

ОЦЕНКА МОЩНОСТИ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ РЫБ В НИЗОВЬЕ р. ОБЬ

© 2022 г. В. Г. Городецкий^а, *, А. В. Трапезников^а, В. Н. Трапезникова^а, А. В. Коржавин^а

^аИнститут экологии растений и животных Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

*e-mail: vgorodetsky@mail.ru

Поступила в редакцию 08.06.2021 г.

После доработки 18.08.2021 г.

Принята к публикации 15.11.2021 г.

Проведена оценка мощности доз облучения, обусловленных ^{90}Sr и ^{137}Cs , у рыб в низовье р. Обь. Используются многолетние результаты радиоэкологического мониторинга Обь-Иртышской речной системы за 2004–2017 гг.: данные лабораторных исследований по содержанию радионуклидов в воде, донных отложениях и ихтиофауне Нижней Оби в границах Ханты-Мансийского (2004–2010 гг.) и Ямало-Ненецкого (2014–2017 гг.) автономных округов и др. Рассчитаны мощности суммарных доз облучения от ^{90}Sr и ^{137}Cs для всех исследуемых видов рыб, а также мощности внутренних и внешних доз облучения для семи видов рыб в Ханты-Мансийском автономном округе и восемь видов в Ямало-Ненецком автономном округе с учетом размерно-массовых характеристик рыб. Мощности дозовых нагрузок на все виды представителей ихтиофауны не превышают рекомендованные Международной комиссией по радиологической защите консервативного экологически безопасного уровня доз облучения биоты. Мощности доз от внутреннего облучения всех видов рыб выше, чем от внешнего. Основной вклад в формирование мощностей доз у рыб вносит ^{90}Sr , аккумулированный в их организме. Проведено сравнение мощностей доз облучения рыб Нижней Оби и в р. Теча вблизи производственного объединения “Маяк”, в реках Ромашка и Томь вблизи Сибирского химического комбината, в р. Енисей вблизи Горно-химического комбината, в Белоярском водохранилище вблизи Белоярской АЭС и р. Неман.

Ключевые слова: техногенные радионуклиды, донные отложения, ихтиофауна, мощность доз облучения, предприятия Росатома, Нижняя Обь, р. Неман

DOI: 10.31857/S0320965222030068

ВВЕДЕНИЕ

Радиоэкологическая ситуация в Нижней Оби и ее пойме определяется в основном процессом выноса радионуклидов из водосборной площади. Поступление радионуклидов на водосбор происходит за счет глобальных выпадений из атмосферы и поступлением радионуклидов в Обь-Иртышскую речную сеть в результате деятельности предприятий ядерного комплекса на территории Обь-Иртышского бассейна (Экология..., 2006).

В 1949–1951 гг. производственным объединением “Маяк” в р. Теча сброшено $\sim 10^{17}$ Бк жидких радиоактивных отходов. Значительная часть радиоактивности прошла транзитом по рекам Теча, Тобол, Иртыш и Нижняя Обь в Обскую губу (Трапезников и др., 2018). Другая часть (~ 4.6 ПБк ^{137}Cs и ~ 4.3 ПБк ^{90}Sr) депонирована в донных отложениях рек и их пойменных почвах (Трапезников, 2010).

В 1993 г. в результате аварии на Сибирском химкомбинате в окружающую среду выброшено 30.9 ТБк активности, включая 6.3 ГБк ^{239}Pu . На поверхности земли сформировался радиоактивный след длиной >7 км (Алексахин и др., 2001; Тетенев и др., 2008). До остановки последнего реактора в 2008 г. жидкие отходы, содержащие радионуклиды, поступали в р. Ромашка, далее в р. Томь (правый приток р. Обь) (Никитин и др., 2010). Были загрязнены пойменные почвы и донные отложения (Радиоэкологическая..., 2015).

Северная часть водосборной площади Обь-Иртышской речной системы загрязнена атмосферными выпадениями радиоактивных веществ в результате испытаний ядерного оружия на Новоземельском полигоне, южная часть – на Семипалатинском полигоне и полигоне Лобнор (Китай). Часть радиоактивных загрязнений с водосборной площади Обь-Иртышского бассейна, с речным стоком поступающих в Обскую губу, концентрируется в донных отложениях в зоне смешения пресных и соленых вод (Семенков и др., 2015; Мирошников и др., 2020).

Сокращения: ПО – производственное объединение; ХМАО – Ханты-Мансийский автономный округ, ЯНАО – Ямало-Ненецкий автономный округ.

