

УДК 539.163:574:614.876

ДИНАМИКА РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ В ЗОНЕ НАБЛЮДЕНИЯ ФГУП “ПО “МАЯК”

© 2022 г. Н. Н. Павлова^{1,*}, И. И. Крышев¹, А. И. Крышев¹¹Научно-производственное объединение “Тайфун”, Обнинск, Россия

*E-mail: pavlova@rpatyphoon.ru

Поступила в редакцию 09.03.2022 г.

После доработки 31.08.2022 г.

Принята к публикации 07.09.2022 г.

На основе данных мониторинга и расчета интегрального показателя загрязнения в компонентах природной среды выполнен анализ радиоэкологической обстановки в зоне наблюдения ФГУП “ПО “Маяк”, включая территорию Восточно-Уральского радиоактивного следа. Произведена оценка контрольных уровней содержания радионуклидов в атмосферном воздухе, почве и поверхностных водах на основе экологических критериев с учетом специфики радиоактивного загрязнения территории в соответствии с Рекомендациями Росгидромета. Для оценки контрольных уровней содержания радионуклидов в компонентах природной среды в качестве критического организма наземной биоты определен лось (*Alces alces*), водной биоты – рыба карп (*Cyprinus carpio*). Представлена многолетняя динамика интегрального показателя загрязнения техногенными радионуклидами (⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ²³⁹Pu) в компонентах природной среды. Анализ радиационной обстановки не выявил превышения экологически безопасного уровня облучения биоты для интегрального показателя загрязнения компонентов природной среды в зоне наблюдения предприятия. Для современной оценки радиоэкологической обстановки в районе расположения ФГУП “ПО “Маяк” необходимо учитывать радиоактивное загрязнение территории, связанное с прошлой деятельностью предприятия.

Ключевые слова: радионуклиды, биота, радиоэкологическая обстановка, мониторинг, многолетняя динамика, Восточно-Уральский радиоактивный след, контрольный уровень, атмосферный воздух, почва, поверхностные воды, интегральный показатель загрязнения

DOI: 10.31857/S0869803122060091

Оценка радиоэкологической обстановки по данным мониторинга в районе расположения радиационно опасных объектов является одной из актуальных задач в настоящее время. Объектом представленного исследования являлась зона наблюдения ФГУП “ПО “Маяк” (ПО “Маяк”), как одного из ключевых предприятий атомной отрасли нашей страны.

ПО “Маяк” расположен в Челябинской области, вблизи городов Кыштым и Касли, на территории закрытого административно-территориального образования Озерского городского округа. Промышленная площадка ПО “Маяк” занимает площадь 256 км², граница которой совпадает с внешней границей санитарно-защитной зоны [1].

Предприятие создавалось в конце 40-х годов прошлого века для получения оружейного плутония и переработки делящихся материалов. В настоящее время производство оружейного плутония прекращено, и на предприятии созданы гражданские производства ядерно-топливного цикла, радиоактивных источников и препаратов.

ПО “Маяк” входит в состав Государственной корпорации по атомной энергии “Росатом” и представляет собой производственный комплекс, включающий реакторное, химическое, химико-металлургическое, радиохимическое, радиоизотопное производство, приборно-механический завод, службу экологии и ряд обеспечивающих подразделений [1].

Радиационная обстановка в районе ПО “Маяк” сформировалась в основном в результате прошлой деятельности предприятия. Радиоактивное загрязнение территории обусловлено как функционированием предприятия, в особенности на первых этапах в условиях отсутствия технологического опыта, так и рядом аварийных ситуаций. Сброс жидких радиоактивных отходов (РАО) в р. Теча в начальный период работы предприятия привел к загрязнению радионуклидами поймы и донных отложений, а иловые отложения в верхней части реки рассматриваются как твердые РАО [2–5]. В настоящее время содержание техногенных радионуклидов в сбросах и выбросах

предприятия значительно ниже установленных норм [6].

Контроль за содержанием техногенных радионуклидов в компонентах природной среды санитарно-защитной зоны (СЗЗ) и зоны наблюдения (ЗН) ПО “Маяк” проводится системой радиационного и радиоэкологического контроля и мониторинга (СРКМ) предприятия, которая функционирует с 1951 г. Мониторинг загрязнения природной среды техногенными радионуклидами в 100-километровой зоне ПО “Маяк” осуществляется Уральским УГМС Росгидромета.

Цель исследования – оценка радиоэкологической обстановки на основе расчета интегрального показателя загрязнения (ИПЗ) по данным многолетнего мониторинга содержания техногенных радионуклидов в компонентах природной среды зоны наблюдения ПО “Маяк” с использованием экологических критериев. Полученные результаты позволяют проанализировать изменения радиоэкологической обстановки в районе расположения ПО “Маяк” за многолетний период. Использование ИПЗ дает возможность провести интегральную оценку радиационной обстановки по данным мониторинга. Важным достоинством методологии оценки ИПЗ является переход от множества данных мониторинга к единому показателю, позволяющему сравнивать опасность различных составляющих загрязнения окружающей среды, оптимизировать мониторинг радиационной обстановки, принять практических решений в области охраны окружающей среды и планирования природоохранных мероприятий.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Оценка радиационной обстановки в зоне наблюдения ПО “Маяк” проводилась на основе данных мониторинга загрязнения ^{90}Sr , ^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$ атмосферного воздуха, водных объектов и почвы за период 2001–2020 гг. [1, 6]. На первом этапе работ по данным наблюдений и методикам, представленным в Рекомендациях Росгидромета [7–9], рассчитывались контрольные уровни (КУ) содержания ^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{239}Pu в компонентах природной среды с учетом местных значений коэффициентов накопления в представительных видах биоты на территории расположения ПО “Маяк” [10]. Непревышение этих контрольных уровней обеспечивает радиационную безопасность окружающей среды.

