophysical station area.

In 2014 due to unfavourable weather conditions it was possible to sample sufficiently and study only two plant species: Ceratophyllum demersum from the Warm Bay and Potamogeton pectinatus from the Industrial-storm water channel. Ceratophyllum demersum from the Warm Bay had almost similar ^{137}Cs for 2014 and 2017, with a little difference within statistical error. As for ^{90}Sr, there are significant differences. ^{90}Sr content was 4.3 times higher ($p < 0.05$) in 2014 comparing to 2017 (Figure 2).

Таблица 3

Содержание радионуклидов в водных растениях

Table 3. Radionuclides Content in Aquatic Plants

Место отбора проб Sampling Site	Вид растения Plant Species	Проба Sample	Радионуклид, Бк/кг Radionuclide, Bq/kg	
			^{137}Cs	^{90}Sr
Сбросной канал 4-го энергоблока 4th NPP Unit discharge channel	Рдест гребенчатый Potamogeton pectinatus	Повторная № 1 Repeated sample No.1	8.7 ± 1.1	13.0 ± 1.1
		Повторная № 2 Repeated sample No.2	12.9 ± 1.3	16.2 ± 1.3
		Средняя Average sample	10.8 ± 2.1	14.6 ± 1.6
Район Биофизической станции Biophysical station area	Роголистник темно-зеленый Ceratophyllum demersum	Повторная № 1 Repeated sample No.1	11.5 ± 1.5	10.3 ± 0.9
		Повторная № 2 Repeated sample No.2	12.6 ± 1.4	14.2 ± 2.1
		Средняя Average sample	12.05 ± 0.55	12.25 ± 1.95
Теплый залив Warm Bay	Роголистник темно-зеленый Ceratophyllum demersum	Повторная № 1 Repeated sample No.1	31.9 ± 1.7	5.6 ± 0.4
		Повторная № 2 Repeated sample No.2	33.3 ± 1.5	8.9 ± 0.7
		Средняя Average sample	32.6 ± 0.7	7.25 ± 1.65
	Спирогира Spirogyra	Повторная № 1 Repeated sample No.1	21.1 ± 1.9	26.3 ± 1.2
		Повторная № 2 Repeated sample No.2	26.6 ± 1.3	35.1 ± 4.6
		Средняя Average sample	23.85 ± 2.75	30.7 ± 4.4
р. Пышма, ниже плотины The Pyshma River, area lower the dam	Рдест гребенчатый Potamogeton pectinatus	Повторная № 1 Repeated sample No.1	33.4 ± 2.1	22.4 ± 2.18
		Повторная № 2 Repeated sample No.2	33.5 ± 1.8	18.2 ± 0.67
		Средняя Average sample	33.45 ± 0.05	20.3 ± 2.1
	Кладофора Cladophora	Повторная № 1 Repeated sample No.1	32.8 ± 1.6	36.6 ± 3.97
		Повторная № 2 Repeated sample No.2	28.5 ± 1.9	32.4 ± 1.96
		Средняя Average sample	30.65 ± 2.15	34.5 ± 2.1

Содержание ^{137}Cs в роголистнике темно-зеленом из Теплого залива в 2014 г. и 2017 г. сопоставимо между собой, небольшая разница укладывается в пределы статистической погрешности. По содержанию ^{90}Sr различия существенные. В 2014 г. содержание ^{90}Sr в 4,3 раза было выше ($p < 0,05$), чем в 2017 г. (рис. 2).

Накопительную способность растений оценивали величиной коэффициента накопления (КН), представляющего собой отношение концентрации нуклида в растениях к его концентрации в воде. КН радионуклидов в водных растениях в 2017 г. представлены на рис. 3.

Более высокие КН у всех видов водных растений получены для ^{137}Cs (от 1688 до 10 136 ед.). Для ^{90}Sr показатели КН несколько ниже – от 558 до 3136. По месту произрастания наиболее высокие КН ^{137}Cs

Plant accumulation capacity was evaluated using concentration factor (CR), i. e. ratio of nuclide concentration in plants to its concentration in water. Radionuclides CR in plants for 2017 is presented in Figure 3.

