

НАКОПЛЕНИЕ РАДИОНУКЛИДОВ В ОЗЕРНОЙ ЛЯГУШКЕ *Pelophylax ridibundus* В ЗОНЕ АТОМНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

© 2020 г. Д. Л. Берзин^{a, b}, М. Я. Чеботина^{a, *}, В. П. Гусева^a

^aИнститут экологии растений и животных, Уральское отделение Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

^bУральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

*e-mail: Chebotina@ipae.uran.ru

Поступила в редакцию 21.01.2020 г.

После доработки 14.02.2020 г.

Принята к публикации 22.04.2020 г.

Проведено исследование накопления антропогенных радионуклидов ^{90}Sr и $^{134,137}\text{Cs}$ в озерной лягушке (*Pelophylax ridibundus* Pall., 1771) на разных стадиях онтогенеза в Белоярском водохранилище (водоеме-охладителе Белоярской АЭС) и Верхнетагильском водохранилище (контрольном водоеме). Отмечена вариабельность размерно-массовых показателей и концентраций радионуклидов во взрослых амфибиях этих водоемов. Выявлено аномально высокое загрязнение ^{134}Cs и ^{137}Cs одной лягушки из промливневого канала Белоярского водохранилища, что могло быть следствием контакта животного с радиоактивной средой в зоне размещения атомного предприятия. Установлено, что в настоящее время в некоторых точках наблюдения Белоярского водохранилища уровни накопления ^{90}Sr и ^{137}Cs достоверно выше, чем в контрольном водоеме, однако, концентрация радионуклидов в лягушках значительно ниже допустимого уровня для земноводных.

Ключевые слова: озерная лягушка, Белоярское водохранилище, Верхнетагильское водохранилище, концентрация, ^{90}Sr и ^{137}Cs , гидробионты

DOI: 10.31857/S0320965220060042

ВВЕДЕНИЕ

Интерес к озерной лягушке (*Pelophylax ridibundus* Pall., 1771) как объекту радиоэкологического исследования вызван широким распространением этого вида амфибий в различных географических зонах Земного шара, их высокой мобильностью в воде и на суше и устойчивостью к загрязнению среды обитания. Распространение озерной лягушки стало возможным благодаря производственной деятельности человека и связанными с ней повсеместными термальными аномалиями антропогенного происхождения. На Урале озерная лягушка появилась в 70-е гг. прошлого столетия (Вершинин, 2007а). В настоящее время лягушек активно культивируют в искусственных и природных водоемах для производства пищевой продукции в ряде стран мира (Китай, Вьетнам, Франция, Бельгия, Португалия, Италия, Испания, Голландия и др.), вылов животных достигает 1 тыс. тонн в год (Mirzaj, 2003; Динь, 2015).

Радиоэкологические исследования лягушек ограничиваются незначительным количеством работ. В мировой литературе имеются данные о

накоплении радионуклидов в аварийных зонах предприятий атомной промышленности (Stark et al., 2004; Stark, 2006; Matsushima et al., 2015; Лунева, 2018; Beresford et al., 2020). Однако в Уральском регионе, где функционирует много ядерных объектов (Белоярская АЭС, ядерные реакторы в научных и медицинских учреждениях, центры по переработке радиоактивных материалов и по захоронению радиоактивных отходов), проводились технологические ядерные взрывы и произошла тяжелейшая радиационная катастрофа на ПО “Маяк” (Уткин и др., 2004), радиоэкологические исследования лягушек отсутствуют.

Цель работы – исследование уровней накопления долгоживущих радионуклидов ^{90}Sr и $^{134,137}\text{Cs}$ в озерной лягушке, обитающей на Урале в Белоярском водохранилище – водоеме-охладителе БАЭС.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали озерных лягушек разных возрастных групп – взрослых особей, сеголетков, личинок. Кроме амфибий накопление радионуклидов оценивали в воде, водных растениях и грунте из Белоярского водохранилища. Водоем

Сокращения: БАЭС – Белоярская АЭС; ПЛК – промливневый канал.

