

УДК 502.175:621.039.7:597.2/.5(285.2)
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4242
Шифр специальности ВАК 1.5.15

Оценка радиационных экологических рисков ихтиофауны водоемов-охладителей ряда действующих атомных электростанций

В.Г. Городецкий, **А.В. Трапезников**, В.Н. Трапезникова, А.В. Коржавин✉

Институт экологии растений и животных УрО РАН, Россия, г. Екатеринбург

✉BFS_zar@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования обусловлена необходимостью оценки радиационных рисков для основных видов рыбы в водоемах, находящихся под постоянным воздействием предприятий атомной энергетики. *Цель:* оценка радиационных экологических рисков ихтиофауны водоемов-охладителей действующих атомных электростанций, анализ источников и особенностей формирования радиационных рисков на разных этапах их эксплуатации. *Объекты:* мониторинговые исследования радиационных экологических рисков для референтных видов рыб в водоемах-охладителях Ленинградской, Белоярской и Нововоронежской АЭС. *Методы.* Расчет мощности доз облучения и количественная оценка риска облучения техногенными радионуклидами ихтиофауны водоемов-охладителей Белоярской, Ленинградской и Нововоронежской АЭС проводились с использованием международного компьютерного комплекса обновленной версии ERICA Tool 2.0. *Результаты.* Показано, что радиационные экологические риски ихтиофауны в водоемах-охладителях действующих атомных станций обусловлены сочетанным воздействием радионуклидов разного происхождения. Особенности формирования радиационных рисков для каждого водоема специфичны и зависят от сложившейся радиационной ситуации. Для водоема-охладителя Белоярской АЭС характерна четко выраженная зависимость радиационной нагрузки от типов действующих энергоблоков. Наибольшие радиационные риски ихтиофауны испытывала в период работы первых двух энергоблоков с тепловыми реакторами АМБ-100 и АМБ-200. Вывод из эксплуатации первых энергоблоков и строительство блоков с реакторами на быстрых нейтронах (БН-600 и БН-800) привели к значительному снижению радиационной нагрузки на ихтиофауну водоема-охладителя. В настоящее время радиационные риски обусловлены в основном влиянием ^{90}Sr , который с Белоярской АЭС в водоем-охладитель почти не сбрасывается, а имеет преимущественно глобальное происхождение, поэтому формирование рисков больше связано с атмосферными выпадениями ^{90}Sr , а не с работой атомной станции. Радиационные риски у ихтиофауны водоема-охладителя Ленинградской АЭС вызваны сочетанным воздействием ^{137}Cs , как следствие радиационной аварии на Чернобыльской АЭС, и радионуклидами с наведенной активностью (^{14}C ; ^{60}Co ; ^3H , ^{54}Mn и ^{65}Zn), происхождение которых может быть связано с работой ядерных реакторов атомной электростанции. Уровень радиационного риска ихтиофауны водоема-охладителя Нововоронежской АЭС за 2009–2019 гг. повысился в 2,2 раза за счет увеличения содержания ^{60}Co во многих компонентах водоема. В результате радиационные риски у придонных видов рыбы на 81,7 % были сформированы влиянием ^{60}Co . Нельзя исключить, что увеличение содержания ^{60}Co в водоеме-охладителе Нововоронежской АЭС является следствием радиоактивного загрязнения подземных вод в результате аварии 1985 г. Экологические риски ихтиофауны во всех водоемах-охладителях на два–три порядка величин ниже максимально допустимого коэффициента опасности. Таким образом, при работе атомных электростанций в штатном режиме не создается недопустимых радиационных рисков, представляющих реальную экологическую угрозу для ихтиофауны водоемов-охладителей.

Ключевые слова: атомные электростанции, техногенные радионуклиды, дозовые нагрузки, радиационные экологические риски, ихтиофауна, водоемы-охладители

Благодарности: Работа выполнена в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН, направление № 122021000077-6.

Для цитирования: Оценка радиационных экологических рисков ихтиофауны водоемов-охладителей ряда действующих атомных электростанций / В.Г. Городецкий, А.В. Трапезников, В.Н. Трапезникова, А.В. Коржавин // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 35. – № 2. – С. 220–233. DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4242

UDC 502.175:621.039.7:597.2/.5(285.2)
DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4242

Assessment of radiation environmental risks for fish fauna of the cooling pools of a number of operating nuclear power plants

V.G. Gorodetsky, A.V. Trapeznikov, V.N. Trapeznikova, A.V. Korzhavin✉

Institut of Plant and Animal Ecology Russian Academy of Science, Ekaterinburg, Russian Federation

✉BFS_zar@mail.ru

Abstract. Relevance. The need to assess radiation risks for the main types of fish in pools that are under the constant influence of the nuclear power plants. **Aim.** To assess the radiation environmental risks for the ichthyofauna of cooling pools of the operating nuclear power plants, to analyze the sources and features of formation of the radiation risks at different stages of their operation. **Objects.** Monitoring studies of radiation environmental risks for reference fish species in cooling reservoirs of the Leningrad, Beloyarsk and Novovoronezh NPP. **Methods.** Calculation of the exposure dose rate and quantitative assessment of the risk of exposure to technogenic radionuclides of the ichthyofauna of the cooling pools of the Beloyarskaya, Leningradskaya and Novovoronezhskaya NPP were carried out using the international computer complex of the updated version of ERICA Tool 2.0. **Results.** The paper demonstrates that the radiation ecological risks for the ichthyofauna in the cooling pools of the operating nuclear power plants are caused by the combined effect of radioisotopes of the different origin. The features of the formation of the radiation risks for each pool are specific and depend on the current radiation situation. The cooling pool of the Beloyarskaya NPP is characterized by a pronounced dependence of the radiation load on the types of operating power units. The ichthyofauna experienced the greatest radiation risks during the operation of the first two power units with thermal reactors AMB-100 and AMB-200. The decommissioning of the first power units and the construction of the units with the fast neutron reactors (BN-600 and BN-800) led to a significant reduction in the radiation load on the ichthyofauna of the cooling pool. At present, the radiation risks are caused mainly by the influence of ^{90}Sr , which is almost not discharged from the Beloyarskaya NPP into the cooling pools, but has a predominantly global origin. Therefore, the formation of the risks is more associated with atmospheric fallout of ^{90}Sr , and not with the operation of the nuclear power plant. The radiation risks for the ichthyofauna of the Leningradskaya NPP cooling pool are caused by the combined effect of ^{137}Cs as a result of the radiation accident at the Chernobylskaya NPP and radionuclides with induced activity (^{14}C ; ^{60}Co ; ^3H ^{54}Mn and ^{65}Zn), the origin of which may be associated with the operation of the nuclear reactors of the NPP. The level of radiation risk for the fish fauna of the Novovoronezhskaya NPP cooling pool for 2009–2019 increased 2.2 times due to ^{60}Co content increase in many components of the pool. As a result, 81.7% of the radiation risks in demersal fish species were formed by the affect of ^{60}Co . It cannot be ruled out that ^{60}Co content increase in the cooling pool of the Novovoronezhskaya NPP is a consequence of radioactive contamination of the groundwater as a result of the 1985 accident. The ecological risks for the fish fauna in all cooling pools are two to three orders of magnitude lower than the maximum allowable hazard coefficient. Thus, the normal operation of the nuclear power plants does not create unacceptable radiation risks that pose a real environmental threat to the fish fauna of the cooling pools.

Keywords: Nuclear Power Plant, technogenic radionuclides, dose loads, environmental radiation risks, ichthyofauna, cooling pools

Acknowledgements: The research was carried out within the State Task of the Institute of Plant and Animal Ecology Ural Branch Russian Academy of Science, direction no. 122021000077-6.

For citation: Gorodetsky V.G., Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V. Assessment of radiation environmental risks for fish fauna of the cooling pools of a number of operating nuclear power plants. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 2, pp. 220–233 DOI: 10.18799/24131830/2024/2/4242

Введение

Радиационная безопасность водоемов-охладителей атомных электростанций занимает особое место при радиозэкологической оценке территорий, прилегающих к предприятиям атомного профиля [1–3].

Как правило, водоемы-охладители атомных станций находятся под постоянным контролем со стороны природоохранных организаций и служб радиационной безопасности. В результате многолетнего мо-

ниторинга для каждого такого водоема накоплен значительный материал, отражающий во временной динамике изменения состояния водных экосистем. Представленный нами в сравнительном аспекте многолетний материал по водоемам-охладителям Ленинградской, Белоярской и Новovoroneжской АЭС показывает важность изучения особенностей формирования радиационных экологических рисков для основных видов рыб данных водных объектов.