Higher CR for all species of aquatic plants is obtained for ^{137}Cs (from 1,688 to 10,136 units). ^{90}Sr CR is slightly lower – from 558 to 3,136. Regarding plants origin, the higher ^{137}Cs CR was observed for species from the Warm Bay and the Pyshma River. Regarding plant species, the higher ^{137}Cs CR was obtained for Potamogeton pectinatus (10136) and Cladophora (9288) from the Pyshma River; it is slightly lower for Ceratophyllum demersum (8150) and Spirogyra (5963) from the Warm Bay. ^{90}Sr CR appeared to be

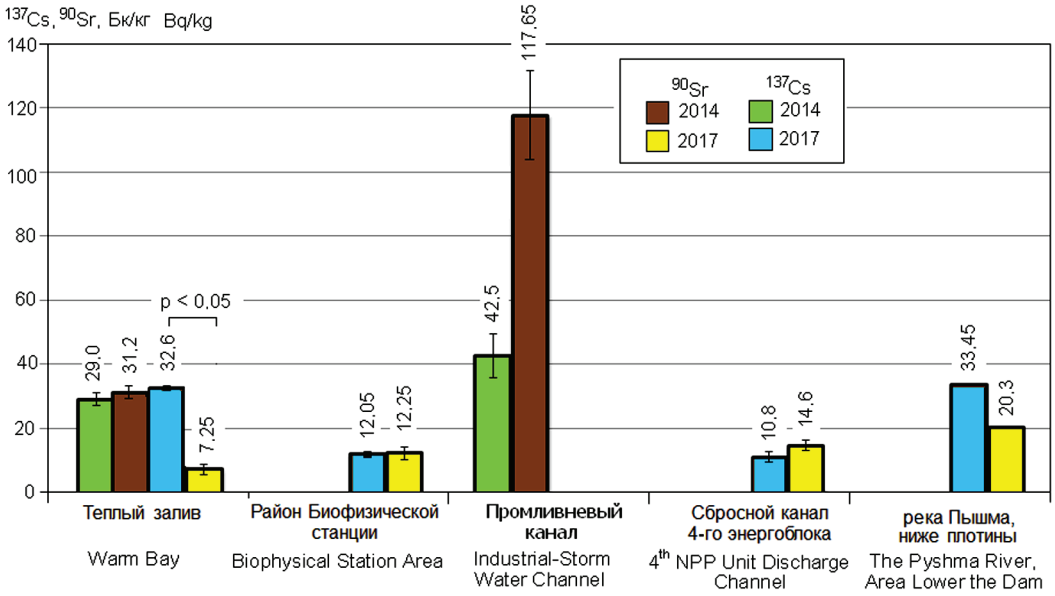

Рис. 2. Содержание радионуклидов в роголистнике темно-зеленом и рдесте гребенчатом водоема-охладителя Белоярской АЭС в 2014 г. и 2017 г.

Fig. 2. Radionuclides Content in Ceratophyllum Demersum and Potamogeton Pectinatus of the Beloyarsk NPP Cooling Pond in 2014 and 2017

наблюдались у растений из Теплого залива и реки Пышма. По видам растений высокие значения КН ^{137}Cs получены для рдеста гребенчатого (10 136) и кладофоры (9288) из реки Пышма, несколько ниже – для роголистника темно-зеленого (8150)

lower: 3,136 for Cladophora from the Pyshma River, 2,362 for Spirogyra from the Warm Bay. Yet lower CR was observed for Ceratophyllum demersum from the Biophysical station area (^{137}Cs – 3,766 units and ^{90}Sr –1,114