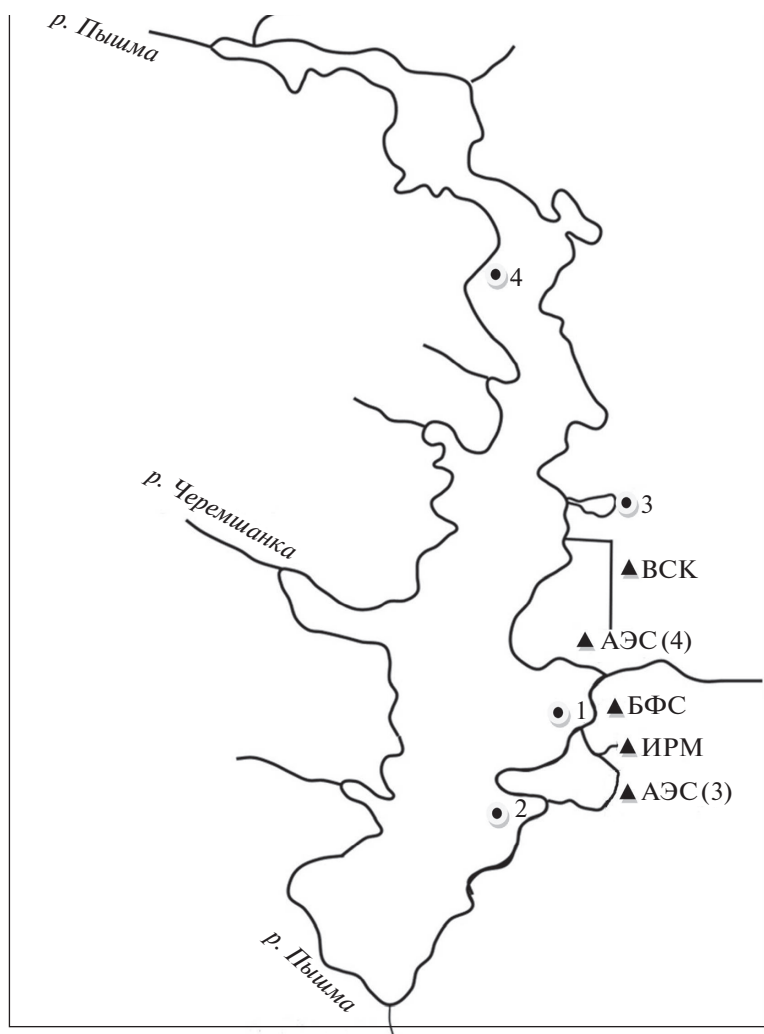


Рис. 1. Карта-схема Белоярского водохранилища. АЭС (3) и АЭС (4) – третий и четвертый энергоблоки Белоярской АЭС; ВСК – водосбросной канал с четвертого энергоблока АЭС; ИРМ – Институт реакторных материалов; БФС – Биофизическая станция Института экологии растений и животных – водосбросной канал с четвертого энергоблока АЭС УрО РАН. Точки отбора проб: 1 – промливневый канал, 2 – зона сброса подогретых вод (теплый залив), 3 – водоем за четвертым энергоблоком соединен с Белоярским водохранилищем неглубокой заросшей протокой, 4 – район на значительном удалении от АЭС, база отдыха “Кедровая роща”.

расположен на Среднем Урале в 50 км от г. Екатеринбурга, образован в 1959–1963 гг. путем регулирования русла р. Пышмы в 75 км от ее истока. Эколого-географическая и гидрохимическая характеристики Белоярского водохранилища приведены в работе Трапезникова и др. (2008). В настоящее время на БАЭС работают два энергоблока – третий (с 1980 г.) и четвертый (пущен в 2014 г.). В период работы первых трех энергоблоков основным путем поступления радионуклидов в Белоярское водохранилище служил ПЛК, куда сбрасывались дебалансные воды станции (воды, прошедшие спецводоочистку, воды спецпрачечных, душевых, талые и ливневые воды с территории станции), а также стоки с соседнего предприятия – Института реакторных материалов (ИРМ), где

работает экспериментальный реактор (рис. 1). Промливневый канал имеет глубину ≤ 1 м и не замерзает в зимнее время. Из растений в канале преобладают рдест гребенчатый и кладофора, реже встречаются ряска, рдест курчавый и элодея. Планктон представлен 30 видами фито- и 10 видами зоопланктона (данные авторов). В канале много мальков рыб, кроме того присутствуют карась, лещ, чебак и окунь. Обращает на себя внимание обилие в нем озерной лягушки, особенно в период размножения.