Методология ограничения радиационно-экологического воздействия на биоту основана на постулате порогового действия ионизирующего излучения на организмы. Для оценки этого воздействия должны быть определены представительные объекты биоты в соответствии с [7]. Для выбора представительных объектов биоты ис-

пользуются следующие критерии: экологическая значимость объекта биоты; доступность для мониторинга радиационной обстановки; величина мощности дозы облучения объекта биоты; радиочувствительность; способность к самовосстановлению [8].

При оценке контрольных уровней содержания радионуклидов значение критерия предельно допустимого радиационно-экологического воздействия для рыб принимается равным 1 мГр/сут, для млекопитающих – 0.1 мГр/сут [11, 12]. Для рассматриваемых радионуклидов (^{90}Sr , ^{137}Cs , ^{239}Pu) в Рекомендациях Росгидромета рыбы и наземные млекопитающие определены как критические группы водной и наземной биоты [7–9].

Контрольный уровень содержания r -го радионуклида $CL_{r, \text{биота}}^{\text{возд}}$ в атмосферном воздухе, рассчитанный по критерию не превышения безопасных уровней облучения биоты, определяется как верхняя граница активности r -го радионуклида в воздухе, постоянный уровень которой, поддерживаемый на протяжении жизни организма, соответствует получению представительными видами наземной биоты суммарных мощностей дозы от внутреннего и внешнего облучения, не превышающих установленных пороговых значений облучения [9].

Контрольный уровень содержания r -го радионуклида в приземном воздухе наземной территории для объекта биоты $CL_r^{\text{возд}}$ Бк/м³, который не должен превышать для обеспечения радиационной безопасности по экологическому критерию, рассчитывается по формуле

$$CL_r^{\text{возд}} = \frac{P_{\max}}{P_r}, \quad (1)$$

где P_{\max} – критерий предельно допустимого радиационного воздействия для объекта биоты; P_r – суммарная мощность дозы облучения объекта биоты при единичном загрязнении воздуха r -м радионуклидом (1 Бк/м³).

Суммарная мощность дозы облучения P_r объекта биоты при единичном загрязнении воздуха (1 Бк/м³) r -м радионуклидом определяется как сумма дозовых нагрузок по всем путям облучения, прямо или опосредованно связанным с радиоактивным загрязнением воздуха [9]:

$$P_r = \sum P_{r, n, i}, \quad (2)$$

где $P_{r, n, i}$ – вклады отдельных путей облучения в суммарную дозовую нагрузку, включая следующие пути:

- внешнее облучение от воздуха, содержащего r -й радионуклид ($i = 1, P_{r,1}$);
- внешнее облучение от почвы, загрязненной выпадениями r -го радионуклида из воздуха ($i = 2, P_{r,2}$);

– внутреннее облучение организма при обитании на загрязненной почве ($i = 3, P_{r,3}$);

– внутреннее облучение организма при ингаляции r -го радионуклида из воздуха ($i = 4, P_{r,4}$).

Контрольные уровни загрязнения атмосферного воздуха при хроническом воздействии и в равновесии с загрязнением почв от выпадений из атмосферного воздуха по экологическому критерию соответствуют пороговым значениям дозовых нагрузок на биоту, ниже которых радиационные эффекты на наиболее чувствительных представителей наземной биоты не приводят к повреждению популяций и экосистем, хотя могут вызвать незначительные эффекты на отдельных наиболее чувствительных особях биоты [9].

Для оценки радиационной безопасности в зоне наблюдения ПО “Маяк” использовали интегральный показатель загрязнения (ИПЗ) атмосферного воздуха, который рассчитывается по формуле:

$$\text{ИПЗ} = \sum_i \frac{A_i}{A_{k,i}} < 1, \quad (3)$$

где A_i – удельная активность i -го радионуклида в атмосферном воздухе, Бк/м³;

$A_{k,i}$ – контрольный уровень удельной активности i -го радионуклида в атмосферном воздухе. Для обеспечения экологической безопасности при наличии в атмосферном воздухе смеси техногенных радионуклидов значение ИПЗ должно быть меньше 1.

Контрольный уровень удельной активности i -го радионуклида в почве для объекта наземной биоты $A_{m,i,эк}$, Бк/кг, рассчитывается по формуле

$$A_{m,i,эк} = \frac{P_{\max}}{(DCF_{i,1} \cdot CF_{i,4} + DCF_{i,4})}, \quad (4)$$

где P_{\max} – критерий предельно допустимого радиационно-экологического воздействия на объект пресноводной биоты, мГр/сут; $DCF_{i,1}$ – фактор дозовой конверсии для внутреннего облучения объекта пресноводной биоты от i -го радионуклида, (мГр/сут)/(Бк/кг сырого веса); $CF_{i,2}$ – коэффициент накопления i -го радионуклида в объекте пресноводной биоты, л/кг; $DCF_{i,2}$ – фактор дозовой конверсии для внешнего облучения объекта пресноводной биоты от i -го радионуклида, (мГр/сут)/(Бк/л);

α_2^1 – доля времени, которую объект пресноводной биоты проводит в воде, безразмерный;

где P_{\max} – критерий предельно допустимого радиационно-экологического воздействия на объект наземной биоты, мГр/сут; $DCF_{i,1}$ – фактор дозовой конверсии для внутреннего облучения объекта наземной биоты от i -го радионуклида, (мГр/сут)/(Бк/кг сырого веса); $CF_{i,4}$ – коэффициент накопления i -го радионуклида в объекте наземной биоты, (Бк/кг сырой массы)/(Бк/кг почвы); $DCF_{i,4}$ – фактор дозовой конверсии для внешнего облучения объекта наземной биоты от i -го радионуклида, (мГр/сут)/(Бк/кг сырого веса).

