

УДК 539.163:597.556:574.5:57.087

РАЗМЕРНАЯ ЗАВИСИМОСТЬ НАКОПЛЕНИЯ РАДИОЦЕЗИЯ (^{137}Cs) В МЫШЦАХ И ТЕЛАХ ЩУКИ (*Esox lucius*) Р. ЕНИСЕЙ

© 2019 г. Т. А. Зотина^{1,2*}, Е. А. Трофимова¹, Д. В. Дементьев¹¹ Институт биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск, Россия² Сибирский федеральный университет, Институт фундаментальной биологии и биотехнологии, Красноярск, Россия

*E-mail: t_zotina@ibp.ru

Поступила в редакцию 12.03.2018 г.

Исследовали размерную зависимость содержания радиоцезия (^{137}Cs) и ^{40}K в мышцах и телах щук (*Esox lucius*), обитающих на радиоактивно загрязненном участке р. Енисей в 2010–2016 гг. Было проанализировано 47 особей с общей сырой массой от 90 до 1651 г. Содержание радионуклидов в пробах рыб измеряли на гамма-спектрометре с германиевым детектором, содержание калия — на пламенном фотометре. Содержание радиоцезия в мышцах и телах рыб варьировало в диапазоне 0.13–7.02 и 0.12–7.24 Бк/кг сырой массы соответственно и зависело от массы рыб. Наиболее высокие величины удельной активности радиоцезия зарегистрированы в мышцах и телах рыб массой до 530 г и возрастом до 5 лет. Корреляционный анализ показал наличие статистически значимой обратной зависимости содержания радиоцезия в телах щук от общей массы и общей длины тел, аналогичной достоверной зависимости для мышц не выявлено. Высокое содержание радиоцезия в тканях молодых щук можно объяснить более интенсивным питанием молодых щук, по сравнению со щуками старшего возраста. Факторный анализ выявил статистически достоверное снижение содержания радиоцезия в мышцах и телах щук со временем.

Ключевые слова: щука, техногенные радионуклиды, отрицательный размерный эффект, коэффициент накопления

DOI: 10.1134/S0869803119030123

Техногенные радионуклиды, попадающие в водную экосистему в результате работы предприятий атомной промышленности и глобальных выпадений, способны ассимилироваться в тканях водной биоты, в том числе ихтиофауны, и переходить, таким образом, в биологически связанную форму. Одним из наиболее широко распространенных в поверхностных водоемах техногенных радионуклидов является ^{137}Cs (радиоцезий, $T_{1/2} = 30.17$ лет). Цезий не относится к числу необходимых для биоты элементов, однако его изотопы с высокой эффективностью ассимилируются рыбами из пищи и воды [1–4]. Для радиоцезия известно явление биомагнификации в водной трофической сети, благодаря чему хищные рыбы накапливают более высокие активности ^{137}Cs , чем “мирные” [2, 5–12]. Наибольшая часть радиоцезия, накопленного в телах рыб, сосредоточена в скелетных мышцах [1, 11–13], что создает высокую вероятность его переноса по трофической цепи к человеку.

Содержание радиоцезия в мышцах рыб определяется в результате интенсивности физиологических процессов: ассимиляции (поглощения с пищей и водой), выделения и роста рыбы, а также

зависит от количества биодоступного радионуклида в экосистеме и конкурирующих макроэлементов (калия и др.) в воде [5, 6, 8, 14, 15]. В процессе онтогенеза интенсивность физиологических процессов у рыб может изменяться, что иногда приводит к установлению зависимости содержания металлов и радионуклидов в мышцах от размерных характеристик рыб — “размерного эффекта”. Зависимость накопления радиоцезия пресноводными рыбами от их размера и возраста изучалась в водоемах разных континентов. В результате были обнаружены размерные зависимости накопления радиоцезия представителями ихтиофауны, различные по виду и знаку, а также отсутствие статистически значимых зависимостей [5, 8, 12, 14, 16–23]. Зависимость накопления радиоцезия рыбами от их размерных характеристик учитывается при моделировании биокинетики радионуклида в водоемах [5, 15, 24, 25].

В р. Енисей радиоцезий поступает, помимо глобальных выпадений, со сбросами Горно-химического комбината (ГХК, г. Железногорск). В годы работы последнего реактора на ГХК, имевшего замкнутый контур охлаждения (с 1992 по 2010 г.), сброс радиоцезия в р. Енисей значи-



Рис. 1. Схематическая карта участка р. Енисей с указанием расположения ГХК — источника радиоактивного загрязнения реки. Вылов рыб проводился между селами Б. Балчуг и Кононово.

тельно снизился по сравнению с периодом, когда кроме него работали два прямоточных реактора, однако не прекратился после полной остановки реакторного производства [26–33]. Источником радиоцезия для биоты р. Енисей могут также служить донные отложения и пойменные почвы, в которых накоплены значительные депозиты радиоцезия [34, 35].