Поступление с водой ^{90}Sr и ^{137}Cs в Нижнюю Обь из Средней Оби превышает поступление этих радионуклидов из р. Иртыш (Трапезников и др., 2016). В паводковый период и при затяжных дождях через пойменные участки происходит вторичное загрязнение рек, что требует постоянного мониторинга радиоэкологической ситуации речной системы (Заключение..., 2008).

В бассейне Нижней Оби ведется промышленный лов рыбы, поэтому мониторинг содержания техногенных радионуклидов в ихтиофауне крайне актуален. Рыбы аккумулируют радионуклиды, поступившие по пищевой цепи и непосредственно из воды. С одной стороны, важно определение содержания радионуклидов в рыбе, как продукте питания с точки зрения санитарно-гигиенических требований, с другой, – важна оценка радиоэкологических рисков для самой рыбы из-за ее внутреннего и внешнего облучений от радионуклидов, содержащихся в окружающей среде (в воде и донных отложениях).

Цель работы – оценить мощность доз, получаемых рыбами от радиоактивного загрязнения Нижней Оби в границах ХМАО и ЯНАО; дать сравнительный анализ этого показателя с таковым у рыб в реках, протекающих в зонах воздействия предприятий Росатома – ПО “Маяк”, Сибирский химический комбинат, Горно-химический комбинат, Белоярская АЭС.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки мощности доз облучения ихтиофауны Нижней Оби использованы данные полевых исследований отдела континентальной радиоэкологии Института экологии растений и животных Уральского отделения РАН в ХМАО (2004–2010 гг.) и ЯНАО (2014–2017 гг.), обобщенные в работах Г.А. Трапезникова с соавторами (2014, 2016, 2018).

Проведена обработка результатов по содержанию ^{90}Sr и ^{137}Cs в рыбе, воде и донных отложениях в Нижней Оби для подготовки исходных данных при расчетах мощности доз облучения в программе ERICA Tool 1.3.1.49 (<http://www.ERICA-tool.com>) с учетом размерно-массовых характеристик исследованных видов рыб. Мощность доз облучения оценивали для двух створов Нижней Оби вниз по течению от г. Ханты-Мансийск – в 20 км (ХМАО) и ~1000 км (ЯНАО, 10 км выше г. Лабытнанги).

При оценке доз внешнего облучения из донных отложений в программе ERICA Tool 1.3.1.49 (Tier 2) использовали данные по содержанию радионуклидов в 10-сантиметровом верхнем слое отложений. Сухую массу донных отложений принимали равной 70% сырой массы.

Исследованы следующие виды рыб:

Карась обыкновенный *Carassius carassius* (Linnaeus, 1758), возраст 2–3 года, придонный образ жизни. Питается зоопланктоном, зоо- и нектобентосом, водорослями. Тело короткое, сжатое с боков.

Лещ *Abramis brama* (L., 1758), возраст 3–5 лет, придонный образ жизни, питается зообентосом. Сравнительно крупная рыба с высоким телом, сжатым с боков.

Налим *Lota lota* (L., 1758), возраст 3–5 лет, придонный образ жизни, питается рыбой и мелкими беспозвоночными, тело удлинено-округлое в передней части.

Окунь речной *Perca fluviatilis* (L., 1758), возраст 2–3 года, питается рыбой, беспозвоночными. Тело сжато с боков.

Пелядь (сырок) *Coregonus peled* (Gmelin, 1789), возраст 2–3 года. Питается зоо- и нектобентосом, зоо- и фитопланктоном. Тело высокое, сжато с боков. Полупроходная рыба.

Сиг обыкновенный (пыжьян) *Coregonus lavaretus* (L., 1758), возраст 4–6 лет. Питается бентосом и нектобентосом. Тело удлиненное, уплощенное с боков. Полупроходная рыба.

Плотва *Rutilus rutilus* (L., 1758), возраст 3–5 лет. Питается зоопланктоном, зообентосом, водорослями и гидрофитами. Тело несколько сжато с боков.

Ряпушка сибирская *Coregonus sardinella* (Valenciennes, 1848), возраст от 4 до 6 лет. Питается преимущественно зоопланктоном. Тело вытянутое, сельдеобразное.

Чир (шокур) *Coregonus nasus* (Pallas, 1776), возраст 5–7 лет. Типичный бентофаг. Тело высокое, уплощенное с боков. Полупроходная рыба.

Щука обыкновенная *Esox lucius* (L., 1758), возраст 3–6 лет. Питается рыбой. Тело удлиненное, торпедообразное, несколько сжатое с боков.

Язь *Leuciscus idus* (L., 1758), возраст 5–7 лет. Питается зообентосом. Тело умеренно удлиненное, овальное.

