

УДК 597.851:550.47(285.2:470.54)

НАКОПЛЕНИЕ МИКРОЭЛЕМЕНТОВ В ОЗЕРНОЙ ЛЯГУШКЕ *Pelophylax ridibundus* ИЗ ВОДОЕМОВ-ОХЛАДИТЕЛЕЙ СРЕДНЕГО УРАЛА

© 2022 г. М. Я. Чеботина^{а, *}, В. П. Гусева^а, Д. Л. Берзин^{а, b}, И. В. Волков^с, Е. В. Поляков^с

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

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

^сИнститут химии твердого тела Уральского отделения Российской академии наук, Екатеринбург, Россия

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

Поступила в редакцию 25.02.2021 г.

После доработки 24.10.2021 г.

Принята к публикации 29.10.2021 г.

Проведено исследование накопления микроэлементов в озерных лягушках *Pelophylax ridibundus* Pall., 1771 из зон подогрева водоемов-охладителей Белоярской АЭС и Рефтинской ГРЭС. Для всей совокупности данных по концентрациям элементов в лягушках статистически значимых различий между исследуемыми водоемами не выявлено. На примере обоих водоемов показано отсутствие различий в накоплении элементов самцами и самками амфибий. Установлена достоверная корреляционная связь между концентрацией элементов во взрослых лягушках и их содержанием в воде и планктоне. Выявлено превышение предельно-допустимых концентраций некоторых элементов в воде обоих водохранилищ, а также превышение концентраций ряда элементов в лягушках по сравнению с фоновыми значениями.

Ключевые слова: озерная лягушка, загрязнение, тяжелые металлы, Белоярское водохранилище, Рефтинское водохранилище, микроэлементы, планктон

DOI: 10.31857/S032096522202005X

ВВЕДЕНИЕ

Проблема загрязнения природной среды микроэлементами (тяжелыми металлами, редкими и рассеянными элементами) считается одной из ключевых при проведении экологических исследований (Виноградов, 1957; Ковальский, 1974; Саэт и др., 1990). Важная особенность микроэлементов при поступлении их в организм – существование пороговых концентраций, в пределах которых организм способен регулировать обменные процессы.

Выход за пределы этих концентраций в сторону их понижения или повышения в среде обитания может вызвать дисфункцию обменных процессов в организме, привести к различным видам заболеваний и даже к его гибели (Ковальский, 1974).

В Уральском регионе к основным источникам загрязнения водных и наземных экосистем тяжелыми металлами относятся горнодобывающая и металлургическая промышленность. Миграция и рассеивание их от источников выброса обусловили высокий уровень загрязнения почв, рек, воздушной среды, подземных вод, дикорастущих рас-

тений, сельскохозяйственной продукции (Махонина, 1987; Государственный..., 1999, 2000, 2008, 2009, 2012). У животных, районированных на загрязненных территориях, наблюдается нарушение иммунной системы и развитие патологических процессов (Донник, Смирнов, 2002; Донник, Хайбуллин, 2002).

Высокая нагрузка на природные экосистемы Уральского региона из-за присутствия в них тяжелых металлов и других техногенных выбросов усугубляется повышенным радиационным фоном за счет функционирования на территории региона предприятий атомной промышленности и последствиями радиоактивного загрязнения территорий в результате радиационных аварий и производственной деятельности человека (использование материалов с повышенным содержанием естественных радионуклидов, медицинские процедуры и пр.) (Восточно-Уральский..., 2000; Климшин и др., 2011; Чеботина и др., 2017).

В ряде работ в качестве индикаторов загрязнения пресноводных экосистем различными поллютантами, в том числе тяжелыми металлами, рассматриваются лягушки (Шарыгин, 1980; Пястолова и др., 1996; Мисюра, 2006; Stark, 2006; Зарипова и др., 2009; Smalling et al., 2019; Берзин и др.,

Сокращения. ПДК – предельно допустимые концентрации.

2020; Beresford et al, 2020). Однако в настоящее время, несмотря на их широкое распространение в водных экосистемах различных регионов страны и устойчивости к негативным факторам среды, они недостаточно изучены.