Из числа рыб, обитающих на участке р. Енисей, расположенном вблизи сбросов ГХК, одним из популярных объектов промысла является щука (*Esox lucius* L.) — облигатный хищник, питающийся рыбами с самого раннего возраста. Щука часто используется в качестве индикатора при мониторинге радиоактивного загрязнения пресных водоемов [8, 11, 14, 18, 36], однако на основе литературных данных не представляется возможным выявить преобладающий характер зависимости накопления ^{137}Cs в мышцах щук от их размера и возраста. Поэтому целью нашей работы стала оценка зависимости накопления ^{137}Cs в мышцах и телах щук, обитающих в р. Енисей, от их размерных характеристик, что необходимо для прогнозирования поведения радионуклида в экосистеме и оценки экологических рисков для населения. Также была предпринята попытка оценки интенсивности снижения содержания радиоцезия в щуках в период после остановки реакторного производства на ГХК.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

Щук отлавливали в р. Енисей в 2010–2016 гг. на расстоянии 10–20 км вниз по течению реки от сбросов ГХК, между селами Большой Балчуг и Кононово (рис. 1). Всего исследовано 47 экзем-

пляров щук, биологические параметры которых представлены в табл. 1. Сразу после отлова рыб замораживали и хранили при -30°C до начала обработки. Перед анализом рыб размораживали и определяли биологические параметры: полную длину тела (L , см); полную массу тела (W , г), пол по развитию гонад, возраст по чешуе и отолитам. Влажность мышц определяли после их высушивания при 105°C до постоянного веса и выражали в %. Данные приведены в табл. 2.

Для гамма-спектрометрии скелетные мышцы рыб собирали со всего тела, за исключением головы, и тщательно отделяли от костей. При совпадении возраста и близких показателей длины тел в одну пробу объединяли мышцы от нескольких экземпляров рыб обоих полов (табл. 1). Оставшиеся после отделения мышц части тел рыб объединяли в одну пробу и анализировали отдельно. Пробы сушили при 80°C , а затем озоляли в муфельной печи ПМ-1.0-20 (НПП «Теплоприбор», Россия) при 450°C . Всего было проанализировано 25 проб мышц, из которых 17 проб содержали мышцы от одной щуки, а восемь — мышцы от 2–4 щук с близкими размерно-весовыми параметрами (табл. 1). Также было проанализировано 25 аналогичных проб, содержащих части тел рыб, оставшиеся после отделения скелетных мышц. Содержание радионуклидов в телах рыб рассчитывали, суммируя абсолютные величины активности в пробе мышц и в пробе остальных органов и тканей рыб. Один экземпляр щуки, отловленный в апреле 2010 г., и пойманные в сентябре 2011 г. четыре щуки, объединенные в одну пробу, были озолены и измерены целиком. В итоге было получено 27 величин удельной активности радионуклидов в пробах тел щуки (табл. 1).

Содержание γ -излучающих радионуклидов в пробах измеряли на гамма-спектрометре со сверхчистым германиевым детектором GX2320 (Canberra, США). Спектры анализировали с помощью программного обеспечения Genie-2000 (Canberra, США). Прибор калибровали, используя образцовую меру активности, содержащую ^{60}Co , ^{109}Cd , ^{133}Ba , ^{137}Cs , ^{152}Eu , ^{241}Am (ЗАО РИТВЕРЦ, г. Санкт-Петербург, Россия) в соответствующих пробах геометриях. Учитывались только активности, превышающие предел обнаружения (минимальную детектируемую активность, полученную после вычитания фона). Значения активности скорректированы на дату отбора проб. Удельные активности радионуклидов в пробах рыб приведены в Бк/кг сырой массы. В качестве ошибок средних величин приведены стандартные отклонения (SD).

Для анализа содержания калия использовали щук, выловленных в 2014 г. (табл. 1). У каждой щуки брали высечку ткани из мышцы под спинным плавником, после удаления кожи. Пробы го-

Таблица 1. Параметры выборки шук р. Енисей, использованных для анализа

Год вылова	Месяц вылова	Число экз.	Длина полная (L), см	Масса полная (W), г	Число проб мышц/тел, в которых определено содержание ^{137}Cs
2010	апрель	1	257	110	–/1
	май	1	509	1054	1/1
	июнь	3	310–340	215–309	1/1
	июль	1	396	534	1/1
2011	апрель	1	332	395	1/1
	май	3	310–400	200–444	1/1
	сентябрь	4	326–360	228–311	–/1
2013	май	4	520–575	851–1244	1/1
2014	июль	1	465	694	1/1
	июль-август	15	240–429	90–591	5/5
	октябрь	2	495–532	807–1207	2/2
2015	октябрь	2	375–425	380–590	2/2
2016	май	8	335–590	256–1344	8/8
	октябрь	1	610	1651	1/1

Таблица 2. Содержание радиоцезия и калия в мышцах шук и в воде р. Енисей в 2014 г. и их коэффициенты накопления (K_H)

Элемент, изотоп	В мышцах щуки, мг/кг сырого веса для К и Бк/кг сырого веса для ^{137}Cs		В воде, мг/л для К и Бк/л для ^{137}Cs , среднее знач. $\pm SD$	K_H , л/кг	
	диапазон величин	среднее значение $\pm SD$		диапазон величин	среднее значение
К	3460–4270	3970 \pm 210	0.28 \pm 0.10	12360–15260	14180
^{137}Cs	0.46–7.02	2.21 \pm 2.14	$a < 0.002$	230–3510	1105
Влажность, %	78.4–83.2	80.7 \pm 1.5	–	–	–

^aДанные радиоэкологического центра ГХК для проб, отобранных в р. Енисей на 10 км ниже сброса радионуклидов [31].