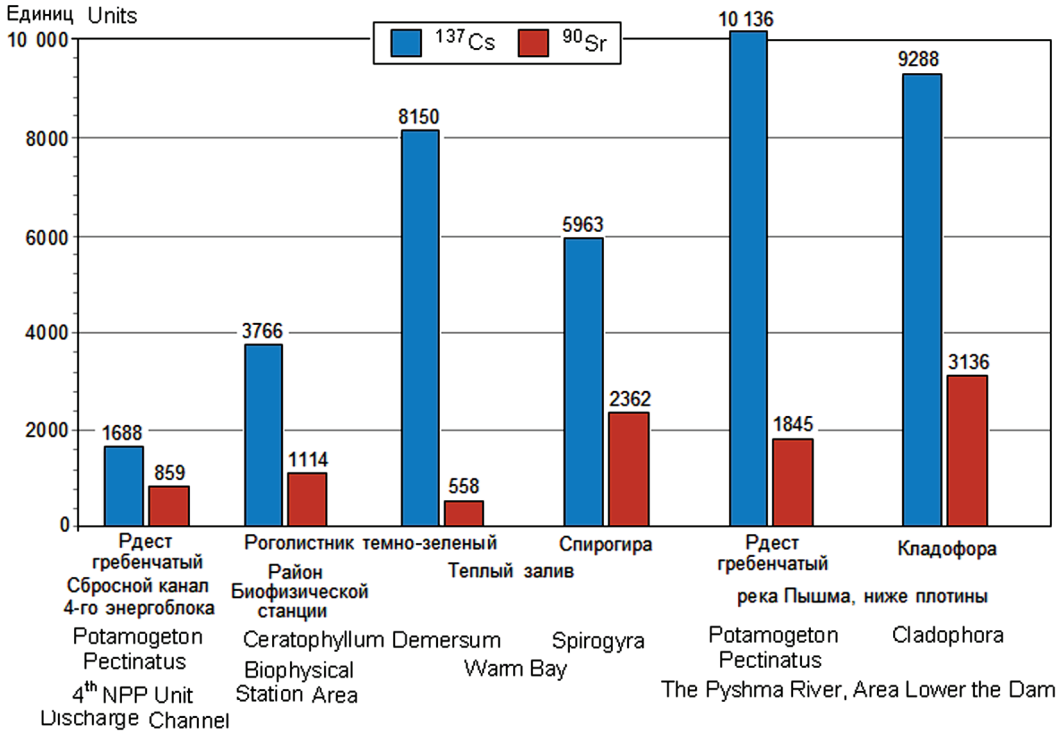

Рис. 3. Коэффициенты накопления радионуклидов в водных растениях водоема-охладителя Белоярской АЭС.

Fig. 3. Concentration factors of radionuclides in Aquatic Plants of the Beloyarsk NPP Cooling Pond.

и спирогиры (5963) из Теплого залива. Для ^{90}Sr КН оказались более низкими, так у кладофоры из реки Пышма КН составил 3136, у спирогиры из Теплого залива – 2362. Еще более низкие КН были отмечены у роголистника темно-зеленого в районе Биофизической станции (3766 ед. по ^{137}Cs и 1114 ед. по ^{90}Sr) и рдеста гребенчатого из сбросного канала 4-го энергоблока (1688 ед. по ^{137}Cs и 859 ед. по ^{90}Sr).

По сравнению с 2014 г. в 2017 г. КН в целом для ^{137}Cs несколько выросли, а для ^{90}Sr –снизились. Так, для роголистника темно-зеленого из Теплого залива КН по ^{137}Cs увеличился в 5,9 раза, а по ^{90}Sr, напротив, уменьшился в 4,7 раза. Для рдеста гребенчатого из Промливневого канала аналога в 2017 г. нет, а в 2014 г. его КН составили 2656 ед. по ^{137}Cs и 4706 ед. по ^{90}Sr.

