

Оценка доз внутреннего облучения ихтиофауны Полесского государственного радиационно-экологического заповедника

А.В. Гулаков¹, Д.Н. Дроздов¹, Д.Н. Иванцов²

В статье представлены данные распределения доз внутреннего облучения некоторых видов «мирных» и «хищных» пелагических рыб, обитающих в водных объектах на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника. Согласно полученным данным установлено, что вне зависимости от характера гидрологического режима доминирующий вклад в формирование дозы внутреннего облучения вносят инкорпорированные в мышечную ткань радионуклиды ^{137}Cs . Суммарная доза внутреннего облучения «мирных» видов рыб, обитающих в проточных объектах с активным гидрологическим режимом, за период наблюдения составила 287 ± 52 мкГр/сут; суммарная доза внутреннего облучения для менее активного водного объекта старичного типа составила 393 ± 60 мкГр/сут. Суммарная доза внутреннего облучения «хищных» видов рыб, обитающих в проточных объектах с активным гидрологическим режимом, за период наблюдения составила 578 ± 293 мкГр/сут; суммарная доза внутреннего облучения для менее активного водного объекта старичного типа составила 597 ± 302 мкГр/сут. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в отношении данных видов рыб имеет место превышение безопасного порога облучения, способного оказывать влияние на воспроизведение популяции.

Ключевые слова: ихтиофауна, доза внутреннего облучения, цезий-137, стронций-90, ПГРЭЗ.

The article presents the data on the distribution of doses of internal radiation of some species of «peaceful» and «predatory» pelagic fish living in the water bodies of the Polesky State Radiation and Ecological Reserve. According to the data obtained, it was found that, regardless of the nature of the hydrological regime, ^{137}Cs radionuclides incorporated into muscle tissue make a dominant contribution to the formation of the internal radiation dose. The total dose of internal radiation of «peaceful» fish species living in flowing objects with an active hydrological regime during the observation period was 287 ± 52 $\mu\text{Gy/day}$; the total dose of internal radiation for a less active water body of the old type was 393 ± 60 $\mu\text{Gy/day}$. The total dose of internal radiation of «predatory» fish species living in flowing objects with an active hydrological regime during the observation period was 578 ± 293 $\mu\text{Gy/day}$; the total dose of internal radiation for a less active old-type water body was 597 ± 302 $\mu\text{Gy/day}$. The results obtained indicate that in relation to these fish species, the safe exposure threshold is exceeded, which can affect the reproduction of the population.

Keywords: ichthyofauna, internal radiation dose, cesium-137, strontium-90, PSRER.

Введение. Юго-восточные территории Республики Беларусь в границах Полесского государственного радиационно-экологического заповедника представляют уникальную возможность проведения исследований влияния хронического облучения на различные биологические объекты в естественных экосистемах. Одним из возможных объектов изучения являются водные экосистемы с разным гидрологическим режимом и обитающая в них аборигенная ихтиофауна. Исследование дозовых нагрузок на ихтиофауну водных объектов, расположенных на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, ведется на протяжении длительного периода времени, что отражено в работах [1]–[3]. Выполненные исследования в отношении водных объектов с разным гидрологическим режимом для разных видов рыб позволяют произвести оценку влияния радиационного фактора на состояние биоты речных и озерных экосистем.

Водные объекты, расположенные на территории Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, представляют отдельный интерес для изучения радиационных эффектов. В условиях гидроэкосистемы происходит более быстрая, в сравнении с почвой, трансформация источников загрязнения радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr , что опосредует их аккумуляцию в организме и последующее формирование дозы облучения. Ранее в работе [4] было показано, что наибольшие значения удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr у рыб наблюдаются в непроточных водоемах, расположенных на территориях с высоким уровнем радиоактивного загрязнения, а наименьшие – в проточных речных системах.

На формирование доз облучения разных видов рыб влияет не только уровень радиоактивного загрязнения водного объекта, но и другие факторы, в том числе, такие как тип и характер пищевого поведения, гидрологический режим водного объекта, возраст животных и другие. Анализ действия разных факторов на формирование доз облучения ихтиофауны показал достоверные различия придонных мирных и пелагических хищных видов, обитающих в закрытых водных объектах.