Контрольный уровень удельной активности i -го радионуклида рассчитывался для верхнего 10-сантиметрового слоя почвы.

Значение $CF_{i,4}$ рекомендуется определять на основе данных наблюдений для исследуемой территории. В случае отсутствия таких данных использовались значения, представленные в Рекомендациях Росгидромета [7]. Значения параметров $DCF_{i,1}$, $DCF_{i,4}$ указаны в Рекомендациях Росгидромета [7].

Для обеспечения радиационной безопасности объектов наземной биоты должно выполняться условие:

$$\text{ИПЗ} = \sum_i \frac{A_i}{A_{m,i,эк}} < 1, \quad (5)$$

где A_i – удельная активность i -го радионуклида в верхнем 10-сантиметровом слое почвы для объектов биоты, обитающих на поверхности, Бк/кг сырого веса; $A_{m,i,эк}$ – контрольный уровень удельной активности i -го радионуклида в почве, Бк/кг.

Контрольный уровень объемной активности i -го радионуклида в пресной воде для объекта пресноводной биоты $A_{v,i,эк}$, Бк/л, рассчитывается по формуле [7]:

$$A_{v,i,эк} = \frac{P_{\max}}{(DCF_{i,1} \cdot CF_{i,2} + DCF_{i,2} \cdot \alpha_2^1 + 0,5 \cdot DCF_{i,2} \cdot K_{d,i} \cdot \alpha_3^1)}, \quad (6)$$

$K_{d,i}$ – коэффициент распределения i -го радионуклида между пресной водой и донными отложениями, л/кг;

α_3^1 – доля времени, которую объект пресноводной биоты проводит вблизи дна.

Значения параметров $DCF_{i,1}$, $DCF_{i,2}$, α_2^1 , α_3^1 указаны в Рекомендациях Росгидромета [7].

Значения параметров $CF_{i,2}$, $K_{d,i}$ рекомендуется определять на основе данных наблюдений для исследуемого пресноводного объекта. В случае отсутствия таких данных использовались значения, представленные в Рекомендациях Росгидромета [7].

Таблица 1. Коэффициенты накопления радионуклидов в организме лося из почвы ((Бк/кг сырой массы)/(Бк/кг почвы)) и контрольные уровни содержания ^{90}Sr , ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ в атмосферном воздухе и почве в районе расположения ПО “Маяк”

Table 1. Coefficients of accumulation of radionuclides in the body of an elk from the soil ((Bq/kg of wet weight)/(Bq/kg of soil)) and control levels of ^{90}Sr , ^{137}Cs and $^{239,240}\text{Pu}$ content in atmospheric air and soil in the area of the location of “Mayak Production Association”

$K_{\text{н}}/КУ$	^{90}Sr	^{137}Cs	^{239}Pu
$K_{\text{н}}$ (лось) [10], (Бк/кг сырой массы)/(Бк/кг почвы)	0.24 ± 0.16	0.003 ± 0.002	0.0010 ± 0.0003
атмосферный воздух			
КУ, Бк/м ³	1.1	2.0	1.7
КУ, Бк/м ³ [9]	3.3	3.4	46
почва			
КУ, (Бк/кг)	3.0×10^4	7.3×10^4	1.4×10^6
КУ, (Бк/кг) [7]	3.8×10^4	4.0×10^4	6.0×10^5

Для обеспечения радиационной безопасности объектов водной биоты должно выполняться условие не превышения экологически безопасного уровня для интегрального показателя загрязнения (ИПЗ).

$$\text{ИПЗ} = \sum_i \frac{A_{v,i}}{A_{v,i,\text{ЭК}}} < 1, \quad (7)$$

где $A_{v,i}$ – объемная активность i -го радионуклида в пресной воде, Бк/л; $A_{v,i,\text{ЭК}}$ – контрольный уровень объемной активности i -го радионуклида в пресной воде для объекта пресноводной биоты, Бк/л.

В качестве исходных данных для расчета показателей загрязнения радионуклидами компонентов природной среды использовали данные мониторинга радиационной обстановки, полученные системой производственного экологического контроля ПО “Маяк” и данные Уральского УГМС [1, 6]. Расчет интегрального показателя загрязнения техногенными радионуклидами атмосферного воздуха и почвы проводили по усредненным данным мониторинга в зоне наблюдения за период 2011–2020 гг. Для водных объектов проведена оценка загрязнения техногенными радионуклидами р. Теча (2001–2020 гг.), озер Иртыш (2004–2020 гг.) и Урускуль (по данным мониторинга 2005 г.). Оз. Иртыш является основным источником водоснабжения г. Озерска [1], озеро Урускуль расположено в головной части Восточно-Уральского радиоактивного следа (ВУРС) и выведено из водопользования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Для оценки загрязнения техногенными радионуклидами атмосферного воздуха и почвы в зоне наблюдения ПО “Маяк” в соответствии с Рекомендациями Росгидромета [8] в качестве представ-

ительного организма наземной биоты для загрязненных радионуклидами территорий был определен лось (*Alces alces*). Значения коэффициентов накопления ($K_{\text{н}}$) радионуклидов в организме лося (*Alces alces*) из почвы и контрольных уровней (КУ) содержания ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{239}Pu в атмосферном воздухе и почве приведены в табл. 1.

Значения контрольных уровней содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в атмосферном воздухе и почве в районе расположения ПО “Маяк” сопоставимы с контрольными уровнями, указанными в Рекомендациях Росгидромета [7, 9]. Контрольные уровни содержания ^{239}Pu в вышеуказанных компонентах природной среды отличаются от указанных в Рекомендациях, так как по данным мониторинга в районе исследования значение коэффициента накопления ^{239}Pu в организме наземного млекопитающего отличается от предложенного в Рекомендациях [8]. Расхождение в значениях контрольных уровней и коэффициентов накопления связаны с тем, что в Рекомендациях Росгидромета приведены обобщенные данные, а в настоящей работе в качестве исходных данных использовались результаты мониторинга в зоне наблюдения ПО “Маяк”.