Цель работы – исследовать уровень содержания микроэлементов в озерной лягушке *Pelophylax ridibundus* Pall., обитающей в водоемах-охладителях Среднего Урала. Для ее выполнения поставлены задачи: изучение уровней концентраций микроэлементов в воде и лягушках Белоярского и Рефтинского водохранилищ; сравнительная оценка концентраций микроэлементов в самках и самцах исследованных водоемов; изучение связи между содержанием микроэлементов в лягушках и таковым в воде и планктоне.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Материалом исследования послужили озерные лягушки и вода Белоярского и Рефтинского водохранилищ. Белоярское вдхр., образованное в 1959–1963 гг. за счет зарегулирования русла р. Пышма, – водоем-охладитель Белоярской АЭС им. Курчатова. Эколого-географическая характеристика водоема приведена в работе (Трапезников и др., 2008). За время существования экосистема Белоярского вдхр. подвергалась воздействию четырех энергоблоков АЭС, два из них выведены из эксплуатации в 1981 и 1989 гг., третий и четвертый работают с 1980 и 2014 гг. соответственно. Рефтинское вдхр. – водоем-охладитель одной из крупнейших в России электростанций – образовано в 1968 г. на р. Рефт, левом притоке р. Пышма. Станция работает на угле, из-за чего ежегодно на золоотвалы выбрасывается ~6 млн тонн золы и шлака. На берегу водохранилища размещается Рефтинская птицефабрика, крупнейшее на Урале предприятие по производству и переработке мяса бройлеров. Оба водохранилища подвергаются тепловому загрязнению за счет сброса в них подогретых вод.

Работу проводили в 2019 г. Места отлова лягушек располагались в районах водоемов, примыкающих к участкам сброса подогретых вод. В каждом водоеме отлавливали по пять самцов и пять самок лягушек и усыпляли их эфиром. В лаборатории лягушек взвешивали, высушивали и озоляли при температуре 500°C. Воду отбирали в трех повторностях по 5 л на повторность, фильтровали через фильтр “синяя лента” для очистки от механических примесей и высушивали при температуре 105°C до сухого остатка. Подготовленные таким образом пробы амфибий и воды растворяли в смеси азотной, соляной и фтороводородной кислот квалификации “ХЧ” в соотношении 2 : 1 : 1 и выдерживали в автоклаве 15–30 мин при температуре 150–160°C с последующим прокаливанием. Количественное определе-

ние элементов проводили на квадрупольном масс-спектрометре “ELAN 9000” (Perkin Elmer SCIEX, США–Канада) с использованием калибровочного стандартного раствора с требуемым диапазоном концентраций исследуемых элементов. Относительная стандартная погрешность определений не превышала 10–20%. Все данные, приведенные на рисунках, рассчитаны на сухую массу вещества.

Статистическую обработку материала проводили с помощью компьютерной программы STATISTICA (критерии Манна–Уитни, Стьюдента и Пирсона).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Концентрации различных элементов в амфибиях варьировали в пределах пяти порядков величин (рис. 1). Содержание Fe в лягушках обоих водоемов было наиболее высоким – $(6–10) \times 10^3$ мкг/г. По мере снижения концентраций идут ряды элементов, характерные для обоих водохранилищ: Ti, V, Mn, Cu, Zn, Br, Sr ($10^2–10^1$ мкг/г), Li, B, Cr, As, Rb, Ba, Th, ($10^1–10^0$ мкг/г), Sc, Ga, Y, Zr, Ce, Pb, U ($10^0–10^{-1}$ мкг/г и меньше). Co и Ni в обнаруживаемых количествах найдены только в лягушках Рефтинского вдхр., Mo, Cd и Cs – только Белоярского вдхр. Концентрации этих микроэлементов находятся ниже предела обнаружения данным методом. По остальным элементам различия между лягушками обоих водоемов оказались статистически недостоверными ($p > 0.05$).

На рис. 2 и 3 представлены средние величины концентраций исследуемых элементов в лягушках Белоярского и Рефтинского водоемов в зависимости от пола животных. Видно, что самцы и самки амфибий накапливают микроэлементы примерно в одинаковых количествах. Это подтверждается результатами статистической обработки совокупности данных по всем исследованным элементам и для Белоярского, и для Рефтинского водохранилища ($p < 0.001$).