Отбор проб в Белоярском водохранилище проводили в четырех точках наблюдений (рис. 1): ПЛК (т. 1), зоне сброса подогретых вод (т. 2), в небольшом водоеме (соединен с Белоярским водохранилищем неглубокой протокой, заросшей

водными растениями) в лесном массиве за четвертым энергоблоком (т. 3) и в районе базы отдыха “Кедровая роща” на правом берегу водохранилища на значительном удалении от АЭС (т. 4).

Для сравнительной оценки накопления радионуклидов озерной лягушкой было выбрано Верхнетагильское водохранилище – водоем-охладитель Верхнетагильской ГРЭС, расположенный в Свердловской обл. и не подверженный влиянию слаборадиоактивных сбросов. Водоем проточный, образован в 1960 г. Относится к малым мелководным водохранилищам с сильным прогревом воды. Озерная лягушка впервые обнаружена в Верхнетагильском водохранилище в 1970 г. Место отлова животных располагалось около Верхнетагильской ГРЭС вне зоны сброса подогретой воды на расстоянии 90–100 км от БАЭС.

Различные этапы работы проводили с 2015 г. по 2018 г. Лягушек ловили при помощи удочки на червя, а сеголетков и головастиков лягушки и мальков рыб – водным сачком, после чего их усыпляли эфиром. В лаборатории лягушек взвешивали, определяли длину тела, пол и в некоторых пробах возраст. Для определения возраста использовали срезы второй фаланги четвертого пальца правой задней конечности амфибии, толщина среза – 15–18 мкм. После декальцинации пальцев в 5%-ном растворе HNO₃ в течение 5 ч готовили срезы на замораживающем микротоме, окрашивали их гематоксилином в течение 3 мин и помещали в глицерин для сохранения материала. В процессе обработки данных определяли наружный диаметр среза и средние диаметры всех линий останковки роста, т.е. линий, образованных во время зимовки. Таким образом, возраст определяли по количеству пережитых зимовок (Клейнберг, Смирин, 1969; Смирин, 1972; Castanet, Smirina, 1990).

За период исследований в указанных местах обитания, включая Верхнетагильское водохранилище, отловлена 151 особь взрослых лягушек, из них 45 ♀ и 106 ♂. Сеголетков лягушек поймано 4 особи (общая масса 25 г), головастиков – 95 особей (130 г), мальков рыб – 530 (375 г). У выловленных из ПЛК 11 ♀ и 32 ♂ лягушек был определен возраст: одного года – 12 особей, двух лет – 14, трех – 14, четырех – 1, пяти лет – 2 особи.

Растения и рыбу отбирали в трех повторностях по 2–3 кг в каждой. Планктон собирали из слоя 0–1 м от поверхности воды при помощи сачков, изготовленных из мельничного газа с размером пор 67 мкм. Грунт отбирали пробоотборником на глубине 0–5 см. Пробы воды (по 70 л в повторности) подкисляли, в лабораторных условиях фильтровали и выпаривали до сухого остатка.

Животных после высушивания и озоления при температуре 500°C исследовали на содержание в них радионуклидов. Концентрацию ⁹⁰Sr в пробах

зола определяли радиохимическим методом (Трапезников и др., 2008). Радиометрию полученных осадков проводили на малофоновой установке УМФ-2000 (Россия) в трех повторностях при статистической ошибке счета 10–15%. Концентрацию ¹³⁴, ¹³⁷Cs определяли с помощью многоканальных γ-анализаторов фирмы “Canberra-Packard” и “ORTEC” (США) при ошибке измерений 10–20%. В процессе анализа проб ¹³⁴Cs обнаружен в значительных количествах только в одной лягушке из ПЛК, в остальных пробах радионуклид присутствовал в микроконцентрациях ниже уровня достоверности определений. При проведении радиометрии на ⁹⁰Sr каждую особь лягушки анализировали отдельно, на ¹³⁴, ¹³⁷Cs – лягушек из 3–4 проб объединяли по половому признаку для повышения точности определений.