Расчет интегрального показателя загрязнения (ИПЗ) техногенными радионуклидами атмосферного воздуха и почвы проводился с учетом контрольных уровней, полученных на основе данных мониторинга в районе расположения предприятия. Динамика интегрального показателя загрязнения за период 2011–2020 гг. приведена на рис. 1, 2.

Содержание ^{90}Sr в 2011–2020 гг. в атмосферном воздухе зоны наблюдения ПО “Маяк” изменялось в диапазоне 0.02–0.26 мБк/м³, ^{137}Cs – 0.04–0.28 мБк/м³, изотопов Pu – 0.002–0.032 мБк/м³ [1]. Анализ изменений ИПЗ (4.7×10^{-5} – $3.4 \times$

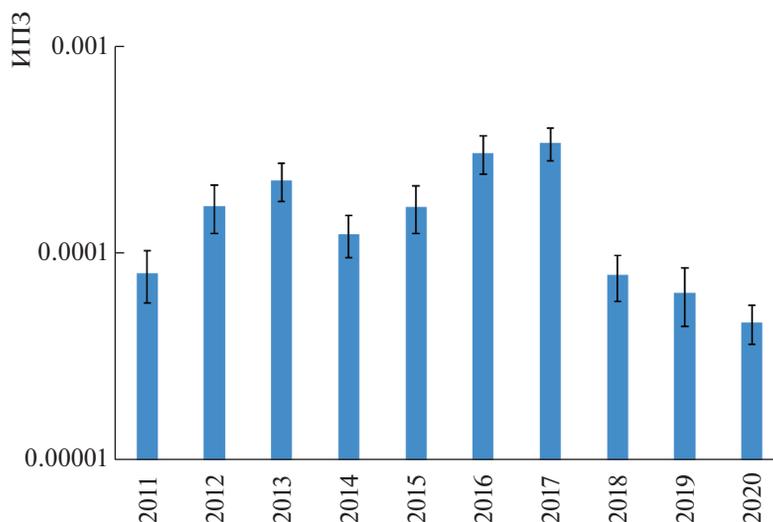


Рис. 1. Динамика интегрального показателя загрязнения атмосферного воздуха ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{239}Pu в зоне наблюдения ПО “Маяк” за период 2011–2020 гг.

Fig. 1. Dynamics of the integral indicator of atmospheric air pollution ^{90}Sr , ^{137}Cs and ^{239}Pu in the observation area of “Mayak Production Association” for the period 2011–2020.

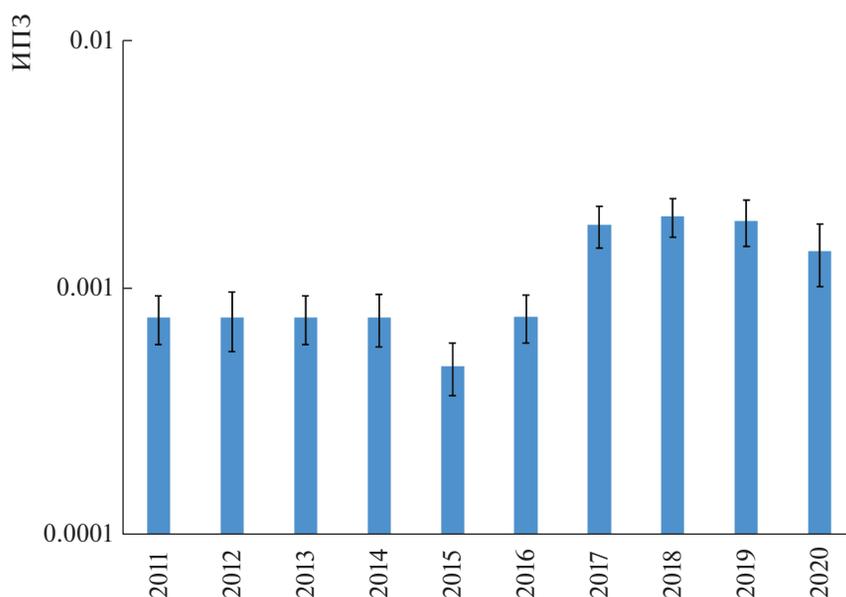


Рис. 2. Динамика интегрального показателя загрязнения почвы ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{239}Pu в зоне наблюдения ПО “Маяк” за период 2011–2020 гг.

Fig. 2. Dynamics of the integral indicator of soil pollution ^{90}Sr , ^{137}Cs and ^{239}Pu in the observation area of “Mayak Production Association” for the period 2011–2020.

$\times 10^{-4}$) атмосферного воздуха ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{239}Pu показывает, что за период исследования 2011–2020 гг. полученные значения показателя были значительно ниже безопасного уровня облучения биоты, т.е. удовлетворяли условиям обеспечения радиационной безопасности и сохранения благоприятной окружающей среды. Колебания значений ИПЗ за рассматриваемый период связаны с

изменениями содержания радионуклидов в атмосферном воздухе в разные годы наблюдений.