Дозы внутреннего облучения у пелагических видов, вследствие накопления ^{90}Sr , в два раза ниже, чем дозы облучения пелагических хищников; дозы облучения придонных и пелагических видов, сформированные вследствие накопления ^{137}Cs , не имеют достоверных различий. В данной связи целесообразно провести сравнительный анализ доз облучения придонных мирных и пелагических хищных видов рыб открытых (проточных) и закрытых (непроточных) водных объектов.

Цель работы – оценить характер распределения доз внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr пелагических «мирных» и хищных видов рыб проточных и непроточных водных объектов.

Материалы и методы исследования. Изъятие проб пелагических «мирных» и хищных видов рыб производилось на озере старичного типа Семеница и участке реки Припять. Озеро Семеница $51^{\circ}37'14''$ СШ и $29^{\circ}47'53''$ ВД, расположено в юго-западном направлении в 34 км от г. Хойники; озеро старичного типа, относится к бассейну реки Припять; плотность радиоактивного загрязнения по ^{137}Cs в пределах $999,2 \pm 354,0$ кБк/м², загрязнение донных отложений ^{90}Sr в пределах $15,6 \pm 7,0$ кБк/м². Средняя удельная активность воды от радионуклидов ^{137}Cs составляет 0,93 Бк/л, от радионуклидов ^{90}Sr – 0,57 Бк/л. В пределах зоны отчуждения длина реки Припять около 50 км, от населенного пункта Довляды $51^{\circ}31'29''$ СШ $29^{\circ}51'57''$ ВД до впадения в Киевское водохранилище. Площадь водосбора составляет около 2000 км².

Отлов рыб производился в летний и осенний период на протяжении 2018–2021 гг. Всего за время проведения исследований было изъято 1059 экземпляров пресноводной ихтиофауны. В качестве «мирных» пелагических видов использовались плотва (*Rutilus rutilus* L.), линь (*Tinca tinca* L.), лещ (*Abramis brama* L.); «хищные» пелагических виды: обыкновенная щука (*Esox lucius* L.), окунь (*Perca fluviatilis* L.), жерех (*Aspius aspius* L.). В период выполнения исследования отловлено 370 особей плотвы, 50 особей линя, 253 особи леща, 143 особи щуки, 51 особей жереха и 192 особи окуня.

В качестве орудий лова использовались сети трехстенные «Нептун» длина 30 м, высота 1,8 м, размер ячеи 30 мм (2 шт.), 40 мм (2 шт.), 50 мм (2 шт.), 65 мм (2 шт.), 70 мм (2 шт.). При проведении лова рыб одновременно устанавливалось от двух до восьми сетей с разным размером ячеи. Определение видов и анализ биологических показателей рыб проводили общепринятыми в ихтиологических исследованиях методами [5].

Для определения удельной активности инкорпорированных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr в отловленных образцах использовали гамма-бета спектрометр МКС-АТ1315 и гамма-спектрометр «Canberra Industries Inc» лаборатории спектрометрии и радиохимии Полесского государственного радиационно-экологического заповедника.

В результате измерения удельной активности произведен расчет поглощенной дозы внутреннего облучения. Оценку поглощенной дозы внутреннего облучения от инкорпорированных ^{137}Cs и ^{90}Sr проводили на основании Рекомендаций Р52.18.820-2015 [6]. Для расчетов использовали значения фактора дозового перехода для внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr [7]. Для оценки достоверности различий и проведения сравнительного анализа использовали методы параметрической статистики для уровня статистической значимости $p \leq 0,05$. Обработка данных проводилась с помощью пакета прикладных программ Statistica 10.0.

Результаты исследования и их обсуждение. В ходе исследования и анализа значения удельной активности ^{137}Cs и ^{90}Sr были распределены на трофические группы рыб с привязкой к месту отлова. Максимальные значения удельной активности ^{137}Cs наблюдались у особей *Rutilus rutilus* L., которые были изъятые на непроточном водном объекте озеро Семеница. Минимальные значения удельной активности ^{137}Cs имели особи *Abramis brama* L., которые были добыты на проточном водном объекте реки Припять. Максимальное значение удельной ак-

тивности ^{90}Sr наблюдались у особей *Rutilus rutilus* L., которые были отловлены на проточном водном объекте река Припять. Минимальные значения удельной активности ^{90}Sr имели особи *Abramis brama* L., которые были изъятые на непроточном водном объекте озеро Семеница.