товили, как описано ранее [37]. Суммарное содержание калия измеряли на пламенном фотометре FLAPHO-4 (CarlZeiss, Германия). Анализ выполнен аналитической лабораторией Института биофизики ФИЦ КНЦ СО РАН.

Для анализа содержания калия пробы воды отбирали в р. Енисей со стороны правого берега вблизи с. Атаманово в июне–октябре 2014 г. Подготовка и анализ проб описаны ранее [38]. Содержание металлов проанализировано в 14 пробах воды методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на приборе Agilent 7500a (США) в Институте химии и химической технологии ФИЦ КНЦ СО РАН. Концентрации ^{137}Cs в воде для расчета коэффициентов накопления (K_H) брали из ежегодных отчетов НПО “Тайфун” [27–33]. Коэффициенты накопления радиоцезия и калия щуками из воды рассчитывали как отношение содержания ^{137}Cs или К в мышцах (Бк/кг

или мг/кг сырого веса) к содержанию в воде (Бк/л или мг/л). Статистический анализ проводили с помощью программы Statistica 8.0. В силу отличия распределения данных от нормального, для анализа применяли непараметрические критерии: Спирмана (Spearman Rank Order Correlations) – для корреляционного анализа, Краскела–Уоллиса (Kruskal–Wallis ANOVA by Ranks, H) и медианный тест – для факторного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Содержание ^{137}Cs и ^{40}K в мышцах и телах шук

Содержание радиоцезия в мышцах и телах рыб изменялось в диапазоне 0.13–7.02 и 0.12–7.24 Бк/кг сырого веса соответственно и зависело от массы рыб (рис. 2, а, б). В выборках разных лет наиболее высокие величины удельной активности радиоцезия регистрировались в мышцах и телах шук

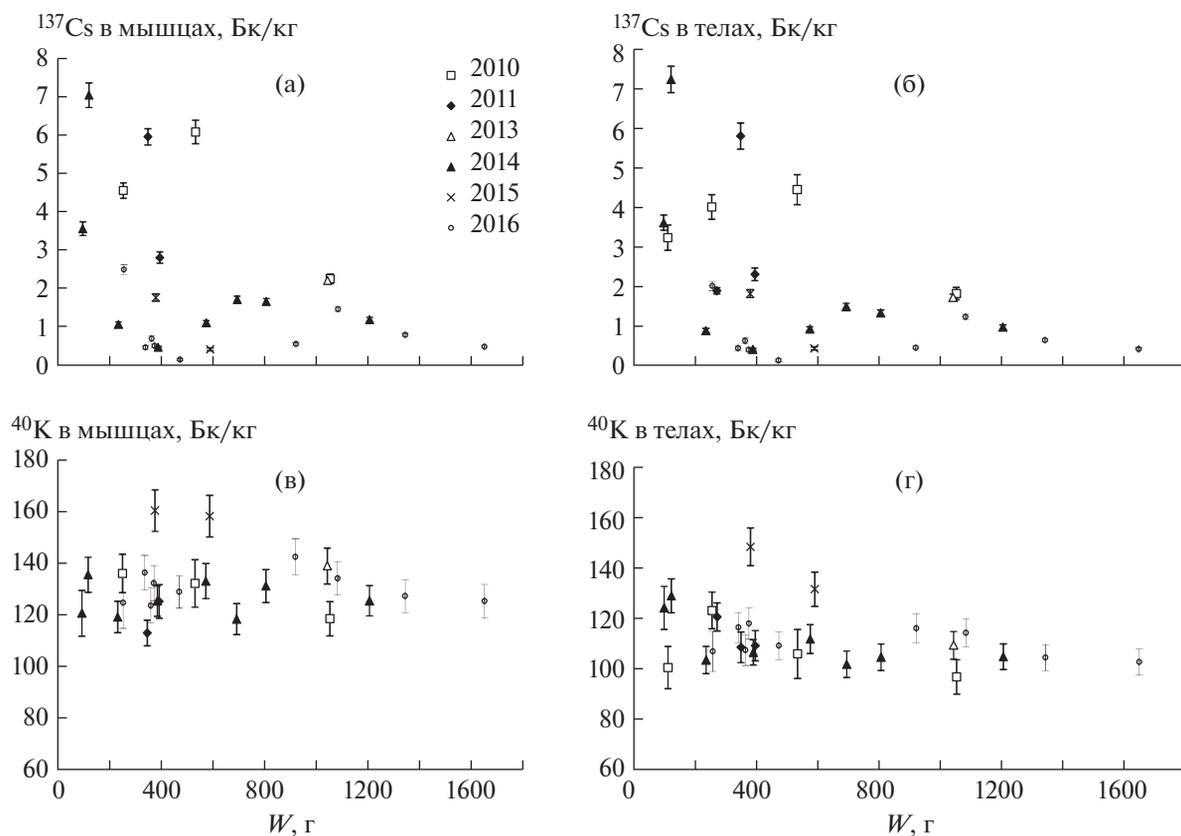


Рис. 2. Содержание ^{137}Cs и ^{40}K в мышцах (а, в) и телах (б, г) щук р. Енисей (Бк/кг сырого веса), отловленных в 2010–2016 гг., в зависимости от общей массы тела рыб (W , г).