Все три атомные станции находятся в эксплуатации уже достаточно длительное время. Строительство Ленинградской АЭС (ЛИАЭС) было начато в июле 1967 г., а 22 декабря 1973 г. состоялся энергетический пуск первого блока РБМК-1000. Всего на ЛИАЭС было построено 6 энергоблоков. Блок № 1 находился в эксплуатации в течение 45 лет и был остановлен 21 декабря 2018 г. Энергоблок № 2 (РБМК-1000) также выработал свой ресурс и выведен из эксплуатации 10 ноября 2020 г. В настоящее время функционируют четыре блока: № 3 и 4 (РБМК-1000), № 5 и 6 (ВВЭР-1200). Водоемом-охладителем для ЛИАЭС служит естественный морской залив – Копорская губа Финского залива. Копорская губа площадью 255 км² по классификации является мелким полузамкнутым водоемом, имеющим протяжённую границу водораздела с основной акваторией. Максимальная глубина залива на границе с основной акваторией достигает 27 м. Дно водоема в большей части песчаное, но местами могут встречаться илы и камни. Сброс нагретых вод с атомной станции осуществляется в восточную часть Копорской губы. Туда же впадают три реки: Систа, Коваши и Воронка, с общим среднесуточным расходом воды около 10 м³·с⁻¹ [4, 5].

На Белоярской атомной станции (БАЭС) в разные годы были построены и эксплуатировались энергоблоки с различными типами реакторов. Первые два реактора на тепловых нейтронах (АМБ-100 и АМБ-200) были запущены в эксплуатацию в 1964 и 1967 гг. В настоящее время они остановлены и находятся на стадии вывода из эксплуатации. Сейчас функционируют два реактора на быстрых нейтронах: блок № 3 (БН-600), работает с 1980 г., и блок № 4 (БН-800), введен в эксплуатацию в 2016 г. Водоемом-охладителем для БАЭС служит Белоярское водохранилище, созданное путем перекрытия русла реки Пышмы в 75 км от ее истока в период 1959–1963 гг. Площадь зеркала водоема составляет 47 км². Сброс воды в водоем-охладитель после прохождения через системы охлаждения АЭС осуществляется через водосбросный канал в Теплый залив. Кроме водосбросного канала радиоактивные вещества в водоем-охладитель могут поступать с газоаerosольными выбросами и жидкими сбросами через промливневый и обводной каналы [6, 7].

Нововоронежская АЭС (НВАЭС) расположена в 45 км южнее Воронежа на берегу реки Дон. За годы работы на Нововоронежской АЭС было построено и введено в эксплуатацию семь энергоблоков с реакторами типа ВВЭР (водо-водяные энергетические реакторы корпусного типа с обычной водой под давлением). Первый энергоблок был пущен в 1964 г., второй – в 1969 г., третий – в 1971 г., четвертый – в 1972 г., пятый – в 1980 г. Первый и второй энергоблоки были остановлены в 1984 и

1990 гг., соответственно. На третьем и четвертом энергоблоках был выполнен комплекс работ, который позволил продлить срок эксплуатации блоков еще на 15 лет. Последними были введены в промышленную эксплуатацию еще два энергоблока: блок № 6 (ВВЭР-1200) – 27 февраля 2017 г.; блок № 7 (ВВЭР-1200) – 31 октября 2019 г. [8]. Для охлаждения теплообменного оборудования энергоблоков Нововоронежской АЭС используется вода р. Дон, пруда-охладителя блока № 5, прудов рыбо-разводного хозяйства «Нововоронежский» (рыбхоз), подземных артезианских водозаборов. Сброс возвратных сточных вод со станции осуществляется в реку Дон по четырем выпускам: № 1 – концевой водосброс первого и второго энергоблоков, № 2 – продувка циркуляционной системы третьего и четвертого энергоблоков, № 3 – кратковременная продувка пруда-охладителя пятого энергоблока № 4 – сброс продувочной воды с первого и второго энергоблоков [9].

В соответствии с требованиями федерального закона «Об охране окружающей среды» при безопасной работе объектов атомной энергетики должны обеспечиваться условия, достаточные для устойчивого функционирования естественных экологических систем, природных и природно-антропогенных объектов, а также сохранения биологического разнообразия. Это означает, что не только человек, но и другие организмы должны быть защищены от радиационных рисков, поскольку биологические организмы, такие как растения и животные, могут испытывать более высокие дозовые нагрузки по сравнению с человеком. В соответствии с данной парадигмой важным показателем для определения степени негативного радиационного воздействия на биоту является оценка радиационных рисков [10, 11].

Оценка радиационных рисков биоты предполагает переход от анализа радиационной ситуации по многочисленным показателям к единому интегральному значению безопасности окружающей среды – уровню радиационного экологического риска. Такой подход дает возможность сравнивать по единому универсальному показателю различные объекты, находящиеся под воздействием предприятий атомной энергетики, оценивать уровни загрязнения территорий и водных экосистем, унифицировать оценку радиационной опасности для биоты. Показателем оценки радиационного экологического риска для биоты в этом случае является безразмерный коэффициент опасности, определяемый как отношение мощности дозы облучения организмов к экологически безопасному уровню облучения [12, 13].

В качестве представительных организмов для водоемов-охладителей выбрана рыба, как вид, свя-

занный с пищевыми цепочками человека. В работе представлена сравнительная оценка радиационных рисков от хронического облучения для референтных видов рыб водоемов-охладителей Ленинградской, Нововоронежской и Белоярской атомных электростанций, выполненная по результатам собственных многолетних исследований на Белоярском водохранилище, а также по информации из литературных источников.

Цель работы – оценка уровней экологических рисков для биоты водоемов-охладителей действующих АЭС на разных этапах их эксплуатации, а также анализ критериев и особенностей формирования радиационных рисков у ихтиофауны водоемов в зависимости от меняющейся радиационной нагрузки и соотношения радиоизотопов в компонентах водных экосистем.

Материалы и методика исследования

Сравнительная оценка экологических рисков для ихтиофауны водоемов-охладителей действующих АЭС на разных этапах их работы представлена на примере водоемов Белоярской, Ленинградской и Нововоронежской АЭС.

В качестве наиболее распространенных видов рыбы Белоярского водохранилища (водоема-охладителя БАЭС) выбраны: лещ, окунь, плотва, щука. Оценка мощности доз облучения и риска для данных видов рыб проводилась на основании содержания техногенных радионуклидов в компонентах Теплого залива, в который поступает вода сбросного канала 1, 2, 3 блоков (табл. 1). Все данные получены в результате многолетнего мониторинга водоема-охладителя сотрудниками Биофизической станции – филиала Института экологии растений и животных УрО РАН. При расчете мощности дозовых нагрузок учитывался вклад ^{60}Co , а также ^{90}Sr , ^{137}Cs и их дочерних продуктов ^{90}Y и $^{137\text{m}}\text{Ba}$, соответственно, в предположении векового равновесия в цепочке распадов.

Таблица 1. Содержание радионуклидов в компонентах Теплого залива Белоярского водохранилища

Table 1. Content of radionuclides in the components of the Teply Bay of the Belayarskoe Pond

Место отбора проб Sampling location	Период/Period							
	1977–1989			2011–2014		2016–2019		
	^{137}Cs	^{90}Sr	^{60}Co	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr	
Вода, Бк/л Water, Bq/l	0,31	0,061	0,25	0,012	0,0165	0,0091	0,0158	
Донные отложения, Бк/кг Bottom sediments, Bq/kg	1490	22,4	10	126,75	36,07	29,93	21,33	
Рыба, Бк/кг/Fish, Bq/kg								
Плотва/Roach	155,4	4,5	7	2,95	3,4	1,73	7,45	
Лещ/Bream	50	3,7	14	2,55	3	1,48	8,95	
Окунь/Perch	92	11	9	4,05	2,55	2,4	3,1	
Щука/Pike	133	2,1	8	4,7	25	0,8	25,1	

Для оценки дозовых нагрузок в динамике были выделены следующие временные периоды в работе Белоярской АЭС:

- 1976–1989 гг. – соответствует работе первых двух энергоблоков (АМБ-100, АМБ-200) и вводу в эксплуатацию третьего энергоблока БН-600;
- 2011–2014 г. работа только одного БН-600;
- 2016–2019 г. – показывает изменение радиоэкологического состояния водоема-охладителя после ввода в эксплуатацию четвертого энергоблока БН-800.

Для водоема охладителя Ленинградской АЭС (Капорская губа Финского залива) в качестве представителей ихтиофауны выбраны: окунь, плотва, салака. Оценка мощности доз облучения и риска для рыб проводилась на основании содержания техногенных радионуклидов в компонентах Копорской губы в 1–3 км от ЛАЭС (табл. 2). Учитывался вклад радионуклидов: ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{65}Zn , ^{14}C , ^3H , в различных сочетаниях в зависимости от временного периода, в соответствии с данными, приведенными в работе [4]. Также учитывались дочерние продукты ^{90}Sr , ^{137}Cs : ^{90}Y и $^{137\text{m}}\text{Ba}$, соответственно. Для расчета мощности дозовых нагрузок на виды рыб в период 2000–2019, где отсутствовали данные по содержанию радионуклидов в их тканях, были использованы коэффициенты накопления.

Периоды рассмотрения радиоэкологической ситуации в Капорской губе соответствуют периодам работы АЭС: до Чернобыльской аварии (1973–1985 гг.), во время аварии и сразу после нее (1986–1990 гг.), период (2000–2019 гг.) [4].