Обсуждение. Известно, что радионуклиды в компонентах пресноводных экосистем распределяются неравномерно. На основании многолетних натурных исследований, было установлено, 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). Но при этом следует учитывать, что донные отложения хоть и накапливают значительное количество радионуклидов, но отражают их интегральные запасы, аккумулированные за многолетний период существования водоема. Более оперативную информацию о текущем состоянии водного объекта можно получить по результатам исследования воды и водной растительности. Результаты исследования воды отражают в основном свежие загрязнения, а макрофиты аккумулируют радионуклиды в течение вегетативного периода. Результаты исследования воды в 2017 г. показывают, что, несмотря на ввод дополнительных мощностей на БАЭС, во всех реперных точках (включая сбросной канал 4-го энергоблока) по сравнению с 2014 г. наблюдалось существенное снижение содержания ^{137}Cs в воде в 1,4–5,9 раза, что указывает на отсутствие дополнительного поступления радионуклида в водоем-охладитель после пуска в эксплуатацию 4-го энергоблока.

Изменения содержания ^{90}Sr менее значимы и не имеют общевыраженной тенденции. В воде Теплого залива содержание ^{90}Sr не изменилось, в воде сбросного канала 4-го блока – незначительно увеличилось в пределах статистической погрешности, а в районе Биофизической станции и реке Пышма – уменьшилось в 1,8 и 2,2 раза со-

units) and Potamogeton pectinatus from the 4th NPP Unit discharge channel (^{137}Cs – 1,688 units and ^{90}Sr – 859 units).

In general, ^{137}Cs CR slightly increased and ^{90}Sr CR decreased in 2017 comparing to 2014. Thus, ^{137}Cs CR increased by 5.9 times whereas ^{90}Sr CR decreased by 4.7 times for Ceratophyllum demersum from the Warm Bay. There was impossible to compare CR for Potamogeton pectinatus from Industrial-storm water channel in 2017, but its ^{137}Cs CR was 2,656 units and ^{90}Sr CR – 4,706 units in 2014.

Discussion. It is known that radionuclides in freshwater ecosystems components are distributed unevenly. Long-standing nature research has found that the main radionuclides depots in freshwater lakes are benthal deposits, in rivers – flood plain soils and flood plain lakes benthal deposits which absorb over 80 % of radioactive substances. They are followed by water component (from a fracture of a percent to 20 %) and finally by hydrobionts (as macrophytes can accumulate in total fractures of a percent from the total radionuclide activity in the lake). Herewith, it should be borne in mind that benthal deposits may accumulate a significant quantity of radionuclides, but reflect their integral stocks accumulated over the long time period of the lake existence. More operative information on present state of the water object can be obtained using the results of water and aquatic plants research. Water research results reflect basically fresh contamination, while macrophytes accumulate radionuclides during the vegetative period. Despite BNPP additional unit commissioning, the results of water research in 2017 showed that all reference points (including the 4th NPP Unit discharge channel) had a considerable ^{137}Cs decrease by 1.4–5.9 times in the water comparing to 2014, i. e. indicating the absence of additional radionuclides release into the cooling pond after the 4th Unit commissioning.

^{90}Sr changes were less considerable, without clear trends. ^{90}Sr concentration did not change in the water of the Warm Bay, increased slightly within statistical error in the water of the 4th NPP Unit discharge channel, decreased by 1.8 and 2.2 times in the Biophysical station area and the Pyshma River, respectively. Such different scenarios can be explained by different mechanisms of radionuclides release into the cooling pond. If

ответственно. Такое разное поведение радионуклидов можно объяснить разными механизмами их поступления в водоем-охладитель. Если основным путем поступления ^{137}Cs в водоем-охладитель всегда считался Промливневый канал, т. е. смывы с территории станции, напротив, ^{90}Sr имеет в основном глобальное происхождение и не связан с деятельностью атомной станции.

Отсутствие дополнительного поступления радионуклидов с 4-го энергоблока подтверждается также относительно низким содержанием последних в водных растениях сбросного канала. Пробы рдеста гребенчатого были отобраны параллельно в сбросном канале 4-го блока и реке Пышма ниже плотины, где интегрируются все сбросы с водоема-охладителя. В результате содержание ^{137}Cs в рдесте гребенчатом из сбросного канала оказалось в 3,1 раза ниже, а ^{90}Sr – в 1,4 раза ниже, чем из реки Пышма.