разной массы, возраст которых не превышал 5 лет. Например, в выборке 2014 г. наиболее высокое содержание радиоцезия зарегистрировано в мышцах и телах щук массой до 200 г, в выборке 2016 г. – до 300 г, в выборке 2011 и 2015 гг. – до 400 г, а в выборке 2010 г. – до 530 г (рис. 2, а, б). Для дальнейшего статистического анализа пробы разных лет были объединены в одну выборку на том основании, что щук ловили после нереста (за исключением двух неполовозрелых особей, пойманных в конце апреля) в период их активного роста и нагула. Корреляционный анализ всего массива данных показал наличие статистически достоверной обратной зависимости содержания радиоцезия в телах щук от их общей массы (W) ($r = -0.42$, $p < 0.05$, $n = 27$) и общей длины тел (L) ($r = -0.49$, $p < 0.05$, $n = 27$). Аналогичных статистически значимых зависимостей для содержания радиоцезия в мышцах щук не выявлено. Содержание природного радиоизотопа ^{40}K в мышцах и телах щук изменялось незначительно и составляло в среднем 131 ± 11 ($n = 25$) и 112 ± 11 ($n = 27$) Бк/кг сырой массы соответственно. Зависимости содержания ^{40}K в мышцах и телах щук от длины и массы рыб не выявлено (рис. 2, в, г).

Эффективность накопления радиоцезия и калия щуками из воды

Согласно данным, полученным радиоэкологическим центром ГХК, содержание ^{137}Cs в воде р. Енисей на расстоянии 10 км от сбросов по течению реки от ГХК в период наших исследований не превышало 2 мБк/л [27–33]. Согласно нашим измерениям, содержание ^{137}Cs в воде р. Енисей в летне-осенний период 2009–2012 гг. на расстоянии около 5 км от сбросов ГХК составляло в среднем 1.5 ± 0.4 мБк/л [39]. Поскольку данные величины принципиально не различаются, для расчета K_H радиоцезия щуками из воды мы использовали величину 2 мБк/л. Расчет коэффициентов накопления радиоцезия и калия в мышцах щук из воды (K_H) был сделан для проб, отобранных в 2014 г., поскольку только в пробах этого года измеряли содержание калия в мышцах. Расчеты показали, что калий наиболее эффективно накапливается в мышцах щук (табл. 2). Максимальные величины K_H радиоцезия в мышцах щук из воды сопоставимы по порядку величин с эффективностью накопления калия, а средние величины K_H радиоцезия в мышцах на порядок ниже K_H калия (табл. 2).

*Динамика содержания радиоцезия
в мышцах и телах щук*

Факторный анализ динамики содержания радиоцезия в мышцах и телах щук в период наших исследований, с 2010 по 2016 г., с использованием всего массива данных ($n = 25$ и $n = 27$ для мышц и тел соответственно) (рис. 3), показал статистически значимое снижение содержания радиоцезия в мышцах ($H(df = 5, N = 25) = 11.88, p = 0.04$) и телах ($H(df = 5, N = 27) = 13.26, p = 0.02$) со временем. Аналогичный результат был получен для тех же выборок с помощью медианного теста.

ОБСУЖДЕНИЕ

Размерный эффект у пресноводных рыб

Размерные зависимости накопления радиоцезия пресноводными рыбами изучались в водоемах разных континентов. После аварии на Чернобыльской АЭС (ЧАЭС) зависимость накопления радиоцезия в мышцах рыб от их массы получила название “размерный эффект” [17]. Случаи положительного “размерного эффекта” описаны для рыб из водоемов, загрязненных радионуклидами в результате аварии на Чернобыльской АЭС, на территории Украины, Норвегии, Финляндии, России [8, 12, 14, 17, 19, 22]. Также положительная размерная и/или возрастная зависимость накопления радиоцезия зафиксирована у рыб в р. Оттава и Большом Невольничьем озере (Great Slave Lake) в Канаде, в заброшенном водоеме-охладителе в США, в озере вблизи Фукусимы (Япония) [5, 20, 23]. Положительный размерный эффект объясняют снижением скорости выведения радиоцезия у рыб с возрастом либо сменой рациона питания. Многие авторы зарегистрировали смену знака зависимости содержания радиоцезия в мышцах от размерных характеристик рыб в одном и том же водоеме в разные годы, а также чередование присутствия и отсутствия статистически значимой зависимости в разные годы [5, 8, 14, 18, 19, 22].