Для оценки рисков ихтиофауны пруда-охладителя Нововоронежской АЭС использовались данные по дозовым нагрузкам для придонной рыбы за периоды 2000–2010 и 2011–2019 гг., приведенные в работе [8]. Исследования на Нововоронежской АЭС направлены на оценку радиоэкологических последствий нештатной ситуации, связанной с утечкой ^{60}Co и ^{137}Cs из хранилища жидких отходов в 1972 и 1985 гг. [14].

Расчет мощности доз облучения и количественная оценка риска облучения техногенными радионуклидами ихтиофауны водоемов-охладителей Белоярской, Ленинградской и Нововоронежской АЭС проводились с использованием международного компьютерного комплекса обновленной версии ERICA Tool 2.0 [15–18].

Программа позволяет при расчетах учитывать вес организма и моделировать эллипсоидом его размеры, долю времени пребывания в среде обитания (для рыб вблизи дна или в толще воды). Также имеется возможность рассчитать риск облучения как от каждого учитываемого радионуклида, так и суммарный.

Таблица 2. Содержание радионуклидов в компонентах Копорской губы: рыбе (Бк/кг), донных отложениях (Бк/кг), воде (мБк/л) [4]

Table 2. Content of radionuclides in the components of Kопorskaya Bay: fish (Bq/kg), bottom sediments (Bq/kg), water (mBq/l)

Место отбора Sampling location	1973–1985					1986–1990	2000–2019					
	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co	⁵⁴ Mn	⁶⁵ Zn	¹³⁷ Cs	⁹⁰ Sr	¹³⁷ Cs	⁶⁰ Co	⁵⁴ Mn	¹⁴ C	³ H
Вода, мБк/л/Water, Bq/l	27	18	30	31	0	365,6	12	20	26	0	–	21000
Донные отложения, Бк/кг Bottom sediments, Bq/kg	2	2,1	10	14	11	19,2	0,7	19	1,5	0,9	–	–
Рыба/Fish												
Окунь/Perch	1,5	2,7	10	6,3	14	100	0,3	6,2	–	0	63	38
Плотва/Roach	1,8	1,5	10	1,5	60	–	0,2	1,2	–	0	150	56
Салака/Herring	1,3	2	5,4	0,3	12	24,2	–	–	–	–	–	–

Радиационный риск для биоты определяется как отношение мощности дозы облучения организма к нормированному уровню [19]. В данной работе риск определялся как отношение рассчитанной мощности поглощенной дозы для выбранного организма к скрининговому уровню, обеспечивающему сохранение живучести популяции, в проекте ERICA (Экологический риск от ионизирующих загрязнителей: оценка и управление) для рыб – 10 мкГр/час [20].

С целью сравнения общей радиозэкологической ситуации в водоемах-охладителях БАЭС, ЛАЭС и НВАЭС на разных этапах их эксплуатации выполнены оценки ожидаемых рисков ихтиофауны от облучения.

Оценивались риски облучения отдельно от каждого радионуклида, находящегося в организме рыб и в окружающей среде.

Оценка риска проводилась для следующих видов рыб:

- лещ *Abramis brama* (L., 1758), возраст 3–5 лет, обитает вблизи дна, питается зообентосом. Рыба с высоким телом, сжатая с боков;
- окунь речной *Perca fluviatilis* (L., 1758), возраст 2–3 года, питается преимущественно рыбой и беспозвоночными. Тело сжато с боков;
- плотва *Rutilus rutilus* (L., 1758), возраст 3–5 лет. Объекты питания: зоопланктон, зообентос, водоросли и гидрофиты. Тело несколько сжато с боков;
- салака, или балтийская сельдь *Clupea harengus membras* (L., 1758), возраст 3–5 лет. Питается нектобентосом, планктоном, бентосом и личинками рыб. Тело имеет вытянутую форму, немного сжатую с боков.

Учитывался вес каждого исследуемого вида рыб. Форма организма рыбы моделировалась эллипсоидом. Соотношение между размерами осей эллипсоида, аппроксимирующего форму рыбы, подбирали с учетом основных размерно-массовых характеристик тела, преобладающих в исследуемых видах (масса, длина, высота, ширина), таким образом, чтобы объем эллипсоида был равен объе-

му рыбы при условии, что ее плотность равна плотности воды.

Результаты исследования и обсуждение

На рис. 1 представлены радиационные риски для ихтиофауны в водоеме-охладителе Белоярской АЭС на разных этапах работы атомной станции.

Показано, что более высокие радиационные риски ихтиофауна водоема-охладителя испытывала в начальный период деятельности Белоярской АЭС при работе энергоблоков АМБ-100 и АМБ-200. Наиболее высокий уровень радиационного риска отмечен у леща, но при этом полученное значение было все же в 60 раз ниже максимально допустимого коэффициента опасности. Также и у других видов рыб уровень радиационного риска был ниже максимального коэффициента опасности: у плотвы в 85 раз, у щуки в 230 раз, у окуня в 240 раз. В период работы только одного третьего энергоблока БН-600 с 2011 по 2014 гг. у всех видов рыб водоема-охладителя наблюдается существенное снижение уровней радиационной нагрузки, связанное с общим улучшением радиационной обстановки в водоеме. Отмеченная тенденция прослеживается и в последующие годы. Так, уровень радиационного риска у леща за весь период наблюдения (1977–2019 гг.) уменьшился в 18,5 раз, у окуня – в 15,3 раз, у плотвы – в 17,6 раз, у щуки – 2,75 раза. Для правильной оценки причин произошедших изменений, а также для установления основных факторов, влияющих на формирование уровней радиационных рисков у ихтиофауны, была рассчитана степень участия отдельных радиоизотопов в формировании радиационных рисков (рис. 2). В период 1977–1989 гг. основным источником радиационного риска для ихтиофауны водоема-охладителя являлся ¹³⁷Cs. Кроме радиоцезия на ихтиофауну водоема-охладителя оказывали влияние ⁶⁰Co и ⁹⁰Sr, но их участие в формировании рисков было незначительным по сравнению с ¹³⁷Cs. Так, у леща доля радиоцезия в формировании радиационного риска составила 94 %, у окуня – 78 %, у плотвы – 94 % и у щуки – 91 %.

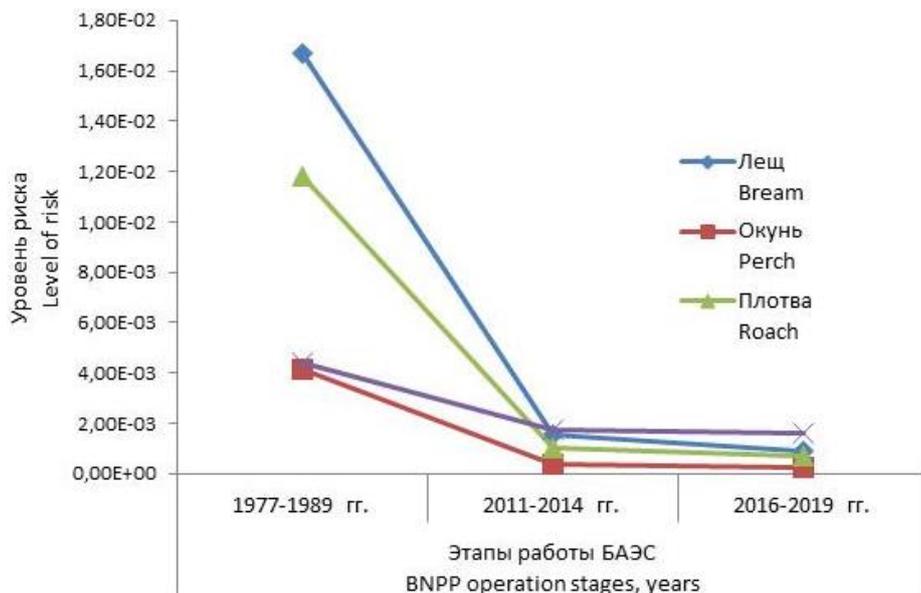


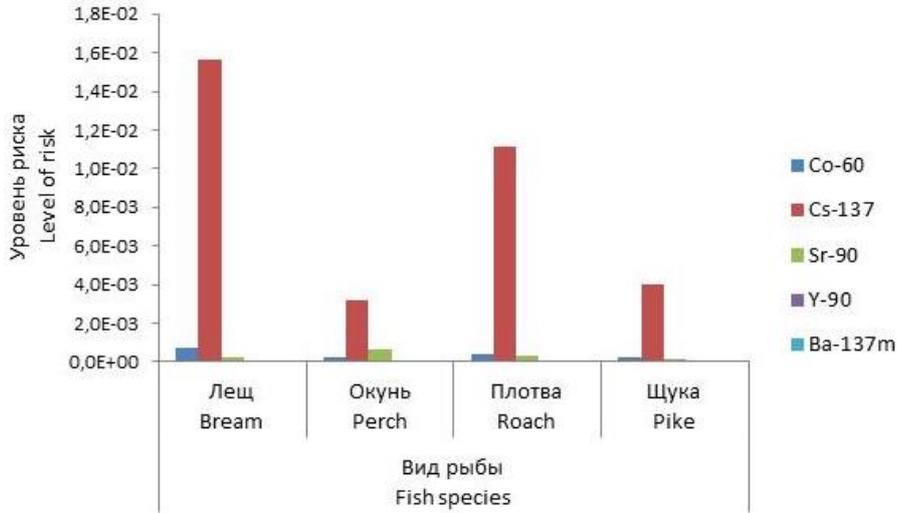
Рис. 1. Радиационные риски для ихтиофауны водоема-охладителя Белоярской АЭС
Fig. 1. Radiation risks for the fish fauna of the Beloyarskaya NPP cooling pool

На заключительном этапе исследований, 2016–2019 гг., ситуация кардинально изменилась. В формировании рисков ихтиофауны водоема-охладителя участвовали ^{137}Cs и ^{90}Sr при существенном преобладании последнего. Доля ^{90}Sr при формировании радиационного риска у леща составила 64 %, у окуня – 71 %, у плотвы – 69 % и у щуки – 97 %. Присутствие ^{60}Co в компонентах водоема-охладителя в настоящее время настолько мало, что его участие в формировании радиационных рисков у ихтиофауны ничтожно.

