

## Биоаккумуляция тяжёлых металлов и других токсичных элементов в мышцах рыб бассейна р. Волги

© 2023. А. В. Горбунов<sup>1</sup>, с. н. с., Б. В. Ермолаев<sup>1</sup>, н. с.,  
Д. Б. Петренко<sup>1,2</sup>, к. х. н., н. с., О. И. Окина<sup>1</sup>, к. т. н., в. н. с.,  
Г. А. Грановская<sup>1</sup>, главный специалист,

<sup>1</sup>Геологический институт Российской академии наук,  
119017, Россия, г. Москва, Пыжевский пер., д. 7,

<sup>2</sup>Государственный университет просвещения,  
141014, Россия, г. Мытищи, ул. Веры Волошиной, д. 24,  
e-mail: anatolygor@yandex.ru, dbpetrenko@yandex.ru

Целью настоящей работы было изучение накопления тяжёлых металлов и токсичных элементов в мышцах основных промысловых рыб бассейна р. Волги. Отбор образцов проводили на всём протяжении р. Волги, в районах, которые характеризуются различной степенью развития промышленности. В процессе проведения работы были отобраны образцы тканей основных видов промысловых рыб (всего около 300 образцов). Анализ отобранного материала проведён с помощью масс-спектрометрии с индукционно-связанной плазмой, атомной абсорбции с атомизацией в пламени и атомной абсорбции с «холодным паром». На основании этого анализа определены уровни накопления Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Sr, Cd, Sb, I, Hg, Pb в мышцах основных видов промысловых рыб. Приведены графики распределения концентрации элементов в мышцах окуня в зависимости от района вылова рыбы: максимальная концентрация суммы токсичных элементов в мышцах окуня характерна для Рыбинского водохранилища и района посёлка Цаган-Аман, а минимальная – для верховьев Волги и дельты. Оценена зависимость накопления в мышцах окуня As, Cd, Hg, Se, I и Br от массы рыбы. Обнаружено, что концентрация Hg и Se в мышцах окуня прямо пропорционально зависит от массы рыбы.

**Ключевые слова:** тяжёлые металлы, токсичные элементы, биоаккумуляция, ткани рыб, особенности накопления, р. Волга.

## Bioaccumulation of heavy metals and other toxic elements in the muscles of fish in the Volga River basin

© 2023. A. V. Gorbunov<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-7794-100X<sup>?</sup>  
B. V. Ermolaev<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-9072-312X<sup>?</sup>, D. B. Petrenko<sup>1,2</sup> ORCID: 0000-0003-0640-5159<sup>?</sup>  
O. I. Okina<sup>1</sup> ORCID: 0000-0002-1947-4551<sup>?</sup>, G. A. Granovskaya<sup>1</sup> ORCID: 0000-0001-6162-9492<sup>?</sup>

<sup>1</sup>Geological Institute, Russian Academy of Sciences,  
7, Pyzhevsky Pereulok, Moscow, Russia, 119017,

<sup>2</sup>State University of Enlightenment,  
24, Very Voloshinoy St., Mytishchi, Russia, 141014,

e-mail: anatolygor@yandex.ru, dbpetrenko@yandex.ru

The purpose of this work was to study the accumulation of heavy and toxic elements in the muscles of the main commercial fish of the Volga River basin. Sampling was carried out throughout the Volga River, in areas that are characterized by varying degrees of industrial development. In the course of the work, tissue samples of the main species of commercial fish were selected (about 300 samples in total). The analysis of the selected material was carried out by a set of methods: induction coupled plasma mass spectrometry, flame atomic absorption spectroscopy and cold steam atomic absorption. Based on this analysis, the levels of accumulation of Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Sr, Cd, Sb, I, Hg, Pb in the muscles of the main species of commercial fish were determined. Graphs of the distribution of the concentration of elements in the muscles of perch depending on the area of fishing are given: the maximum concentration of the sum of toxic elements in the muscles of perch is characteristic of the Rybinsk reservoir and the area of the village of Tsagan-Aman, and the minimum – for the upper Volga and delta. The dependence of accumulation of As, Cd, Hg, Se, I and Br in the muscles of perch on the mass of fish has been assessed. It was found that the concentration of Hg and Se in the muscles of the perch is directly proportional to the weight of the fish.

**Keywords:** heavy metals, toxic elements, bioaccumulation, fish tissues, accumulation features, the Volga River.

Загрязнение природной среды представляет серьезную опасность для биосферы. Антропогенное воздействие приводит к поступлению в водоёмы огромного количества токсических веществ, в том числе тяжёлых металлов. В настоящее время токсичными (в зависимости от уровня концентрации) считаются соединения Cr, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Sb, Hg и Pb. Для тяжёлых металлов в принципе не существует механизмов самоочищения – они лишь перераспределяются из одного резервуара в другой, взаимодействуя с различными категориями живых организмов. Рыбы являются конечными звеньями трофических цепей в водных экосистемах. Именно поэтому в рыбах следует ожидать максимального накопления токсичных веществ. К настоящему моменту накоплен значительный объём данных об их содержании в тканях рыб в различных регионах мира, необходимый для выполнения мониторинга химического состояния водной среды, контроля качества рыбной продукции и оценки поступления токсикантов в организм человека с пищей [1–3].

Достаточно хорошо изучено накопление Hg [4–7] в мышцах рыб Волжских водохранилищ, дельты р. Волги, оз. Байкал. Показано, что аккумуляция ртути рыбами имеет видовую специфику, в частности в тканях хищных рыб – кумже, щуке и окуне содержание ртути выше, чем в бентофагах – сигах и леще [8]. В некоторых случаях – это уровень концентрации, опасный для здоровья человека. Имеются также сведения о концентрации в тканях рыб некоторых токсичных и эссенциальных элементов – Cr, Ni, Fe, Co, Cu, Zn, Se, I [9–14]. Однако в этих сведениях, как правило, отсутствуют данные о концентрации таких токсикантов, как As, Cd, Sb и Pb.