Следует отметить динамику вклада радионуклидов в ИПЗ. Так, в 2011 г. вклад ^{90}Sr составил 67.5%, ^{137}Cs – 31%, ^{239}Pu – 1.5%. В 2020 г. вклад ^{90}Sr снизился до 45%, ^{137}Cs внес 38.6% в значение ИПЗ, ^{239}Pu – 16.4%. За рассматриваемый период

Таблица 2. Коэффициенты накопления техногенных радионуклидов в рыбе, обитающей в водных объектах в районе расположения ПО “Маяк”**Table 2.** Coefficients of accumulation of technogenic radionuclides in fish living in water objects in the area of the location of “Mayak Production Association”

Водный объект/ референтный объект биоты	K_n^* , л/кг			K_n , л/кг [8]					
	^{90}Sr	^{137}Cs	$^{239,240}\text{Pu}$	^{90}Sr	^{137}Cs	$^{239,240}\text{Pu}$			
Р. Теча (с. Першинское)									
Рыба придонная	49 ± 26	20 ± 7	43 ± 18	190	3000	60			
Оз. Урускуль									
Рыба придонная	920 ± 320	2400 ± 850	—						
Оз. Иртяш									
Рыба придонная	75 ± 33	330 ± 100	—						

Примечание. * Расчет коэффициентов накопления проводился с использованием данных, представленных в [13–16].

Таблица 3. Контрольные уровни содержания техногенных радионуклидов в водных объектах зоны наблюдения ПО “Маяк”**Table 3.** Control levels of technogenic radionuclides in the water objects of the observation zone of “Mayak Production Association”

Водный объект	КУ Бк/л			КУ Бк/л [7]		
	^{90}Sr	^{137}Cs	$^{239,240}\text{Pu}$	^{90}Sr	^{137}Cs	^{239}Pu
Р. Теча	1300 ± 470	190 ± 60	320 ± 70			
Оз. Урускуль	63 ± 19	7.0 ± 1.6	—	320	15.6	231
Оз. Иртяш	870 ± 240	560 ± 120	—			

Примечание. Расчет контрольных уровней проводился с использованием данных, представленных в [13–16].

вклад ^{90}Sr в ИПЗ изменялся в диапазоне 45.5–69.5%, ^{137}Cs – 30.7–50.2%, ^{239}Pu – 1.4–16.4%.

Значения ИПЗ почвы ^{90}Sr , ^{137}Cs и ^{239}Pu в зоне наблюдения ПО “Маяк” за период 2011–2020 гг. не превышали экологически безопасного уровня облучения биоты (рис. 2) и изменялись от 0.001 до 0.002. Основной вклад в значение ИПЗ за период 2011–2020 гг. вносит ^{90}Sr – 54.7–79.0%, доля ^{137}Cs составляет 20.7–45.2%, ^{239}Pu – 0.1–0.5%. Содержание ^{90}Sr в 2011–2020 гг. в почве зоны наблюдения ПО “Маяк” варьировало от 9.4 до 46.3 Бк/кг, ^{137}Cs – от 12.5 до 39.4 Бк/кг, изотопов Pu – от 1.3 до 8.8 Бк/кг [1]. Увеличение значений ИПЗ с 2017 г. обусловлено более высокими значениями удельной активности радионуклидов в почве, что возможно связано с особенностями пробоотбора и последующего определения содержания техногенных радионуклидов в почве.

Результаты расчета коэффициентов накопления (K_n) и контрольных уровней (КУ) содержания радионуклидов в водных объектах зоны наблюдения ПО “Маяк” представлены в табл. 2, 3. Для сравнения в табл. 2, 3 приведены значения контрольных уровней содержания радионукли-

дов в водных объектах, указанных в Рекомендациях Росгидромета [7].

Данные, представленные в табл. 2, показывают, что максимальные значения коэффициентов накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs наблюдаются в биоте оз. Урускуль, которое было загрязнено техногенными радионуклидами в результате аварии на ПО “Маяк” в 1957 г. По результатам расчетов минимальные значения контрольных уровней содержания ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде были получены также для вышеуказанного водного объекта (табл. 3). Более высокие значения коэффициентов накопления в биоте оз. Урускуль по сравнению с менее минерализованным оз. Иртяш не могут быть объяснены различиями в гидрохимических показателях воды данных озер [15]. Как правило, коэффициенты накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs в рыбе менее минерализованных водоемов при прочих сходных условиях должны быть выше по сравнению с более минерализованным водоемом. Однако в рассматриваемом случае ситуация обратная.

Наиболее вероятной причиной повышенного накопления радионуклидов в придонной рыбе оз. Урускуль является более высокий уровень загрязнения донных отложений по сравнению с

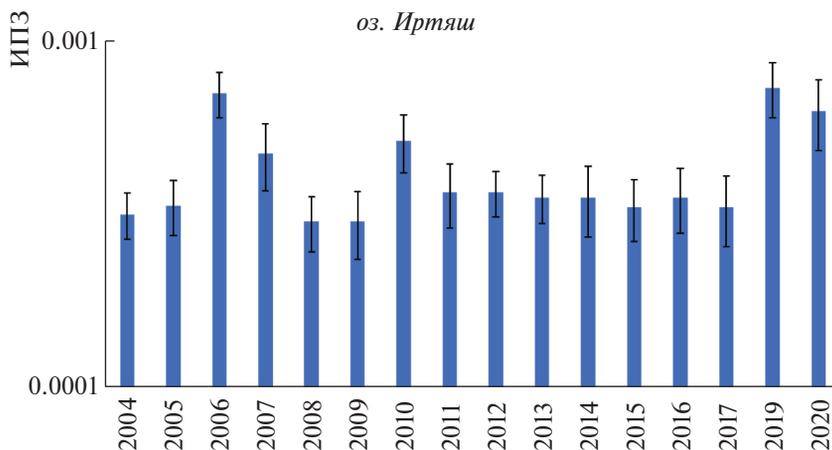


Рис. 3. Динамика интегрального показателя загрязнения воды оз. Иртыш ^{90}Sr и ^{137}Cs за период 2004–2020 гг.
Fig. 3. Dynamics of the integral indicator of water pollution of lake Irtyash ^{90}Sr and ^{137}Cs for the period 2004–2020.

