

Цитогенетическое действие радиационного облучения на ихтиофауну водных объектов Полесского радиационно-экологического заповедника

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

В статье представлены результаты анализа зависимости спонтанной частоты микроядер и дозы внутреннего облучения от инкорпорированных радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr и в эритроцитах пресноводных видов рыб с разным типом пищевого поведения, обитающих в водных объектах с разным гидрологическим режимом на территории Полесского радиационно-экологического заповедника. Сильная статистическая зависимость установлена между дозовыми значениями и цитогенетическим индексом ($r = 0,88$, $p < 0,05$), которые наблюдаются у вида *Esox lucius* L. проточных водных объектах Полесского радиационно-экологического заповедника. Значения дозы внутреннего облучения и цитогенетический индекс имеют достоверные различия у разных видов рыб, обитающих в водных объектах с разным гидрологическим режимом.

Ключевые слова: доза облучения, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, цитогенетический показатель.

The article presents the results of the analysis of the dependence of spontaneous frequency of micronuclei and internal radiation doses on incorporated radionuclides of ¹³⁷Cs and ⁹⁰Sr and in red blood cells of freshwater fish species with different types of eating behavior living in water bodies with different hydrological regime on the territory of the Polesky Radiation and Ecological Reserve. A strong statistical relationship is established between the dose values and the cytogenetic index ($r = 0.88$, $p < 0.05$) are observed in the *Esox lucius* L. species of flowing water bodies of the Polesky Radiation and Ecological Reserve. Internal exposure dose values and cytogenetic index have significant differences in different fish species living in water bodies with different hydrological regimes.

Keywords: radiation dose, ¹³⁷Cs, ⁹⁰Sr, cytogenetic index.

Введение. В свете формирования эоцентрического подхода радиационной защиты и выработки безопасных уровней радиационного воздействия Юго-Восточный регион Республики Беларусь представляет собой уникальную территорию для проведения долгосрочных исследований действия радиационного фактора на биоту. В этой связи на территории Полесского радиационно-экологического заповедника созданы условия и ведется работа по радиоэкологическому мониторингу объектов наземной и водной среды. Среди объектов мониторинга определенный научный интерес занимает мониторинг водных объектов проточных, малопроточных и непроточных водоемов зоны отчуждения, расположенных в границах заповедника. Мониторинг биоты водных объектов заповедника представляет собой комплексное исследование содержания радиоактивных изотопов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr чернобыльского происхождения в воде, донных отложениях, растительности; изучаются процессы поступления, накопления, распределения и формирование доз внешнего и внутреннего облучения разных объектов биоты [1].

Среди большого разнообразия объектов биоты водных экосистем значительный интерес имеют аборигенные виды рыб, которые занимают разные трофические уровни в биогидроценозе. В результате многолетних исследований установлено, что у особей 5 наиболее типичных видов рыб карась (*Carassius carassius* L.), окунь (*Perca fluviatilis* L.), плотва (*Rutilus rutilus* L.), лещ (*Abramis brama* L.), щука (*Esox lucius* L.) имеет место аккумуляция в органах и тканях радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. Ранее установлено [2], что особи, обитающие в непроточных водоемах зоны отчуждения, отличаются высокой удельной активностью и вариацией значений удельной активности радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr. В отношении обозначенных видов в условиях непроточных водоемов в большинстве случаев имеет место устойчивая аккумулятивная последовательность, соответствующая трофической цепочке биогидроценоза.

Хищные виды рыб и рыбы со смешанным типом питания, занимающие верхний трофический уровень, отличаются высокой накопительной способностью; перифитофаги отличаются средним уровнем накопления радионуклидов ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr; представители бентосной их-

тиофауны накапливают радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr в наименьшей степени. Следует заметить, данная последовательность может существенно искажаться в зависимости от суммы факторов, обуславливающих конкретные условия локации биогеоценоза.

В результате длительного поступления, накопления и распределения в тканях организма радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr формируется доза внутреннего облучения, которая способствует возникновению цитогенетических изменений. Одним из наиболее выразительных и доступных изменений для обнаружения и исследования на клеточном уровне являются нарушения клеточного деления, обусловленные поражением веретена деления и абберации хромосом, которое проявляется в клетках крови. Хромосомные абберации могут возникать как результат радиационного воздействия на клетки в пре- и синтетической фазы до начала репликации. Абберации сохраняются при клеточном делении, не элиминируются со временем и накапливаются в результате длительного радиационного воздействия, поэтому могут служить в качестве индикатора радиационно-индуцированных эффектов [3].