При оценке мощности доз облучения использовали программу ERICA Tool 1.3.1.49 (Tier 2). Рассчитывали параметры эллипсоидов, аппроксимирующих форму каждого вида рыбы. Полученные параметры заносили в программу. Мощность доз рассчитывали для каждой из трех вторностей у всех видов рыб.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Параметры аппроксимирующих эллипсоидов. По каждому виду рыбы рассчитывали параметры эллипсоида, аппроксимирующего его форму (высота, ширина и длина). Размеры осей аппроксимирующего эллипсоида подбирали таким образом, чтобы объем эллипсоида равнялся объему

Таблица 1. Параметры эллипсоидов, аппроксимирующих форму рыб

Вид	Масса, кг	Размеры аппроксимирующего эллипсоида, м			Доля времени в воде/на дне
		высота	ширина	длина	
Карась	0.20	0.074	0.037	0.143	0.2/0.8
Лещ	0.50	0.120	0.030	0.265	0.2/0.8
Налим	0.50	0.060	0.043	0.37	0.2/0.8
Окунь	0.10	0.048	0.027	0.150	0.8/0.2
Пелядь	0.40	0.080	0.033	0.290	0.5/0.5
Плотва	0.06	0.045	0.023	0.110	0.5/0.5
Пыжьян	0.30	0.062	0.04	0.23	0.5/0.5
Ряпушка	0.15	0.048	0.026	0.230	0.5/0.5
Щокур	1.10	0.100	0.055	0.380	0.2/0.8
Щука	1.50	0.080	0.070	0.510	0.8/0.2
Язь	0.95	0.090	0.065	0.310	0.2/0.8

Таблица 2. Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в воде (мБк/л) и в 10-сантиметровых донных отложениях (Бк/кг) в створе Нижней Оби в 20 км вниз по течению от г. Ханты-Мансийска

Среда	Радионуклид	Содержание радионуклидов				Среднее
		2004 г.	2006 г.	2008 г.	2010 г.	
Вода	^{90}Sr	12.5 ± 3.5	125 ± 13	23.7 ± 4.9	20 ± 4	45 ± 8
	^{137}Cs	0.17 ± 0.09	10.6 ± 1.8	0.39 ± 0.08	1.87 ± 0.19	3.26 ± 0.76
Донные отложения	^{90}Sr	0.52 ± 0.23	1.70 ± 0.99	19.9 ± 1.3	10 ± 2	8.04 ± 2.15
	^{137}Cs	2.56 ± 1.03	0.33 ± 0.09	1.05 ± 0.05	<0.01	0.98 ± 0.39

рыбы, при условии, что ее плотность равна плотности воды. Соотношения между размерами осей эллипсоида выбирали с учетом массы рыбы, преобладающей в уловах и соотношения долей времени, проводимого рыбами в толще воды и вблизи дна, с учетом образа жизни и питания (табл. 1).

Ихтиофауна Ханты-Мансийского автономного округа. Использованы результаты ежегодного мониторинга Обь-Иртышской системы (Трапезников и др., 2014, 2016) с 2004 по 2010 гг. Выбраны годы, за которые получен наиболее полный набор данных, необходимых для расчетов. В 2006 г. зафиксировано значительное увеличение содержания радионуклидов в воде из-за их повышенного поступления в Нижнюю Обь из Средней Оби (табл. 2). Поступления радионуклидов из р. Иртыш оставались на прежнем уровне (Трапезников и др., 2016).

Суммарные мощности доз облучения от ^{90}Sr и ^{137}Cs за весь период находились в пределах 142 ± 3 нГр/сут у щуки в 2004 г. и 1515 ± 660 нГр/сут у окуня в 2006 г. (табл. 3).

Для всех видов рыб ХМАО радиационное воздействие формировалось преимущественно за счет внутреннего облучения от ^{90}Sr (табл. 4).

Ихтиофауна Ямало-Ненецкого автономного округа. Для расчета мощности дозы внешнего облучения у рыб использованы данные ежегодного мониторинга Нижней Оби (Трапезников и др., 2018) с 2014 по 2017 г. по содержанию радионуклидов в воде и в 10-сантиметровом слое донных отложений (табл. 5). Для всех представленных видов рыб ЯНАО проведены расчеты, аналогичные таковым для рыб ХМАО. Суммарные мощности доз у каждого вида за счет ^{90}Sr и ^{137}Cs , находящихся в организме рыб и в окружающей среде, приведены в табл. 6. У всех видов рыб ЯНАО основная мощность дозы облучения формируется за счет внутренней дозы, основной дозообразующий радионуклид – ^{90}Sr (табл. 7).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Мощности суммарных доз облучения от ^{90}Sr и ^{137}Cs у всех видов исследуемых рыб существенно ниже безопасных уровней, рекомендуемых в про-