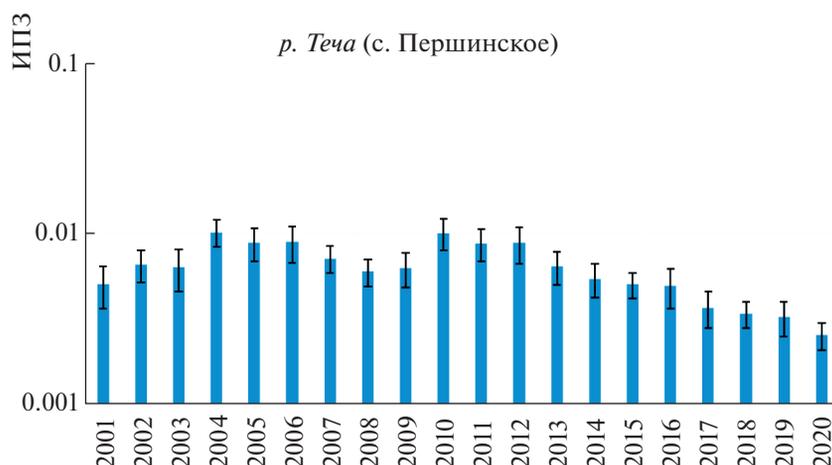


Рис. 4. Динамика интегрального показателя загрязнения воды р. Теча ^{90}Sr и ^{137}Cs за период 2001–2020 гг.
Fig. 4. Dynamics of the integral indicator of water pollution of the Techa river ^{90}Sr and ^{137}Cs for the period 2001–2020.

оз. Иртыш. Согласно оценкам [16], коэффициент накопления ^{90}Sr в верхнем слое (0–15 см) донных отложений озера Урускуль составляет 3400, ^{137}Cs – 39000. В оз. Иртыш значения коэффициентов накопления, оцененные по данным, представленным в статьях [15, 17], значительно ниже, ^{90}Sr – 63, ^{137}Cs – 90. Более высокие уровни загрязнения радионуклидами донных отложений в оз. Урускуль приводят к более высокому загрязнению зообентоса, которым питаются придонные рыбы, что в свою очередь приводит к росту загрязнения рыбы.

Многолетняя динамика ИПЗ ^{90}Sr и ^{137}Cs воды р. Теча и оз. Иртыш приведена на рис. 3 и 4. Расчет интегрального показателя загрязнения проводился с учетом контрольных уровней, полученных по данным мониторинга в районе расположения ПО “Маяк”. Значения ИПЗ ^{90}Sr и ^{137}Cs вышеуказанных водных объектов значительно ниже

экологически безопасного уровня облучения биоты за рассматриваемый период.

Значения интегрального показателя загрязнения оз. Иртыш изменялись в диапазоне 0.0003–0.0007. Динамика вклада ^{90}Sr в ИПЗ оз. Иртыш составляет 5–25%, ^{137}Cs – 78–95%. Содержание ^{90}Sr в воде оз. Иртыш за период 2004–2020 гг. варьировало от 0.03 до 0.12 Бк/л, ^{137}Cs – 0.2–0.4 Бк/л [6].

Загрязнение воды р. Теча обусловлено в основном ^{90}Sr , активность которого колебалась от 3.3 до 11 Бк/л в разные годы наблюдений. Содержание ^{137}Cs изменялось в диапазоне 0.007–0.1 Бк/л [6]. Вклад ^{90}Sr в ИПЗ за период 2001–2020 гг. изменялся от 91 до 98%, ^{137}Cs – 1.4–8.7%.

На рис. 5 для сравнения представлены значения ИПЗ ^{90}Sr и ^{137}Cs р. Теча, озер Иртыш и Урускуль по данным 2005 г. Анализ значений ИПЗ в

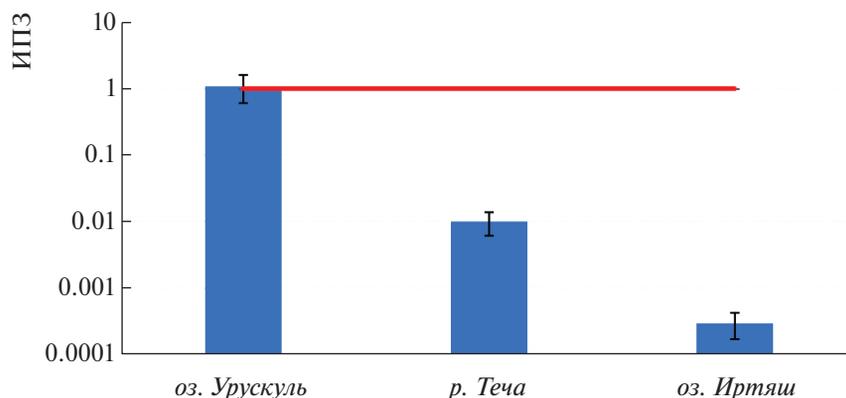


Рис. 5. Интегральный показатель загрязнения ^{90}Sr и ^{137}Cs водных объектов в районе расположения ПО “Маяк” в 2005 г.
Fig. 5. Integral indicator of pollution of ^{90}Sr and ^{137}Cs of water objects in the area of the location of “Mayak Production Association” in 2005.

исследуемых водных объектах показывает, что содержание техногенных радионуклидов в воде оз. Урускуль не удовлетворяет критерию экологически безопасного уровня облучения биоты. Загрязнение озера обусловлено ^{90}Sr , вклад которого в значение ИПЗ составляет 99.7%.

Таким образом, результаты исследования показали, что радиоэкологическая обстановка в зоне наблюдения ПО “Маяк” может оцениваться как стабильная, значения ИПЗ техногенными радионуклидами компонентов природной среды значительно ниже экологически безопасного уровня облучения биоты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена оценка радиоэкологической обстановки в районе расположения ПО “Маяк” на основе расчета интегрального показателя загрязнения техногенными радионуклидами компонентов природной среды. Для обеспечения радиационной безопасности при наличии в окружающей среде смеси техногенных радионуклидов значение ИПЗ должно быть меньше 1.