Полученные результаты обрабатывали с помощью корреляционного и однофакторного дисперсионного анализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В табл. 1 приведены данные по размерам и массе тела озерной лягушки из различных точек наблюдений. В период исследований лягушки из водоема за четвертым энергоблоком имели большие средние размеры (на 20%) и массу тела (на 47%), чем обитающие в ПЛК и теплом заливе Белоярского водохранилища, а также в Верхнетагильском водохранилище. Возможно, это связано с благоприятными условиями жизни лягушек в водоеме, расположенном в лесном массиве, – отсутствием быстрого течения воды и штормовых волн, хорошим прогревом воды при небольшой глубине водоема, обильной пищевой базой и др. В районе базы отдыха “Кедровая роща” удалось отловить лишь одну лягушку, она имела относительно большую длину и массу тела. В дальнейшем из-за отсутствия статистически значимой выборки эту точку отбора не рассматривали.

Содержание радионуклидов ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в лягушках большинства местобитаний отличалось значительной вариабельностью, о чем свидетельствуют приведенные в табл. 1 коэффициенты вариации (C_v). Отмечены пониженные концентрации ¹³⁷Cs в лягушках зоны сброса подогретой воды Белоярского водохранилища, которые достоверно отличаются от таковых других местобитаний, включая Верхнетагильское водохранилище (*p* < 0.0001).

Кроме приведенных в табл. 1 данных в ПЛК обнаружена одна лягушка с высоким содержанием ¹³⁷Cs (45 000 Бк/кг) и ¹³⁴Cs (441 Бк/кг).

Сравнительный анализ концентраций ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs в озерной лягушке и других группах гидробионтов в ПЛК (табл. 2) показал, что оба радионуклида

Таблица 1. Размерно-массовая характеристика озерной лягушки и содержание в ней ^{90}Sr и ^{137}Cs в Белоярском и Верхнетагильском водохранилищах

Место отбора проб	Число особей	Длина тела, мм	Масса тела, г	Содержание радионуклидов, Бк/кг сухой массы	
				^{90}Sr	^{137}Cs
Белоярское вдхр.					
ПЛК	43	$\frac{79.4 \pm 1.3}{57.0-93.5(11)}$	$\frac{56.6 \pm 2.7}{21.5-105.5(34)}$	$\frac{9.7 \pm 0.9}{1.4-24.9(57)}$	$\frac{18.1 \pm 1.7}{8.0-26.2(31)}$
Теплый залив	50	$\frac{75.2 \pm 1.2}{48.2-86.4(11)}$	$\frac{50.9 \pm 1.7}{19.1-80.8(24)}$	$\frac{10.2 \pm 1.6}{1.1-20.6(75)}$	$\frac{4.3 \pm 0.65}{2.1-7.9(45)}$
Залив за четвертым энергоблоком	21	$\frac{95.5 \pm 1.9}{86.0-118.1(13)}$	$\frac{102.2 \pm 6.8}{75.6-190.1(33)}$	$\frac{6.6 \pm 0.4}{2.7-9.3(24)}$	$\frac{22.3 \pm 2.6}{7.3-51.9(55)}$
Район базы отдыха "Кедровая роща"	1	94.0	116.3	3.2	15.9
Верхнетагильское вдхр.					
Район ГРЭС	36	$\frac{77.3 \pm 1.4}{56.0-92.1(12)}$	$\frac{53.7 \pm 2.4}{19.1-79.9(29)}$	$\frac{7.1 \pm 1.2}{1.0-20.0(68)}$	$\frac{11.8 \pm 1.0}{6.5-19.2(33)}$

Примечание. Над чертой – среднее значение и стандартная ошибка, под чертой – min–max и в скобках – коэффициент вариации.