Полученная нами обратная размерная зависимость содержания радиоцезия в щуках р. Енисей не имеет строгого линейного характера. Размерные характеристики щук, в телах и мышцах которых регистрировались наиболее высокие величины содержания радиоцезия, варьировали в достаточно широком диапазоне в выборках разных лет (от 90 до 530 г и от 26.5 до 39.6 см соответственно), что, возможно, является следствием индивидуальных различий, свойственных ихтиофауне (полиморфизма). Содержание радиоцезия в мышцах и телах молодых щук с небольшой массой тела, полученные при усреднении высоких величин в каждой из выборок ($4.3 \pm 1.9, n = 8$; и 3.8 ± 1.8 Бк/кг, $n = 9$ сырого веса соответственно), были в 4.2 раза выше ($p < 0.05$), чем у более крупных щук ($1.0 \pm$

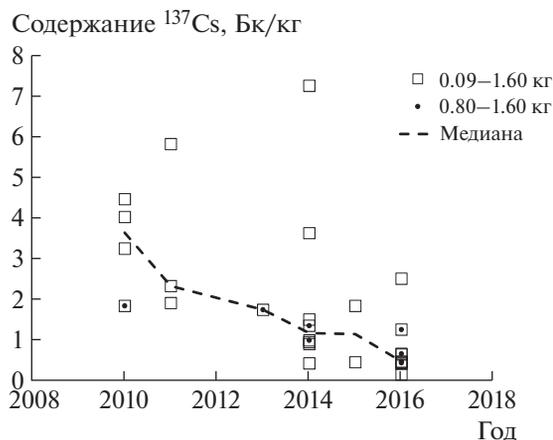


Рис. 3. Содержание радиоцезия в телах щук р. Енисей в 2010–2016 гг. Квадратными маркерами обозначены данные для проб щук с массой тел 0.09–1.6 кг ($n = 27$), черными точками – для проб щук с массой тел 0.8–1.6 кг ($n = 8$).

$\pm 0.6, n = 17$; и 0.9 ± 0.6 Бк/кг, $n = 18$ соответственно). Полученные данные следует учитывать при планировании радиоэкологического мониторинга р. Енисей, в частности, представляется целесообразным использование объединенных проб щук с разными размерными характеристиками, что практикуют некоторые авторы [36].

В литературе встречаются немногочисленные данные о существовании отрицательного “размерного эффекта” у рыб в отношении радиоцезия и тяжелых металлов. Снижение содержания радиоцезия в мышцах щук и двух других видов рыб, при увеличении их размера и возраста, регистрировалось в шведских озерах в первые 2 года после аварии на ЧАЭС [14], а также в водоемах на территории Украины [24]. В норвежском озере Øvre Heimdalsvatn в отдельные годы регистрировался обратный размерный эффект у озерной форели [22]. Обнаружено снижение содержания радиоцезия в мышцах щук и лещей с возрастом в р. Тобол (Россия), загрязненной радионуклидами в результате работы ПО “Маяк” [11]. Исследование москитных рыбок, обитающих в бывшем пруду-охладителе атомной станции в США, показало обратную зависимость содержания ^{137}Cs в телах самок в одной из трех точек отбора [16]. Авторы работы сделали заключение, что размерная зависимость накопления радиоцезия рыбами может изменяться непредсказуемым образом в зависимости от половых и размерных характеристик данного вида, а также в рамках микрогеографической шкалы [16]. В лабораторных экспериментах было показано повышенное накопление ^{137}Cs из воды мелкими особями рыбы-ползуна по сравнению с более крупными [1]. В некоторых природных водоемах зарегистрировано снижение содер-

жения металлов в мышцах рыб с возрастом и/или размером. Например, у омуля из оз. Байкал и у лещей из оз. Балатон с возрастом и размером снижалось содержание цинка, меди и свинца [40, 41]. Исследователи объясняют обратную зависимость содержания радиоцезия и тяжелых металлов в мышцах рыб от их размера и возраста либо смещенной спектра питания, либо повышенной интенсивностью питания активно растущих молодых особей, по сравнению с более взрослыми, в результате чего в организмы молодых рыб поступает больше радиоцезия и тяжелых металлов из пищи. Вторая причина более характерна для облигатных ихтиофагов, к которым относится щука.

У молодых енисейских щук наблюдался значительный разброс величин концентраций радиоцезия в мышцах, что, возможно, свидетельствует об индивидуальных различиях в рационе питания щук на данном участке р. Енисей. В желудках исследованных нами щук были обнаружены останки трех видов рыб: ельцов (*Leuciscus leuciscus baicalensis*, Dyb.), подкаменщиков (*Gottus sibiricus*, Warpachowski, 1889) и голец (*Barbatula toni*, Dyb., 1869), следовательно, можно предположить, что эти виды являются наиболее частой добычей щук. На сегодняшний день мы не располагаем достаточным количеством данных, чтобы судить о возможных пищевых предпочтениях исследованных нами щук в зависимости от их размера и возраста.

Динамика содержания радиоцезия в щуках р. Енисей

Анализ многолетней динамики сброса радиоцезия в р. Енисей показал, что в последние 10 лет работы реакторного производства на ГХК (с 2000 по 2010 г.), а также в период наших исследований (в 2010–2016 гг.) поток радиоцезия в р. Енисей со сбросами ГХК изменялся в пределах одного порядка величин: в диапазоне $(7.2–50.8) \times 10^9$ Бк/год с 2000 по 2009 г. с максимумом в 2007 г., и в диапазоне $(4.4–25.6) \times 10^9$ Бк/год с 2010 по 2016 г. с максимумом сброса в 2011 г. [26–33, 42–48]. Для сравнения, в 1990 г., когда еще работали все реакторы на ГХК, годовой сброс радиоцезия в р. Енисей составлял 560×10^9 Бк [26]. Содержание радиоцезия в воде р. Енисей на участке отлова щук в период наших исследований, <2 мБк/л, было значительно ниже, чем в 1991 г. (70 мБк/л) [49]. Следует отметить, что в период работы реакторного производства [50] и в настоящее время содержание радиоцезия в мышцах щук р. Енисей было значительно ниже нормативов, установленных в Российской Федерации (130 Бк/кг, СанПиН 2.3.2.1078-01). Отсутствие значительного снижения ежегодных сбросов радиоцезия в р. Енисей после остановки реакторного производства на ГХК [27–33] не позволяет ожидать существенно-