Одним из наиболее значительных источников пресноводной рыбы в европейской части России является р. Волга. Следует отметить, что для областей, относящихся ко всему течению Волги, характерно присутствие антропогенных источников загрязнения. К этим источникам можно отнести всю промышленную агломерацию, расположенную на берегах р. Волги, в которой представлена весьма широкая линейка промышленного производства. Согласно статистическим данным [15–17], в Волжском регионе регулярно потребляют рыбу в среднем до 32% от опрошенных респондентов, а 58% потребляют рыбу не реже 1–2 раз в неделю. Следует отметить, что это официальные данные, основанные на объёмах продаж рыбы и рыбопродуктов через торговые сети. Учёт

объёма индивидуального вылова и потребления рыбы отсутствует полностью. При этом следует отметить, что по неофициальным данным потребление рыбы, полученной в результате индивидуального вылова в Волге, составляет от 18 до 80% от официальных статистических данных. В сумме это достаточно большая часть рыбы и рыбной продукции, потребляемой в регионе, поэтому весьма актуальной является оценка уровня накопления токсичных элементов в тканях рыб, наиболее распространённых в Волжском бассейне.

Цель настоящей работы: оценить накопление тяжёлых металлов и других токсичных элементов в тканях рыбы, выловленной в бассейне р. Волги, и изучить особенности этого накопления некоторыми видами рыб.

### Материалы и методы исследования

Основными промысловыми видами рыб в Волжском бассейне являются плотва, лещ, окунь, сазан, сом, судак и щука [6, 16, 17]. Отлов рыбы производили в течение весенне-летне-осенних сезонов 2019–2020 гг. в основном непосредственно участниками данного проекта, частично недостаток рыбы восполнялся покупкой у местных рыбаков. Районы отбора образцов показаны на рисунке 1. Район № 1 – участок г. Кимры – г. Калязин; район № 2 – Рыбинское водохранилище; район

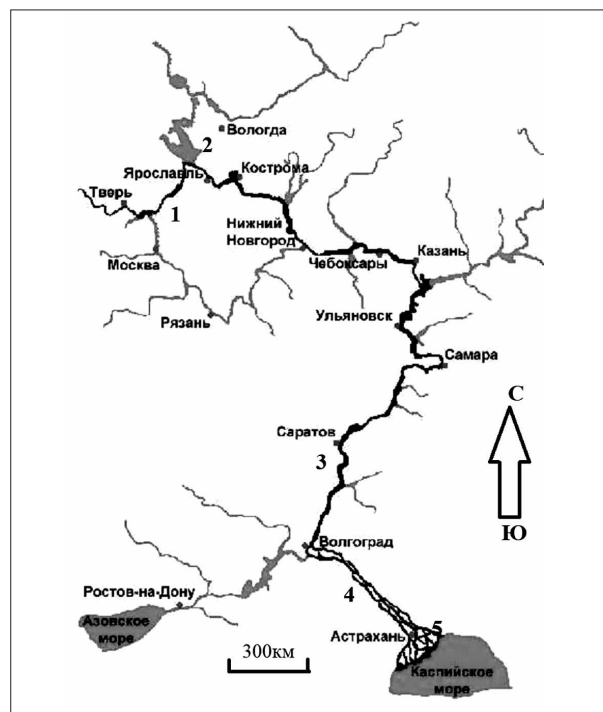


Рис. 1. Районы отбора образцов рыбы (участки 1–5)  
Fig. 1. Fish sampling areas (points 1–5)

Таблица 1 / Table 1

Общий список отобранных образцов / General list of selected samples

№ п/п No.	Объект / Object	Масса, г / Weight, g	
		min-max	средняя / average
1	Лещ ( <i>Abramis brama</i> ), n = 39	100-560	340
2	Окунь ( <i>Perca fluviatilis</i> ), n = 86	12-332	161
3	Плотва ( <i>Rutilus</i> ), n = 28	49-96	75
4	Сазан ( <i>Cyprinus carpio</i> ), n = 17	450-1100	743
5	Сом ( <i>Silurus glanis</i> ), n = 13	1000-2600	1750
6	Судак ( <i>Sander Volgensis</i> ), n = 35	156-533	331
7	Щука ( <i>Esox lucius</i> ), n = 21	90-2700	909

№ 3 – пос. Чардым – г. Саратов; район № 4 – пос. Цаган-Аман – база Лунёвка; район № 5 – база Гандурино. Общий список отобранных образцов с указанием массы рыбы приведён в таблице 1.

Образцы отбирали в полиэтиленовые пакеты типа зип-лок, очищали от внешних загрязнений и промывали дистиллированной водой. Для длительной транспортировки образцы замораживали при температуре -20 °С. Всего было отобрано около 300 образцов. При подготовке к анализу рыбу размораживали и помещали в эмалированные кюветы, после этого вырезали с левой стороны, начиная от спинного плавника до начала рёбер вдоль тела 2–4 г скелетных мышц. Весь инструмент и стеклянную посуду мыли 5–10% азотной кислотой и ополаскивали дистиллированной водой. На анализ образцы поступали с естественным процентом влажности [4, 5].

Содержание Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Sr, Cd, Sb, I, Pb в пробах определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП-МС) на масс-спектрометре Element 2 (Thermo Fisher Scientific of GmbH, Германия), содержание Fe – методом атомно-абсорбционной спектрометрии с атомизацией в пламени (ПА-ААС) на спектрометре Квант-2а (КОРТЭЖ, Россия), содержание Hg – методом атомно-абсорбционной спектрометрии холодного пара на анализаторе Юлия 5К, ООО «НПО «Метрология», Россия.