Средняя взвешенная удельная активность «мирных» рыб по ^{137}Cs изъятых на водном объекте река Припять составляет $68,6 \pm 5,0$ Бк/кг, на водном объекте озеро Семеница $76,0 \pm 5,0$ Бк/кг. Между средними значениями удельной активности ^{137}Cs «мирных» рыб отсутствует достоверное различие ($p > 0,05$). Средняя взвешенная удельная активность «мирных» рыб по ^{90}Sr , добытых на водном объекте река Припять, составляет $1,66 \pm 0,5$ Бк/кг, на водном объекте озеро Семеница $5,0 \pm 0,8$ Бк/кг. Из полученных данных следует, что между средними значениями удельной активности по ^{137}Cs и удельной активностью ^{90}Sr в ткани «мирных» рыб, изъятых в водных объектах с разным гидрологическим режимом, имеет место достоверное различие ($p < 0,05$).

Значения удельной активности «мирных» рыб были пересчитаны в дозу внутреннего облучения, величины для разных стационаров приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Доза внутреннего облучения «мирных» рыб (мкГр/сут)

Вид	Цезий-137				Стронций-90			
	Река Припять		Озеро Семеница		Река Припять		Озеро Семеница	
Линь	337 ± 158	n = 22	187 ± 80	n = 19	35 ± 28	n = 6	36 ± 38	n = 3
	82–825		73–420		9–79		8–73	
Лещ	155 ± 126	n = 127	132 ± 43	n = 103	50 ± 58	n = 17	98 ± 56	n = 6
	46–1464		50–483		5–242		38–174	
Плотва	406 ± 376	n = 209	625 ± 100	n = 137	104 ± 71	n = 19	74 ± 80	n = 5
	27–5467		46–1218		9–318		8–186	

Из таблицы 1 видно, что средняя взвешенная доза внутреннего облучения от инкорпорированных радионуклидов ^{137}Cs у «мирных» видов рыб, изъятых на реке Припять, составила 313 ± 274 мкГр/сут; на озере Семеница 394 ± 76 мкГр/сут. Средняя взвешенная доза внутреннего облучения от радионуклидов ^{90}Sr у «мирных» рыб, изъятых на реке Припять, составила 72 ± 59 мкГр/сут; на озере Семеница 76 ± 60 мкГр/сут.

Полученные данные свидетельствуют об отсутствии достоверных различий дозы внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr у «мирных» видов рыб, обитающих в разных стационарах ($p > 0,05$). В тоже время из данных таблицы 1 видно, что между средними значениями дозы внутреннего облучения, сформированной от разных радионуклидов, у «мирных» видов рыб имеет место достоверное различие ($p < 0,05$).

Доза внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs в мышечной ткани *Tinca tinca* L. более чем в 5 раз превышает дозу внутреннего облучения этого вида, сформированную от радионуклидов ^{90}Sr в костной ткани. Доза внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs в мышечной ткани *Rutilus rutilus* L. в 3 раза больше дозы внутреннего облучения от радионуклидов ^{90}Sr в костной ткани. Для видов *Tinca tinca* L. и *Rutilus rutilus* L. установлено превышение безопасного порога облучения (10 мкГр/ч), которое может оказывать влияние на репродуктивную систему данных видов [8], [9].

Анализ распределения доз внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs «мирных» рыб показал, что величина верхнего квантиля дозы у рыбы, изъятый на участке реки Припять, составляет 2586 мкГр/сут, что более чем в 10 раз превышает безопасный порог облучения. Значение верхнего квантиля распределения дозы от радионуклидов ^{137}Cs в мышечной ткани рыб, изъятых на участке озера Семеница, составляет 707 мкГр/сут, что в 3 раз превышает безопасный порог облучения. Верхний квантиль распределения дозы внутреннего облучения от ^{90}Sr в костной ткани «мирной» рыбы, изъятый на реке Припять, составил 213 мкГр/сут, на озере Семеница 144 мкГр/сут; превышения безопасного порога облучения по данному радионуклиду не наблюдается. Оценка суммарной дозы облучения от радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr показало, что доза внутреннего облучения у «мирных» рыб, обитающих на участке реки Припять, составляет 287 ± 52 мкГр/сут; на озере Семеница 393 ± 60 мкГр/сут.

