

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРЕСНОВОДНЫХ ВОДОЕМОВ ЧЕЛЯБИНСКОЙ ОБЛАСТИ ПО СОДЕРЖАНИЮ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В РЫБЕ

Д. Ю. НОХРИН, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник,
Ю. Г. ГРИБОВСКИЙ, доктор ветеринарных наук, ведущий научный сотрудник,
Н. А. ДАВЫДОВА, научный сотрудник,
Уральский федеральный аграрный научно-исследовательский центр
Уральского отделения Российской академии наук
(620142 г. Екатеринбург, ул. Белинского, 112-а)

Ключевые слова: рыбохозяйственные водоёмы, тяжёлые металлы, рыба.

В статье приведены сравнительные данные о содержании семи тяжелых металлов (ТМ) в рыбе двух рыбохозяйственных водоемов Челябинской области, подверженных различной техногенной нагрузке. Пруд на Безымянной балке (Красноармейский муниципальный район Челябинской области) расположен вдали от городов и крупных производств, а потому может выступать в экологических исследованиях как относительный контроль по отношению ко многим водным объектам. Озеро Чебаркуль (Чебаркульский район Челябинской области) со всех сторон окружен населёнными пунктами и базами отдыха, включая г. Чебаркуль с населением 40 тыс. чел., и испытывает значительную антропогенную нагрузку. В мышечной и костной тканях плотвы *Rutilus rutilus* и окуня *Perca fluviatilis* из этих водоёмов атомно-абсорбционным спектрофотометрическим методом было определено содержание Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd. В ходе статистического анализа вычисляли средние значения содержания ТМ в тканях, которые снабжали 95 %-ными доверительными интервалами, вычисленными процедурой непараметрического бутстрепа (метод ВСа, $n=99999$). Сравнение двух водоёмов по содержанию ТМ в тканях рыб проводили с помощью точного рандомизационного варианта *U*-критерия Манна–Уитни. Было установлено, что рыба более антропогенно загрязнённого водоёма накапливает статистически значимо больше ТМ. Содержание Cd в мясе плотвы оз. Чебаркуль составило 0,090 мг/кг, а окуня – 0,225 мг/кг, т. е. превышало норматив (0,2 мг/кг). Установлено, что концентрация всех ТМ кроме Zn в тканях хищного вида – окуня – была статистически значимо выше, чем в тканях плотвы.

COMPARATIVE ASSESSMENT OF TWO FRESHWATER BODIES IN CHELYABINSK REGION FOR HEAVY METALS CONTENT IN THE FISH

D. Yu. NOKHRIN, candidate of biological sciences, senior researcher,
Yu. G. GRIBOVSKY, doctor of veterinary sciences, leading researcher,
N. A. DAVYDOVA, researcher,
Ural Federal Agrarian Scientific Research Centre,
Ural Branch of Russian Academy of Sciences
(112-a Belinskogo Str., Ekaterinburg 620142)

Keywords: fishing waters, heavy metals, fish.

This article provides a comparative data for seven heavy metals (HM) in the fish of Chelyabinsk region fishing waters under the industrial impact. The pond on the Bezymyannaya Balka (Krasnoarmeyskiy Munitsipal'niy district of Chelyabinsk region) is situated far from the cities and big industrial complexes and can be used relative standard in relation to many other water bodies. Lake Chebarkul' (Chebarkul' district of Chelyabinsk region) is surrounded by residential areas and recreation centers, which includes the town of Chebarkul' with the population of 40 000 and is under heavy anthropogenic load. From these water bodies, in the muscle and bone tissue of the roach *Rutilus rutilus* and perch *Perca fluviatilis*, using the nuclear-absorption spectrophotometric method, the following contents have been determined: Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd. During the statistical analysis the average amount of TM in the tissue was calculated, the result of which was supported by 95% confidence intervals, which were calculated with the help of nonparametric bootstrapping (method BCa, $n=99999$). The comparison of two water bodies on the amount of TM in the tissue of the fish was conducted with the help of randomization Mann-Whitney *U*-test. It was proven, that the fish of the more anthropogenic water source accumulates statistically significantly more HM. The amount of Cd in the meat of a perch from the lake Chebarkul' exceeded the standard amount (0.2 mg/kg) and reached 0.225 mg/kg. It has been established, that concentration of the most HM (outside of Zn) in the tissue of the perch, was significantly higher, than in the tissue of roach.