Пробоподготовку образцов к определению микроэлементов методами ИСП-МС и ПА-ААС осуществляли методом микроволнового разложения смесью азотной кислоты и пероксида водорода. Разложение проводили в микроволновой системе резонаторного типа MarsX-MarsX-press (SEM Corp., США). Для подготовки проб использовали сосуды ХР-1500 из фторполимерного материала объёмом 100 мл. Пробоподготовку к определению

ртути в образцах осуществляли методом кислотной минерализации в соответствии с МУК 4.1.1472-03.

Качество полученных аналитических данных по всем элементам контролировали путём анализа стандартных образцов состава мышечной ткани байкальского окуня БОК-2 (ГСО 9055-2008), гомогената ткани рыб (IAEA-436, IAEA-407), мышечной ткани рыб (ERM-BB422) и «холостных» проб.

### Результаты и обсуждение

Основным критерием качества рыбы и рыбной продукции служит значение предельно допустимой концентрации (ПДК) токсичных элементов в мясе рыб. Результаты анализа отобранных образцов приведены в таблице 2.

Анализ полученных результатов показал, что концентрация практически всех перечисленных элементов в мышцах плотвы, леща, окуня, сазана, сома, судака и щуки находится в пределах ПДК. Данные о концентрации Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, представленные в таблице, достаточно хорошо согласуются с литературными источниками [9, 10, 12, 13]. Концентрация Se и I, показанная в таблице 2, практически находится в диапазоне значений, приведённых для Рыбинского водохранилища [11]: I – 0,215–0,557 мг/кг; Se – 0,101–0,340 мг/кг. Концентрация Hg в мышцах рыб в основном также находится в пределах ПДК. Исключение составляет концентрация Hg в мышцах сома: в максимуме эти значения превышают ПДК для хищных рыб. Концентрация в икре окуня Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu и Zn практически соответствует концентрации этих элементов в мышцах рыбы. Элементы-токсиканты в икре окуня накапливаются разнонаправлено: так, концентрация As и Hg существенно ниже (Hg в 24 раза), чем в мышцах, а концентрация Cd в 10 раз выше, чем в мышцах рыбы.

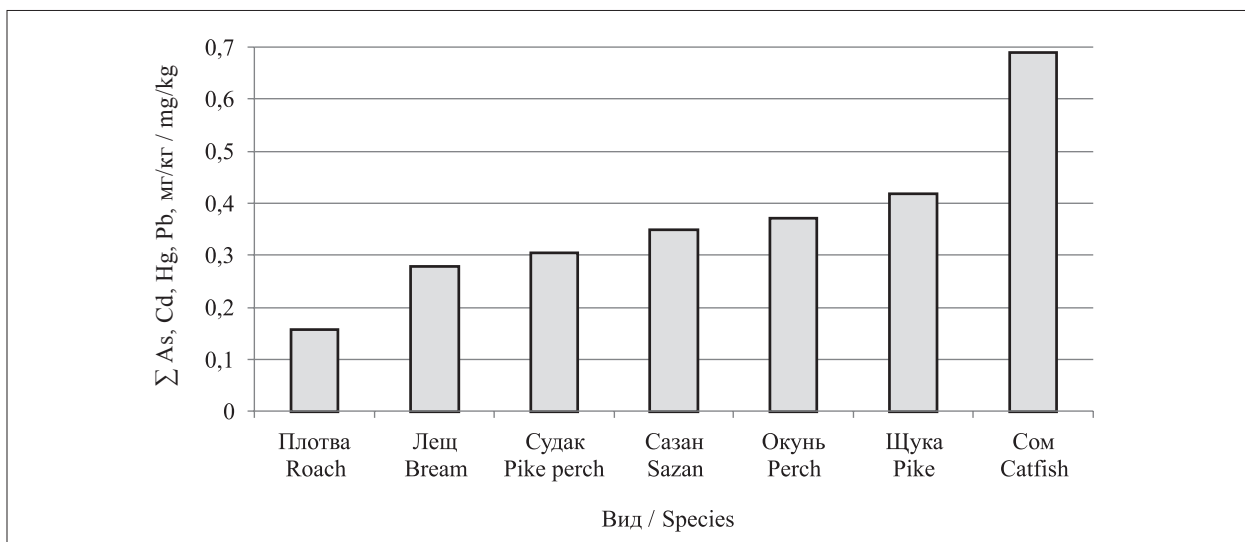
Таблица 2 / Table 2

Концентрация тяжёлых металлов и других токсичных элементов в мышцах рыб бассейна р. Волги, мг/кг  
Concentration of heavy metals and other toxic elements in the muscles of fish of the Volga river basin, mg/kg