Поскольку вода служит важным источником поступления элементов в организм лягушек, исследована связь концентраций микроэлементов в организме животных и воде Белоярского и Рефтинского водохранилищ (рис. 4). Для обоих водоемов по совокупности исследуемых элементов установлена высоко достоверная корреляционная связь между их концентрацией в лягушках и содержанием в воде (коэффициент корреляции 0.78; $p < 0.001$). Для Белоярского вдхр. также выявлена достоверная корреляционная связь между концентрациями микроэлементов в лягушках и планктоне (коэффициент корреляции 0.78; $p = 0.001$) (рис. 5). В последнем случае для исследования использовали данные по планктону из работы (Поляков и др., 2012).

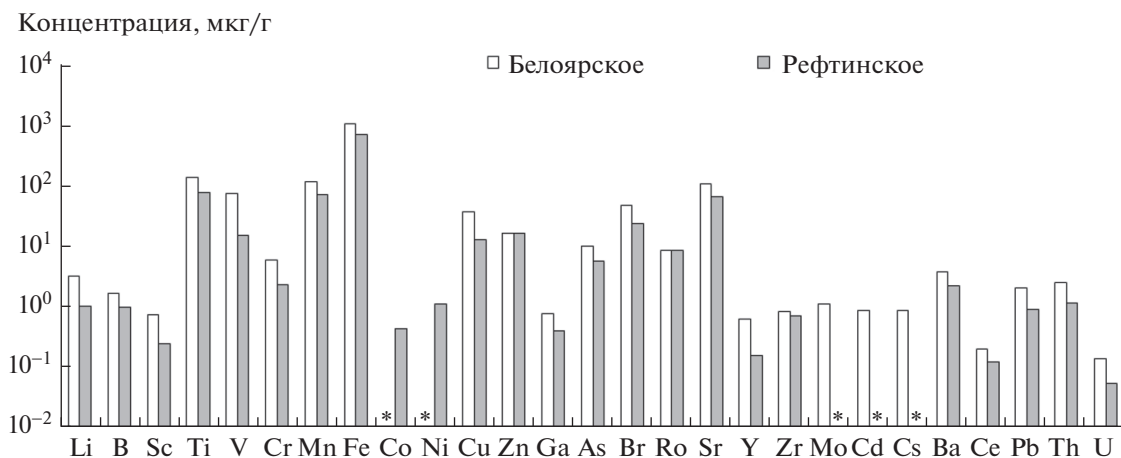


Рис. 1. Средние концентрации микроэлементов в лягушках Белоярского и Рефтинского водохранилищ. * — концентрации ниже предела обнаружения.