Анализ удельной активности мышечной и костной ткани «хищных» видов рыб показал, что минимальные значения удельной активности ^{137}Cs наблюдается у особей *Perca fluviatilis* L., которые были отловлены на водном объекте озеро Семеница. Максимальные значения удельной активности ^{137}Cs наблюдаются у особей вида *Esox lucius* L., которые были изъяты на водном объекте озеро Семеница. В отношении радионуклидов ^{90}Sr максимальное значение удельной активности наблюдается у особей вида *Esox lucius* L., которые были отловлены на водном объекте озеро Семеница.

Наименьшие значения удельной активности от ^{90}Sr имеют особи *Aspius aspius* L., изъятые на водном объекте озеро Семеница. Средняя взвешенная удельная активность «хищных» рыб от радионуклидов ^{137}Cs , изъятых на водном объекте река Припять, составляет $138,1 \pm 15,0$ Бк/кг, на водном объекте озеро Семеница $125,0 \pm 12,0$ Бк/кг.

Между средними значениями удельной активности ^{137}Cs «хищных» рыб отсутствует достоверное различие ($p > 0,05$). Средняя взвешенная удельная активность «хищных» рыб по ^{90}Sr , изъятых на водном объекте река Припять, составляет $1,6 \pm 0,5$ Бк/кг, на водном объекте озеро Семеница $9,1 \pm 0,6$ Бк/кг. Из полученных данных следует, что между средними значениями удельной активности ^{137}Cs «хищных» рыб, изъятых в водных объектах с разным гидрологическим режимом, имеет место достоверное различие ($p < 0,05$).

Значения удельной активности «хищных» рыб также были пересчитаны в дозу внутреннего облучения, величины для разных стационаров приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Доза внутреннего облучения «хищных» рыб (мкГр/сут)

Вид	Цезий-137				Стронций-90			
	Река Припять		Озеро Семеница		Река Припять		Озеро Семеница	
Щука	620 ± 327	$n = 73$	575 ± 416	$n = 54$	36 ± 22	$n = 9$	125 ± 154	$n = 7$
	87–2877		128–3183		12–79		15–423	
Жерех	666 ± 297	$n = 32$	958 ± 1105	$n = 13$	32 ± 13	$n = 3$	23 ± 12	$n = 3$
	68–1751		461–4446		14–36		9–30	
Окунь	625 ± 318	$n = 96$	643 ± 1000	$n = 84$	14 ± 6	$n = 6$	209 ± 81	$n = 6$
	73–3187		68–9229		3–18		79–277	

Из таблицы 2 видно, что средняя взвешенная доза внутреннего облучения от инкорпорированных радионуклидов ^{137}Cs у «хищных» рыб, изъятых на реке Припять, составила 630 ± 318 мкГр/сут; на озере Семеница 646 ± 800 мкГр/сут. Средняя взвешенная доза внутреннего облучения от радионуклидов ^{90}Sr у «мирных» рыб, изъятых на реке Припять, составила 28 ± 15 мкГр/сут; на озере Семеница 137 ± 100 мкГр/сут.

Полученные данные свидетельствуют об отсутствии достоверных различий дозы внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr у «хищных» видов рыб, обитающих на разных стационарах ($p > 0,05$). Обращает внимание большой разброс значений доз внутреннего облучения у «хищных» рыб, сформированных от инкорпорированного ^{137}Cs ; вариационный размах достигает более 3 мГр/сут. Сравнительный анализ средних значений доз внутреннего облучения инкорпорированных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr у разных видов рыб на разных водных объектах имеет достоверное различие ($p < 0,05$). Из таблицы 2 видно, что средние дозы внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs достоверно выше доз внутреннего облучения от радионуклидов ^{90}Sr .

Превышение безопасного порога облучения, которое может оказывать влияние на репродуктивную систему данных видов, имеет место у особей «хищных» видов рыб, обитающих как на участке реки Припять, так и в озере Семеница. Вид *Esox lucius* L. имеет в среднем превышение в 2,5 раза, верхний квантиль распределения в 12 раз; *Aspius aspius* L. в 2,8 раза, верхний квантиль в 7 раз; *Perca fluviatilis* L. имеет в среднем превышение в 2,6, верхний квантиль в 13 раз. Анализ распределения доз внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs у «хищных» видов рыб показал, что величина верхнего квантиля дозы облучения у рыбы, изъятая на участке реки Припять, составило 2605 мкГр/сут. Значение верхнего квантиля распределения дозы от радионуклидов ^{137}Cs в мышечной ткани рыб, изъятых на участке озера Семеница, составляет 5619 мкГр/сут. Верхний квантиль распределения дозы внутренней облучения от ^{90}Sr в костной ткани «мирной» рыбы, изъятая на реке Припять, составил 44 мкГр/сут, на озере Семеница 243 мкГр/сут, что превышает безопасный порог облучения по данному радионуклиду.