Динамика изменения содержания радионуклидов в водоеме-охладителе в период 2014–2017 гг. полностью согласуется с многолетними процессами, происходящими в данной водной экосистеме. Так, по результатам углубленного радиоэкологического обследования водоема-охладителя в 2011 г. и в сравнительном аспекте с ранее проведенными многолетними наблюдениями в 1976–1987 гг. было показано, что на протяжении более чем 20-летнего периода произошло существенное снижение содержания радионуклидов в основных компонентах водоема-охладителя БАЭС. Объемная активность ^{60}Co в воде Теплого залива уменьшилась в 800 раз и более, 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 – снизилась в 386 раз. Объемная активность ^{90}Sr в тех же точках снизилась в 3 и 5,7 раза соответственно. 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 1-го и 2-го блоков БАЭС. 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 [7].

Таким образом, ввод в эксплуатацию энергоблока БН-800 БАЭС не сопровождался дополнительной радиационной нагрузкой на водоем-охладитель и не оказывал отрицательного влияния на процессы самоочищения, которые наметились в данной водной экосистеме после вывода из эксплуатации 1-го и 2-го блоков БАЭС.

Industrial-storm water channel has always been considered as a main source of ^{137}Cs entry into the cooling pond, i. e. washouts from the station territory; ^{90}Sr, on the contrary, has mainly a global origin and is not related to the NPP operation.

Absence of additional radionuclides from the 4th NPP Unit is also confirmed by their relatively low concentration in the aquatic plants of the discharge channel. Potamogeton pectinatus was sampled simultaneously in the 4th NPP Unit discharge channel and the Pyshma River area below the dam where all discharges from the cooling pond are integrated. The content of ^{137}Cs and ^{90}Sr in Potamogeton pectinatus from the 4th NPP Unit discharge channel was 3.1 and 1.4 times lower than from the Pyshma River, respectively.

Changes of radionuclides concentrations in the cooling pond over the period of 2014–2017 are completely consistent with long-standing processes of the present water ecosystem. Thus, advanced radioecological research of the cooling pond in 2011 comparing to earlier long-time observations in 1976–1987 showed a considerable decrease in radionuclides concentration in main components of the BNPP cooling pond over more than 20-year period. ^{60}Co volumic activity in the water of the Warm Bay decreased by 800 times and more, in Industrial-storm water channel – by 5,600 times. ^{137}Cs volumic activity in the water of the Warm Bay decreased by over 100 times and in Industrial-storm water channel – by 386 times. ^{90}Sr volumic activity in the same points decreased by 3 and 5.7 times, respectively. Such considerable changes in radioecological state of the cooling pond in 2011 comparing to 1976–1987 became possible due to a number of reasons. Firstly, 1st and 2nd BNPP Units were decommissioned. Secondly, it was the result of long-time work of mechanisms of water ecosystem natural purification from radionuclides by radioactive substances decay as well as mechanisms of radionuclides redistribution from water into other components, to benthal deposits above all [7].

Thus, the BN-800 Unit commissioning was not associated with additional radiation load on the BNPP cooling pond and did not deleteriously affect the natural purification processes started after BNPP 1st and 2nd Units decommissioning.

Выводы

1. После ввода в эксплуатацию энергоблока БН-800 в воде Белоярского водохранилища наблюдалось снижение содержания ^{137}Cs в 1,4–5,9 раза по сравнению с 2014 г. (нулевой уровень перед пуском энергоблока), что свидетельствует об отсутствии дополнительного поступления радионуклида в водоем-охладитель.

2. Изменения содержания ^{90}Sr менее значимы и не имеют общевыраженной тенденции. Это объясняется разными механизмами поступления радионуклидов в водоем-охладитель. Основным путем поступления ^{137}Cs в водоем-охладитель всегда являлся Промливневый канал, т.е. смывы с территории станции. ^{90}Sr, напротив, имеет в основном глобальное происхождение и не связан с деятельностью атомной станции.