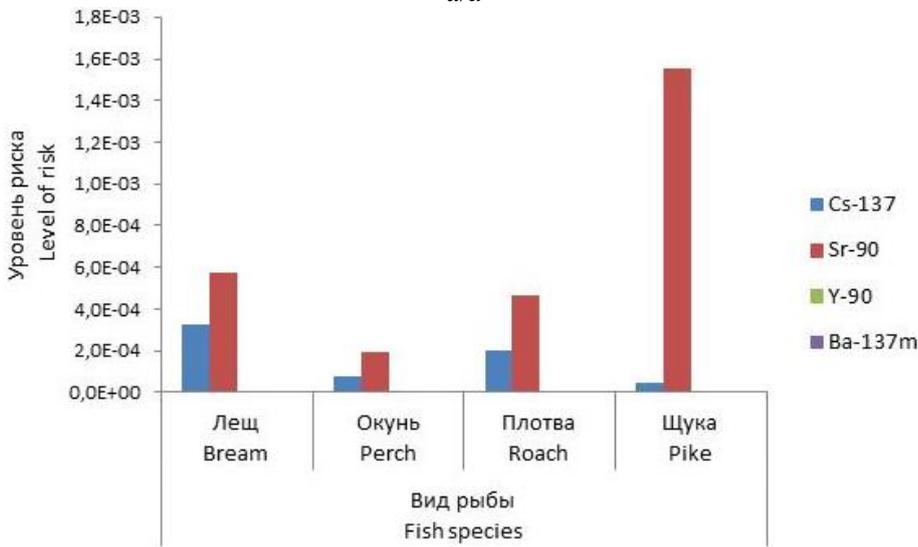
Анализируя полученные данные, можно заключить, что после вывода из эксплуатации двух первых энергоблоков с реакторами на тепловых нейтронах АМБ-100 и АМБ-200 радиоэкологическое состояние водоема-охладителя стабилизировалось, а радиационные риски для ихтиофауны стали в меньшей степени зависеть от работы атомной станции. На начальных этапах эксплуатации АЭС основным источником радиационных рисков для ихтиофауны водоема-охладителя был ^{137}Cs , который поступал с атомной станции через технические каналы в составе дебалансных вод и промливневых стоков с территории промплощадки БАЭС. В последние годы определяющим радионуклидом стал ^{90}Sr , который с атомной станции практически не сбрасывается, а в основном имеет глобальное происхождение. Таким образом, на уровни рисков ихтиофауны водоема-охладителя Белоярской АЭС в период работы энергоблоков с реакторами на быстрых нейтронах большое влияние оказывают внешние факторы, связанные с поступлением ^{90}Sr в составе атмосферных выпадений, а не деятельность атомной станции.

Основные радиационные риски для ихтиофауны водоема-охладителя ЛАЭС были связаны с радионуклидами коррозионного происхождения (рис. 3). Для окуня и плотвы радиационные риски в значительной степени были обусловлены присутствием ^{60}Co , у плотвы кроме ^{60}Co существенную роль играли ^{54}Mn и ^{65}Zn . На долю радионуклидов с наведенной активностью у окуня в сумме приходилось 68,9 %, у плотвы – 85,5 %. Кроме элементов активации и коррозии присутствовали долгоживущие радионуклиды ^{90}Sr и ^{137}Cs , но их роль в формировании радиационных рисков на данном этапе была существенно меньше, 31,1 и 14,5 % соответственно. Таким образом, радиационные риски у окуня и плотвы в Копорской губе в период 1973–1985 гг. были опосредованно связаны с функционированием Ленинградской АЭС и поступлением в водоем-охладитель радионуклидов с наведенной активностью, образующихся в результате работы атомных реакторов.

Несколько иначе происходило формирование радиационных рисков у салаки. Коррозионные элементы, такие как ^{60}Co , ^{65}Zn , тоже присутствовали, но их доля составляла не более 45 % от суммарной активности. Напротив, более существенную роль играли долгоживущие радионуклиды ^{90}Sr и ^{137}Cs . По-видимому, это связано с особенностями обитания данного вида рыбы. В отличие от окуня и плотвы, салака при определенных условиях способна мигрировать из водоема-охладителя в открытое море и возвращаться обратно. Так, в весенний период салака держится на мелководье возле берегов в поверхностных горизонтах.



a/a



б/б

Рис. 2. Влияние ряда техногенных радионуклидов на уровень радиационного риска ихтиофауны Белоярского водохранилища в период работы Белоярской АЭС: а) 1977–1989 гг. б) 2016–2019 гг.

Fig. 2. Impact of a number of technogenic radionuclides on the radiation risk level for the fish fauna of the Beloyarskoe pool during Beloyarskaya NPP operation: a) 1977–1989; b) 2016–2019

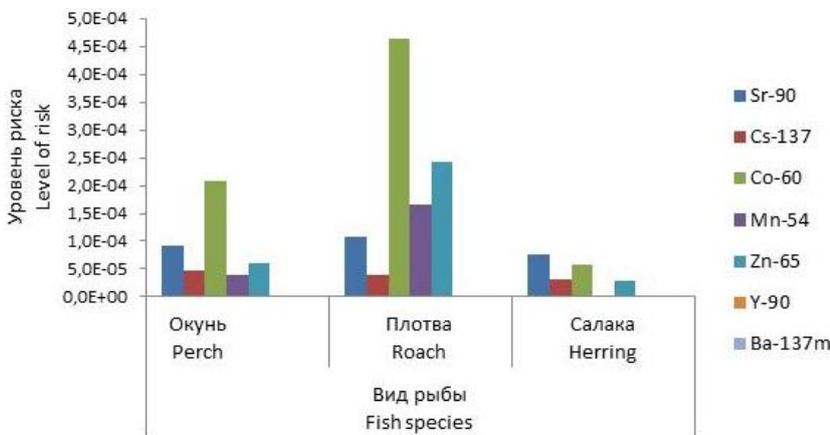


Рис. 3. Формирование радиационных рисков для ихтиофауны Копорской губы на этапе 1973–1985 гг.

Fig. 3. Formation of the radiation risks for the fish fauna of the Kopper Bay for 1973–1985

Летом, по мере прогревания воды, салака уходит от берегов в более глубокие места или держится в средних водных горизонтах. В начале осени при охлаждении поверхностных слоев воды салака обратно возвращается к берегам на мелководье. С наступлением холодного периода и сильным охлаждением поверхностных горизонтов салака стремится уходить на глубокие места в придонные слои воды. Таким образом, Копорскую губу нельзя считать местом постоянного обитания салаки, поэтому и радиационные риски у этого вида рыбы, по видимому, были сформированы под влиянием других условий.

В период 1986–1990 гг. радиационные риски для ихтиофауны Копорской губы были в основном связаны с последствиями Чернобыльской аварии и радиоактивным загрязнением водоема-охладителя в результате атмосферных выпадений (рис. 4). После радиационной аварии на Чернобыльской АЭС особое внимание уделялось контролю содержания ^{137}Cs в компонентах водоема-охладителя, поэтому и оценка радиационного риска на ихтиофауну Копорской губы за этот период представлена в зависимости от изменения содержания радиоцезия. У всех представленных на рис. 3 видов рыб в первый год после аварии отмечено существенное увеличение уровней радиационных рисков. Так, у плотвы данный показатель увеличился в 20 раз, у салаки – в 16 раз. У окуня уровень радиационного риска плавно возрастал на протяжении двух лет после аварии. В первый год он вырос в 7,9 раза, а к концу 1987 г. – еще в 4,3 раза. Вероятно, это связано с накоплением в течение первого года радиоцезия в организмах рыб и беспозвоночных, которыми питается окунь, а последующее увеличение рисков вызвано поступлением ^{137}Cs в организм окуня через пищеварительный тракт.