Таблица 2. Содержание ^{90}Sr и ^{137}Cs в различных компонентах экосистемы ПЛК Белоярского водохранилища

Объект исследования	^{90}Sr	^{137}Cs
Вода	20 ± 3	33 ± 1
Планктон	44 ± 2	2650 ± 306
Головастики	15 ± 7	486 ± 61
Сеголетки лягушки	27 ± 3	397 ± 86
Лягушки	9.7 ± 0.9	18 ± 2
Мальки рыб	0.8 ± 0.5	5.0 ± 2.3
Карась	1.5 ± 0.1	17 ± 1
Лещ	1.7 ± 0.7	8.8 ± 1.8
Рдест гребенчатый	15 ± 1	1228 ± 179
Кладофора	22 ± 2	1156 ± 150
Песчано-илистый грунт	6.4 ± 1.5	81 ± 9

Примечание. Единицы измерения показателей: вода – Бк/м³, остальные – Бк/кг сухой массы.

накапливаются в амфибиях, растениях и планктоне в среднем выше, чем в рыбах. Сеголетки и головастики лягушек содержат ^{90}Sr и ^{137}Cs больше, чем взрослые особи. Компоненты экосисте-

мы ПЛК по мере возрастания концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs располагаются следующим образом:

^{90}Sr	^{137}Cs
Мальки рыб	Мальки рыб
Карась, лещ	Лещ
Песчано-илистый грунт	Карась
Взрослые лягушки	Взрослые лягушки
Головастики	Песчано-илистый грунт
Рдест гребенчатый	Сеголетки лягушек
Кладофора	Головастики
Сеголетки лягушек	Кладофора и рдест гребенчатый
Планктон	Планктон

Исследование содержания радионуклидов во взрослых лягушках разного пола в пределах Белоярского водохранилища не выявило достоверных различий ($p > 0.05$) между самцами и самками (9.8 ± 1.0 и 8.9 ± 2.3 Бк/кг для ^{90}Sr и 17.6 ± 2.4 и 18.7 ± 3.2 Бк/кг для ^{137}Cs соответственно). Статистическая обработка совокупности данных по водоему показала тенденцию к снижению накопления ^{90}Sr с увеличением массы тела животных ($C_v = -0.314$). На примере ПЛК установлено, что у взрослых лягушек отсутствует достоверная корреляционная связь между концентрацией ^{90}Sr в организме и возрастом животных от 1 до 4 лет ($C_v = 0.043$).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Белоярское водохранилище – объект всестороннего радиоэкологического исследования. В ряде работ (Чеботина и др., 2002; Чеботина, Николин, 2005; Трапезников и др., 2008, 2015, 2019) рассмотрены многолетние данные об уровнях накопления и динамике концентраций долгоживущих радионуклидов в различных компонентах водоема-охладителя (воде, растениях, планктоне, рыбах, грунтах) в разные периоды эксплуатации атомной станции. Установлено, что на первых этапах работы АЭС загрязнение экосистемы водоема радионуклидами было связано с функционированием первого (АМБ-100) и второго (АМБ-200) энергоблоков, тогда как ныне работающие третий (БН-600) и четвертый (БН-800) энергоблоки не вносят существенного вклада в загрязнение водоема.

Известно, что лягушки в условиях повышенного радиоактивного загрязнения среды, например при авариях на атомных предприятиях, способны накапливать радионуклиды в высоких концентрациях. В работе Matsushima et al. (2015) приведены данные о накоплении ¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs пятью видами лягушек в 20-километровой зоне Фукусимской АЭС и за ее пределами после аварии 2011 г. Содержание радионуклидов в лягушках на этой территории варьировало от 3.7 до 47.0 кБк/кг сырой массы. При гистологическом исследовании явных отклонений в морфологии зародышевых клеток гонад лягушек не выявлено. По результатам исследований Бересфорда и др. (Beresford et al., 2020) в зоне отчуждения Чернобыльской АЭС в 2014 г. концентрации радионуклидов в остромордой лягушке варьировали по ⁹⁰Sr от 14.8 до 59.3 кБк/кг сырой массы, по ¹³⁷Cs от 7.7 до 119.0 кБк/кг, ²⁴¹Am – от 0.5 до 9.5 кБк/кг сырой массы. В заболоченных экосистемах центрально-восточной части Швеции через 17 лет после Чернобыльской аварии средняя концентрация ¹³⁷Cs в остромордой лягушке была 1.7 ± 1.1 кБк/кг сырой массы, при этом наиболее высокие значения (3.5 кБк/кг сырой массы) были отмечены для самых мелких особей амфибий (Stark et al., 2004; Stark, 2006). Авторами оценены коэффициенты накопления радионуклида, которые по отношению к воде оказались значительно выше, чем по отношению к почве.