3. Отсутствие дополнительного поступления радионуклидов с 4-го энергоблока БН-800 подтверждается результатами исследования параллельных проб водных растений из сбросного канала 4-го энергоблока и реки Пышма ниже плотины, где интегрируются все сбросы с водоема-охладителя. Содержание ^{137}Cs в рдесте гребенчатом из сбросного канала оказалось в 3,1 раза ниже, а ^{90}Sr – в 1,4 раза ниже, чем из реки Пышма.

4. Динамика изменения содержания радионуклидов в водоеме-охладителе в период 2014–2017 гг. в полной мере согласуется с общими процессами самоочищения, которые стали возможны в данной водной экосистеме после вывода из эксплуатации 1-го и 2-го блоков Белоярской АЭС.

Литература

1. Колтик И.И. Атомные электростанции и радиационная безопасность. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2001. 368 с.

2. Костин В.И., Васильев Б.А. Задачи сооружения БН-800 и возможности создания перспективных быстрых реакторов // Атом. энергия. 2007. Т. 102, № 1. С. 21–26.

3. Нормы радиационной безопасности (НРБ 99/2009): Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы (СанПиН 2.6.1.2523–09) : утв. и введены в действие от 01.09.2009 г. М. : Федер. центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.

4. Ошканов Н.Н., Носков Ю.В., Баканов М.В. [и др.]. О сооружении энергоблока № 4 Белоярской АЭС с реактором БН-800 // Изв. высш. учеб. заведений. Ядер. энергетика. 2005. № 1. С. 10–12.

5. Поплавский В.М., Чебесков А.Н., Матвеев В.И. БН-800 как новый этап в развитии быстрых натри-

Conclusion

1. After BN-800 commissioning, ^{137}Cs decreased by 1.4–5.9 times in the water of the Beloyarsk artificial lake comparing to 2014 (zero level before the unit commissioning) confirming the absence of additional radionuclides entry into the cooling pond.

2. Changes in ^{90}Sr content are less considerable and have no general trends, which can be explained by different mechanisms of radionuclides release into the cooling pond. Industrial-storm water channel has always been a main source of ^{137}Cs entry into the cooling pond, i. e. washouts from the station territory; ^{90}Sr, on the contrary, has mainly a global origin and is not related to the NPP activity.

3. Absence of additional entry of the BN-800 Unit radionuclides is also confirmed by research of parallel samples of the aquatic plants from the 4th NPP discharge channel and the Pyshma River area lower the dam where all discharges from the cooling pond are integrated. The content of ^{137}Cs and ^{90}Sr in Potamogeton pectinatus from the 4th NPP Unit discharge channel was 3.1 and 1.4 times lower than from the Pyshma River, respectively.

4. Changes in radionuclides concentrations in the cooling pond over the period of 2014–2017 are completely consistent with general processes of purification, which became possible in the present water ecosystem due to the 1st and 2nd BNPP Units decommissioning.

References

1. Koltik I.I. Atomnye elektrostantsii i radiatsionnaya bezopasnost [Nuclear Power Plants and Radiation Safety]. Ekaterinburg. 2001. 368 p. (In Russ.)

2. Kostin V.I., Vasil'yev B.A. Problems of BN-800 construction and the possibilities of developing advanced fast reactors. *Atomic Energy.* 2007. Vol. 102, N 1. Pp. 21–26.

3. Normy radiatsionnoi bezopasnosti (NRB 99/2009): Sanitarno-jepidemiologicheskie pravila i normativy (SanPiN 2.6.1.2523–09) [Radiation safety regulations (NRB-99/2009) : Sanitary and epidemiological requirements and codes 2.6.1.2523–09]. Moskva. 2009. 100 p. (In Russ.)

4. Oshkanov N.N., Noskov Yu.V., Bakanov M.V. [et al.]. O sooruzhenii energobloka N 4 Beloyarskoi AES s reaktorom BN-800. [BN-800 Reactor Beloyarsk 4 Construction]. *Izvestia Vysshikh Uchebnykh Zawedeniy. Yadernaya Energetika* [Higher Education Establishments Proceedings. Nuclear Engineering]. 2005. N 1. Pp. 10–12. (In Russ.)