Всего к 1988 г. уровень радиационного риска у окуня по сравнению с доаварийным периодом уве-

личился в 35 раз, но при этом оставался в 480 раз ниже максимально допустимого коэффициента опасности. У салаки и плотвы в период 1986–1987 гг. тоже прослеживалось увеличение уровня радиационного риска, но с разной интенсивностью. Если у плотвы активный период роста радиационных рисков к концу 1986 г. уже завершился, а далее наметилась тенденция на его снижение, то у салаки этот процесс проходил на протяжении двух лет и закончился к концу 1987 г., после чего последовало плавное снижение. Показатели радиационных рисков для ихтиофауны Копорской губы стабилизировались к 1990 г., но на более высоких уровнях по сравнению с 1985 г. Так, у окуня уровень радиационного риска остался в 32 раза выше, чем до аварии, у плотвы – в 10 раз, у салаки – в 15 раз.

Динамика изменения радиационных рисков за весь период наблюдения с 1973 по 2019 гг. представлена на рис. 5. Показано, что после 1990 г. у основных видов рыбы Копорской губы наметилось последовательное снижение радиационных рисков. К завершающему периоду (2000–2019 гг.), по сравнению с 1990 г., радиационные риски у окуня снизились в 13 раз, у плотвы – в 3,5 раза и у салаки – в 11 раз. Но при этом, спустя 33 года после аварии, значения радиационных рисков не вернулись к прежним показателям, которые были до Чернобыльской аварии. У окуня уровень радиационного риска остался в 2,7 раза выше первоначального, у плотвы – в 4,2 раза и у салаки – в 1,1 раза. Таким образом, последствия Чернобыльской аварии до настоящего времени оказывают заметное влияние на формирование радиационных рисков для ихтиофауны Копорской губы.

Кроме последствий радиационной аварии, существенная роль в формировании радиационного риска у ихтиофауны водоема-охладителя ЛАЭС на этапе 2000–2019 гг. отводится ^{14}C и ^3H (рис. 6).

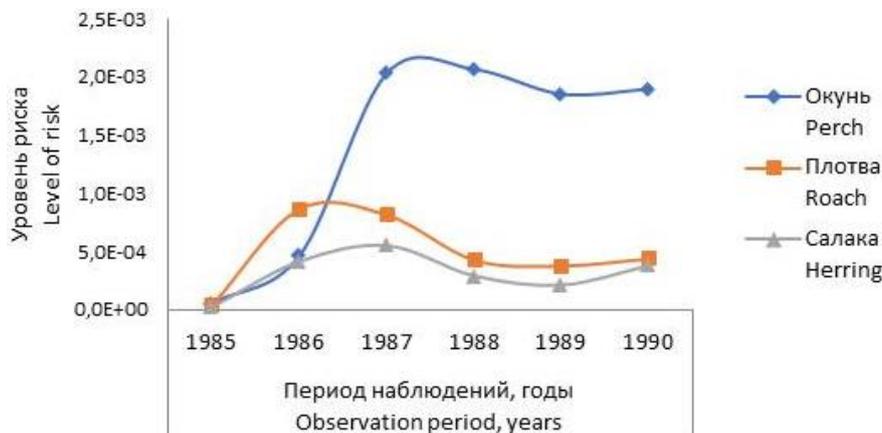


Рис. 4. Изменение радиационных рисков для ихтиофауны Копорской губы после Чернобыльской аварии
Fig. 4. Change in radiation risks for the fish fauna of the Kopperskaya Bay after the Chernobyl accident

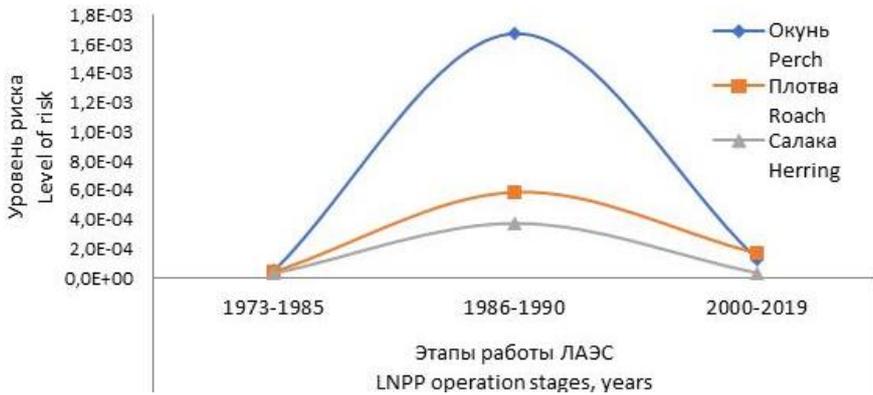


Рис. 5. Динамика изменения радиационных рисков для ихтиофауны Копорской губы в период 1973–2019 гг.
Fig. 5. Dynamics of changes in radiation risks for the fish fauna of the Koporskaya Bay during 1973–2019

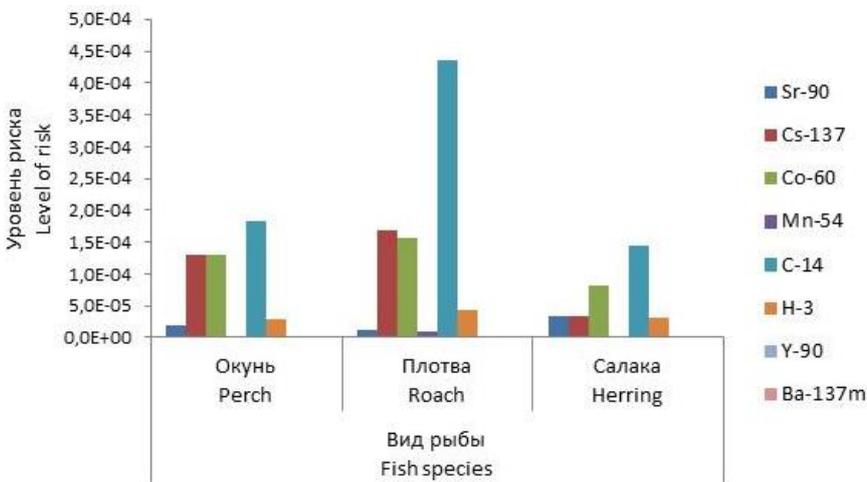


Рис. 6. Формирование радиационных рисков для ихтиофауны Копорской губы на этапе 2000–2019 гг.
Fig. 6. Formation of the radiation risks for the fish fauna of the Koporskaya Bay for 2000–2019

В последние годы было показано, что эти изотопы могут вносить существенный вклад в формирование радиационных дозовых нагрузок на биоту [21–23]. Ранее, на первом и втором этапах исследований, в доступной литературе не имелось информации о содержании ^{14}C в компонентах водоема-охладителя, а появление ее на заключительном этапе в корне изменило соотношение влияния радионуклидов на формирование радиационных рисков у ихтиофауны водоема. Так, у окуня радиационные риски в основном были обусловлены присутствием трех радионуклидов: ^{14}C , ^{137}Cs и ^{60}Co . При этом вклад ^{14}C составлял 37 % от суммарного показателя. Количественное соотношение ^{137}Cs и ^{60}Co было одинаково и составляло по 26,4 % от общего значения. Небольшая доля приходилась на ^3H и ^{90}Sr – 5,9 и 3,7 % соответственно. У плотвы радиационные риски на 52,8 % были сформированы влиянием ^{14}C . Также прослеживалось присутствие ^{137}Cs – 20,3 %, ^{60}Co – 18,8 %, ^3H – 5,2 %, ^{90}Sr – 1,6 % и ^{54}Mn – 1,3 %. Доля участия ^{90}Y у всех видов рыб была ми-

нимальна и составляла 0,1–0,2 % от суммарного риска. У салаки формирование радиационных рисков в основном происходило под влиянием радионуклидов коррозионного происхождения: ^{14}C – 44,6 % и ^{60}Co – 24,7 %. Но при этом присутствовали и долгоживущие радионуклиды: ^{90}Sr – 10,6 % и ^{137}Cs – 10,4 %. Также был отмечен вклад ^3H – 9,4 %.

Таким образом, на разных этапах работы ЛАЭС радиационные риски для ихтиофауны водоема-охладителя слагались под влиянием нескольких факторов: 1 – глобальные выпадения; 2 – авария на Чернобыльской АЭС; 3 – поступление в водоем-охладитель радионуклидов с наведенной активностью в результате работы ядерных реакторов ЛАЭС. Появление информации о содержании ^{14}C в компонентах водоема-охладителя позволило оценить значительный вклад данного радионуклида в формирование радиационных рисков для ихтиофауны водоема. Более подверженной влиянию ^{14}C оказалась плотва – 52,8 % от суммарного риска. У других видов влияние тоже заметное: салака – 44,6 %, окунь – 37 %.