В работе О.А. Пястоловой и др. (1996) амфибий использовали для биоиндикационных целей: выявлены изменения в популяционной структуре, физиологические и генетические отличия лягушек, обитающих на радиоактивно загрязненных территориях в зоне ПО “Маяк”, по сравнению с контрольным регионом. В.Л. Вершининым (2007б) выявлены изменения в печени, крови, половых органах и продолжительности жизни лягушек на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа.

Для оценки влияния Белоярской АЭС на накопление радионуклидов лягушками проведено сравнение полученных данных с таковыми в контрольном водоеме (Верхнетагильское водохранилище). Выявлено, что среднее содержание ⁹⁰Sr в лягушках промливневого канала и теплого залива Белоярского водохранилища, расположенных в 0.5 и 2.0 км ниже по течению от БАЭС, на ~40% выше, чем в контрольной водоеме (различие высоко достоверно при $p < 0.05$). В более удаленной точке отбора, расположенной в 6 км выше по течению в сторону верховья (залив за четвертым энергоблоком), концентрация ⁹⁰Sr близка к уровню в контрольном водоеме ($p > 0.05$). Отмечено превышение концентраций ¹³⁷Cs в лягушках ПЛК и залива за четвертым энергоблоком по отношению к контрольному водоему соответственно на 53 и 89% (различие достоверно при $p = 0.002$ и 0.004 соответственно). Зафиксирован случай высокого содержания ¹³⁷Cs (45000 Бк/кг) и ¹³⁴Cs (441 Бк/кг) в одной особи озерной лягушки промливневого канала, что может быть следствием тесного контакта животного с радиоактивной средой в зоне размещения атомного предприятия (путешествие в радиоактивно загрязненную зону, попадание горячей частицы и др.) (Рихванов, 1997). Согласно существующей в настоящее время классификации, по содержанию цезия эту лягушку можно отнести к радиоактивным отходам (Постановление..., 2012).

Таким образом, можно заключить, что лягушки, обитающие в водоеме-охладителе Белоярской АЭС, накапливают больше стронция и цезия, чем животные из контрольного водоема. Полученные значения концентраций указанных радионуклидов в основной массе изученных лягушек Белоярского водохранилища значительно ниже допустимого уровня в пищевых продуктах для земноводных (100 и 200 Бк/кг для ⁹⁰Sr и ¹³⁷Cs соответственно), согласно принятым нормативам (Методические указания ..., 1998).

Обращают на себя внимание пониженные концентрации ¹³⁷Cs в лягушках зоны сброса подогретой воды в Белоярском водохранилище, которые достоверно отличаются от таковых других местообитаний, включая Верхнетагильское водохранилище ($p < 0.0001$). Следует отметить, что эти данные не согласуются с данными лабораторных экспериментов по изучению влияния температуры на накопление радионуклидов различными компонентами водоема. Установлено, что с повышением температуры воды в большинстве случаев уровень накопления радионуклидов пресноводными гидробионтами и грунтами возрастает, однако, в некоторых случаях температурные условия не влияют и даже снижают накопление (Куликов, Чеботина, 1988; Чеботина и др., 2019). В настоящее время мы не располагаем достоверной

информацией, позволяющей объяснить феномен пониженного накопления ^{137}Cs в лягушках зоны подогрева. Возможно, это связано с особыми гидрохимическими условиями в теплом заливе, которые формируются под влиянием сбросных подогретых вод, поступающих в залив от БАЭС после прохождения их через системы водоочистки и охлаждения реактора. Следствием этого могут быть изменения в пищевой базе животных, обитающих в зоне сброса теплых вод.