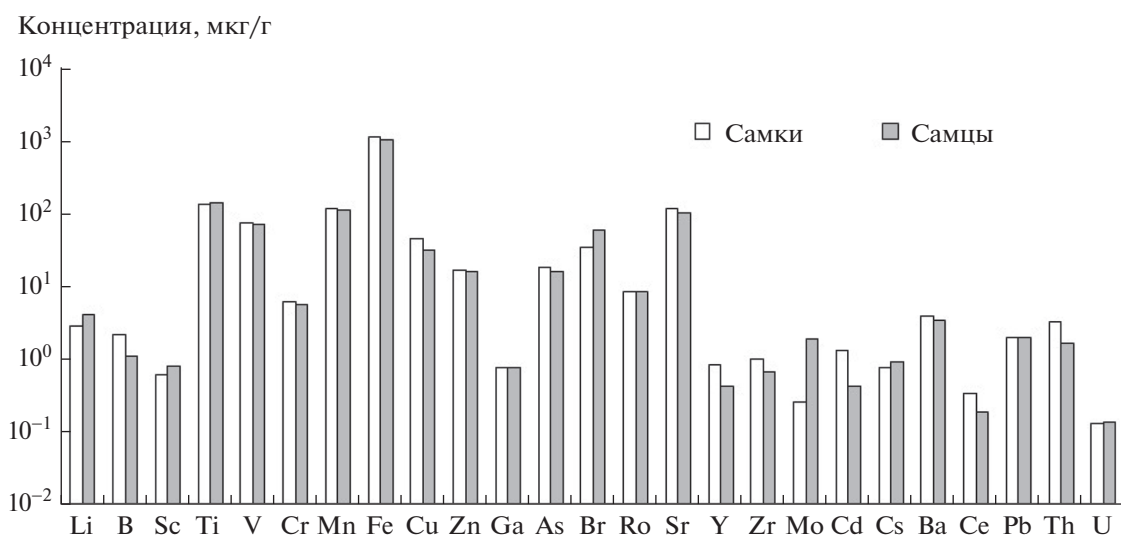


Рис. 2. Концентрации микроэлементов в самках и самцах лягушек Белоярского водохранилища.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Белоярское и Рефтинское водохранилища на Среднем Урале относятся к числу водоемов, испытывающих постоянную антропогенную нагрузку. В Белоярское водохранилище поступают слаборадиоактивные и химические стоки с двух предприятий атомной промышленности (Белоярской АЭС и Института реакторных материалов), в Рефтинское — смывы химических веществ из золоотвалов и птицефабрики. Водоемы служат зонами отдыха населения, используются для рыбной ловли и промышленного выращивания рыбы в садках. Также они подвергаются тепловому загрязнению в результате сброса подогретых вод. Анализ качества воды показал превышение содержания ряда микроэлементов в зоне подогрева санитарно-защитной зоны водохранилищ по срав-

нению с ПДК, установленными для водоемов, имеющих рыбохозяйственное значение (Перечень..., 1999). Так, на момент исследований превышение ПДК в Белоярском и Рефтинском водохранилищах достигало по V в 12 и 14 раз, по Mn — в 9 и 17 раз, по Fe — в 5 и 12 раз, по Cu — в 5 и 22 раза соответственно. Кроме того, в Рефтинском вдхр. отмечено превышение ПДК по Ni в 4, по Zn в 1.6 раза.

Установлено, что концентрации различных микроэлементов в лягушках зоны подогрева указанных водохранилищ варьируют в пределах пяти порядков величин (от 10^{-2} до 10^4 мкг/г сухой массы тела). В наибольших количествах лягушки обоих местообитаний накапливают железо, что согласуется с данными работы (Мисюра и др., 2004). При небольших колебаниях в содержании микроэлементов в лягушках Белоярского и Реф-

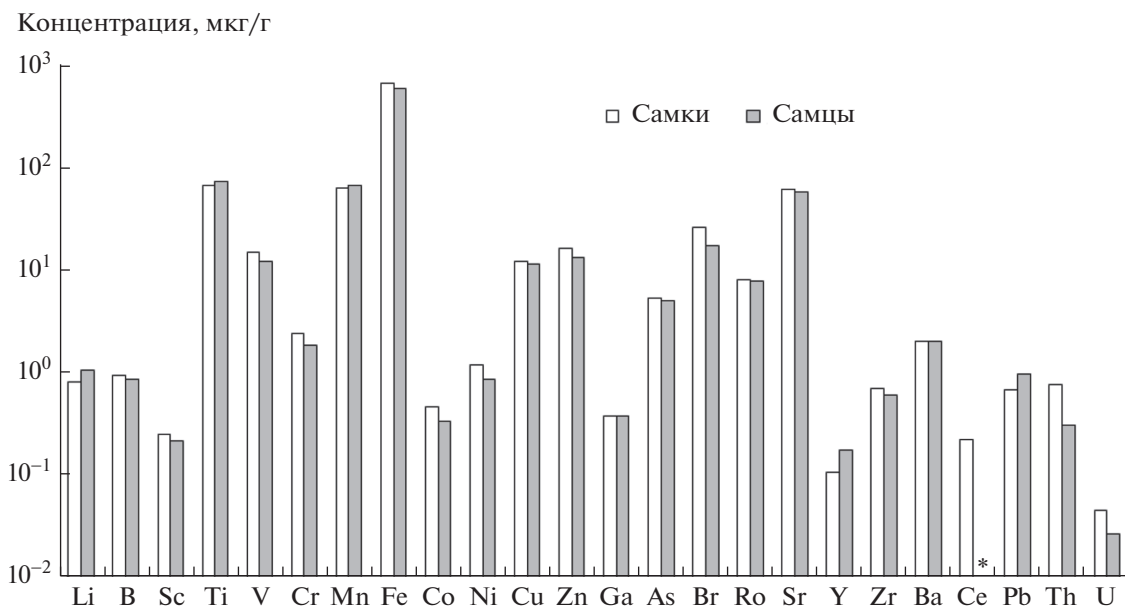


Рис. 3. Концентрации микроэлементов в самках и самцах лягушек Рефтинского водохранилища.
* – концентрации ниже предела обнаружения.