Таблица 3. Суммарные мощности доз воздействия ^{90}Sr и ^{137}Cs (нГр/сут) у рыб в створе Нижней Оби в 20 км вниз по течению от г. Ханты-Мансийск

Вид	2004 г.	2006 г.	2008 г.	2010 г.	Среднее
Карась	—	—	164 ± 84	96 ± 56	130 ± 35
Лещ	111 ± 9	815 ± 560	—	81 ± 6	336 ± 164
Налим	134 ± 11	—	55 ± 22	63 ± 16	64 ± 15
Окунь	161 ± 8	1515 ± 660	327 ± 44	96 ± 23	525 ± 202
Плотва	146 ± 3	—	75 ± 4	48 ± 17	90 ± 16
Щука	142 ± 3	—	65 ± 24	38 ± 21	81 ± 18
Язь	152 ± 3	413 ± 360	95 ± 60	95 ± 41	188 ± 63

Примечание. Здесь и в табл. 4, 6, 7 “—” — данные отсутствуют.

Таблица 4. Мощность внутренних доз воздействия ^{90}Sr и ^{137}Cs (нГр/сут) у рыб в створе Нижней Оби в 20 км вниз по течению от г. Ханты-Мансийск

Рыба	^{90}Sr				^{137}Cs			
	2004 г.	2006 г.	2008 г.	2010 г.	2004 г.	2006 г.	2008 г.	2010 г.
Карась	—	—	127 ± 70	77 ± 65	—	—	30.5 ± 15.9	16.7 ± 10.7
Лещ	105 ± 8	809 ± 570	—	78 ± 6	0.82 ± 0.75	4.81 ± 2.79	—	<0.01
Налим	125 ± 10	—	45 ± 22	60 ± 15	4.07 ± 1.77	—	4.15 ± 0.05	<0.01
Окунь	157 ± 6	1488 ± 660	319 ± 44	94 ± 22	2.52 ± 1.32	26.2 ± 2.8	6.32 ± 0.98	<0.01
Плотва	139 ± 3	—	67 ± 5	46 ± 17	3.64 ± 1.22	—	3.93 ± 2.65	<0.01
Щука	137 ± 4	—	58 ± 24	18.5 ± 17.9	3.99 ± 1.38	—	3.83 ± 2.97	17.9 ± 3.4
Язь	145 ± 4	408 ± 360	89 ± 59	92 ± 41	1.90 ± 0.55	3.23 ± 0.25	2.16 ± 1.70	<0.01

Таблица 5. Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs (мБк/л) в воде и в 10-сантиметровых донных отложениях (Бк/кг) в 2014–2017 гг. в створе ниже по течению Нижней Оби в ~1000 км от г. Ханты-Мансийск

Среда	Радионуклид	Содержание радионуклидов				Среднее
		2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	
Вода	^{90}Sr	8.2 ± 2.2	12.5 ± 1.5	15 ± 4	9 ± 1	11.2 ± 1.3
	^{137}Cs	7.4 ± 2.7	4 ± 1	18.4 ± 2.4	1.7 ± 0.2	7.8 ± 1.5
Донные отложения	^{90}Sr	13.6 ± 3.3	8.6 ± 1.9	11.1 ± 1.3	21.5 ± 8.5	13.7 ± 1.6
	^{137}Cs	2.3 ± 1.5	2.3 ± 0.6	6.2 ± 1.1	8.0 ± 5.3	4.7 ± 1.4

екте ERICA project — 10 мкГр/ч (Лаврентьева и др., 2020) и Международной комиссией по радиологической защите — 1 мГр/сут (ICRP..., 2008).

Суммарная мощность дозы облучения. Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в 2006 г. в воде створа Нижней Оби в 20 км вниз по течению от г. Ханты-Мансийск было на порядок выше, чем в 2004 г. (табл. 2), за счет повышенного поступления радионуклидов в Нижнюю Обь из Средней Оби в Томской обл. (Трапезников и др., 2016). Суммарные мощности дозы в 2006 г. превышали таковые в 2004 г. у леща в 7 раз, окуня в >9 раз, язя в ~3 раза (табл. 3).