Повышенное накопление радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs в сеголетках и головастиках по сравнению со взрослыми лягушками возможно связано с относительно большим вкладом обогащенного радионуклидами планктона в пищевую рацион молодых особей по сравнению со взрослыми животными. Аналогичные данные о более высоком накоплении ^{137}Cs головастиками по сравнению со взрослыми животными приводятся для зоны Фуксимской АЭС в работе (Tagami et al., 2018). Концентрации ^{90}Sr и ^{137}Cs в лягушках в среднем выше, чем в исследованных представителях ихтиофауны, что связано с видовыми особенностями гидробионтов.

Полученные нами результаты показали, что во всех компонентах экосистем Белоярского и Верхнетагильского водохранилищ содержание ^{137}Cs выше, чем ^{90}Sr . Исключение — зона сброса подогретой воды в Белоярском водохранилище, где концентрация ^{137}Cs в лягушках примерно в 25 раз меньше, чем ^{90}Sr (различие достоверно при $p = 0.01$).

Выводы. Озерная лягушка, обитающая в Белоярском водохранилище, накапливает долгоживущие радионуклиды ^{90}Sr и ^{137}Cs в больших концентрациях по сравнению с контрольным водоемом. Установлено, что у взрослых лягушек накопление не зависит от массы животных, их пола и возраста. Сеголетки и головастики содержат ^{90}Sr и ^{137}Cs больше, чем взрослые особи. Накопление ^{137}Cs в лягушках, сеголетках и головастиках выше, чем ^{90}Sr .

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Полевой сбор материала проведен при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации (постановление № 211, контракт № 02.А03.21.0006) и Комплексной программы УрО РАН (проект № 18-4-4-28), радиоэкологический анализ и интерпретация результатов исследования — в рамках государственного задания Института экологии растений и животных УрО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Вершинин В.Л. 2007а. Амфибии и рептилии Урала. Екатеринбург: УрО РАН.

Вершинин В.Л. 2007б. Специфика жизненного цикла *R. arvalis* Nills. на территории Восточно-Уральского радиоактивного следа // Сиб. экол. журн. Вып. 4. С. 677.

Динь В.Х. 2015. Обоснование и разработка рациональной технологии переработки лягушки *Rana ridibunda*: Дис. ... канд. техн. наук. Астрахань.

Клейненберг С.Е., Смирин Э.М. 1969. Метод определения возраста у амфибий // Зоол. журн. Т. 48. С. 1090.

Куликов Н.В., Чеботина М.Я. 1988. Радиоэкология пресноводных биосистем. Свердловск: УрО АН СССР.

Лунова Е.В. 2018. Содержание радионуклидов в поверхностных водах, донных отложениях и гидробионтах реки Неман // Биология внутренних вод. № 1. С. 100.
<https://doi.org/10.7868/S0320965218010138>

Методические указания по методам контроля МУК 2.6.1.717-98. 1998. Москва: Минздрав России.

Постановление Правительства РФ от 19 октября 2012 г. № 1069 “О критериях отнесения твердых, жидких и газообразных отходов к радиоактивным отходам, критериях отнесения радиоактивных отходов к особым радиоактивным отходам и к удаляемым радиоактивным отходам и критериях классификации удаляемых радиоактивных отходов”.

Пястолова О.А., Вершинин В.Л., Трубецкая Е.А. и др. 1996. Использование амфибий в биоиндикационных исследованиях территории Восточно-Уральского радиоактивного следа // Экология. № 5. С. 378.

Рихванов Л.П. 1997. Общие и региональные проблемы радиоэкологии. Томск: Томск. политех. ун-т.

Смирин Э.М. 1972. Годовые слои в костях травяной лягушки (*Rana temporaria*) // Зоол. журн. Т. 51. Вып. 10. С. 1529.

Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В. 2015. Динамика радиоэкологического состояния пресноводных экосистем, подверженных многолетнему воздействию атомной электростанции в границах наблюдаемой зоны // Радиационная биология. Радиоэкология. Т. 55. № 3. С. 302.
<https://doi.org/10.7868/S0869803115020150>

Трапезников А.В., Трапезникова В.Н., Коржавин А.В. и др. 2019. Основные принципы оценки безопасности рыбной продукции из водоемов, подверженных воздействию предприятий ядерного топливного цикла // Медико-биологические и социально-психологические проблемы безопасности в чрезвычайных ситуациях. № 1. С. 106.
<https://doi.org/10.25016/2541-7487-2019-0-1-106-114>

Трапезников А.В., Чеботина М.Я., Трапезникова В.Н. и др. 2008. Влияние АЭС на радиоэкологическое состояние водоема-охладителя. Екатеринбург: Академ-Наука.