тинского водохранилища существенных различий между животными разных местообитаний не выявлено. Аналогичные данные о вариабельности концентраций микроэлементов в амфибиях разных местообитаний приведены в работах (Шарыгин, 1980; Мисюра, 2006).

В связи с использованием лягушек для производства пищевой продукции в ряде стран мира (Mirzaj, 2003; Динь, 2015) интересно было сравнить уровни накопления микроэлементов амфи-

биями в наших исследованиях с фоновыми показателями. Из-за отсутствия ПДК для пресноводных животных и, в частности, для лягушек, мы использовали результаты работы (Никаноров, Жулидов, 1991), в которой приведены концентрации химических элементов в пресноводных организмах, условно принимаемые за фоновые. Превышение этих значений по некоторым элементам достигало от 2 до 21 раза. Лягушки Белоярского вдхр. содержат в 2–4 раза больше Li, Sc, Ti, Ga, Br, а Рефтинского вдхр. – Li, Ti и V. В Белоярском водохр. концентрация V в амфибиях из зоны подогрева превышала фоновые значения в

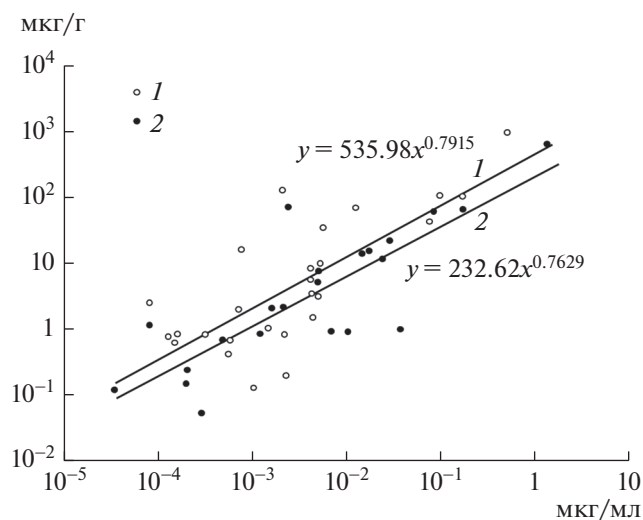


Рис. 4. Корреляционная связь между концентрациями микроэлементов в лягушках (ось ординат) и в воде (ось абсцисс) Белоярского (1) и Рефтинского (2) водохранилищ.

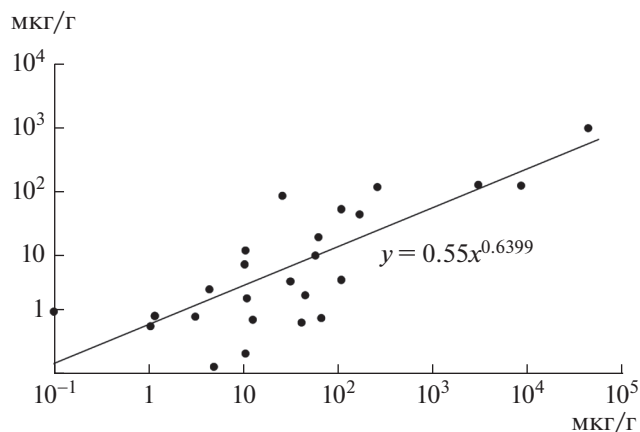


Рис. 5. Корреляционная связь между концентрациями микроэлементов в лягушках (ось ординат) и в планктоне (ось абсцисс) Белоярского водохранилища.