Таким образом, цель работы состояла в изучении связи между частотой микроядер в эритроцитах рыб с разным типом питания, обитающих в водных объектах с разным гидрологическим режимом Полесского радиационно-экологического заповедника и дозой внутреннего облучения от инкорпорированных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr .

Материалы и методы исследования. В качестве материала исследования использовали данные проб донного грунта, воды, удельной активности ^{137}Cs в мышечной ткани, ^{90}Sr в костной ткани, образцы крови рыб с разным типом пищевого поведения. На основании данных удельной активности инкорпорированных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr производили оценку суммарной дозы облучения; в ходе гематологического анализа образцов крови методом световой микроскопии определяли частоту микроядер на 1000 эритроцитов крови рыб следующих видов: карась (*Carassius auratus gibelio* Bloch.), лещ (*Abramis brama* L.), окунь (*Perca fluviatilis* L.), плотва (*Rutilus rutilus* L.) обыкновенная щука (*Esox lucius* L.). Изъятие рыб производили в летний и осенний периоды в течение 2018–2021 гг.; за время проведения исследований изъято 776 экземпляров разных видов пресноводной ихтиофауны. Сбор материала осуществляли на семи участках: замкнутых непроточных водных объектов – озера Вьюры, Жартай, Лядо, Персток, Семеница и проточных водных объектов – русло р. Несвич, Николаевский старик и Старое русло р. Припять.

Река Припять, правый приток Днепра, протяженность 775 км, площадь водосборного бассейна превышает 114 тысяч км², является важным водным объектом Чернобыльской зоны отчуждения. Река пересекает зону отчуждения с севера на юго-запад и на границе 30-ти километровой зоны впадает в Киевское водохранилище. Это равнинная река, заболоченность берегов которой не превышает 15 %. В районе размещения Чернобыльской АЭС русло Припяти искусственно изменено, обустроен судоходный канал протяженностью 11 км. Русло реки проложено в обход водоема-охладителя, технологического водоема, созданного для нужд ЧАЭС. В этом месте река Припять проходит в 200–400 метрах от водоема-охладителя, который отделен от реки искусственной дамбой. Здесь средняя ширина реки колеблется от 100 до 160 м, а средняя глубина составляет 3–4 м. При общей протяженности реки в 780 км в пределах зоны отчуждения длина реки Припять около 50 километров – от деревни Довляды до места ее впадения в Киевское водохранилище. Площадь водосбора составляет около 2000 км².

Озеро Семеница (51°37'14" СШ и 29°47'53" ВД) находится в 34 км на юго-запад от города Хойники и в 1,4 км на юг от населенного пункта Хвощевка. Озеро старичного типа, относится к бассейну реки Припять, является полупроточным водоемом – соединено с рекой Припять. Площадь зеркала 0,21 км², длина около 2,3 км, наибольшая ширина примерно 0,17 км, длина береговой линии 7,8 км. Николаевский старик (51°31'4.02" СШ и 29°54'25.91" ВД) относится к бассейну реки Припять, является полупроточным водоемом. Местность холмистая со сложным рельефом. Берега песчаные, высокие, поросшие кустарником, местами лесом. Площадь зеркала около 0,78 км², длина 4,16 км, наибольшая ширина 0,19 км, длина береговой линии около 12,6 км.

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 [4].

Измерение удельной активности образцов проводили в лаборатории спектрометрии и радиохимии Полесского государственного радиационно-экологического заповедника с использованием γ - β -спектрометра МКС-АТ1315. Анализ препаратов крови проводили в лаборатории кафедры зоологии, физиологии и генетики Учреждения образования «Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины» согласно методике МУ № 13-4-2 / 1487 1999. Для каждой особи готовили по два препарата, препараты высушивали, фиксировали и окрашивали по Романовскому [5]. Микроскопический анализ проводили на световом микроскопе OPTITECH XSZ-139 (Ningbo Instrument Co., Ltd China, Китай).

На основании полученных данных общепринятыми методами вариационной статистики определяли основные параметры распределения. Для оценки достоверности различий использовали критерий Стьюдента для уровня статистической значимости $p \leq 0,05$, для оценки статистической зависимости методику корреляционного анализа. Статистическая обработка данных проводилась с помощью пакета прикладных программ Statistica 7.0.

Результаты исследования и их обсуждение. Данные спектрометрического анализа проб донного грунта и воды, представленные в таблице 1, позволяют оценить различия радиационного загрязнения водных объектов с разным гидрологическим режимом.