Для створа, исследованного в ЯМАО, размах колебаний содержания в воде ^{90}Sr и ^{137}Cs по годам

был меньше, чем в ХМАО (табл. 2, 5). Максимальное различие в суммарной мощности дозы обнаружено у пыжьяна — в 2015 г. в 6 раз выше, чем в 2017 г. Сравнение суммарных средних мощностей доз рыб одного вида, исследованных в двух створах Нижней Оби, показало, что мощность доз у окуня, плотвы и язя выше в ХМАО, лишь у щуки средняя мощность дозы превышала таковую в ЯНАО (табл. 3, 6).

Мощность дозы внутреннего облучения. Доля мощности доз от радионуклидов в организме всех рыб в общей дозе для рыб в ХМАО была >95% (табл. 3, 4), в ЯНАО — от 64 до 98% (табл. 6, 7). Внутренняя мощность дозы доля, обусловленная

Таблица 6. Суммарные мощности доз от ^{90}Sr и ^{137}Cs (нГр/сут) у рыб в створе Нижней Оби в ~1000 км вниз по течению от г. Ханты-Мансийск

Вид	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	Среднее
Окунь	—	—	107 ± 20	80 ± 9	93 ± 11
Пелядь	97 ± 7	282 ± 124	—	—	171 ± 57
Плотва	52 ± 5	—	78 ± 15	65 ± 9	63 ± 5
Пыжьян	—	234 ± 11	—	39 ± 9	136 ± 77
Ряпушка	—	—	64 ± 7	50 ± 7	57 ± 6
Щокур	57 ± 9	107 ± 86	52 ± 12	56 ± 8	66 ± 9
Щука	113 ± 9	237 ± 73	85 ± 14	67 ± 8	124 ± 25
Язь	—	158 ± 100	75 ± 18	65 ± 7	99 ± 23

Таблица 7. Мощности внутренних доз ^{90}Sr и ^{137}Cs (нГр/сут) у рыб в створе Нижней Оби в ~1000 км вниз по течению от г. Ханты-Мансийск

Вид	^{90}Sr				^{137}Cs			
	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.
Окунь	—	—	91 ± 17	66 ± 12	—	—	12.3 ± 2.8	8.17 ± 2.42
Пелядь	79 ± 3	268 ± 133	—	—	9.73 ± 4.28	7.65 ± 7.05	—	—
Плотва	40 ± 7	—	59 ± 13	47 ± 10	5.17 ± 2.68	—	7.71 ± 2.04	3.48 ± 0.85
Пыжьян	—	221 ± 13	—	16 ± 9	—	5.75 ± 2.57	—	1.39 ± 0.55
Ряпушка	—	—	45 ± 8	25 ± 8	—	—	2.62 ± 1.31	1.79 ± 0.87
Щокур	46 ± 8	95 ± 81	34 ± 11	34 ± 9	4.53 ± 0.85	6.56 ± 5.06	3.97 ± 1.59	2.89 ± 1.29
Щука	102 ± 9	215 ± 68	73 ± 16	56 ± 10	8.86 ± 0.95	21.13 ± 5.47	7.93 ± 1.21	5.59 ± 2.23
Язь	—	139 ± 95	54 ± 15	43 ± 6	—	13.20 ± 4.77	7.09 ± 2.79	3.68 ± 1.39

^{90}Sr , превышала 74% у рыб в ХМАО и 90% в ЯНАО.

Радиоактивные загрязнения в Нижнюю Обь поступают с наиболее загрязненных территорий Обь-Иртышского бассейна вблизи ПО “Маяк” и Сибирского химического комбината: со стороны ПО “Маяк” — по рекам Теча, Исеть, Тобол, Иртыш, Нижняя Обь; со стороны Сибирского химического комбината — по речной системе Ромашка—Томь—Средняя Обь—Нижняя Обь.

Целесообразно сравнить мощности доз облучения у рыб в реках на этих территориях.

ПО “Маяк”. В летне-весенний период 2012–2013 гг. суммарная мощность дозы облучения у рыб, обусловленная ^{90}Sr и ^{137}Cs , в р. Теча уменьшалась вниз по течению на участке 33–184 км от места выпуска жидких радиоактивных отходов ПО “Маяк” (Тряпицына и др., 2017, 2019). У окуня суммарная мощность дозы снижалась с 124 до 4 мкГр/сут, у плотвы — с 108 до 9 мкГр/сут, у щуки — со 150 до 3 мкГр/сут.

В Нижней Оби на расстоянии ~1500 км (створ в ХМАО) и ~2500 км (створ в ЯНАО) от ПО “Маяк” усредненные мощности дозы у окуня, плотвы, щуки (табл. 3, 6) были на три порядка меньше, чем в р. Теча на расстоянии 33 км от точки сброса жидких радиоактивных отходов и на один–два порядка меньше на расстоянии 184 км.