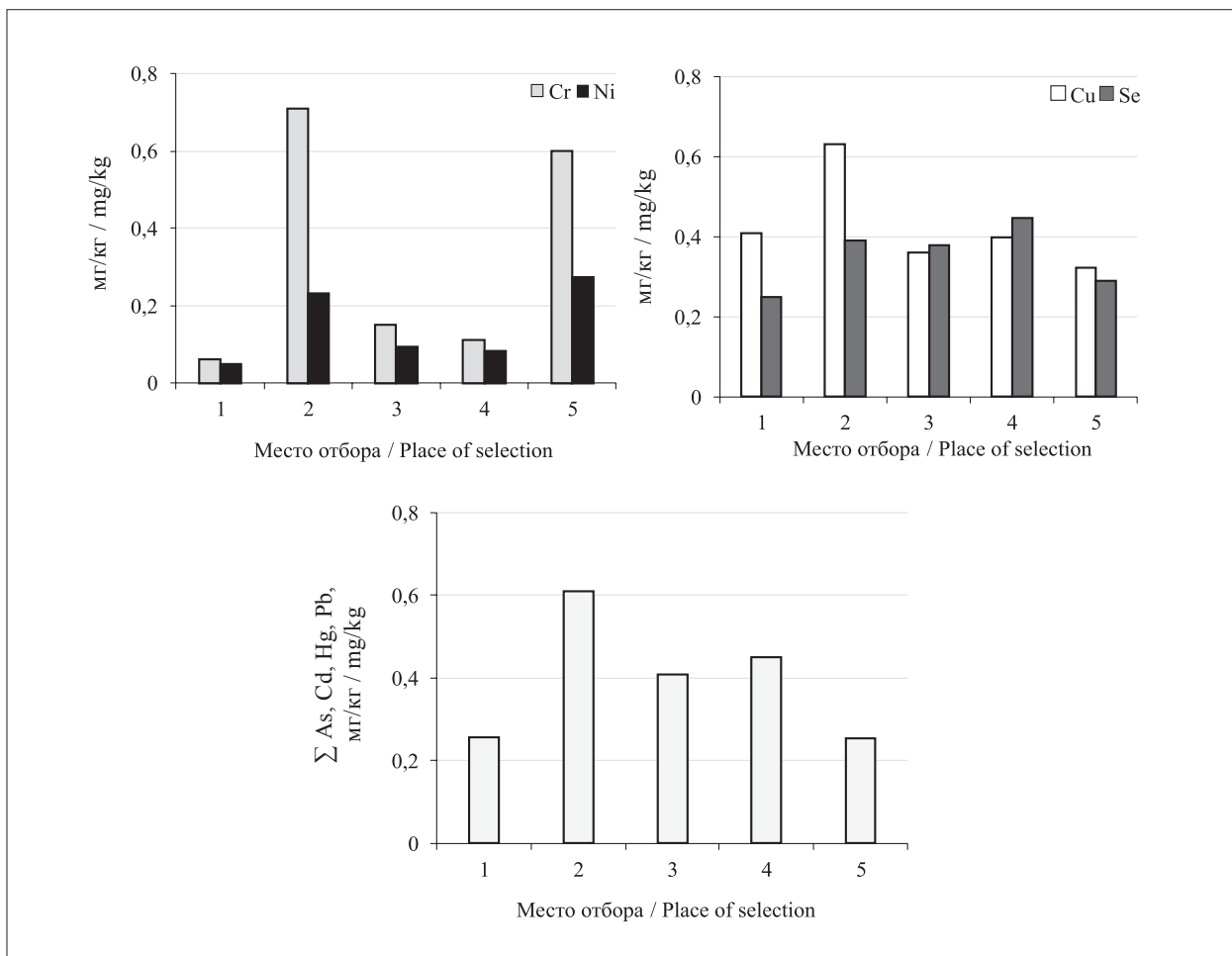
Элемент Element	Объект / Object										ПДК* MPC
	Судак <i>Sander</i>	Щука <i>Esox lucius</i>	Окунь <i>Perca fluviatilis</i>	Икра окуня <i>Perch caviar</i>	Сом <i>Silurus glanis</i>	Сазан <i>Cyprinus carpio</i>	Плотва <i>Rutilus</i>	Лещ <i>Abramis brama</i>			
Cr	0,24±0,22***	0,32±0,21	0,44±0,31	0,37±0,17	0,13±0,05	0,25±0,08	0,15±0,11	0,16±0,07	1(0,04**)		
Mn	0,75±0,32	1,5±0,9	1,03±0,97	1,7±0,7	0,26±0,12	1,4±0,8	0,34±0,15	1,3±0,7	10(2,0**)		
Fe	5,0±0,7	9,0±3,2	5,3±3,4	5,24±1,7	3,5±1,0	13±5	2,1±1,1	29±16	30(10**)		
Co	0,005±0,001	0,029±0,01	0,005±0,003	0,011±0,01	0,009±0,005	0,017±0,011	0,005±0,003	0,04±0,03	0,5(0,01**)		
Ni	0,081±0,022	0,076±0,02	0,08±0,06	0,068±0,04	0,08±0,06	0,09±0,06	0,052±0,030	0,12±0,07	0,5		
Cu	0,25±0,03	0,24±0,16	0,37±0,21	0,49±0,08	0,31±0,30	0,29±0,24	0,42±0,22	0,42±0,18	10(1,0**)		
Zn	8,52±2,3	22±10	14,3±13,7	12±7	8±5	56±12	5,5±1,3	5,5±3,8	40(12**)		
As	0,076±0,024	0,09±0,05	0,037±0,03	0,022±0,019	0,033±0,021	0,27±0,18	0,17±0,07	0,17±0,09	1,0		
Se	0,23±0,06	0,31±0,11	0,21±0,09	0,24±0,04	0,38±0,27	0,28±0,15	0,15±0,11	0,22±0,16	1(0,07**)		
Br	8,61±3,9	9,0±1,6	3,01±1,11	4,6±1,7	2,1±0,9	1,4±0,5	2,5±1,6	11±7	(3-8**)		
Sr	2,7±1,4	1,9±1,6	2,29±2,18	2,1±1,3	1,2±0,7	1,42±0,33	1,5±0,9	2,5±1,6	7		
Cd	0,004±0,002	0,003±0,002	0,003±0,001	0,032±0,020	0,005±0,003	0,006±0,004	0,006±0,004	0,006±0,005	0,2		
Sb	0,064±0,03	0,028±0,015	0,036±0,013	< 0,01	0,07±0,04	0,015±0,009	< 0,01	< 0,01	0,5		
I	0,48±0,19	0,42±0,16	0,23±0,08	< 0,1	0,53±0,24	0,37±0,24	0,21±0,12	0,31±0,18	(0,15**)		
Hg	0,12±0,07	0,26±0,09	0,19±0,06	0,008±0,005	0,52±0,31	0,25±0,18	0,09±0,04	0,21±0,11	0,4-0,6		
Pb	< 0,04	< 0,04	0,042±0,01	< 0,04	0,06±0,4	< 0,04	< 0,04	< 0,04	1		

Примечание: \* – ПДК согласно СанПиН 1.2.3685-21, СанПиН 2.3.2.1078-01; \*\* – суточная потребность, мг/сутки (MP 2.3.1.0253-21); \*\*\* – среднее значение ± стандартное отклонение.