Положительная рецензия представлена Е. А. Пряхиным, доктором биологических наук, профессором, заведующим экспериментальным отделом Уральского научно-практического центра радиационной медицины.

Территория Южного Урала отличается обилием водоёмов различного геологического характера, что обусловлено генезисом и структурой древнейших в мире Уральских гор. Так, только на территории Челябинской области насчитывается более трёх тысяч озёр, многие из которых имеют рыбохозяйственное, рекреационное, бальнеологическое значение, а также служат источником водоснабжения населения Южного Урала, водопоя сельскохозяйственных животных, используются для промышленно-технологических нужд народного хозяйства России [6].

Учитывая интенсификацию промышленного производства, проблема ведения животноводства и рыбоводства в промышленных регионах актуальна в мировой практике [3, 12, 13, 15 и др.]. При этом публикации по мониторингу контаминацией тяжёлыми металлами промысловых видов рыбы внутренних вод Южного Урала немногочисленны и весьма дифференцированы в целеполагании решаемых задач [4, 7, 8, 11].

Целью данной работы было провести сравнительный анализ загрязнения тяжёлыми металлами разных видов рыб в рамках комплексного экотоксикологического мониторинга пресноводных озёрных хозяйств Южного Урала. Для её реализации были выбраны два водоёма с различной степенью антропогенного воздействия: пруд на Безымянной балке и озеро Чебаркуль.

Пруд на Безымянной балке расположен на северо-западе Красноармейского муниципального района Челябинской области, к востоку от Дубровского сельского поселения. Создавался как гидротехническое сооружение, однако на момент исследования питающая водоём речка была пересохшей, проточность водоёма отсутствовала, и он имел озёрный тип. По нашим данным, средняя глубина водоёма составляет 4 м, максимальная – 7 м, площадь – 25,26 га. Вода по составу гидрокарбонатная кальциево-магниево-натриевая; минерализация – 375 мг/дм³ [9]. Пруд расположен вдали от городов и крупных производств, а потому может выступать в экологических исследованиях как относительный контроль по отношению ко многим водным объектам. Водоём – рыбохозяйственный, плотвично-окунёвый; лов рыбы осуществляется сетями.

Озеро Чебаркуль – озеро в Чебаркульском районе Челябинской области. Входит в так называемую Чебаркульскую группу озёр, являясь наиболее крупным из них: средняя глубина водоёма составляла в разные годы 6–7,8 м, максимальная глубина – 12–14 м, площадь – 19,8 км² [5]. Береговая линия сильно изрезана, есть несколько полуостровов и 5 островов. В озеро впадает 3 небольшие речки и вытекает одна – река Коелга (бассейн реки Оби). На восточном берегу озера располагается одноимённый город Чебаркуль (на-

селение 40 тыс. чел.); на северном – ж/д станция и посёлок Кисегач (в составе г. Чебаркуль); на южном – посёлки Боровое (750 чел.) и Малково (650 чел.); на западном – многочисленные базы отдыха и санатории. Таким образом, водоём испытывает значительную антропогенную нагрузку. По многолетним данным, по составу вода преимущественно гидрокарбонатная магниевая, минерализация – 380–540 мг/дм³ [5]. В озере обитают линь, карп, лещ, щука, окунь, ротан, плотва, ёрш, язь, карась, рипус, налим, судак. На водоёме осуществляется рыбохозяйственная деятельность, включая разведение сиговых.

Материалы и методы исследований

Работа выполнена в рамках Государственного задания ФАНО России по теме № 0773-2018-0006 «Разработать методы и средства снижения негативного воздействия экотоксикантов на организм сельскохозяйственных животных на территориях экологического загрязнения зоны Южного Урала».