Уткин В.И., Чеботина М.Я., Евстигнеев А.В., Любашевский Н.М. 2004. Особенности радиационной обстановки на Урале. Екатеринбург: УрО РАН.

Чеботина М.Я., Гусева В.П., Трапезников А.В. 2002. Планктон и его роль в миграции радионуклидов в водоеме-охладителе АЭС Екатеринбург: УрО РАН.

- Чеботина М.Я., Николин О.А. 2005. Радиоэкологические исследования трития в Уральском регионе. Екатеринбург: УРО РАН.
- Чеботина М.Я., Поляков Е.В., Гусева В.П. 2019. Роль природных органических веществ в миграционных процессах трития // Радиационная биология. Радиоэкология. 2019. № 5. С. 531. <https://doi.org/10.1134/S0869803119050047>
- Beresford N.A., Barnett C.L., Gashchak S. et al. 2020. Radionuclide transfer to wildlife at a 'Reference site' in the Chernobyl Exclusion Zone and resultant radiation exposures // J. Environ. Radioactivity. V. 211. P. 1.
- Castanet J., Smirina E.M. 1990. Introduction to the skeletochronological method in amphibians and reptiles // Ann. Sci. Nat. Zool. V. 11. P. 191.
- Matsushima N., Ihara S., Takase M., Horiguchi T. 2015. Assessment of radiocesium contamination in frogs 18 months after the Fukushima Daiichi nuclear disaster // Scientific Reports. V. 5. P. 1.
- Mirzaj A. 2003. Biological evaluation of the frog species of *Rana ridibunda* in Anzali Lagoon for consumption and export // Agricultural Research, Education, and Extension Organization (AREEO). P. 1.
- Stark K. 2006. Risk from radionuclides: a frog's perspective. Accumulation of ¹³⁷Cs in a riparian wetland, radiation doses, and effects on frogs and toads after low-dose rate exposure. Stockholm: Department of Systems Ecology Stockholm University.
- Stark K., Avila R., Wallberg P. 2004. Estimation of radiation doses from ¹³⁷Cs to frogs in a wetland ecosystem // J. Environ. Radioactivity. V. 75. P. 1.
- Tagami K., Uchida S., Wood M.D., Beresford N.A. 2018. Radiocesium transfer and radiation exposure of frogs in Fukushima Prefecture // Scientific Reports. V. 8. Article number: 10662 <https://doi.org/10.1038/s41598-018-28866-0>

Accumulation of Radionuclides in the Lake Frog *Pelophylax ridibundus* in the Zone of the Nuclear Enterprise

D. L. Berzin^{1,2}, M. Ya. Chebotina^{1, *}, and V. P. Guseva¹

¹Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

²Yeltsin Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

*e-mail: Chebotina@ipae.uran.ru

A study was made of the accumulation of anthropogenic radionuclides ⁹⁰Sr and ^{134,137}Cs in a marsh frog at various observation points of the Beloyarsk Reservoir (cooling reservoir of the Beloyarsk nuclear enterprise) in comparison with the control reservoir (Verkhnetagil Reservoir). The variability of individual morphological indicators and concentrations of radionuclides in adult amphibians of the studied water bodies was noted. An abnormally high contamination of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs of one frog from the industrial flood channel of the Beloyarsk Reservoir was revealed, which could be due to the contact of the animal with the radioactive medium in the area of the nuclear plant. It has been established that at present, at some observation points of the Beloyarsk Reservoir, the levels of accumulation of ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs are significantly higher than in the control reservoir. The concentration of radionuclides in frogs is much lower than the permissible level for amphibians.

Keywords: marsh frog, Beloyarsk Reservoir, nuclear power plants, Verkhnetagil Reservoir, concentration, ⁹⁰Sr and ¹³⁷Cs, hydrobionts