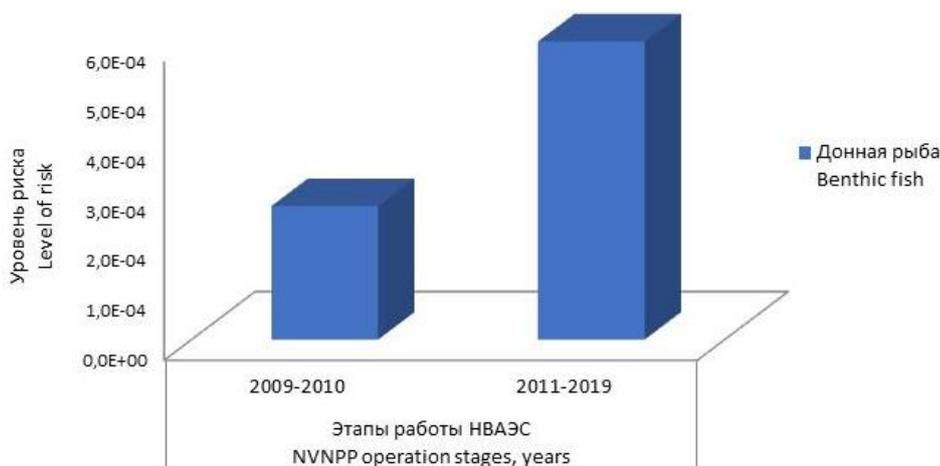


Рис. 7. Динамика изменения радиационных рисков для ихтиофауны водоема-охладителя НВАЭС в период 2009–2019 гг.
Fig. 7. Dynamics of change in radiation risks for the fish fauna of the Novovoronezhskaya NPP cooling pool during 2009–2019

Радионуклиды с наведенной активностью в сумме оказывали существенное влияние на ихтиофауну Копорской губы. У салаки радиационные риски на 79,0 % были обусловлены влиянием радионуклидов с наведенной активностью, у плотвы – на 78,2 %, у окуня – на 69,9 %. Если учесть, что данные изотопы являются производными работы ядерных реакторов, можно судить о высокой зависимости ихтиофауны водоема-охладителя от деятельности ЛАЭС.

В целом экологическую ситуацию для ихтиофауны Копорской губы в настоящее время можно считать стабильной и приемлемой для существования и размножения рыбы в данном водоеме. Уровни радиационных рисков у основных видов рыб до критических значений коэффициента опасности отделяет существенный запас. Так, у окуня суммарный радиационный риск ниже критического значения в 2000 раз, у плотвы – в 1200 раз, у салаки – в 3000 раз.

На рис. 7 представлена динамика значений радиационных рисков на ихтиофауну водоема-охладителя НВАЭС. Для расчета радиационных рисков в доступной литературе имеется исходная информация по обобщенной группе – донная рыба [8]. К этой группе можно отнести референтные для водоема-охладителя виды рыб: толстолобик и карп [24]. Показано, что за десятилетний период наблюдения общий уровень радиационных рисков для ихтиофауны увеличился в 2,2 раза. Анализ слагаемых суммарного радиационного риска (рис. 8) показывает, что данный рост обусловлен в основном увеличением во многих компонентах водоема ^{60}Co . По сравнению с предыдущим периодом его влияние на формирование радиационного риска возросло в 3,8 раза и составило 81,7 % от суммарного риска. Таким образом, ситуация с ^{60}Co в водоеме-охладителе до последнего времени остается неста-

бильной и, вероятно, связана с радиационной аварией, произошедшей на начальных этапах работы НВАЭС.

Так, в марте 1985 г. в результате утечки из емкостей хранилища около 480 м³ жидких радиационных отходов произошло загрязнение подземных вод в районе ХЖО-2 НВАЭС с последующей инфильтрацией радиоактивных веществ в первый не питьевой водоносный горизонт. В составе загрязнения до 90 % составлял ^{60}Co , оставшиеся 10 % приходились на ^{137}Cs и другие техногенные радионуклиды. В подстилающий грунт поступило 76 ТБк ^{60}Co и 15 ТБк ^{137}Cs . Радиоизотопы ^{134}Cs и ^{137}Cs прошли на глубину до полутора метров и были задержаны песком, ^{60}Co в песке практически не задержался и опустился до водоупорного глиняного слоя на глубину до 18 м. Загрязненный песок с суммарной активностью ^{134}Cs и ^{137}Cs около 1,1 ТБк был захоронен в могильники между ХЖО-1 и ХЖО-2. Для локализации радиационного загрязнения ^{60}Co с 1986 по 1991 гг. проводилась откачка грунтовых вод из трех подземных скважин. Всего было откачано 40000 м³ подземных вод с общей активностью 8,9 ТБк по ^{60}Co . Однако это не смогло препятствовать формированию ореола загрязнения подземных вод на расстоянии до 50 м от ХЖО-2 с объемными активностями от 37 кБк/л и на расстоянии до 150 м от ХЖО-2 в сторону р. Дон с объемными активностями 0,37 кБк/л. Загрязненные подземные воды могут разгружаться на участках русла р. Дон преимущественно между сбросным каналом блоков № 1 и 2 и береговой насосной станцией блоков № 1 и 2; в ковше, устье и в средней части русла сбросного канала блоков № 1 и 2; в средней части русла отводного канала на рыбхоз [8, 24].

Расчеты показали, что процессы поступления ^{60}Co в водоем-охладитель и связанные с этим радиационные риски в последнее время являются спон-

танными, не связанными с работой энергоблоков НВАЭС. Это также подтверждается сообщениями: «Причиной поступления ^{60}Co в р. Дон и пруды рыбхоза является разгрузка подземных вод из зоны локализации низкоактивных солевых промышленных отходов ХЖО-2 в устье сбросного канала 1 и 2 блоков. Колебания содержания этого радионуклида в гидробионтах, вероятно, связаны с природными явлениями (количество осадков, уровень воды в р. Дон и др.)» [25. С. 241].

В этой связи нельзя не отметить снижение роли ^{137}Cs в формировании радиационных рисков для ихтиофауны на фоне роста значения ^{60}Co . За рассмотренный десятилетний период влияние ^{137}Cs снизилось в 1,6 раза (рис. 8). В итоге вклад ^{137}Cs в формирование суммарного радиационного риска составил 7,7 %, вклад от ^{90}Sr – 10,6 %, против 81,7 % от ^{60}Co .

В табл. 3 представлены уровни радиационного риска для ихтиофауны водоемов-охладителей на завершающем этапе исследований. Показано, что в каждом водоеме радиационные риски для ихтиофауны были обусловлены изотопами разного проис-

хождения. В Белоярском водохранилище радиационные риски в основном связаны с влиянием долгоживущих радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs . Экологические риски для ихтиофауны водоема-охладителя ЛАЭС в настоящее время определяются влиянием двух радиационных составляющих. С одной стороны, еще значима роль ^{137}Cs , как следствие аварии на Чернобыльской АЭС, с другой стороны, уже начинают доминировать радионуклиды с наведенной активностью (^{14}C ; ^{60}Co ; ^3H и др.), которые могут быть производными работы ядерных реакторов на ЛАЭС. В водоеме-охладителе НВАЭС на формирование радиационных рисков большое влияние оказывает ^{60}Co , происхождение которого в основном связывают с аварией 1985 г. и образованием ореола загрязнения подземных вод. Несмотря на разные условия формирования, радиационные риски для ихтиофауны (кроме щуки) находятся в диапазоне одного порядка величин (10^{-4}), то есть на три порядка величин ниже критического значения коэффициента опасности. У щуки, соответственно, ниже на два порядка величин.

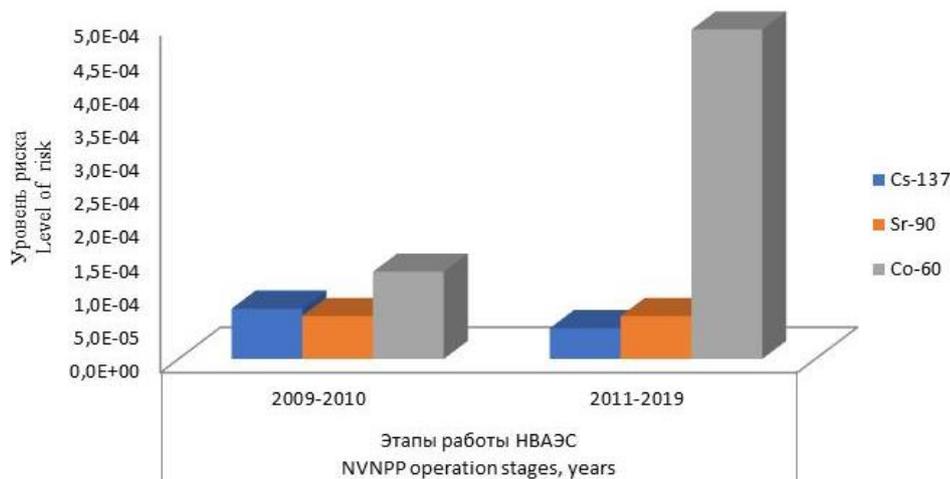


Рис. 8. Формирование радиационных рисков для ихтиофауны водоема-охладителя НВАЭС

Fig. 8. Formation of the radiation risks for the fish fauna of the Novovoronezhskaya NPP cooling pool