Отбор проб биоматериала проводили в сентябре 2016 г. Рыбу двух видов в количестве 10 экземпляров брали на анализ из уловов рыбаков. Промысловая длина тела плотвы *Rutilus rutilus* (L., 1758) варьировала в пределах 120...205 мм, окуня *Perca fluviatilis* (L., 1758) – 119...198 мм. Пробоподготовка для определения ТМ в тканях рыб проводилась методом сухой минерализации согласно МУ [1]. Анализ выполнен на «AAS-1» («Carl Zeiss», Германия) в пламени смеси ацетилен-воздух. В качестве градуировочных растворов использовали смеси ГСО отдельных ионов.

В ходе статистического анализа полученных данных использовали методы описательной статистики и выборочных сравнений. Вычисляли средние значения содержания ТМ в тканях, которые снабжали 95 %-ными доверительными интервалами (95 % ДИ), вычисленными процедурой непараметрического бутстрепа (метод ВСа, $n=99999$). Сравнение двух водоёмов по содержанию ТМ в тканях рыб проводили с помощью точного рандомизационного варианта *U*-критерия Манна–Уитни. Различия считали статистически значимыми при $P \leq 0,05$. Расчёты выполнены в пакете PAST (version 3.20, [13]).

Результаты и их обсуждение

Различия водоёмов

Результаты определения металлов в рыбе из двух исследованных водоёмов представлены в таблице 1.

Значимые различия между двумя водоёмами по содержанию ТМ в рыбе были обнаружены в 75 % случаев (21 из 28): у плотвы в мясе – по Mn, Fe, Ni, Cd, в костной ткани – по Mn, Fe, Co, Cu, Zn, Cd; у окуня в мясе – по Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd, в костной ткани – по Fe, Co, Ni, Cu, Zn. При этом в 71 % случаев более высокие концентрации наблюдались в тканях рыб озера Чебаркуль. Исключение составил только Cd, которого содержалось в 1,8 раза больше

Таблица 1
Концентрация тяжёлых металлов в тканях промысловых видов рыб двух уральских водоёмов, мг/кг сухого вещества. Среднее [95 % ДИ]

Table 1
Concentration of heavy metals in the tissues of commercial fish species of two Ural reservoirs, mg/kg dry matter. Mean [95 % CI]