Note: \* – MPC (SanPiN 1.2.3685-21, SanPiN 2.3.2.1078-01); \*\* – daily requirement, mg/day (MR 2.3.1.0253-21); \*\*\* – mean ± standard deviation.



**Рис. 2.** Накопление суммы токсичных элементов (As, Cd, Sb, Hg, Pb) в мышцах пресноводных рыб  
**Fig. 2.** Accumulation of the total amount of toxic elements (As, Cd, Sb, Hg, Pb) in the muscles of freshwater fish



**Рис. 3.** Распределение концентрации тяжёлых и токсичных элементов в мышцах окуня в зависимости от места отбора пробы. Здесь и на рисунке 4: 1 – Кимры; 2 – Рыбинское водохранилище; 3 – Саратов (Чардым); 4 – Цаган-Аман; 5 – дельта Волги  
**Fig. 3.** Distribution of the concentration of heavy and toxic elements in perch muscles depending on the sampling location. Here and in Figure 4: 1 – Kimry; 2 – Rybinskoye reservoir; 3 – Saratov (Chardym); 4 – Tsagan-Aman; 5 – Delta of the Volga River

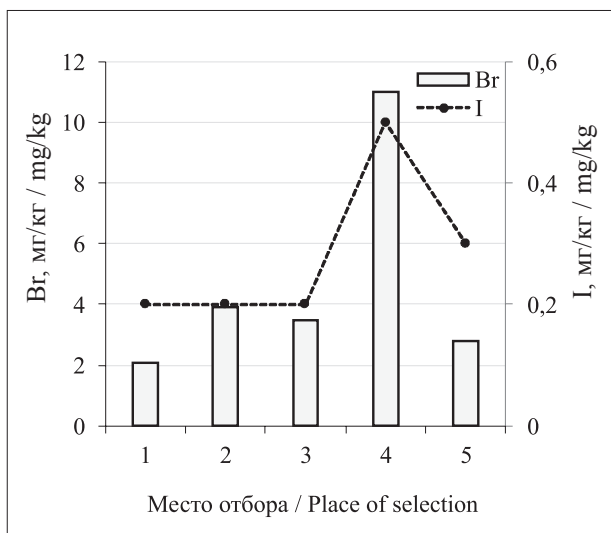


Рис. 4. Распределение концентрации Br и I в мышцах окуня в зависимости от места отбора пробы / Fig. 4. Distribution of Br and I concentrations in perch muscles depending on the sampling location

На рисунке 2 показан уровень накопления суммы токсичных элементов в мышцах различных видов пресноводных рыб. Эти графики позволяют расположить виды рыб по уровню накопления суммы токсичных элементов, а также Se и I по степени убывания в следующем по-

рядке: сом > щука > окунь, сазан > судак > лещ > плотва. Очевидно, что наибольший уровень накопления этих элементов характерен для типичных хищников – сома, щуки, судака, окуня.

Поскольку окунь в нашей работе имеет наиболее представительную выборку (табл. 1), была проведена оценка накопления в мышцах окуня Cr, Ni, Cu, Se, As, Sb, Hg, Pb, Br и I в зависимости от места отбора (вылова) образца. На рисунках 3 и 4 представлено распределение токсичных элементов, а также Br и I в мышцах окуня в зависимости от места вылова рыбы. Следует отметить достаточно высокие уровни накопления Cr, Ni, Cu, Se, As, Sb, Hg и Pb в мышцах окуня, выловленного на территории Рыбинского водохранилища. Минимальные уровни концентрации этих элементов характерны для Верхней Волги и района дельты Волги (Гандурино). Следует также отметить аномально высокое накопление Br и I в мышцах окуня в районе Цаган-Амана и достаточно высокий уровень накопления в этом районе As, Cd, Sb, Hg и Pb.

Из литературных источников известно, что в определённых условиях накопление токсичных элементов в мышцах рыбы носит закономерный характер. Например, описаны случаи, когда концентрации Br, I, Hg в мыш-