Таблица 3. Сравнительная оценка и основные слагаемые радиационных рисков для ихтиофауны водоемов-охладителей действующих АЭС

Table 3. Comparative assessment and main components of the radiation risks for the fish fauna of the operating NPPs cooling pools

Водоем-охладитель АЭС NPP cooling pool	Учетный период Accounting period	Рефератные виды ихтиофауны Reference species of fish fauna	Уровень радиационного риска Radiation risk level	Основные радиоизотопы main radioisotopes
Белоярское водохранилище (БАЭС) Beloyarsk reservoir (BNPP)	2016–2019	Лещ/Bream	9,0E-4	^{90}Sr ; ^{137}Cs
		Окунь/Perch	2,7E-4	
		Плотва/Roach	6,7E-4	
		Щука/Pike	1,6E-3	
Копорская губа (ЛАЭС) Koporskaya Bay (LNPP)	2000–2019	Окунь/Perch	5,0E-4	^{14}C ; ^{60}Co ; ^{137}Cs ; ^3H
		Плотва/Roach	8,3E-4	
		Салака/Herring	3,3E-4	
Пруд-охладитель НВАЭС NVNPP cooling pond	2011–2019	Донная рыба Benthic fish	6,0E-10 ⁻⁴	^{60}Co ; ^{90}Sr ; ^{137}Cs

Заключение

Радиационные экологические риски для ихтиофауны в водоемах-охладителях действующих АЭС обусловлены сочетанным воздействием радионуклидов разного происхождения, соотношение которых в разных водоемах может существенно меняться. Для Белоярского водохранилища характерна четко выраженная зависимость радиационной нагрузки на ихтиофауну от типов действующих энергоблоков на БАЭС. Наибольшие радиационные риски ихтиофауна водоема-охладителя испытывала в период работы первых двух энергоблоков с тепловыми реакторами АМБ-100 и АМБ-200. Основным источником экологических рисков для ихтиофауны в этот период был ^{137}Cs , который поступал с атомной станции через технические каналы в составе дебалансных вод и промливневых стоков с территории промплощадки БАЭС. После вывода из эксплуатации первых двух энергоблоков произошло значительное снижение уровней радиационной нагрузки на ихтиофауну. Такая тенденция продолжилась и после ввода в эксплуатацию четвертого энергоблока БН-800. На завершающем этапе исследований (2016–2019 гг.) радиационные риски для ихтиофауны водоема были обусловлены в основном влиянием ^{90}Sr . При этом ^{90}Sr с БАЭС в водоем-охладитель почти не сбрасывается, а имеет преимущественно глобальное происхождение. Таким образом, формирование рисков для ихтиофауны водоема-охладителя БАЭС в настоящее время больше зависит от поступления ^{90}Sr в составе атмосферных выпадений, а не от деятельности атомной станции.

Формирование радиационных рисков у ихтиофауны водоема-охладителя ЛАЭС в период 1973–1985 гг. было в значительной степени связано с присутствием в водоеме радионуклидов с наведенной ак-

тивностью (^{60}Co , ^{54}Mn и ^{65}Zn), образование которых может быть следствием работы ядерных реакторов АЭС. В период 1986–1990 гг. экологические риски у ихтиофауны Копорской губы были в основном вызваны последствиями радиационной аварии на Чернобыльской АЭС и загрязнением водоема ^{137}Cs . В последние годы (2000–2019 гг.) радиационные нагрузки на ихтиофауну вызваны сочетанным воздействием радиоцезия и радионуклидов с наведенной активностью (^{14}C ; ^{60}Co ; ^3H , ^{54}Mn и ^{65}Zn) при доминировании последних в процессе формирования суммарного экологического риска.

Уровень радиационного риска для ихтиофауны водоема-охладителя НВАЭС за десятилетний период наблюдения (2009–2019 гг.) повысился в 2,2 раза в основном за счет увеличения ^{60}Co во многих компонентах водоема. За наблюдаемый период его влияние на формирование радиационных рисков возросло в 3,8 раза и составило 81,7 % от суммарного значения. Нельзя исключить, что увеличение ^{60}Co в водоем-охладителе НВАЭС связано с радиоактивным загрязнением подземных вод в результате аварии в 1985 г.

В количественном выражении экологические риски для ихтиофауны во всех водоемах-охладителях на два–три порядка величин ниже максимально допустимого коэффициента опасности. Таким образом, результаты исследований подтверждают, что во всех водоемах-охладителях действующих атомных электростанций (БАЭС, ЛАЭС, НВАЭС) радиационные риски являются приемлемыми для существования и развития разных видов рыб. При работе АЭС в штатном режиме не образуется недопустимых радиационных рисков, представляющих реальную экологическую угрозу для ихтиофауны водоемов-охладителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линге И.И., Крышев И.И. Радиозэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома. – М.: САМ полиграфист, 2015. – 296 с.
2. Djingova R., Kuleff I. Concentration of caesium-137, cobalt-60 and potassium-40 in some wild and edible plants around the nuclear power plant in Bulgaria // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2002. – Vol. 59. – P. 61–73.
3. Analysis of the influence of nuclear facilities on environmental radiation by monitoring the highest nuclear power plant density region / U. Lee, C. Lee, M. Kim, H.R. Kim // *Nuclear Engineering and Technology*. – 2019. – Vol. 51. – P. 1626–1632.
4. Оценка радиационной безопасности морской среды в районе расположения Ленинградской АЭС по данным многолетнего мониторинга (1973–2019) / И.И. Крышев, Т.Г. Сазыкина, Н.Н. Павлова, И.В. Косых, А.А. Бурякова, А.И. Крышев // *Морской биологический журнал*. – 2021. – Т. 6. – № 1. – С. 41–57.
5. Росгидромет, НПО «Тайфун». Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2021 году. – Обнинск: ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2022. – 342 с.
6. Радиозэкологические исследования Белоярского водохранилища / М.Я. Чеботина, А.В. Трапезников, В.Н. Трапезникова, Н.В. Куликов. – Свердловск: УрО АН СССР, 1992. – 78 с.
7. Радиозэкологический мониторинг пресноводных экосистем / А.В. Трапезников, В.Н. Трапезникова, А.В. Коржавин, В.Н. Николкин. – Екатеринбург: Изд-во АкадемНаука, 2019. – Т. IV. – 448 с.
8. Радиозэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» / под общ. ред. И.И. Линге, И.И. Крышева. – М.: ГК «Росатом», 2021. – 555 с.
9. Росгидромет, НПО «Тайфун». Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2017 году. – Обнинск: ООО «Красногорский полиграфический комбинат», 2018. – 360 с.
10. Лаврентьева Г.В., Сызыныс Б.И. Современные тенденции оценки радиационного экологического риска. Обзор // *Радиация и риск*. – 2020. – Т. 29. – № 2. – С. 128–138.

11. Анализ подходов к радиационно-экологическому мониторингу в районах размещения ядерно и радиационно опасных объектов. Обзор / А.В. Панов, Н.И. Санжарова, В.К. Кузнецов, С.И. Спиридонов, Д.Н. Курбаков // Радиация и риск. – 2019. – Т. 28. – № 3. – С. 75–95.
12. Сазыкина Т.Г., Крышев А.И., Крышев И.И. Моделирование радиоэкологических процессов в окружающей среде. – М.: ООО «Маска», 2022. – 638 с.
13. Radiation weighting for reference animals and plants. ICRP Publication 148. – Ann. ICRP. – 2021. – Vol. 50. – № 2. – P. 3–133.
14. Шандала Н.К., Коренков И.П., Романов В.В. Состояние радиационно-гигиенической обстановки в районе размещения АЭС // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2015. – Т. 60. – № 2. – С. 15–21.
15. The ERICA tool / J.E. Brown, B. Alfonso, R. Avila, N.A. Beresford, D. Copplestone, G. Prohl, A. Ulanovsky // J. Environment. Radioactivity. – 2008. – Vol. 99. – № 9. – P. 1371–1383.
16. A new version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals / J.E. Brown, B. Alfonso, R. Avila, N. Beresford, D. Copplestone, A. Hosseini // J. Environment. Radioactivity. – 2016. – Vol. 153. – P. 14–49.
17. D-ERICA: an integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation. Description of purpose, methodology and application. A Deliverable Report for the Project «ERICA» (Contract No. FI6R-CT-2004-508847) within the EC's VIth Framework Programme / N. Beresford, J. Brown, D. Copplestone, J. Garnier-Laplace, B. Howard, C.-M. Larsson, D. Oughton, G. Prohl, I. Zinger. – Stockholm: Swedish Radiation Protection Authority, 2007. – 82 p.
18. Larsson C.M. An overview of the ERICA integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionising contaminants // J. Environment Radioactivity. – 2008. – Vol. 99. – P. 1364–1370.
19. Оценка дозы и экологического риска для объектов биоты в районе расположения Горно-химического комбината / А.А. Бурякова, И.И. Крышев, Т.Г. Сазыкина, М.В. Ведерникова, С.В. Панченко // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2020. – Т. 60. – № 6. – С. 661–670.
20. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants // ICRP Publication 108. – 2008. – Vol. 38. – № 4–6. – 242 p.
21. Radioactive effluents released from Korean nuclear power plants and the resulting radiation doses to members of the public / T.Y. Kong, S. Kim, Y. Lee, J.K. Son, S.J. Maeng // Nuclear Engineering and Technology. – 2017. – Vol. 49. – P. 1772–1777.
22. Kotzer T., Trivedi A. Dosimetric implications of atmospheric dispersal of tritium near a heavy-water research reactor facility // Radiation Protection Dosimetry. – 2001. – Vol. 93. – № 1. – P. 61–66.
23. Kim C.K., Han M.J. Dose assessment and behavior of tritium in environmental samples around Wolsong nuclear power plant // Applied Radiation and Isotopes. – 1999. – Vol. 50. – P. 783–791.
24. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома // под общ. ред. И.И. Линге, И.И. Крышева. – М.: САМ полиграфист, 2015. – 296 с.
25. Росгидромет, НПО «Тайфун». Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2005 году. – Обнинск: АНО «Метеоагентство Росгидромета», 2006. – 274 с.