Металл Metal	Мышечная ткань Muscle tissue			Костная ткань Bone tissue		
	Чебаркуль Chebarkul	Контроль Control	Значимость различий Statistical significance	Чебаркуль Chebarkul	Контроль Control	Значимость различий Statistical significance
Плотва Roach (n=10)						
Mn	5,9 [3,3; 9,0]	1,5 [1,1; 1,7]	<i>U=7</i> P<0,001	33,9 [28,0; 39,6]	11,2 [9,0; 13,7]	<i>U=1</i> P<0,001
Fe	11,6 [8,4; 14,9]	7,5 [6,6; 8,3]	<i>U=24</i> P=0,047	58,5 [37,4; 81,4]	11,0 [9,0; 13,0]	<i>U=0</i> P<0,001
Co	1,2 [0,78; 1,6]	1,1 [0,71; 1,5]	<i>U=47</i> <i>P=0,839</i>	9,1 [7,0; 11,1]	2,0 [1,4; 12,7]	<i>U=2</i> P<0,001
Ni	1,7 [1,1; 2,3]	0,52 [0,34; 0,68]	<i>U=8</i> P<0,001	7,3 [5,3; 9,4]	4,6 [3,6; 5,7]	<i>U=25</i> <i>P=0,060</i>
Cu	0,92 [0,70; 1,2]	0,65 [0,43; 0,87]	<i>U=27</i> <i>P=0,075</i>	4,2 [3,6; 4,7]	2,7 [1,8; 3,7]	<i>U=18</i> P=0,014
Zn	12,4 [10,3; 14,4]	13,2 [12,0; 14,4]	<i>U=44</i> <i>P=0,670</i>	67,8 [58,3; 77,3]	45,5 [38,4; 52,8]	<i>U=13</i> P=0,004
Cd	0,42 [0,26; 0,60]	0,75 [0,57; 0,91]	<i>U=19</i> P=0,017	3,41 [2,66; 4,22]	1,87 [1,10; 2,76]	<i>U=16</i> P=0,008
Окунь Perch (n=10)						
Mn	10,7 [3,5; 22,8]	2,55 [1,83; 3,26]	<i>U=17</i> P=0,010	32,2 [19,0; 45,8]	21,1 [16,4; 26,1]	<i>U=36</i> <i>P=0,315</i>
Fe	25,5 [19,0; 32,0]	7,83 [6,89; 8,71]	<i>U=0</i> P<0,001	73,7 [62,9; 85,4]	17,5 [14,0; 20,9]	<i>U=0</i> P<0,001
Co	1,5 [1,2; 1,9]	0,83 [0,55; 1,1]	<i>U=20</i> P=0,021	16,0 [11,6; 20,5]	4,2 [3,1; 5,4]	<i>U=4</i> P<0,001
Ni	2,4 [1,4; 3,5]	0,62 [0,42; 0,78]	<i>U=9</i> P<0,001	13,5 [8,3; 18,8]	6,0 [4,6; 7,5]	<i>U=21,5</i> P=0,030
Cu	1,4 [1,1; 1,7]	0,63 [0,47; 0,78]	<i>U=10</i> P=0,001	6,0 [5,4; 6,6]	4,4 [3,5; 5,3]	<i>U=18,5</i> P=0,015
Zn	15,1 [12,4; 17,8]	8,02 [6,87; 9,05]	<i>U=6</i> P<0,001	62,5 [52,7; 72,0]	40,6 [34,1; 47,9]	<i>U=12</i> P=0,003
Cd	1,14 [0,69; 1,61]	0,88 [0,49; 1,28]	<i>U=47</i> <i>P=0,836</i>	4,95 [3,40; 6,48]	2,80 [2,10; 3,52]	<i>U=24</i> <i>P=0,052</i>

Жирным шрифтом выделены P-значения статистически значимых различий.

P-values of statistically significant differences between reservoirs are highlighted in bold

в мясе плотвы контрольного водоёма. Таким образом, в целом следует констатировать более высокую концентрацию ТМ в рыбе озера Чебаркуль. Данный результат представляется закономерным, поскольку, как было отмечено выше, антропогенная нагрузка на этот водоём существенна.

Соответствие санитарным нормам

Согласно СанПин 2.3.2. 1078-01 ПДК по кадмию в рыбе составляет 0,2 мг/кг. На этапе пробоподготовки нами были проведены замеры, позволяющие получить коэффициенты пересчета с сухой массы на живой вес. Они составили для плотвы и окуня пруда 0,231 и 0,196, для озера Чебаркуль – соответственно, 0,215 и 0,197. Чтобы пересчитать данные таблицы на сырой вес, необходимо значение для металла умножить на соответствующий коэффициент. После такого расчёта содержание Cd в мышечной ткани плотвы

в контрольном водоёме составило 0,174 мг/кг сырой массы, окуня – 0,173 мг/кг, т.е. концентрации были близки к нормативу, но не превышали его. Для озера Чебаркуль данные значения для плотвы и окуня составили соответственно 0,090 и 0,225 мг/кг. Таким образом, содержание кадмия в окуне озера Чебаркуль превысило нормативное значение.

Видовые и тканевые различия

Для более подробного анализа видовых и тканевых особенностей накопления металлов рыбами было проведено статистическое сравнение двух видов и рассчитаны отношения концентрации элемента в ткани окуня к концентрации в ткани плотвы.