Проведена апробация методологии расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в атмосферном воздухе, почве и водных объектах, представленная в Рекомендациях Росгидромета Р 52.18.820-2015, Р 52.18.853-2016, Р 52.18.913-2021 [7–9] с учетом данных мониторинга радиационной обстановки в районе расположения ПО “Маяк”.

Анализ радиационной обстановки не выявил превышения экологически безопасного уровня облучения биоты для интегрального показателя загрязнения компонентов природной среды в зоне наблюдения предприятия. Основной вклад (60%) в загрязнение атмосферного воздуха и почвы вносит ^{90}Sr . Доля ^{90}Sr в ИПЗ радионуклидами р.Теча и оз. Урускуль составляет более 90%.

Доминирующий вклад (85%) в ИПЗ оз. Иртяш вносит ^{137}Cs . Различия в экологической значимости разных радионуклидов в водоемах зоны наблюдения связаны, вероятно, с неоднородностью пространственного распределения полей загрязнения, сформировавшихся в результате прошлой деятельности ПО “Маяк”.

Следует отметить, что для детального анализа радиоэкологической обстановки информативным показателем является динамика вклада различных радионуклидов в значение интегрального показателя загрязнения компонентов природной среды в разные годы наблюдений. Таким образом, ИПЗ является инструментом, позволяющим анализировать и отслеживать динамику и тенденции изменения радиационной обстановки, что является одной из важнейших задач радиационного мониторинга.

В целом радиационная обстановка на территории зоны наблюдения ФГУП “ПО “Маяк” стабильна. Деятельность предприятия на современном этапе не оказывает значительного влияния на радиационную обстановку в регионе. Вместе с тем в районе расположения предприятия есть территории, загрязненные техногенными радионуклидами в результате прошлой производственной деятельности, требующие детального радиоэкологического мониторинга.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Отчеты по экологической безопасности ФГУП “ПО “Маяк” за 2011–2020 гг. / Госкорпорация “Росатом”; ФГУП “ПО “Маяк”. Озерск: РИЦ ВРБ; Типография ФГУП “ПО “Маяк”. [Otchety po ekologicheskoy bezopasnosti FGUP “PO “Mayak” za 2011–2020 gg. / Goskorporaciya “Rosatom”; FGUP “PO “Mayak”. Ozersk: RIC VRB; Tipografiya FGUP “PO “Mayak”. (In Russ.)]