Суммарная доза внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr у «хищных» рыб, обитающих на участке реки Припять, составила 578 ± 293 мкГр/сут; на озере Семеница 597 ± 302 мкГр/сут.

Заключение. В результате анализа распределения доз внутреннего облучения некоторых видов «мирных» и «хищных» рыб, обитающих в водных объектах Полесского государственного радиационно-экологического заповедника, установлено, что вне зависимости от характера гидрологического режима доминирующий вклад в формирование дозы внутреннего облучения вносят радионуклиды ^{137}Cs , инкорпорированные в мышечную ткань. Суммарная доза внутреннего облучения «мирных» видов рыб, обитающих в проточных объектах с активным гидрологическим режимом, за период наблюдения составила 287 ± 52 мкГр/сут; суммарная доза внутреннего облучения для менее активного водного объекта старичного типа составила 393 ± 60 мкГр/сут.

Суммарная доза внутреннего облучения «хищных» видов рыб, обитающих в проточных объектах с активным гидрологическим режимом за период наблюдения составила 578 ± 293 мкГр/сут; суммарная доза внутреннего облучения для менее активного водного объекта старичного типа составила 597 ± 302 мкГр/сут. Полученные результаты свидетельствуют о том, что в отношении данных видов рыб имеется превышение безопасного порога облучения, способного оказывать влияние на воспроизведение популяции.

Литература

1. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи : учеб. пособ. для студ. вузов / под ред. А. В. Аксеева. – Челябинск : Книга, 2016. – 400 с.
2. Гудков, Д. И. Радионуклиды в озерных экосистемах Красненской поймы р. Припять : содержание и распространение в биотических и абиотических компонентах / Д. И. Гудков [и др.] // Доп. АН України. – 2005. – № 5 – С. 187–193.
3. Гулаков, А. В. Цитогенетическое действие радиационного облучения на ихтиофауну водных объектов Полесского радиационно-экологического заповедника / А. В. Гулаков, Д. Н. Дроздов, Д. Н. Иванцов // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2024. – № 3 (144). – С. 17–21.
4. Иванцов, Д. Н. Зависимость накопления ^{137}Cs от промысловой длины хищных видов рыб / Д. Н. Иванцов, А. В. Гулаков, Д. Н. Дроздов // Трансграничное сотрудничество в области экологической безопасности и охраны окружающей среды : VI Международная науч.-практ. конф., Гомель, 2–3 июня 2022 г. : сб. матер. / М-во обр. Республики Беларусь, Гомельский гос. ун-т им. Ф. Скорины ; редкол.: А. П. Гусев (гл. ред.) [и др.]. – Гомель : ГГУ им. Ф. Скорины, 2022. – С. 38–42.
5. Жуков, П. И. Справочник по экологии пресноводных рыб / П. И. Жуков. – Минск : Наука и техника, 1988. – 310 с.
6. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки : рек. Р52.18.820-2015. – Введ. 01.09.2015. – Обнинск, 2015 – 65 с.
7. Дроздов, Д. Н. Формирование поглощенной дозы облучения у аборигенной ихтиофауны не проточных водоемов Полесского радиационно-экологического заповедника / Д. Н. Дроздов, А. В. Гулаков // Известия Гомельского гос. ун-та им. Ф. Скорины. – 2023. – № 3 (138). – С. 5–10.
8. Larsson, C.-M. An overview of the ERICA Integrated Approach to the assessment and management of environmental risks from ionising contaminants / C.-M. Larsson // Radioact. – 2008. – Vol. 99. – P. 1361–1518.
9. Andersson, P. Numerical benchmarks for protecting biota from radiation in the environment: proposed levels, underlying reasoning and recommendations / P. Andersson [et al.] // PROTECT. – 2008. – Deliverable 5. – 112 p.

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Полесский государственный радиозэкологический заповедник