По мере удаления от точки сброса жидких радиоактивных отходов в р. Теча доля мощности внутреннего облучения в общей мощности облучения увеличивалась с 17.6 до 89% и становилась

сопоставимой для плотвы в ХМАО (99%) и плотвы в ЯНАО (95%).

Сибирский химический комбинат. В период с 2000 по 2008 гг. до остановки последнего реактора мощность общей дозы облучения придонной рыбы в р. Ромашка, куда непосредственно сливали отходы, содержащие радионуклиды, достигала 200 мкГр/сут, доля мощности внутреннего облучения превышала 97% (Радиоэкологическая..., 2015). В это же время в Чернильщиковской протоке на р. Томь мощность общей дозы облучения была 42 мкГр/сут. В обоих случаях внутреннее облучение преобладало. Основной вклад в мощность дозовой нагрузки вносил ^{32}P — ~90%.

После остановки последнего реактора мощность дозы в 2009–2014 гг. у придонной рыбы снизилась на 2–3 порядка — в р. Ромашка до 880 нГр/сут, в Чернильщиковской протоке до 140 нГр/сут. Доля внешнего облучения за счет ^{60}Co , ^{137}Cs и ^{152}Eu в донных отложениях была преобладающей.

Для Нижней Оби в качестве придонных рыб можно рассматривать карася и леща. Усредненные мощности доз облучения у этих видов за 2004–2010 гг. были 130 и 336 нГр/сут соответственно, что сравнимо с оценками по придонным рыбам в Чернильщиковской протоке на р. Томь (Радиоэкологическая..., 2015).

Как и в случае с ПО “Маяк”, мощность дозы облучения рыбы на расстоянии ~100 км вниз по течению от точки сброса жидких радиоактивных отходов уменьшилась более чем на порядок вели-

чин. Оценки мощности усредненной дозы облучения рыб за 2012–2013 гг. в р. Теча выше, чем у рыбы в р. Ромашка в 2009–2014 гг. Следует учесть, что у рыб в этих реках разный состав дозообразующих радионуклидов.

Горно-химический комбинат. В 2006–2009 гг. в период работы третьего реактора Горно-химического комбината в 5 км от места основного сброса сточных вод, содержащих радионуклиды, вниз по течению р. Енисей, мощность доз от ^{137}Cs у хариуса (*Thymallus arcticus* Pallas) достигала 22.3 мкГр/сут, у щуки – 36.4 мкГр/сут (Ракитский и др., 2018).

В работах (Лунева, Крышев, 2014; Радиоэкологическая..., 2015) проведена оценка усредненной дозы облучения рыб р. Енисей в районе Горно-химического комбината в 16 км от места сброса сточных вод ниже по течению. До остановки последнего реактора доза облучения в 2000–2009 гг. для пелагической рыбы достигала 1.92 мкГр/сут, для придонной – 1.90 мкГр/сут с учетом $^{239+240}\text{Pu}$ – 6.6 мкГр/сут (Бурякова и др., 2020). Преобладало внутреннее облучение. Основным дозообразующим радионуклидом без учета $^{239+240}\text{Pu}$ был ^{32}P (70%), на ^{24}Na приходилось 30% (Лунева, Крышев, 2014). После остановки последнего реактора в 2011–2014 гг. мощность дозы снизилась для пелагической рыбы до 25 нГр/сут, придонной – до 106 нГр/сут. Мощность дозы внешнего облучения за счет накопленных в донных отложениях ^{60}Co и ^{137}Cs была преобладающей. Таким образом, после остановки реакторов на Горно-химическом комбинате общие мощности доз у рыб в р. Енисей на расстоянии 16 км от места сброса жидких радиоактивных отходов сравнимы с таковыми для рыб Нижней Оби.

Белоярская АЭС. На основании данных по содержанию радионуклидов в рыбе, воде и донном грунте в работе (Берзин и др., 2020), проведена оценка доз облучения у карася и леща в Белоярском водохранилище в районе промливневого канала Белоярской АЭС. Суммарная мощность дозы внутреннего и внешнего облучения у карася достигала 257 нГр/сут, у леща 225 нГр/сут. Преобладала мощность дозы внешнего облучения за счет накопленного в донном грунте ^{137}Cs : у карася – 65%, у леща – 73%. Внутреннее облучение у этих видов рыб было обусловлено, преимущественно, накоплением ^{137}Cs . Вклад ^{137}Cs в формирование мощности дозы внутреннего облучения достигал у карася 75%, у леща 59%.