Информация об авторах

Владислав Геннадьевич Городецкий, кандидат физико-математических наук, старший инженер лаборатории общей радиоэкологии Института экологии растений и животных УрО РАН, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202. vgorodetsky@mail.ru

Александр Викторович Трапезников, доктор биологических наук, заведующий Биофизической станцией и Отделом континентальной радиоэкологии Института экологии растений и животных УрО РАН, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202

Вера Николаевна Трапезникова, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории общей радиоэкологии Института экологии растений и животных УрО РАН, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202. vera_zar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1576-8536>

Александр Васильевич Коржавин, кандидат ветеринарных наук, старший научный сотрудник лаборатории общей радиоэкологии Института экологии растений и животных УрО РАН, Россия, 620144, г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202. BFS_zar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0963-6593>

Поступила в редакцию: 17.04.2023

Поступила после рецензирования: 02.11.2023

Принята к публикации: 25.01.2024

REFERENCES

1. Linge I.I., Kryshev I.I. *Radioecological situation in the regions where Rosatom enterprises are located*. Moscow, SAM polygraphist Publ., 2015. 296 p. (In Russ.)
2. Djingova R., Kuleff I. Concentration of caesium-137, cobalt-60 and potassium-40 in some wild and edible plants around the nuclear power plant in Bulgaria. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2002, vol. 59, pp. 61–73.
3. Lee U., Lee C., Kim M., Kim H.R. Analysis of the influence of nuclear facilities on environmental radiation by monitoring the highest nuclear power plant density region. *Nuclear Engineering and Technology*, 2019, vol. 51, pp. 1626–1632.
4. Kryshev I.I., Sazykina T.G., Pavlova N.N., Kosykh I.V., Buryakova A.A., Kryshev A.I. Assessment of radiation state of marine environment in the Leningrad NPP area according to long-term monitoring data (1973–2019). *Marine Biological Journal*, 2021, vol. 6, no. 1, pp. 41–57. (In Russ.)
5. *Radiation situation in Russia and neighboring states in 2021*. Obninsk, FGBI "VNIIGMI-MCD" Publ., 2022. 342 p. (In Russ.)

6. Chebotina M.Ya., Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Kulikov N.V. *Radioecological studies of the Beloyarsky storage pond*. Sverdlovsk, UrO AN SSSR Publ., 1992. 78 p. (In Russ.)
7. Trapeznikov A.V., Trapeznikova V.N., Korzhavin A.V., Nikolkin V.N. *Radioecological monitoring of the freshwater ecosystems*. Ekaterinburg, AkademNauka Publ., 2019. Vol. IV, 448 p. (In Russ.)
8. *Radioecological situation in the regions where the enterprises of the State Nuclear Energy Corporation "Rosatom" are located*. Eds. I.I. Linge, I.I. Kryshev. Moscow, Rosatom Group of Companies Publ., 2021. 555 p. (In Russ.)
9. *Radiation situation in Russia and neighboring states in 2017*. Obninsk, Krasnogorsk Printing Plant LLC Publ., 2018. 360 p. (In Russ.)
10. Lavrentyeva G.V., Synzynys B.I. Modern trends in the radiation environmental risk assessment. Review. *Radiation and risk*, 2020, vol. 29, no. 2, pp. 128–138. (In Russ.)
11. Panov A.V., Sanzharova N.I., Kuznetsov V.K., Spiridonov S.I., Kurbakov D.N. Analysis of approaches to organization of radioecological monitoring on areas of nuclear and radiation-hazardous facilities location. Review. *Radiation and Risk*, 2019, vol. 28, no. 3, pp. 75–95. (In Russ.)
12. Sazykina T.G., Kryshev A.I., Kryshev I.I. *Modeling of the radioecological processes in the environment*. Moscow, OOO «Maska» Publ., 2022. 638 p. (In Russ.)
13. Radiation weighting for reference animals and plants. *ICRP Publication 148*, 2021, vol. 50, no. 2, pp. 3–133.
14. Shandala N.K., Korenkov I.P., Romanov V.V. The state of the radiation-hygienic situation in the NPP location area. *Meditinskaya radiologiya i radiatsionnaya bezopasnost*, 2015, vol. 60, no. 2, pp. 15–21.
15. Brown J.E., Alfonso B., Avila R., Beresford N.A., Copplestone D., Prohl G., Ulanovsky A. The ERICA tool. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, vol. 99, pp. 1371–1383.
16. Brown J.E., Alfonso B., Avila R., Beresford N., Copplestone D., Hosseini A. A new version of the ERICA tool to facilitate impact assessments of radioactivity on wild plants and animals. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, vol. 153, pp. 141–149.
17. Beresford N., Brown J., Copplestone D., Garnier-Laplace J., Howard B., Larsson C.-M., Oughton D., Prohl G., Zinger I. *D-ERICA: an integrated approach to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation. Description of purpose, methodology and application. A Deliverable Report for the Project «ERICA» (Contract No. FI6R-CT-2004-508847) within the EC's Vth Framework Programme*. Stockholm, Swedish Radiation Protection Authority, 2007. 82 p.
18. Larsson C.M. An overview of the ERICA Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionizing contaminants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2008, vol. 99, pp. 1364–1370.
19. Buryakova A.A., Kryshev I.I., Sazykina T.G., Vedernikova M.V., Panchenko S.V. Dose and environmental risk assessment for biota objects in the area of the Mining and Chemical Plant. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya*, 2020, vol. 60, no. 6, pp. 661–670. (In Russ.)
20. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants. *ICRP Publication 108*, 2008, vol. 38, no. 4–6, 242 p.
21. Kong T.Y., Kim S., Lee Y., Son J.K., Maeng S.J. Radioactive effluents released from Korean nuclear power plants and the resulting radiation doses to members of the public. *Nuclear Engineering and Technology*, 2017, vol. 49, pp. 1772–1777.
22. Kotzer T., Trivedi A. Dosimetric implications of atmospheric dispersal of tritium near a heavy-water research reactor facility. *Radiation Protection Dosimetry*, 2001, vol. 93, no. 1, pp. 61–66.
23. Kim C.K., Han M.J. Dose assessment and behavior of tritium in environmental samples around Wolsong nuclear power plant. *Applied Radiation and Isotopes*, 1999, vol. 50, pp. 783–791.
24. *Radioecological situation in the regions where Rosatom enterprises are located*. Eds. I.I. Linge, I.I. Kryshev. Moscow, SAM poligrafist Publ., 2015. 296 p. (In Russ.)
25. *Radiation situation in Russia and neighboring states in 2005*. Obninsk, ANO "Meteorological Agency of Roshydromet" Publ., 2006. 274 p. (In Russ.)

Information about the authors

Vladislav G. Gorodetsky, Cand. Sc., Senior Engineer, Institute of Plant and Animal Ecology Russian Academy of Science, Russian Branch, 202, 8 Marta street, Ekaterinburg, 620144, Russian Federation. vgorodetsky@mail.ru

Aleksandr V. Trapeznikov, Dr. Sc., Head of the Biophysical Station and the Department of Continental Radioecology, Institut of Plant and Animal Ecology Russian Academy of Science, Russian Branch, 202, 8 Marta street, Ekaterinburg, 620144, Russian Federation

Vera N. Trapeznikova, Cand. Sc., Senior Researcher, Institut of Plant and Animal Ecology Russian Academy of Science, Russian Branch, 202, 8 Marta street, Ekaterinburg, 620144, Russian Federation. vera_zar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0002-1576-8536>

Aleksandr V. Korzhavin, Cand. Sc., Senior Researcher, Institut of Plant and Animal Ecology Russian Academy of Science, Russian Branch, 202, 8 Marta street, Ekaterinburg, 620144, Russian Federation. BFS_zar@mail.ru; <https://orcid.org/0000-0003-0963-6593>

Received: 17.04.2023

Revised: 02.11.2023

Accepted: 25.01.2024