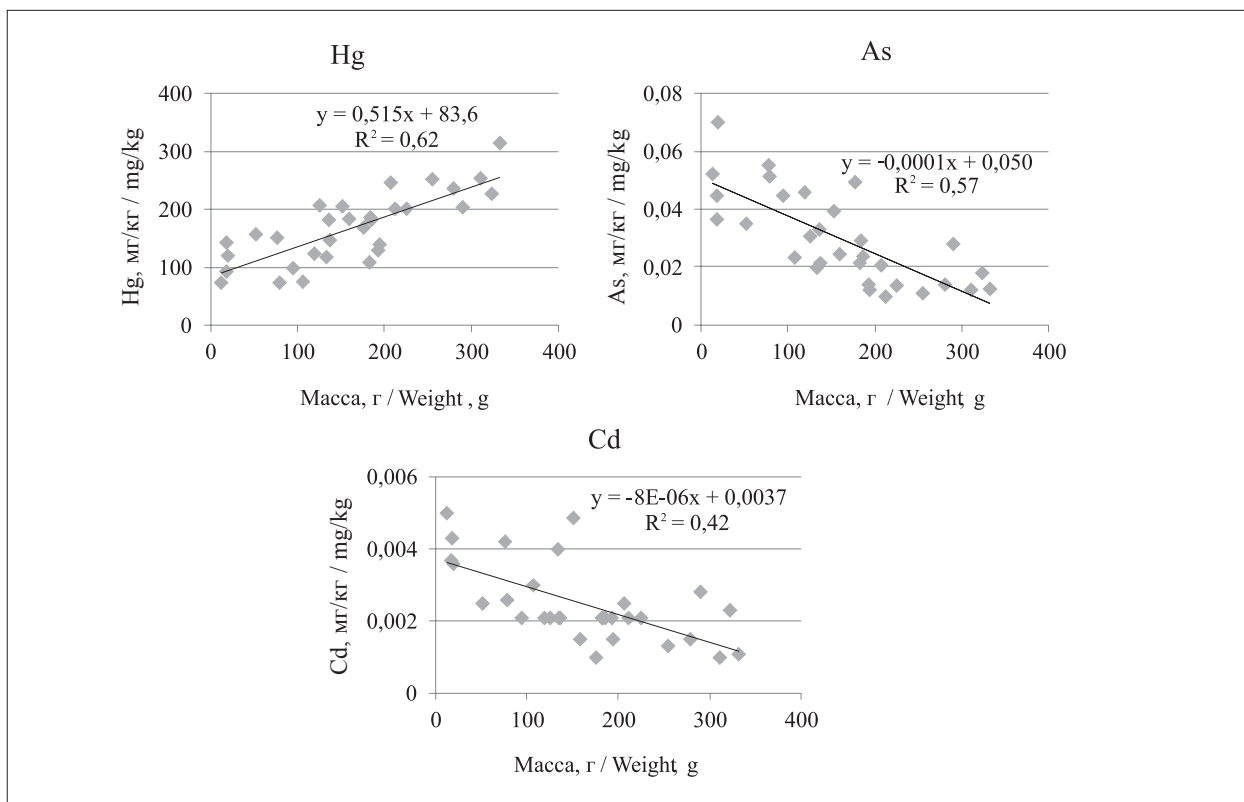
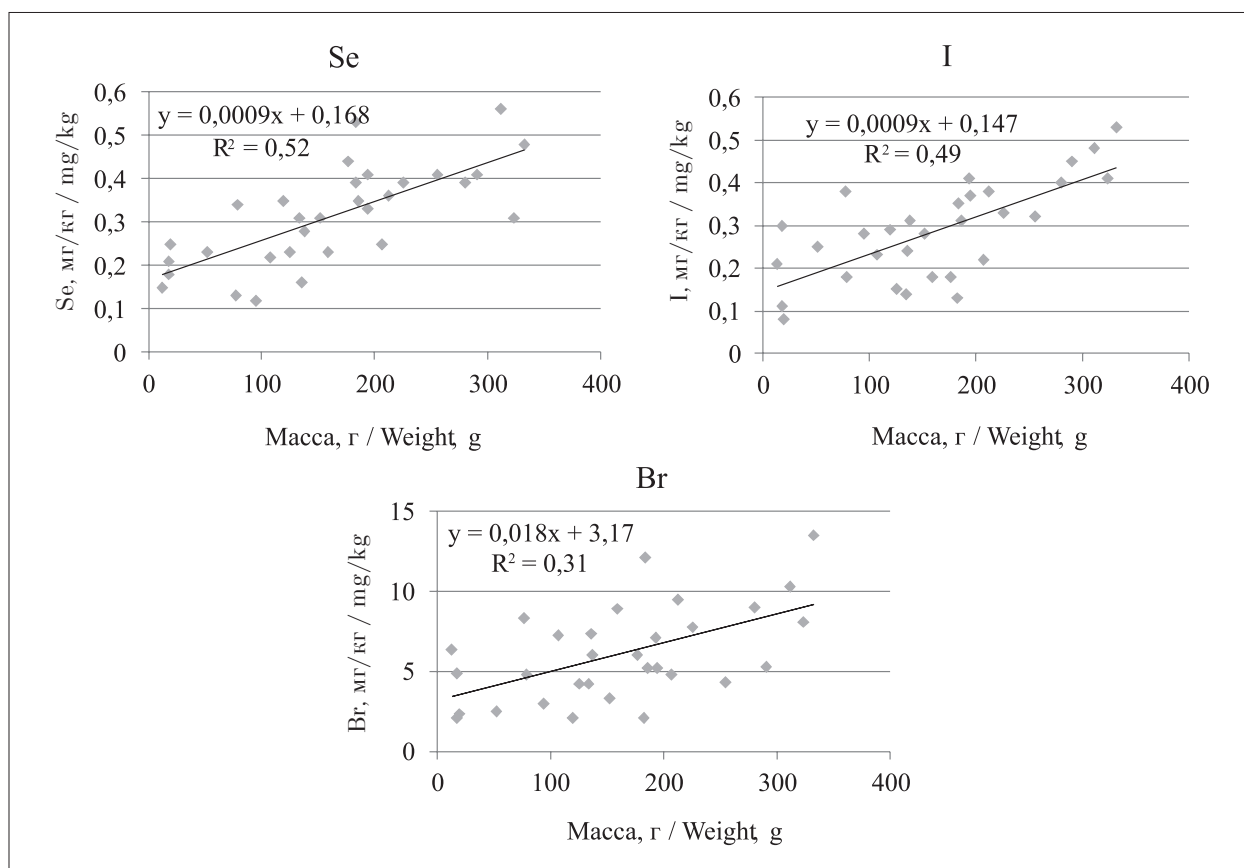


Рис. 5. Распределение Hg, As, Cd в мышцах окуня в зависимости от массы рыбы / Fig. 5. Distribution of Hg, As, Cd in perch muscles depending on fish weight



**Рис. 6.** Накопление Se, Br, I в мышцах окуня в зависимости от массы рыбы  
**Fig. 6.** Accumulation of Se, Br, I in perch muscles depending on fish weight

цах окуня находились в прямой зависимости от возраста или от массы рыбы [4, 5, 7]. Нами была проведена оценка накопления As, Cd, Hg, Se, Br, I в мышцах окуня в зависимости от массы рыбы.