На рис. 1 отношение полученного таким образом индекса $C_{\text{окунь}}/C_{\text{плотва}}$ более 1 (пунктирная линия) указывает на преобладание элемента в тканях окуня, менее 1 – в тканях плотвы. Видно, что в мышечной тка-

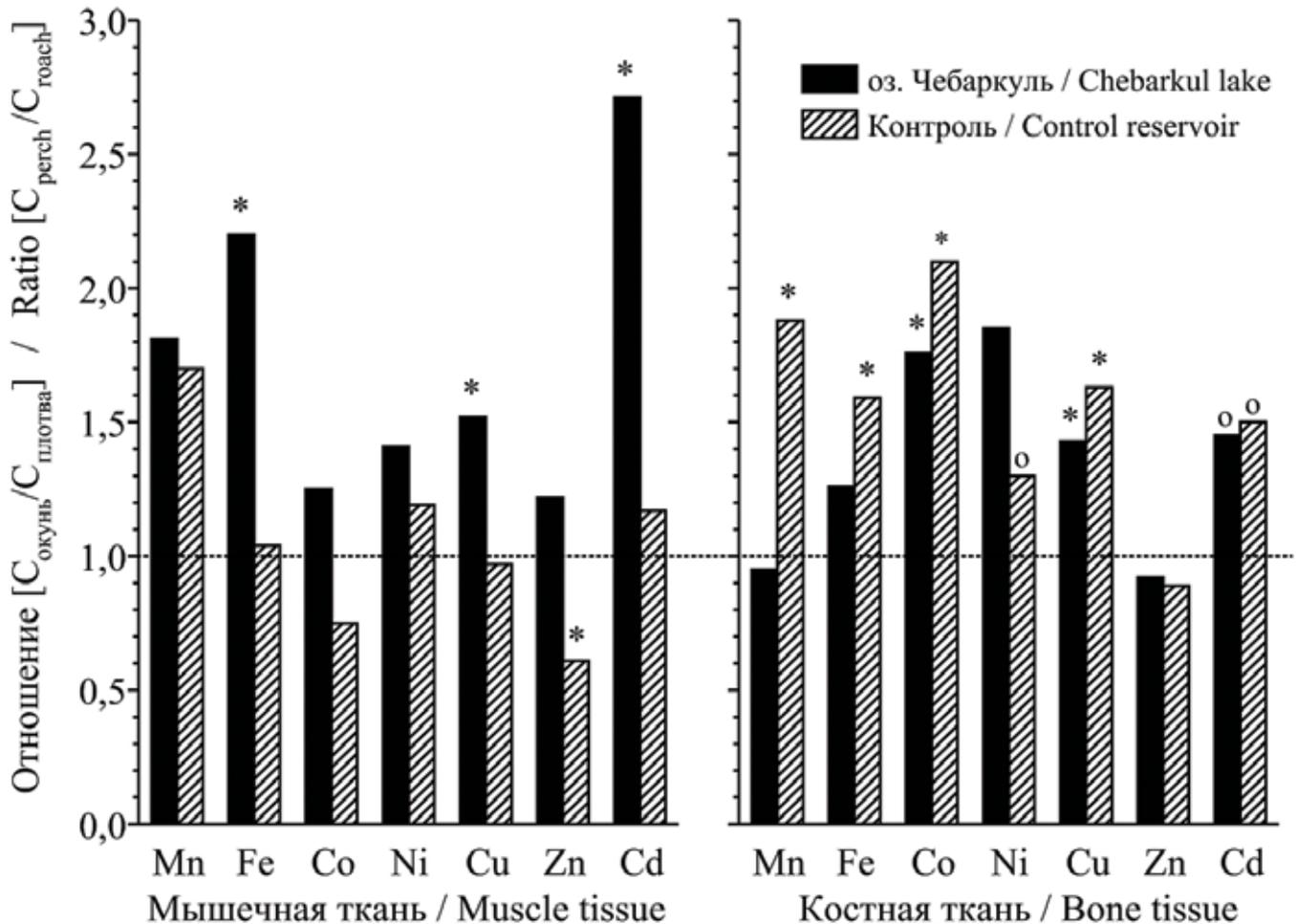


Рис. 1. Видовые и тканевые особенности накопления металлов у рыб двух водоёмов. Значимость видовых различий: * $P \leq 0,05$; $0,05 < P \leq 0,10$.

Fig. 1. Species and tissue features of metal accumulation in fish of two reservoirs. The significance of species differences: * $P \leq 0,05$; $0,05 < P \leq 0,10$.