Общая доза облучения рыб Белоярского водохранилища сравнима с дозами у рыб тех же видов в Нижней Оби. Однако, основным дозообразующим радионуклидом в р. Обь был ^{137}Cs , аккумулярованный в организме рыб, у рыб Белоярского водохранилища – ^{137}Cs , находящийся в донном грунте и в организме рыб.

Река Неман. На основании данных работы (Лунева, 2018), проведена оценка доз облучения у окуня и густеры в 2014 г. в р. Неман вблизи проек-

тируемого забора воды строящейся Балтийской АЭС. Суммарная мощность дозы внутреннего и внешнего облучения за счет ^{137}Cs и ^{137}Cs у окуня – 8.65 нГр/сут, густеры – 13.58 нГр/сут. Общая доза облучения у рыб в р. Неман более чем на порядок меньше, чем у тех же видов в Нижней Оби.

Выводы. Дозы радиационного воздействия на все виды исследуемых рыб в ХМАО (2004–2010 гг.) и ЯНАО (2014–2017 гг.) не превышают рекомендованные Международной комиссией по радиологической защите консервативного экологически безопасного уровня облучения – 1 мГр/сут. Мощность дозы от радионуклидов, аккумулярованных в рыбах, выше мощности внешней дозы от радионуклидов в окружающей среде. Основной вклад в радиационное воздействие на рыб в Нижней Оби вносит ^{90}Sr , аккумулярованный в организме рыб.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена за счет бюджетного финансирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексахин Р.М., Булдаков Л.А., Губанов В.А. и др. 2001. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. Москва: ИздАТ.
- Берзин Д.Л., Чеботина М.Я., Гусева В.П. 2020. Накопленные радионуклиды в озерной лягушке *Pelophylax ridibundus* в зоне атомного предприятия // Биология внутр. вод. № 6. С. 613. (Berzin D.L., Chebotina M.Ja., Guseva V.P. 2020. Accumulation of Radionuclides in the Marsh Frog *Pelophylax ridibundus* in the Zone of a Nuclear Plant // Inland Water Biology. V. 13. № 6. P. 691.).
<https://doi.org/10.31857/S0320965220060042>
- Заключение Российской научной комиссии по радиационной защите по докладу “Радиоэкологический мониторинг речной системы Теча-Обь”. 2008 // Радиация и риск. Т. 17. № 3. С. 5.
- Бурякова А.А., Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. и др. 2020. Оценка дозы и экологического риска для объектов биоты в районе расположения Горно-химического комбината // Радиационная биология. Радиоэкология. Т. 60. № 6. С. 661.
<https://doi.org/10.31857/S0869803120060156>
- Лаврентьева Г.В., Сынзыныс Б.И. 2020. Современные тенденции оценки радиационного экологического риска. Обзор // Радиация и риск. Т. 29. № 2. С. 128.
<https://doi.org/10.21870/0131-3878-2020-29-2-128-138>
- Лунева К.В., Крышев А.И. 2014. Анализ радиоэкологического воздействия Красноярского горно-химического комбината на объекты речной биоты в 2000–2012 гг. // Радиация и риск. Т. 23. № 1. С. 89.
- Лунева Е.В. 2018. Содержание радионуклидов в поверхностных водах, донных отложениях и гидробионтах реки Неман // Биология внутр. вод. № 1. С. 100.
<https://doi.org/10.7868/S0320965218010138>
- Мирошников А.Ю., Флинт М.В., Асадулин Э.Э., Комаров В.Б. 2020. Радиационно-геохимическая устой-