На рисунке 5 приводится зависимость концентрации Hg, As, Cd в мышцах окуня от массы рыбы. Показано, что накопление Hg в мышцах окуня находится в прямой зависимости от массы рыбы при высокой степени достоверности аппроксимации линии тренда ( $R^2 = 0,62$ ). Расчёт коэффициента корреляции между концентрацией Hg в мышцах окуня и массой рыбы показал высокую степень зависимости данных показателей ( $R = 0,78$ ;  $p = 0,006$ ). Для остальных представленных элементов наблюдается не накопление, а уменьшение концентрации в мышцах при увеличении массы рыбы. При этом зависимость носит также прямо пропорциональный характер с низкой степенью достоверности аппроксимации линии тренда ( $R^2(As) = 0,57$ ;  $R^2(Cd) = 0,42$ ).

На рисунке 6 приведена оценка зависимости концентрации Se, Br, I в мышцах окуня от массы рыбы. График накопления Se по-

казывает наличие прямо пропорциональной зависимости при высокой степени достоверности аппроксимации линии тренда ( $R^2 = 0,52$ ), коэффициент корреляции составил  $R = 0,65$  ( $p = 0,007$ ), графики накопления I и Br также указывают на прямо пропорциональную зависимость, но с гораздо более низкой степенью достоверности аппроксимации линии тренда.

Учитывая всё сказанное выше, можно предположить, что концентрация любого элемента в тканях рыбы – это баланс между скоростью поступления данного элемента в организм рыбы и скоростью прироста массы тела рыбы. Очевидно, что при высокой скорости наращивания массы рыбы и низкой скорости поступления элемента, концентрация элемента в зависимости от массы будет падать и, наоборот, при низкой скорости роста и высокой скорости поступления элемента концентрация будет возрастать.

### Заключение

Полученные в ходе работы данные показали, что превышения ПДК тяжёлых метал-

лов и других токсичных элементов для всех исследованных видов рыб не обнаружено. Наибольшее значение концентрации токсичных элементов отмечаются для Рыбинского водохранилища и зоны Цаган-Амана, минимальные значения характерны для верхней Волги и дельты.

Накопление элементов в мышцах различных видов рыб носит дифференцированный характер: наибольший уровень накопления токсичных элементов характерен для сома, судака и щуки. Концентрации Hg и Se в мышцах окуня находятся в прямо пропорциональной зависимости от массы рыбы.

### Литература

1. Akila M., Anbalagan S., Lakshmisri N.M., Janaki V., Ramesh T., Merlin J.R., Kamala-Kannan S. Heavy metal accumulation in selected fish species from Pulicat Lake, India, and health risk assessment // *Environmental Technology & Innovation*. 2022. V. 27. Article No. 102744.

2. Melake B.A., Nkuba B., Groffen T., De Boeck G., Bervoets L. Distribution of metals in water, sediment and fish tissue. Consequences for human health risks due to fish consumption in Lake Hawassa, Ethiopia // *Science of the Total Environment*. 2022. V. 843. Article No. 156968.

3. Ai L., Ma B., Shao S., Zhang L. Heavy metals in Chinese freshwater fish: Levels, regional distribution, sources and health risk assessment // *Science of the Total Environment*. 2022. V. 853. Article No. 158455.

4. Комов В.Т., Степанова И.К., Гремячих В.А. Содержание ртути в мышцах рыб из водоёмов Северо-Запада России: причины интенсивного накопления и оценка негативного эффекта на состояние здоровья людей // *Актуальные проблемы водной токсикологии*. Борок: Институт биологии внутренних вод РАН, 2004. С. 99–123.

5. Немова Н.Н. Биохимические эффекты накопления ртути у рыб. М.: Наука, 2005. 161 с.

6. Пономаренко А.М. Эколого-рыбохозяйственные аспекты ртутного загрязнения водохранилищ: Диссертация на соискание учёной степени кандидата биологических наук. Казань, 2006. 116 с.

7. Горбунов А.В., Ляпунов С.М., Окина О.И., Шешуков В.С. Оценка поступления малых доз ртути в организм человека с пищей // *Экология человека*. 2017. № 10. С. 16–20.

8. Моисеенко Т.И., Гашкина Н.А. Биоаккумуляция ртути в рыбе как индикатор загрязнения воды // *Geochemistry International*. 2016. V. 54. P. 485–493.

9. Лопарева Т.Я., Шарипова О.А., Петрушенко Л.В. Уровень накопления токсикантов в мышечной ткани рыб в водных бассейнах Республики Казахстан // *Вестник Астраханского государственного технического университета*. Серия: Рыбное хозяйство. 2016. № 2. С. 115–122.

10. Махлун А.В., Ильясова Г.Х., Мусаев М.А., Вундцеттель М.Ф. Сравнительный анализ микроэлементного состава некоторых компонентов водных экосистем дельты Волги // *Физиология и биохимия гидробионтов*. Серия: Рыбное хозяйство. 2012. № 1. С. 149–153.

11. Кекина Е.Г., Голубкина Н.А., Кузьмина В.В., Баранов В.И., Хотимченко С.А. Содержание йода и селена в мышцах некоторых промысловых видов рыб Рыбинского водохранилища // *Микроэлементы в медицине*. 2009. Т. 10. № 3–4. С. 31–36.

12. Гилева Т.А., Костицына Н.В. Характеристика периферической крови и содержание тяжёлых металлов в органах и тканях окуня в водоёмах бассейна реки Кама // *Теоретическая и прикладная экология*. 2014. № 2. С. 46–51.

13. Ciesielski T., Pastukhov M.V., Fodor P., Bertenyi Z., Namiesnik J., Szefer P. Relationships and bioaccumulation of chemical elements in Baikal seal (*Phoca sibirica*) // *Environmental Pollution*. 2006. V. 139. No. 2. P. 372–384.