ни рыб озера Чебаркуль по большинству элементов более высокие концентрации наблюдались у окуня, в том числе 3 статистически значимых по критерию Манна–Уитни (для Fe, Cu, Cd). В костной ткани ситуация была сходной и ещё более выраженной: статистически значимое и близкое к нему ($0,05 < P \leq 0,10$) преобладание элемента у окуня наблюдалось по 6 элементам из 7, причём по Co и Cu проявилось сразу в двух водоёмах.

Таким образом, в целом содержание ТМ в тканях окуня было выше. При этом видовые различия в накоплении металлов проявились в большей степени в костной ткани и слабо зависели от антропогенной нагрузки, тогда как накопление металлов в мышечной ткани было более избирательным. Накопление ряда ТМ в цепях питания является в водной токсикологии установленным фактом, поэтому более высокие значения у хищного вида – окуня – выглядят логичными. Вместе с тем известно, что разные металлы могут проявлять специфику, связанную как с видовыми, так и тканевыми особенностями. Биоаккумуляция в одной из наименее загрязнённой ткани – мышечной – обычно характерна для ксенобиотиков,

то есть для элементов, не имеющих установленной биологической функции в организме: ртути, мышьяка, кадмия, свинца и других [19]

Как видно из рис. 1, именно Cd наиболее активно накапливался в мясе окуня по сравнению с плотвой. В этом отношении полученные нами данные по Cd полностью соответствуют представлениям о поведении данного элемента в водоёмах [17, 19]

В отличие от ксенобиотиков, накопление в организме рыб микроэлементов носит более сложный характер, поскольку наряду с оптимальными концентрациями может наблюдаться как их дефицит, так и избыток [18]. Многими авторами отмечается сильная видовая специфика, связанная с характером питания, а также влияние на содержание ТМ типа ткани, возраста и пола [2, 10, 15]. В нашем случае, сходное с кадмием поведение (рис. 1) продемонстрировали железо и медь. В связи с этим есть основания считать, что концентрации Fe и Cu в озере Чебаркуль превышают оптимальные для изученных видов рыб значения и накапливаются по типу ксенобиотиков. Единственным элементом, показавшим отличные от всех других изученных металлов закономерности измене-

ния в видах и тканях рыб, был цинк. Он содержался в статистически значимо больших концентрациях в мясе плотвы контрольного водоёма ($U_{[10; 10]} = 3,0$, $P \ll 0,001$), и в незначимо больших – в костях плотвы из обоих водоёмов. Полагаем, что это связано с иным характером питания плотвы, в рационе которой преобладают растительные корма и зоопланктон.

Выводы

1. Рыбы из водоёмов, в различной степени подверженных антропогенной нагрузке, статистически значимо различаются содержанием ТМ. В 71 % случаев

более высокие значения обнаружены в рыбе озера Чебаркуль по сравнению с контрольным водоёмом.

2. Содержание Cd в мясе окуня из озера Чебаркуль превысило норматив (0,2 мг/кг) и составило 225 мг/кг.

3. Установлены видовые и тканевые особенности содержания ТМ в рыбах. Для большинства элементов более высокие концентрации наблюдались в тканях окуня, а цинка – в тканях плотвы. В костной ткани межвидовые различия выражены сильнее.