Таблица 1 – Радиоактивное загрязнение водных объектов

Показатель	Проточный водный объект		Непроточный водный объект	
	^{137}Cs	^{90}Sr	^{137}Cs	^{90}Sr
Плотность загрязнения донного грунта, кБк/м ²	695,0	43,0	899,0	82,0
Содержание радионуклида в воде, Бк/л	2,79	3,99	2,25	1,18

Из таблицы 1 видно, что плотность загрязнения от радионуклидов ^{137}Cs в донном грунте непроточных водных объектов в 1,29 раза выше, чем в проточных водных объектах; плотность загрязнения от радионуклидов ^{90}Sr в донном грунте непроточных водных объектов в 1,91 раза выше, чем в проточных водных объектах.

Отсюда можно сделать вывод, что в отношении выноса радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr из донных отложений более эффективными являются проточные водные объекты. Содержание ^{137}Cs в проточных водных объектах не более чем на 20 % выше, чем в непроточном водоеме, в тоже время содержание ^{90}Sr в проточных объектах на 70 % больше, чем в непроточных водных объектах.

В результате радиоспектрометрического анализа мышечной и костной ткани рыб разных видов получены средние значения удельной активности радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr для водных объектов с различающимся гидрологическим режимом (таблица 2).

Из таблицы 2 видно, что достоверные различия удельной активности ^{137}Cs в мышечной ткани рыб, обитающих в водных объектах с разным гидрологическим режимом, наблюдаются у леща и окуня ($p < 0,05$). Среднее удельное содержание радионуклидов ^{137}Cs у леща, обитающего в непроточных водных объектах, в 1,6 раза больше, чем у леща полупроточных водных объектах и в 2,9 раза больше, чем у леща проточных водных объектах.

Таблица 2 – Удельная активность радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr , Бк/кг

Вид	Нуклид	Водный объект		
		Проточный	Полупроточный	Непроточный
Карась (n = 24)	^{137}Cs	47,4 ± 9,3	78,6 ± 29,7	47,1 ± 19,2
	^{90}Sr	148,5 ± 37,4	155,0 ± 58,6	116,5 ± 47,6
Лещ (n = 54)	^{137}Cs	75,7 ± 11,8	123,4 ± 20,7	41,7 ± 7,5
	^{90}Sr	123,7 ± 16,6	225,7 ± 10,8	202,4 ± 64,4
Окунь (n = 134)	^{137}Cs	144,2 ± 15,4	237,7 ± 25,9	106,5 ± 10,0
	^{90}Sr	112,3 ± 3,1	96,7 ± 16,0	98,8 ± 13,2
Плотва (n = 331)	^{137}Cs	103,8 ± 17,2	135,9 ± 12,7	470,9 ± 79,5
	^{90}Sr	76,5 ± 14,3	43,4 ± 8,8	451,4 ± 35,5
Щука (n = 233)	^{137}Cs	698,5 ± 96,9	518,6 ± 95,5	347,3 ± 57,5
	^{90}Sr	535,3 ± 32,7	188,2 ± 10,2	1817,7 ± 471,1

Среднее удельное содержание радионуклидов ^{137}Cs у окуня, обитающего в полупроточных водных объектах, в 1,7 раза больше, чем у окуня, обитающего в проточных водных объектах, и в 2,2 раза больше, чем у окуня, обитающего в непроточных водных объектах. Среднее удельное содержание радионуклидов ^{90}Sr в костной ткани имеет достоверные различия у плотвы и щуки, обитающих в водных объектах с разным гидрологическим режимом ($p < 0,05$). Среднее удельное содержание радионуклидов ^{90}Sr у плотвы проточных водных объектах в 2,8 раза больше, чем у плотвы, обитающей в полупроточных водных объектах и в 1,2 раза больше, чем у плотвы, обитающей в непроточных водных объектах.

В таблице 3 представлены данные средние годовые дозы внутреннего облучения от радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr у рыб с разным типом пищевого поведения.

Таблица 3 – Дозы внутреннего облучения, мГр/сут

Вид	Тип	Водный объект		
		Проточный	Полупроточный	Непроточный
Карась	Бентофаг	$2,46 \pm 0,61$	$2,70 \pm 1,02$	$1,98 \pm 0,81$
Лещ	Бентофаг	$2,22 \pm 0,30$	$3,98 \pm 0,26$	$3,25 \pm 1,01$
Окунь	Зоофаг	$2,36 \pm 0,12$	$2,55 \pm 0,36$	$1,98 \pm 0,25$
Плотва	Пери/зоофаг	$1,63 \pm 0,29$	$1,28 \pm 0,19$	$4,62 \pm 0,54$
Щука	Зоофаг	$1,28 \pm 0,94$	$5,21 \pm 0,59$	$8,97 \pm 0,73$

Из таблицы 3 видно, что у рыб с разным типом пищевого поведения, обитающих в водных объектах с разным гидрологическим режимом, наблюдаются достоверные различия доз внутреннего облучения. Среди видов рыб наибольшие дозы внутреннего облучения имеют щука, плотва и линь, обитающие в непроточных водных объектах. Среди перечисленных видов у щуки как крупного зоофага средняя доза внутреннего облучения в 2,7 раза превышает дозу облучения бентофагов и в 1,9 раза дозу облучения перифагов.