14. Черная Л.В., Ковальчук Л.А., Микшевич Н.В. Особенности биоаккумуляции тяжёлых и токсичных металлов в тканях большой ложноконской пиявки *Haemopis sanguisuga* L. в водных экосистемах Урала // *Теоретическая и прикладная экология*. 2022. № 3. С. 68–74.

15. Гершонков А.М., Меркулова Е.Ю. Анализ потребления основных продуктов питания по регионам Российской Федерации // *Социально-экономические явления и процессы*. 2014. Т. 9. № 11. С. 54–63.

16. Гузенко М.А. Состояние и тенденции развития продовольственной безопасности в Волгоградской области // *Terra Economicus*. 2011. Т. 9. № 1. Часть 2. С. 134–138.

17. Гуркина О.А., Тугулева Г.В. Исследование рынка рыбы и рыбопродуктов в Саратове // *Современные технологии в сельскохозяйственной науке и производстве: Сборник докладов Международной научно-практической конференции*. Саратов: ФГБНУ «НИИСХ Юго-Востока», 2016. С. 452–456.

### References

1. Akila M., Anbalagan S., Lakshmisri N.M., Janaki V., Ramesh T., Merlin J.R., Kamala-Kannan S. Heavy metal accumulation in selected fish species from Pulicat Lake, India, and health risk assessment // *Environmental Technology & Innovation*. 2022. V. 27. Article No. 102744. doi: 10.1016/j.eti.2022.102744

2. Melake B.A., Nkuba B., Groffen T., De Boeck G., Bervoets L. Distribution of metals in water, sediment and fish tissue. Consequences for human health risks due to fish consumption in Lake Hawassa, Ethiopia // *Science of the Total Environment*. 2022. V. 843. Article No. 156968. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156968

3. Ai L., Ma B., Shao S., Zhang L. Heavy metals in Chinese freshwater fish: Levels, regional distribution,



sources and health risk assessment // Science of the Total Environment. 2022. V. 853. Article No. 158455. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.158455

4. Komov V.T., Stepanova I.K., Gremyachikh V.A. Mercury content in the muscles of fish from the reservoirs of the North-West of Russia: reasons for intensive accumulation and assessment of the negative effect on human health // Actual problems of aquatic toxicology. Borok: Institut biologii vnutrennikh vod RAN, 2004. P. 99–123 (in Russian).

5. Nemova N.N. Biochemical effects of mercury accumulation in fish. Moskva: Nauka, 2005. 161 p. (in Russian).

6. Ponomarenko A.M. Ecological and fishery aspects of mercury pollution of reservoirs: Dissertation for the degree of candidate of biological sciences. Kazan, 2006. 116 p. (in Russian).

7. Gorbunov A.V., Lyapunov S.M., Okina O.I., Sheshukov V.S. Assessment of the intake of small doses of mercury into the human body with food // Human Ecology. 2017. No. 10. P. 16–20 (in Russian). doi: 10.33396/1728-0869-2017-10-16-20

8. Moiseenko T.I., Gashkina N.A. Bioaccumulation of mercury in fish as indicator of water pollution // Geochemistry International. 2016. V. 54. P. 485–493. doi: 10.1134/S0016702916060045

9. Lopareva T.Ya., Sharipova O.A., Petrushenko L.V. The level of accumulation of toxicants in the muscle tissue of fish in the water basins of the Republic of Kazakhstan // Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Rybnoe khozyaystvo. 2016. No. 2. P. 115–122 (in Russian).

10. Makhlyn A.V., Pyasova G.H., Musaev M.A., Wundzettel M.F. Comparative analysis of the trace element composition of some components of aquatic ecosystems of the Volga Delta // Fiziologiya i biokhimiya gidrobiontov. Seriya: Rybnoe khozyaystvo. 2012. No. 1. P. 149–153 (in Russian).

11. Kekina E.G., Golubkina N.A., Kuz'mina V.V., Baranov V.I., Khotimchenko S.A. The content of iodine and selenium in the muscles of some commercial fish species of the Rybinsk reservoir // Microelements in Medicine. 2009. V. 10. No. 3–4. P. 31–36 (in Russian).

12. Gileva T.A., Kostitsyna N.V. Characteristics of peripheral blood and the content of heavy metals in the organs and tissues of perch in water bodies of the Kama River basin // Theoretical and Applied Ecology. 2014. No. 2. P. 46–51 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2014-2-046-051

13. Ciesielski T., Pastukhov M.V., Fodor P., Bertenyi Z., Namiesnik J., Szefer P. Relationships and bioaccumulation of chemical elements in Baikal seal (*Phoca sibirica*) // Environmental Pollution. 2006. V. 139. No. 2. P. 372–384 (in Russian). doi: 10.1016/j.envpol.2004.12.040

14. Chernaya L.V., Kovalchuk L.A., Mikshevich N.V. Features of bioaccumulation of heavy and toxic metals in the tissues of the great False Dragon leech *Haemopsis sanguisuga* L. in the aquatic ecosystems of the Urals // Theoretical and Applied Ecology. 2022. No. 3. P. 68–74 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-3-068-074

15. Gershonkov A.M., Merkulova E.Yu. Analysis of the consumption of basic food products by regions of the Russian Federation // Socio-economic Phenomena and Processes. 2014. V. 9. No. 11. P. 54–63 (in Russian).

16. Guzenko M.A. State and trends in the development of food security in the Volgograd region // Terra Economicus. 2011. V. 9. No. 1. Part 2. P. 134–138 (in Russian).

17. Gurkina O.A., Tuguleva G.V. Market research of fish and fish products in Saratov // Modern technologies in agricultural science and production: Sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno- prakticheskoy konferentsii, 2016. P. 452–456 (in Russian).