5. Poplavskii V.M., Chebeskov A.N., Matveev V.I. BN-800 as a new stage in the development of fast sodium-cooled reactors. *Atomic Energy*. 2004. Vol. 96, N 6. Pp. 386–390.

евых реакторов // Атом. энергия. 2004. Т. 96, № 6. С. 426–431.

6. Сараев О.М., Носков Ю.В., Зверев Д.Л. [и др.]. Обоснование проекта и состояние сооружения БН-800 // Атом. энергия. 2010. Т. 108, № 4. С. 197–200.

7. Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В. Динамика радиоэкологического состояния пресноводных экосистем, подверженных многолетнему воздействию атомной электростанции в границах наблюдаемой зоны // Радиац. биология. Радиоэкология. 2015. Т. 55, № 3. С. 302–313.

8. Harvey R.S. Temperature effects on the sorption of ^{137}Cs, ^{85}Sr and ^{65}Zn by freshwater shrimp // Radionuclides in ecosystems : Proc. 3th Nat. Symp. Radioecol., Oak Ridge, TN, 10–12 May 1971. Springfields, 1971. Vol. 1. P. 599–602.

6. Saraev O.M., Noskov Y.V., Zverev D.L. [et al.]. BN-800 design validation and construction status. *Atomic Energy.* 2010. Vol. 108, N 4. Pp. 248–253.

7. Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V. Dinamika radiojekologicheskogo sostojanija presnovodnyh jekosistem, podverzhennyh mnogoletnemu vozdejstviju atomnoj jelektrostancii v granicah nabljudaemoj zony [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]. *Radiacionnaja biologija. Radiojekologija* [Radiation Biology. Radioecology]. 2015. Vol. 55, N 3. Pp. 302–313. (In Russ.)

8. Harvey R.S. Temperature effects on the sorption of ^{137}Cs, ^{85}Sr and ^{65}Zn by freshwater shrimp. *Radionuclides in ecosystems*: Proc. 3th Nat. Symp. Radioecol., Oak Ridge, TN, 10–12 May 1971. Springfields. 1971. Vol. 1. P. 599–602.

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией статьи. Отбор проб материала из водоема-охладителя, пробоподготовка и измерение концентраций ^{137}Cs и ^{90}Sr в воде и водных растениях, а также интерпретация результатов выполнены в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН.

Поступила 17.04.2018 г.

Для цитирования. Коржавин А.В., Трапезникова В.Н., Трапезников А.В., Николкин В.Н., Платаев А.П. Первые результаты радиоэкологического исследования водоема-охладителя Белоярской АЭС после ввода в эксплуатацию 4-го энергоблока БН-800 // Мед.-биол. и соц.-психол. пробл. безопасности в чрезв. ситуациях. 2018. № 2. С. 70–82. DOI 10.25016/2541-7487-2018-0-2-70-82

Authors declare the absence of existing and potential conflicts of interest concerning the article publication. Sampling from the cooling pond, sample preparation, ^{137}Cs and ^{90}Sr concentration measurement in water and aquatic plants as well as interpretation of results are performed in the framework of the State Task of the Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences.

Received 17.04.2018

For citing. Korzhavin A.V., Trapeznikova V.N., Trapeznikov A.V., Nikolkin V.N., Plataev A.P. Pervye rezul'taty radioekologicheskogo issledovaniya vodoema-okhladitelya Beloyarskoi AES posle vvoda v ekspluatatsiyu 4-go energobloka BN-800. *Mediko-biologicheskie i sotsial'no-psikhologicheskie problemy bezopasnosti v chrezvychaynykh situatsiyakh*. 2018. N 2. Pp. 70–82. **(In Russ.)**

Korzhavin A.V., Trapeznikova V.N., Trapeznikov A.V., Nikolkin V.N., Plataev A.P. First results of the radioecological research of the Beloyarsk NPP cooling pond after the 4th Unit BN-800 commissioning. *Medico-Biological and Socio-Psychological Problems of Safety in Emergency Situations*. 2018. N 2. Pp. 70–82. DOI 10.25016/2541-7487-2018-0–2-70-82