го снижения содержания радиоцезия в тканях рыб в ближайшие годы. Нам не удалось найти опубликованных данных по содержанию радиоцезия в щуках, обитавших вблизи сбросов ГХК в период работы реакторного производства, чтобы оценить многолетнюю динамику содержания радиоцезия. Анализ динамики содержания радиоцезия в телах щук р. Енисей, полученной на основе наших данных, показал статистически значимое снижение содержания радионуклида в мышцах и телах щук в период с 2010 по 2016 г. (рис. 3). Это может свидетельствовать о снижении количества биодоступного радиоцезия в экосистеме со временем. Поскольку содержание радиоцезия в мышцах и телах щук зависит от размера рыб, для оценки скорости снижения необходимо использовать рыб близкого размера. Объем наших данных этого сделать не позволяет, поэтому для приближенной оценки скорости снижения радиоцезия мы использовали щук массой 800–1600 г, возрастом 7–10 лет, содержание радиоцезия в которых не зависело от массы тел (рис. 3). С помощью полученного уравнения регрессии ($y = 407.1 - 0.2 \cdot x$; $n = 8$; $r = -0.75$; $p = 0.03$; $r^2 = 0.57$, где y – удельная активность радиоцезия в телах щук, Бк/кг сырого веса, x – время, годы) можно приблизительно оценить скорость снижения содержания радиоцезия в телах щук р. Енисей данного размерного диапазона за исследованный период времени.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ накопления радиоцезия в щуках, отловленных в р. Енисей вблизи радиоактивных сбросов ГХК в 2010–2016 гг., показал, что содержание ^{137}Cs в мышцах и телах рыб снижается с их размером. Наиболее высокие величины удельной активности радиоцезия зарегистрированы в мышцах и телах рыб массой до 530 г и возрастом до 5 лет. Традиционно подобное явление у облигатных ихтиофагов, к числу которых относится щука, объясняется более интенсивным питанием молодых, активно растущих особей, по сравнению с более зрелыми. Однако нельзя также исключить гипотезу о смене пищевых предпочтений щук на разных этапах онтогенеза, поскольку в желудках щук были обнаружены виды рыб, занимающие разные экологические ниши, которые могут отличаться по содержанию радиоцезия. Полученную размерно-возрастную зависимость, вероятно, следует учитывать при планировании мониторинга, оценке скорости биологического выведения радиоцезия из тел щук, а также при моделировании биокинетики радиоцезия в р. Енисей.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарят Р.В. Борисова и К.Н. Стоянова за помощь в подготовке проб.