- чивость донных осадков в эстуариях Оби и Енисея и на прилегающем мелководье Карского моря // *Океанология*. Т. 60. № 6. С. 930. <https://doi.org/10.31857/S0030157420060088>
- Никитин А.И., Чумичев В.Б., Валетова Н.К. и др. 2010. Современное содержание ^{90}Sr , ^{137}Cs , 239 , ^{240}Pu и трития в воде речной системы Тобол–Иртыш (от устья р. Исеть до слияния с р. Обь) // *Известия вузов. Ядерная энергетика*. № 3. С. 26.
- Радиоэкологическая обстановка в регионах расположения предприятий Росатома. 2015. Москва: САМ полиграфист.
- Ракитский В.Н., Бондарева Л.Г., Федорова Н.Е. 2018. Расчет дозы облучения для некоторых компонентов пищевой цепочки пресноводной экосистемы реки Енисей в период деятельности предприятия ядерно-топливного цикла – Горно-химического комбината, г. Красноярск // *Радиационная гигиена*. Т. 11 № 3. С. 22. <https://doi.org/10.21514/1998-426X-2018-11-3-22-29>
- Семенов И.Н., Мирошников А.Ю., Асадулин Э.Э. и др. 2015. Обская макроарена как источник загрязнения Карского моря цезием-137 глобальных выпадений // *Докл. академии наук*. Т. 463. № 1. С. 99. <https://doi.org/10.7868/S0869565215190196>
- Тетнев Ф.Ф., Рыжов А.И., Порозовский Я.В. 2008. Эволюция допустимых доз ионизирующего излучения и значение аварии 1993 г. на Сибирском химическом комбинате в облучении населения // *Бюллетень сибирской медицины*. № 4. С. 104.
- Трапезников А.В. 2010. ^{60}Co , ^{90}Sr , ^{137}Cs и $^{239,240}\text{Pu}$ в пресноводных экосистемах. Екатеринбург: Изд-во “АкадемНаука”.
- Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В., Николкин В.Н. 2014. Радиоэкологический мониторинг пресноводных экосистем. Т. 1. Екатеринбург: Изд-во “АкадемНаука”.
- Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В., Николкин В.Н. 2016. Радиоэкологический мониторинг пресноводных экосистем. Т. 2. Екатеринбург: Изд-во “АкадемНаука”.
- Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В., Николкин В.Н. 2018. Радиоэкологический мониторинг пресноводных экосистем. Т. 3. Екатеринбург: Изд-во “АкадемНаука”.
- Тряпицына Г.А., Осипов Д.И., Егорейченко Е.А. и др. 2017. Оценка состояния эритропоза у плотвы (*Rutilus rutilus*) радиоактивно загрязненной реки Теча // *Радиационная биология. Радиоэкология*. Т. 57. № 1. С. 98. <https://doi.org/10.7868/S0869803117010131>
- Тряпицына Г.А., Пряхин Е.А., Осипов Д.И. и др. 2019. Реакция эритропоза на трипаносомную инвазию у рыб, обитающих в радиоактивно загрязненной реке Теча // *Радиационная биология. Радиоэкология*. Т. 59. № 1. С. 82. <https://doi.org/10.1134/S0869803119010119>
- Экология рыб Обь-Иртышского бассейна. 2006. Москва: Товарищество науч. изданий КМК.
- ICRP Publication 108. 2008. Environmental protection: the concept and use of reference animals and plants // *Ann. ICRP*. V. 38. № 4–6.

Assessment of Radiation Exposure of Fish in the Lower Reaches of the Ob River

V. G. Gorodetsky¹, *, A. V. Trapeznikov¹, V. N. Trapeznikova¹, and A. V. Korzhavin¹

¹Institute of Plant and Animal Ecology, Russian Academy of Science, Ural Branch, Ekaterinburg, Russia

*e-mail: vgorodetsky@mail.ru

An assessment of the radiation exposure power, caused by ^{90}Sr and ^{137}Cs on fish in the Ob River lower reaches was carried out. We used long-term results of the radioecological monitoring of the Ob-Irtysh river system for the period 2004–2017. Including the data from laboratory analyses of studies on the radionuclides content in water, bottom sediments and ichthyofauna of the Lower Ob River within the boundaries of the Khanty-Mansiysk region (2004–2010) and the Yamalo-Nenets Autonomous region (2014–2017). When calculating the radiation exposure power, the ERICA Tool 1.3.1.49 (Tier 2) software was used. The rates of total radiation exposure power from ^{90}Sr and ^{137}Cs were calculated for all species of the studied fish species. We also calculated the power of internal and external radiation exposure, both from ^{90}Sr and ^{137}Cs for 7 species of fish in the Khanty-Mansiysk Autonomous Region, and 8 species in the Yamalo-Nenets Autonomous Region. The calculations were carried out taking into account the size and weight characteristics of the studied fish. The radiation exposure power for all species of ichthyofauna representatives does not exceed the ICRP-recommended levels of the conservative ecologically safe radiation level. The radiation exposure power due to the internal irradiation in all species of fish is higher than the radiation exposure power due to the external irradiation. The main contribution to the formation of the radiation exposure power for all the fish studied is made by ^{90}Sr accumulated in the fish organisms. A comparison is made of the radiation dose power for fish from the Lower Ob-river and fish in the Techa-river near the Mayak Production Association, in the Romashka-river and Tom-river, near the Siberian Chemical Complex, in the Yenisei-river near the Mining and Chemical Complex, in the Beloyarsk reservoir near the Beloyarsk NPP and in Neman River.

Keywords: Lower Ob River, technogenic radionuclides, bottom sediments, ichthyofauna, radiation exposure, PA Mayak, Siberian Chemical Complex, Mining and Chemical Complex, Beloyarsk NPP, Neman River