Литература

1. Атомно-абсорбционные методы определения токсичных элементов в пищевых продуктах и пищевом сырье. Методические указания. Утверждены: зам. гл. сан. врача РФ А. А. Монисов, 25.12.92. № 01-19/47-11. С. 27.
2. Ваганов А. С. Содержание тяжелых металлов в тканях и органах промысловых рыб Куйбышевского водохранилища // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 2. С.25–28.
3. Донник И. М., Шкуратова И. А., Кривоногова А. С., Исаева А. Г., Андрейко А. А., Хасина Э. И. Экологические аспекты животноводства в промышленных регионах // Ветеринария Кубани. 2010. № 6. С. 6–8.
4. Давыдова Н. А., Нохрин Д. Ю., Грибовский Ю. Г. Содержание металлов в рыбе озера Чебакуль (Челябинская область) // Проблемы ветеринарной санитарии, гигиены и экологии. 2015. № 1. С. 95–98.
5. Захаров С. Г. Экосистема озера Чебаркуль до и после падения метеорита : монография. Челябинск : «Край Ра», 2014. С. 56.
6. Комплексный доклад о состоянии окружающей среды Челябинской области в 2016 году. Министерство экологии Челябинской области. [Электронный ресурс]. URL : <http://www.mineco174.ru/htmlpages/Show/protectingthepublic/2016>.
7. Красноперова Е. А. Анализ содержания экотоксикантов в мышечной ткани рыб различных семейств // Матер. II нац. научно-практич. конф. «Состояние и пути развития аквакультуры в Российской Федерации в свете импортозамещения и обеспечения продовольственной безопасности страны». С-Пб. : ООО "ЦеСАин". 2017. С. 62–67.
8. Нохрин Д. Ю., Грибовский Ю. Г., Давыдова Н. А. Использование необъясненной изменчивости химического состава организмов для идентификации ксенобиотиков в экологических исследованиях // Экология. 2011. № 4. С. 369–375.
9. Нохрин Д. Ю., Корляков А. А., Грибовский Ю. Г., Давыдова Н. А. Экогеохимическая характеристика пруда на Безымянной балке (Челябинская область) // Матер. Междунар. научно-практич. конф., посвященной 100-летию со дня рождения Заслуженного деятеля науки РСФСР, доктора ветеринарных наук, профессора Кабыша Андрея Александровича. Троицк : Южно-Уральский ГАУ. 2017. С. 299–305.
10. Попов П. А., Андросова Н. В. Содержание тяжелых металлов в мышечной ткани рыб из водоемов бассейна реки Оби // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2014. № 4. С. 108–122.
11. Юдин М. Ф., Таирова А. Р., Красноперова Е. А. Особенности накопления и распределения тяжелых металлов в системе "вода – донные отложения – гидробионты". Троицк : Южно-Уральский ГАУ. 2014. С. 214.
12. Farkas A., Salánki J., Specziár A. Metal pollution as health indicator of lake ecosystems // International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health. 2001. Vol. 14, No. 2. P. 163–170.
13. Hammer O., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. No. 1. P. 1–9.
14. Ismail I., Saleh I. M. Analysis of heavy metals in water and fish (Tilapia sp.) samples from Tasik Mutiara, Puchong // The Malaysian Journal of Analytical Sciences. 2012. Vol. 16, No. 3. P. 346–352.
15. Literature review for biological monitoring of heavy metals in aquatic environments // MTND Project 4.7.2. North Vancouver: E.V.S. Consultants Limited. 1990. P. 127.
16. Njogu P. M., Keriko J. M., Wanjau R. N. Distribution of heavy metals in various lake matrices; water, soil, fish and sediments: a case study of the lake Naivasha Basin, Kenya // JAGST. 2011. Vol. 13, No. 1. P. 91–106.
17. Perera P.A.C.T., Kodithuwakku S. P., Sundarabarathy T. V., Edirisinghe U. Bioaccumulation of Cadmium in Freshwater Fish: An Environmental Perspective // Insight Ecology. 2015. Vol. 4, No. 1. P. 1–12.

18. Wood C. M., Farrell A. P., Brauner C. J. Homeostasis and toxicology of essential metals. Fish physiology series. V. 31A. NY : Academic Press. 2012 (a). P. 497.
19. Wood C. M., Farrell A. P., Brauner C. J. Homeostasis and toxicology of non-essential metals. Fish physiology series. Vol. 31B. NY : Academic Press. 2012 (b). P. 507.