18 раз, As – в 17 и 7 раз для Белоярского и Рефтинского вдхр. соответственно. Источником поступления повышенных концентраций микроэлементов в водоемы-охладители могут быть системы охлаждения на атомной и тепловой станциях, а также золоотвалы на Рефтинской ГРЭС (Махонина, 1987; Трапезников и др., 2008).

В проведенном исследовании установлено, что накопление всей совокупности исследованных элементов озерной лягушкой не зависит от пола животных. Аналогичные данные об отсутствии различий в накоплении радионуклидов ^{90}Sr и ^{137}Cs самцами и самками Белоярского вдхр. получены нами в работе (Берзин и др., 2020).

Вода служит необходимой средой обитания озерных лягушек, обеспечивающей их жизнедеятельность. Поглощение микроэлементов из воды возможно через кожные покровы и с пищей. Вместе с водой лягушки заглатывают пищу (зообентос, молодь рыб, пауков, ручейников, стрекоз и их личинок, жуков и прочих), содержащую различные микроэлементы (Вершинин, 2007). Кроме того, водная среда заселена огромным числом видов планктона растительного и животного происхождения. Озерные лягушки питаются, как правило, консументами двух–трех порядков, которые непосредственно являются частью планктона или его потребителями. Планктон, обладающий огромной биосорбционной активностью имеет в своем составе большое разнообразие тяжелых металлов, редких и рассеянных элементов (Поляков и др., 2012). Это объясняет выявленную нами достоверную корреляционную связь между содержанием микроэлементов в озерных лягушках и воде, с одной стороны, а также между лягушками и планктоном, – с другой.

Полученные данные могут служить для сравнительной оценки содержания микроэлементов в озерных лягушках других водоемов страны и разработки для них соответствующих нормативов.

Выводы. Озерные лягушки, обитающие в зоне подогрева Белоярского и Рефтинского водохранилищ, накапливают различные микроэлементы в концентрациях, лежащих в пределах пяти порядков величин. Для всей совокупности микроэлементов в лягушках достоверные различия между исследованными водоемами не установлены. Показано, что накопление микроэлементов амфибиями в целом не зависит от пола животных. Установлена достоверная корреляционная связь между концентрацией микроэлементов во взрослых лягушках и их содержанием в воде и планктоне. Выявлено превышение ПДК некоторых микроэлементов в воде зоны подогрева обоих водохранилищ, а также концентраций ряда микроэлементов в лягушках изученных местообитаний по сравнению с их фоновыми значениями.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках государственного задания Института экологии растений и животных Уральского отделения РАН, тема № АААА-А19-119032090023-0.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Берзин Д.Л., Чеботина М.Я., Гусева В.П. 2020. Накопление радионуклидов в озерной лягушке *Pelophylax ridibundus* в зоне атомного предприятия // Биология внутр. вод. № 6. С. 613.
<https://doi.org/10.31857/S0320965220060042>
- Вершинин В.Л. 2007. Амфибии и рептилии Урала. Екатеринбург: УрО РАН.
- Восточно-Уральский радиоактивный след. 2000. Екатеринбург: ИПЭ УрО РАН.
- Виноградов А.П. 1957. Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. Москва: АН СССР.
- Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Свердловской области. 1999, 2000, 2008, 2009, 2012. Екатеринбург: Изд-во Уральск. ун-та.
- Динь В.Х. 2015. Обоснование и разработка рациональной технологии переработки лягушки *Rana ridibunda*: Дис. ... канд. техн. наук. Астрахань.
- Донник И.М., Смирнов П.Н. 2002. Экология и здоровье животных. Екатеринбург: УрО РАН.
- Донник И.М., Хайбуллин Р.Р. 2002. Оценка состояния здоровья крупного рогатого скота из хозяйств с различной экологической характеристикой // Научно-практическая конференция “ВУРС-45”, Труды и материалы. Озерск: Редакционно-издательский центр ВРБ.
- Зарипова Ф.Ф., Файзуллин А.И., Юмагулова Г.Р. 2009. Содержание тяжелых металлов в печени озерной лягушки *Rana ridibunda* Pallas, 1771 Башкирского Зауралья // Вестник Оренбургского государственного университета. № 6. С. 145.
- Ковальский В.В. 1974. Геохимическая экология. Москва: Наука.
- Климшин А.В., Миндубаев М.Г., Колотухин А.З. 2011. Перенос радона в поверхностном слое почвы в условиях свободной тепловой конвекции // Уральский геофизический вестник. № 1(18). С. 23.
- Махонина Г.И. 1987. Химический состав растений на промышленных отвалах Урала. Свердловск: Изд-во Уральского ун-та.
- Мисюра А.Н. 2006. Влияние отходов предприятий горнодобывающей промышленности на уровень содержания микроэлементов в органах и тканях амфибий из различных по степени загрязнения водоемов // Проблемы экологии и охраны природы техногенного региона. Межведомственный сборник научных работ. Донецк: ДонГУ. С. 140.
- Мисюра А.Н., Марченковская А.А., Сподарец Д.А. 2004. Сравнительная характеристика содержания биогенных элементов в органах и тканях озерной лягушки из водоемов в местах поступления отходов уранодобывающей промышленности и Днепро-Орельского заповедника // Вестник Оренбургского гос. ун-та. Вып. 6. С. 62.
- Никаноров А.М., Жулидов А.В. 1991. Биомониторинг металлов в пресноводных экосистемах. Ленинград: Гидрометеиздат. С. 56.