Работа поддержана грантом РФФИ-КФН № 18-44-240003 и гос. заданием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Malek M.A. Uptake and elimination of ^{137}Cs by climbing perch (*Anabus testudineus*) // Health Phys. 1999. V. 77. P. 719–723.
2. Zhao X., Wang W.-X., Yu K.N., Lam P.K.S. Biomagnification of radiocesium in a marine piscivorous fish // Mar. Ecol. Prog. Ser. 2001. V. 222. P. 227–237.
3. Mathews T., Fisher N.S. Trophic transfer of seven trace metals in four-step marine food chain // Mar. Ecol. Prog. Ser. 2008. V. 367. P. 23–33.
4. Pinder J.E. III, Hinton T.G., Taylor B.E., Whicker F.W. Cesium accumulation by aquatic organisms at different trophic levels following an experimental release into a small reservoir // J. Environ. Radioactiv. 2011. V. 102. P. 283–293.
5. Rowan D.J., Chant L.A., Rasmussen J.B. The fate of radiocesium in freshwater communities – why is biomagnification variable both within and between species? // J. Environ. Radioactiv. 1998. V. 40. № 1. P. 15–36.
6. Rowan D.J., Rasmussen J.B. Bioaccumulation of radiocesium by fish: the influence of physicochemical factors and trophic structure // Can. J. Fish. Aquat. Sci. 1994. V. 51. P. 2388–2410.
7. Koulikov A.O. Physiological and ecological factors influencing the radiocesium contamination of fish species from Kiev reservoir // Sci. Total Environ. 1996. V. 177. № 1. P. 125–135.
8. Рябов И.Н. Радиоэкология рыб водоемов в зоне влияния аварии на Чернобыльской АЭС. М.: Тов-во научных изданий КМК, 2004. 215 с.
9. Гудков Д.И., Каглян А.Е., Назаров А.Б. и др. Динамика содержания и распределение основных дозообразующих радионуклидов у рыб зоны отчуждения Чернобыльской АЭС // Гидробиол. журн. 2008. Т. 44. № 3. С. 95–113.
10. Зарубин О.Л., Малюк И.А., Костюк В.А. Особенности содержания ^{137}Cs у различных видов рыб Каневского водохранилища на современном этапе // Гидробиол. журн. 2009. Т. 45. № 5. С. 110–116.
11. Полякова Н.И., Пельгунова Л.А., Рябцев И.А., Рябов И.Н. Динамика накопления ^{137}Cs и ^{40}K в тканях промысловых видов рыб рек Тобол и Иртыш в 1995–2007 гг. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2009. Т. 49. № 6. С. 721–728.
12. Каглян А.Е., Гудков Д.И., Кленус В.Г. и др. Радионуклиды в аборигенных видах рыб Чернобыльской зоны отчуждения // Ядерная физика та енергетика. 2012. Т. 13. № 3. С. 306–314.
13. Трофимова Е.А., Зотина Т.А., Дементьев Д.В., Болсуновский А.Я. Накопление техногенных радионуклидов хищными и мирными рыбами р. Енисей // Вопр. радиац. безопасности. 2014. № 4. С. 55–61.
14. Sundbom M., Meili M., Andersson E. et al. Long-term dynamics of Chernobyl ^{137}Cs in freshwater fish: quantifying the effect of body size and trophic level // J. Appl. Ecol. 2003. V. 40. P. 228–240.
15. Smith J.T., Kudelsky A.V., Ryabov I.N. et al. Uptake and elimination of radiocesium in fish and the “size effect” // J. Environ. Radioactiv. 2002. V. 62. P. 145–164.
16. Newman M.C., Brisbin I.L. Jr. Variation of ^{137}Cs levels between sexes, body sizes and collection localities of mosquitofish, *Gambusia holbrooki* (Girard 1859), inhabiting a reactor cooling reservoir // J. Environ. Radioactiv. 1990. V. 12. № 2. P. 131–141.
17. Koulikov A.O., Ryabov I.N. Specific cesium activity in freshwater fish and the size effect // Sci. Total Environ. 1992. V. 112. № 1. P. 125–142.
18. Särkkä J., Jämsä A., Luukko A. Chernobyl-derived radiocesium in fish as dependent on water quality and lake morphometry // J. Fish Biol. 1995. V. 46. P. 227–240.
19. Jagoe C.H., Chesser R.K., Smith M.H. et al. Levels of cesium, mercury and lead in fish, and cesium in pond sediments in an inhabited region of the Ukraine near Chernobyl // Environ. Pollut. 1997. V. 98. № 2. P. 223–232.
20. McCreeedy C.D., Jagoe C.H., Glickman L.T., Brisbin I.L. Bioaccumulation of cesium-137 in yellow bullhead catfish (*Ameiurus natalis*) inhabiting an abandoned nuclear reactor reservoir // Environ. Toxicol. Chem. 1997. V. 16. P. 328–335.
21. Зарубин О.Л. Содержание ^{137}Cs в мышцах голавля (*Leuciscus cephalus* L.) в зависимости от массы особи // Ядерная физика та енергетика. 2009. Т. 10. № 2. С. 201–204.
22. Brittain J.E., Gjerset J.E. Long-term trends and variation in ^{137}Cs activity concentrations in brown trout (*Salmo trutta*) from Øvre Heimdalsvatn, a Norwegian subalpine lake // Hydrobiologia. 2010. V. 642. P. 107–113.
23. Takagi K., Yamamoto S., Matsuda K. et al. Radiocesium concentrations and body size of freshwater fish in Lake Hayama. 1 Year After the Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Plant Accident // Impacts of the Fukushima Nuclear Accident on Fish and Fishing Grounds / Eds K. Nakata, H. Sugisaki. Japan: Springer, 2015. P. 201–209.
24. Крышев А.И., Рябов И.Н. Моделирование различных типов размерного эффекта накопления ^{137}Cs рыбой водоема-охладителя Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2000. Т. 40. № 1. С. 108–112.
25. Крышев А.И. Evaluation of the biological transfer of ^{32}P , ^{137}Cs and ^{65}Zn by fish in the Yenisei River // Sci. Total Environ. 2004. V. 322. № 1–3. P. 191–207.
26. Носов А.В., Крылов А.Л., Киселев В.П., Казаков С.В. Моделирование миграции радионуклидов в поверхностных водах. М.: Наука, 2010. 253 с.
27. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2010 году. Ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. Обнинск: ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2011. 282 с.
28. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2011 году. Ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. Обнинск: ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2012. 298 с.
29. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2012 году. Ежегодник / Под ред. В.М. Шершакова, В.Г. Булгакова, И.И. Крышева и др. Обнинск: ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2013. 345 с.
30. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2013 году. Ежегодник / Под ред. В.М. Шершакова, В.Г. Булгакова, И.И. Крышева и др. Обнинск: ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2014. 358 с.
31. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2014 году. Ежегодник / Под ред. В.М. Шершакова, В.Г. Булгакова, И.И. Крышева и др. Обнинск: ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2015. 350 с.

32. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2015 году. Ежегодник / Под ред. В.М. Шершакова, В.Г. Булгакова, И.И. Крышева и др. Обнинск: ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2016. 346 с.
33. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2016 году. Ежегодник / Под ред. В.М. Шершакова, В.Г. Булгакова, И.И. Крышева и др. Обнинск: ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2017. 397 с.
34. Сухоруков Ф.В., Дегерменджи А.Г., Болсуновский А.Я. и др. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей. Новосибирск: Изд-во СОРАН, филиал “Гео”, 2004. 286 с.
35. *Bolsunovsky A., Bondareva L.* Actinides and other radionuclides in sediments and submerged plants of the Yenisei River // *J. Alloy. Compd.* 2007. V. 444–445. P. 495–499.
36. *Saxén R., Ilus E.* Transfer and behaviour of ^{137}Cs in two Finnish lakes and their catchments // *Sci. Total Environ.* 2008. V. 394. P. 349–360.
37. Зотина Т.А., Трофимова Е.А., Карнов А.Д., Болсуновский А.Я. Накопление радионуклидов в трофических сетях р. Енисей после остановки реакторного производства на Горно-химическом комбинате // *Радиационная биология. Радиоэкология.* 2014. Т. 54. № 4. С. 405–414.
38. Деметьев Д.В., Болсуновский А.Я., Борисов Р.В., Александрова Ю.В. Содержание металлов в воде р. Енисей на участке от г. Красноярска до устья р. Ангара в 2010–2015 гг. // *Изв. Томского политехн. ун-та. Инжиниринг георесурсов.* 2017. Т. 328. № 3. С. 54–63.
39. Зотина Т.А., Трофимова Е.А., Паньков Е.В. и др. Содержание техногенных радионуклидов в промысловых рыбах р. Енисей в период работы реакторного производства на Горно-химическом комбинате и после его остановки // *Вопр. радиац. безопасности.* 2016. № 2 (82). С. 28–35.
40. Погодаева Т.В., Смирнов В.В., Смирнова-Залузи Н.С., Титова Е.Ю. Тяжелые металлы (Zn, Fe, Cu, Mn, Pb) в тканях и органах байкальского омуля // *Сиб. экол. журн.* 1998. Т. 5. № 5. С. 477–483.
41. *Farkas A., Salánki J., Specziár A.* Age- and size-specific patterns of heavy metals in the organs of freshwater fish *Abramis brama* L. populating a low-contaminated site // *Water Res.* 2003. V. 37. P. 959–964.
42. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2003 году. Ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. СПб.: Гидрометеоздат, 2004. 274 с.
43. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2004 году. Ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: АНО “Метео-агентство Росгидромета”, 2005. 288 с.
44. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2005 году. Ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. М.: АНО “Метео-агентство Росгидромета”, 2006. 274 с.
45. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2006 году. Ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. Нижний Новгород: ООО “Вектор–Тис”, 2007. 280 с.
46. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2007 году. Ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. Обнинск: ГУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2008. 286 с.
47. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2008 году. Ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. Обнинск: ГУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2009. 299 с.
48. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2009 году. Ежегодник / Под ред. С.М. Вакуловского. Обнинск: ФГБУ “ВНИИГМИ-МЦД”, 2010. 316 с.
49. *Vakulovsky S.M., Kryshev I.I., Nikitin A.I. et al.* Radioactive contamination of the Yenisei River // *J. Environ. Radioactiv.* 1995. V. 29. № 3. P. 225–236.
50. *Носов А.В., Ашанин М.В., Иванов А.Б., Мартынова А.М.* Радиоактивное загрязнение р. Енисей, обусловленное сбросами Красноярского Горно-химического комбината // *Атомная энергия.* 1993. Т. 74. № 2. С. 144–150.

Size Dependent Accumulation of Radiocesium (^{137}Cs) in Muscles and Bodies of Northern Pike (*Esox lucius*) in the Yenisei River

T.A. Zotina^{a,b,#}, E.A. Trofimova^a, and D.V. Dementyev^a

^a*Institute of Biophysics, Federal Research Centre Krasnoyarsk Scientific Centre, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, Russia*

^b*Siberian Federal University, Institute of Fundamental Biology and Biotechnology, Krasnoyarsk, Russia*

[#]*E-mail: t_zotina@ibp.ru*

Size dependent concentration of radiocesium (^{137}Cs) and ^{40}K in muscles and bodies of the Northern pike (*Esox lucius*) inhabiting radioactively contaminated part of the Yenisei River was investigated in 2010–2016. Concentrations of radionuclides in fish samples were measured with a gamma-spectrometer with Ge-detector, concentrations of potassium – with a flame photometer. Forty seven fish with the fresh weight (W) ranging from 90 to 1651 g were analyzed. Activity concentrations of radiocesium in muscles and bodies of the pike were 0.13–7.02 and 0.12–7.24 Bq/kg w.w., respectively, and inversely depended on the fish size. Highest activity concentrations of radiocesium were registered in muscles and bodies of the fish with the body weight up to 530 g and age up to 5 y. Correlation analyses revealed a significant negative dependence of the radiocesium content in bodies of the pike with the total weight (W) and the length of the fish (L). A higher concentration of radiocesium can be explained by more intensive feeding of young fish than that of old ones. A significant decrease of the radiocesium content in muscles and bodies of the pike with time was revealed.

Keywords: Northern pike, technogenic radionuclides, negative size effect, concentration factor