References

1. Atomic absorption methods for the determination of toxic elements in food products and food raw materials. Methodical instructions. Approved: Ch. san. doctor of the Russian Federation A.A. Monisov, December 25, 1992, No. 01–19 / 47–11. P. 27.
2. Vaganov A. S. The content of heavy metals in the tissues and organs of commercial fish of the Kuibyshev reservoir // Bulletin of the Nizhny Novgorod University. 2011. No. 2. P. 25–28.
3. Donnik I. M., Shkuratova I. A., Krivonogova A.S., Isaeva A. G., Andreiko A. A., Hasina E. I. Ecological aspects of animal husbandry in industrial regions // Veterinariya Kubani. 2010. No. 6. P. 6–8.
4. Davydova N. A., Nokhrin D. Yu., Gribovsky Yu. G. The content of metals in the fish of Lake Chebakul (Chelyabinsk region) // Problemy veterinarnoj sanitarii, gigieny i jekologii. 2015. No. 1. P. 95–98.
5. Zakharov S. G. Ecosystem of Lake Chebarkul before and after the fall of the meteorite: The monograph. Chelyabinsk : "Kraj Ra". 2014. P. 56.
6. Ministry of Ecology of the Chelyabinsk region. Comprehensive report on the state of the environment of the Chelyabinsk region in 2016. URL: <http://www.minecol174.ru/htmlpages/Show/protectingthepublic/2016>.
7. Krasnoperova E. A. Analysis of the content of ecotoxicants in the muscle tissue of fish of different families // Mater. II nat. scientific and practical conf. "Status and development of aquaculture in the Russian Federation in the light of import substitution and ensuring the country's food security". S-Pbg : "TseSain". 2017. P. 62–67.
8. Nokhrin D. Yu., Gribovskii Yu. G., Davydova N. A. Using unexplained variation in the chemical composition of organisms for identification of xenobiotics in ecological studies // Russian Journal of Ecology. 2011. Vol. 42, No. 5. P. 407–413.
9. Nokhrin D. Yu., Korlyakov A. A., Gribovsky Yu. G., Davydova N. A. Ecogeochemical characteristics of the pond on the Bezmyannaya Balka (Chelyabinsk Region) // Mater. Intern. scientific and conf. devoted to the 100th anniversary of the birth of the Honored Scientist of the RSFSR, Doctor of Veterinary Sciences, Professor Kabysch Andrei Alexandrovich. Troitsk : South Ural State University. 2017. P. 299–305.
10. Popov P. A., Androsova N. V. The content of heavy metals in the muscle tissue of fish from the reservoirs of the Ob River basin // Bulletin of Tomsk State University. Biology. 2014. No. 4. P. 108–122.
11. Yudin M. F., Tairova A. R., Krasnoperova E. A. Features of accumulation and distribution of heavy metals in the system "water – bottom sediments – hydrobionts". Troitsk : South Ural State Agrarian University. 2014. P. 214.
12. Farkas A., Salánki J., Specziár A. Metal pollution as health indicator of lake ecosystems // International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health. 2001. Vol. 14, No. 2. P. 163–170.
13. Hammer O., Harper D. A. T., Ryan P. D. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. No. 1. P. 1–9.
14. Ismail I., Saleh I. M. Analysis of heavy metals in water and fish (*Tilapia* sp.) samples from Tasik Mutiara, Puchong // The Malaysian Journal of Analytical Sciences. 2012. Vol. 16, No. 3. P. 346–352.
15. Literature review for biological monitoring of heavy metals in aquatic environments // MTND Project 4.7.2. North Vancouver: E.V.S. Consultants Limited. 1990. P. 127.
16. Njogu P. M., Keriko J. M., Wanjau R. N. Distribution of heavy metals in various lake matrices; water, soil, fish and sediments: a case study of the lake Naivasha Basin, Kenya // JAGST. 2011. Vol. 13, No. 1. P. 91–106.
17. Perera P.A.C.T., Kodithuwakku S. P., Sundarabarathy T. V., Edirisinghe U. Bioaccumulation of Cadmium in Freshwater Fish: An Environmental Perspective // Insight Ecology. 2015. Vol. 4, No. 1. P. 1–12.
18. Wood C. M., Farrell A. P., Brauner C. J. Homeostasis and toxicology of essential metals. Fish physiology series. V. 31A. NY : Academic Press. 2012 (a). P. 497.
19. Wood C. M., Farrell A. P., Brauner C. J. Homeostasis and toxicology of non-essential metals. Fish physiology series. Vol. 31B. NY : Academic Press. 2012 (b). P. 507.