2. *Круглов А.К.* Как создавалась атомная промышленность в СССР. М.: ЦНИИАтоминформ, 1995. 380 с. [*Kruglov A.K.* Kak sozdavalas' atomnaya promyshlennost' v SSSR. M.: CNIIAtominform, 1995. 380 p. (In Russ.)]
3. *Фетисов В.И.* Производственное объединение “Маяк” – из истории развития // *Вопр. радиац. безопасности.* 1996. № 1. С. 5–10. [*Fetisov V.I.* Proizvodstvennoe ob"edinenie “Mayak” – iz istorii razvitiya // *Voprosy radiacionnoy bezopasnosti.* 1996. № 1. P. 5–10. (In Russ.)]
4. *Глаголенко Ю.В., Дзекуп Е.Г., Дрозжко Е.Г. и др.* Стратегия обращения с радиоактивными отходами на производственном объединении “Маяк” // *Вопр. радиац. безопасности.* 1996. № 2. С. 3–10. [*Glagolenko Yu.V., Dzekup E.G., Drozhko E.G. i dr.* Strategiya obrashcheniya s radioaktivnymi othodami na proizvodstvennom ob"edinenii “Mayak” // *Voprosy radiacionnoy bezopasnosti.* 1996. № 2. P. 3–10. (In Russ.)]
5. *Мокров Ю.Г.* Анализ прогноза стока стронция-90 с водами р. Теча // *Изв. вузов. Ядерная энергетика.* 2004. № 4. С. 43–49. [*Mokrov Yu.G.* Analiz prognoza stoka stronciya-90 s vodami r. Techa // *Izvestiya vuzov. YAdernaya energetika.* 2004. № 4. P. 43–49. (In Russ.)]
6. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2000–2020 годы. Ежегодники Росгидромета. Обнинск, НПО “Тайфун”. [*Radiacionnaya obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v 2000–2020 gody. Ezhegodniki Rosgidrometa. Obninsk, NPO “Tajfun”* (In Russ.)]
7. Рекомендации Р 52.18.853-2016. Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в пресной воде и почве. Утв. Росгидрометом Минприроды России 17.08.2016 г. // Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в объектах природной среды: Сб. рекомендаций. Обнинск, 2016. С. 29–55. [*Rekomendacii R 52.18.853-2016. Poryadok rascheta kontrol'nyh urovnej sodержaniya radionuklidov v presnoj vode i pochve. Utv. Rosgidrometom Minprirody Rossii 17.08.2016 g. // Poryadok rascheta kontrol'nyh urovnej sodержaniya radionuklidov v ob"ektah prirodnoj srede: Sb. rekomendacij. Obninsk, 2016. P. 29–55. (In Russ.)]*
8. Рекомендации Р 52.18.820-2015. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки. Утв. Росгидрометом Минприроды России 17.04.2015 г. Обнинск, 2015. 60 с. [*Rekomendacii R 52.18.820-2015. Ocenka radiacionno-ekologicheskogo vozdejstviya na ob"ekty prirodnoj srede po dannym monitoringa radiacionnoy obstanovki. Utv. Rosgidrometom Minprirody Rossii 17.04.2015 g. Obninsk, 2015. 60 p. (In Russ.)]*
9. Рекомендации Р 52.18.913-2021. Порядок расчета контрольных уровней содержания радионуклидов в атмосферном воздухе. Утв. Росгидрометом Минприроды России 23.08.2021 г. Обнинск, 2021. 58 с. [*Rekomendacii R 52.18.913-2021. Poryadok rascheta kontrol'nyh urovnej sodержaniya radionuklidov v atmosfernom vozduhe. Utv. Rosgidrometom Minprirody Rossii 23.08.2021 g. Obninsk, 2021. 58 p. (In Russ.)]*
10. *Тарасов О.В.* Радиоэкология наземных позвоночных головной части Восточно-Уральского радиоактивного следа: Дис. ... канд. биол. наук. Озерск, 2000. 151 с. [*Tarasov O.V.* Radioekologiya nazemnyh pozvonochnyh golovnoj chasti Vostochno-Ural'skogo radioaktivnogo sleda. (dissertation). Ozersk, 2000. 151 p. (In Russ.)]
11. International Commission on Radiological Protection (ICRP). Publication 108. Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. Annals ICRP, 2009. 251 p.
12. Protection of the environment under different exposure situations. ICRP Publication 124 // *Ann. ICRP.* 2014. V. 43. № 1. P. 1–59.
13. *Крышев И.И., Никитин А.И.* Миграция радионуклидов в речной системе Теча–Исеть–Тобол–Иртыш–Обь // *XLIY Радиоэкологические чтения В.М. Клечковского: Сб. докл. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2016. С. 48–82. [Kryshhev I.I., Nikitin A.I. Migraciya radionuklidov v rečnoj sisteme Techa-Iset'-Tobol-Irtysh-Ob' // XLIY Radioekologicheskie chteniya V.M. Klechkovskogo: Sbornik dokladov. Obninsk: FGBNU VNIIRAE, 2016. P. 48–82. (In Russ.)]*
14. Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Государственной корпорации по атомной энергии “Росатом” / Под общ. ред. И.И. Линге и И.И. Крышева. М., 2021. 566 с. [*Radioekologicheskaya obstanovka v regionah raspolozheniya predpriyatij Gosudarstvennoj korporacii po atomnoj energii “Rosatom” / Pod obshch. red. I.I. Linge i I.I. Krysheva. M., 2021. 566 p. (In Russ.)]*
15. *Крышев И.И., Романов Г.Н., Исаева Л.Н. и др.* Радиоэкологическое состояние озер Восточно-Уральского радиоактивного следа // *Проблемы радиоэкологии и пограничных дисциплин / Под ред. А.В. Трапезникова и С.М. Вовка. Вып. 4. Заречный, УрО РАН, 2001. С. 107–122. [Radioekologicheskoe sostoyanie ozer Vostochno-Ural'skogo radioaktivnogo sleda // Kryshhev I.I., Romanov G.N., Isaeva L.N. i dr. Problemy radioekologii i pogranychnyh discipline / Pod redakciej A.V. Trapeznikova i S.M. Vovka. Vyp. 4. Zarechnyj, UrO RAN, 2001. P. 107–122. (In Russ.)]*
16. *Левина С.Г., Аклеев А.В.* Современная радиоэкологическая характеристика озерных экосистем Восточно-Уральского радиоактивного следа. М., 2009. 272 с. [*Levina S.G., Akleev A.V.* Sovremennaya radioekologicheskaya harakteristika ozernyh ekosistem Vostochno-Ural'skogo radioaktivnogo sleda. M., 2009. 272 p. (In Russ.)]
17. *Тягунов Д.С., Рыбаков Е.Н., Гусева В.П.* Исследование загрязненности техногенными радионуклидами донных и пойменных отложений озер Уральского региона // *Международ. науч.-исслед. журн.* 2016. № 3 (45). Ч. 2. С. 112–116. [*Tyagunov D.S., Rybakov E.N., Guseva V.P.* Issledovanie zagryaznennosti tekhnogennymi radionuklidami donnyh i pojmennyh otlozhenij ozer Ural'skogo regiona // *Mezhdunarodnyj nauchno-issledovatel'skij zhurnal.* 2016. № 3 (45). Ch. 2. P. 112–116. (In Russ.)]

Dynamics of the Radioecological Situation in the Observation Area of FSUE “Mayak Production Association”

N. N. Pavlova^{a,#}, I. I. Kryshev^a, and A. I. Kryshev^a

^aResearch and Production Association “Typhoon”, Obninsk, Russia

[#]E-mail: pavlova@rpatyphoon.ru

Based on the monitoring data and calculation of the integral indicator of pollution of the components of the natural environment, the analysis of the radioecological situation in the observation area of FSUE “Mayak Production Association”, including the territory of the East-Ural radioactive trace, was carried out. The control levels of radionuclides in atmospheric air, soil and surface waters were assessed on the basis of environmental criteria, taking into account the specifics of radioactive contamination of the territory in accordance with the Recommendations of Roshydromet. To assess the control levels of radionuclides in the components of the natural environment, elk (*Alces alces*) was identified as a critical organism of the terrestrial biota, and the bottom fish ide (*Leuciscus idus*) was identified as an aquatic biota. The long-term dynamics of the integral indicator of pollution with technogenic radionuclides (⁹⁰Sr, ¹³⁷Cs, ²³⁹Pu) in the components of the natural environment is presented. The analysis of the radiation situation did not reveal an excess of the environmentally safe level of biota irradiation for the integral indicator of pollution of the components of the natural environment in the observation area of the enterprise. For a modern assessment of the radioecological situation in the area of the location of FSUE “Mayak Production Association”, it is necessary to take into account the radioactive contamination of the territory associated with the past activities of the enterprise.

Keywords: radionuclides, biota, radioecological situation, monitoring, long-term dynamics, the East-Ural radioactive trace, control level, atmospheric air, soil, surface waters, integral pollution indicator