- Перечень рыбохозяйственных нормативов, предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно безопасных уровней воздействия (ОБУВ) вредных веществ для воды водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. 1999. Москва: ВНИРО.
- Поляков Е.В., Чеботина М.Я., Хлебников Н.А. и др. 2012. Особенности накопления химических элементов планктоном пресноводного водоема // Экология. № 5. С. 353.
- 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.
- Саев Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.Н. и др. 1990. Геохимия окружающей среды. Москва: Недра.
- Трапезников А.В., Чеботина М.Я., Трапезникова В.Н. и др. 2008. Влияние АЭС на радиоэкологическое состояние водоема-охладителя. Екатеринбург: Академ-Наука.
- Чеботина М.Я., Пономарева Р.П., Трапезников А.В. 2017. Дисперсность частиц плутония в производственных процессах и окружающей среде. Екатеринбург: Изд-во "АкадемНаука".
- Шарыгин С.А. 1980. Микроэлементы в организме некоторых амфибий и рептилий и их динамика под влиянием антропогенных факторов: Дис. канд. биол. наук. Свердловск.
- Юшкова Е.А., Боднарь И.С., Шадрин Д.М. и др. 2018. Цитогенетические и молекулярно-генетические показатели в популяциях бесхвостых амфибий (*Rana arvalis* Nilsson) в условиях радиоактивного и химического загрязнения водной среды // Биология внутр. вод. № 3. С. 88. <http://doi.org/10.1134/S0320965218030233>.
- 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. Envir. Radioactivity. V. 211. 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.
- Smalling K.L., Anderson C.W., Honeycutt R.K. et al. 2019. Associations between environmental pollutants and larval amphibians in wetlands contaminated by energy-related brines are potentially mediated by feeding traits // Environmen. Pollution. V. 248. P. 260. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.02.033>

Accumulation of Trace Elements by the Lake Frog *Pelophylax ridibundus* in the Cooling Bodies of the Middle Urals

M. Ya. Chebotina^{1, *}, V. P. Guseva¹, D. L. Berzin^{1, 2}, I. V. Volkov³, and E. V. Polyakov³

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

²Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia

³Institute of Solid State Chemistry, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

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

A study of the accumulation of microelements in the lake frog *Pelophylax ridibundus* Pall., 1771 in the heating zones of the cooling ponds of the Beloyarsk NPP and Reftinskaya GRES was carried out. For the entire set of data on the concentrations of elements in frogs, no statistically significant differences were found between the studied water bodies. By the example of both water bodies, the absence of differences in the accumulation of elements by males and females of amphibians was shown. A reliable correlation was established between the concentration of elements in adult frogs with their content in water and plankton. An excess of the maximum permissible concentrations of some elements in the water of both reservoirs, as well as an excess of the concentrations of a number of elements in frogs, compared with background values, are shown.

Keywords: lake frog, pollution, heavy metals, Beloyarskoe reservoir, Reftinskoe reservoir, microelements, plankton