В таблице 4 представлены данные частоты микроядер в эритроцитах у рыб разных видов и типов пищевого поведения, отловленных на водных объектах с разным гидрологическим режимом и уровнем радиоактивного загрязнения.

Из таблицы 4 видно, что максимальная частота микроядер наблюдается у щуки, обитающей в непроточных водных объектах Полесского радиационно-экологического заповедника; следует отметить, что в непроточных водных объектах цитогенетический показатель достоверно больше, чем в проточных и полупроточных водных объектах ($p < 0,05$).

Таблица 4 – Частота микроядер у рыб с разным типом пищевого поведения, ‰

Вид	Тип	Водный объект		
		Проточный	Полупроточный	Непроточный
Карась	Бентофаг	$1,62 \pm 0,25$	$1,33 \pm 0,26$	$2,35 \pm 0,15$
Лещ	Бентофаг	$1,16 \pm 0,27$	$0,92 \pm 0,23$	$1,41 \pm 0,25$
Окунь	Зоофаг	$1,67 \pm 0,12$	$1,61 \pm 0,10$	$2,12 \pm 0,12$
Плотва	Пери/зоофаг	$1,01 \pm 0,18$	$1,33 \pm 0,12$	$1,35 \pm 0,25$
Щука	Зоофаг	$2,30 \pm 0,19$	$2,67 \pm 0,28$	$3,68 \pm 0,32$

Полученный результат хорошо согласуется с данными аккумулятивной способности радионуклидов у этого вида рыб [6]. Минимальные показатели частоты микроядер наблюдаются у плотвы и леща, для рыб этих видов не установлено достоверного различия частоты микроядер относительного гидрологического режима водного объекта, в котором они обитают ($p > 0,05$). Методом корреляционного анализа оценена статистическая связь между значениями дозы облучения и цитогенетическим показателем частоты аберраций в эритроцитах рыб с разным типом пищевого поведения, обитающих в водных объектах с разным гидрологическим режимом. В результате анализа установлено, что для проточных объектов имеет место сильная положительная статистическая зависимость, $r = 0,88$ ($p < 0,05$), для полупроточных и непроточных водных объектов статистическая зависимость средней силы $r = 0,57$ ($p < 0,05$) и $r = 0,67$ ($p < 0,05$) соответственно.

Заключение. Между дозой внутреннего облучения от инкорпорированных в организме пресноводных видов рыб с разным типом пищевого поведения радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr и спонтанной частотой микроядер в эритроцитах наблюдается статистическая зависимость сильной и средней силы ($p < 0,05$). Наиболее выраженная зависимость между дозовыми значениями и цитогенетическим индексом ($r = 0,88$, $p < 0,05$) наблюдаются в проточных водных объектах Полесского радиационно-экологического заповедника. Значения дозы внутреннего облучения и цитогенетический индекс имеют достоверные различия у разных видов рыб, обитающих в водных объектах с разным гидрологическим режимом. Среди рыб с разным типом пищевого поведения наибольшие значения доз внутреннего облучения и значения цитогенетического индекса наблюдаются у вида *Esox lucius* L. $8,97 \pm 0,73$ мГр/сут; $3,68 \pm 0,32$ ‰, обитающего в непроточных водных объектах Полесского радиационно-экологического заповедника.

Литература

1. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки : рекомендации Р 52.18.820-2015 : утв. 17.04.2015 г. : введ. 01.09.2015. – Обнинск, 2015 – 65 с.
2. 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.
3. Последствия радиоактивного загрязнения реки Течи : учеб. пособ. для студ. вузов / под ред. А. В. Аклеева. – Челябинск : Книга, 2016. – 400 с.
4. Жуков, П. И. Справочник по экологии пресноводных рыб / П. И. Жуков. – Минск : Наука и техника, 1988. – 310 с.
5. Методические указания по проведению гематологического обследования рыб [Электронный ресурс] : утв. 02.02.1999 г., №13-4-2/1487. – Режим доступа : <https://e-ecolog.ru/docs/pQbF13m1UU6Pwog1f85Wo>. – Дата доступа : 20.11.2023.
6. 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.

¹Гомельский государственный университет имени Франциска Скорины

²Полесский государственный радиоэкологический заповедник

Поступила в редакцию 24.11.2023