

КОМПЛЕКСНАЯ ОЦЕНКА ЭКОТОКСИКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ СРЕДНЕЙ И НИЖНЕЙ ВОЛГИ МЕТОДАМИ БИОДИАГНОСТИКИ И АНАЛИЗА СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ

Г. М. Чуйко*, В. А. Подгорная, И. И. Томилина, Р. А. Ложкина, В. В. Законнов, М. В. Гапеева

*Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН,
152742 пос. Борок, Ярославская обл., Некоузский р-н, e-mail: *gchuiko@ibiw.ru*

Поступила в редакцию 11.09.2022

Проведена комплексная оценка экотоксикологического состояния водохранилищ Средней и Нижней Волги методом биодиагностики (биомаркирование, биотестирование) и анализа содержания тяжелых металлов в донных отложениях. Установлена пространственная вариабельность содержания тяжелых металлов в донных отложениях и значений биомаркеров состояния оксидативного стресса в печени леща из разных водохранилищ. Определена токсичность донных отложений. По результатам проведенного исследования водохранилища по степени ухудшения экотоксикологического состояния располагаются в следующем ряду: Горьковское > Волгоградское = Саратовское > Куйбышевское > Чебоксарское. Участок Рыбинского водохранилища в районе ст. 1 можно принять за фоновый по антропогенной нагрузке.

Ключевые слова: биомаркирование, биотестирование, оксидативный стресс, лещ, водохранилища.

DOI: 10.47021/0320-3557-2022-89-96

ВВЕДЕНИЕ

Река Волга – одна из крупнейших рек на Земле и самая большая по водности, площади бассейна и длине в Европе, а также крупнейшая в мире река, впадающая в бессточный (внутренний) водоем. Она является основной водной артерией Европейской части России и имеет большое социально-экономическое, культурно-историческое и экологическое значение. В водосборном бассейне Волги расположено большое количество коммунально-промышленных и сельскохозяйственных зон, отходы деятельности которых загрязняют реку, ухудшают качество ее воды, наносят вред водным организмам и представляют потенциальную опасность для здоровья человека. В последнее десятилетие проблема экологического состояния Волги вышла на общегосударственный уровень и на ее решение направлен приоритетный Федеральный проект “Оздоровление Волги”, одним из направлений которого является оценка современного экотоксикологического состояния реки.

На современном этапе развития водной токсикологии для того, чтобы получить более полную картину экотоксикологического состояния водного объекта, наряду с качественным и количественным анализом загрязняющих веществ (ЗВ) используются биодиагностические методы, основанные на ответах биоты на загрязнение на разных уровнях биологической организации: биомаркирование, биотестирование и биоиндикация [Чуйко и др., 2022 (Chuiko et al., 2022)]. Такой подход в своих работах активно развивал Б.А. Флеров [Флеров, 1989 (Flerov, 1989)] и продолжают развивать в основанной им лаборатории [Томилина и др., 2018 (Tomilina et al., 2018); Morozov et al., 2012; Zabotkina et al., 2018; Kuzmina et al., 2019; Klimova et al., 2020].

В рамках проекта “Оздоровление Волги” проводилось исследование, цель которого – дать комплексную оценку экотоксикологического состояния Волжских водохранилищ с использованием методов биодиагностики и химического анализа загрязняющих веществ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Пробы донных отложений (ДО) отбирались в 2015 и 2016 г. в ходе комплексной экспедиции на научно-исследовательском судне “Академик Топчиев” ИБВВ РАН на Рыбинском, Горьковском, Чебоксарском, Куйбышевском, Саратовском и Волгоградском водохранилищах модифицированным дночерпателем Экмана-Берджи (ДАК-250) с площадью захвата 1/40 м² и дночерпателем ДАК-100 с площадью захвата 1/100 м² (см. рисунок). Для исследования характеристик ДО, их токсичности и

содержания тяжелых металлов (ТМ) использовали интегральную пробу верхнего слоя грунта (0–10 см), отобранную на каждой станции за три подъема. Лещ (*Abramis brama* L.) был выбран в качестве индикаторного вида в связи с тем, что он является бентофагом и трофически тесно связан с ДО.

Отлов леща произведен в 2016 г. донным тралом. После вылова и проведения стандартного биоанализа у 10 особей обоего пола со средними значениями длины и массы тела

водорастворимого белка – для оценки эффективности работы системы антиоксидантной защиты (АОЗ) [Morozov et al., 2012]. Данный набор биомаркеров рыб наиболее часто используется при оценке экотоксикологического состояния водных объектов [Barhoumi et al., 2014; Madeira et al., 2016; Catteau et al., 2021].

Полученные данные обрабатывали статистически с использованием пакета программ

MS Excel 2007 и Statistica 10. Результаты представлены в виде средних и их ошибок ($\bar{x} \pm SE$). Проверку нормальности эмпирического распределения изучаемого признака осуществляли с помощью критерия Колмогорова-Смирнова. Статистическую значимость различий оценивали по t-критерию Стьюдента при $p = 0.05$.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Все отобранные ДО в преобладающем большинстве были представлены двумя типами илов – глинистые серые (8 проб) и песча-

нистые (5 проб), и только одна проба (ст. 6) – илистым песком (табл. 1).

Таблица 1. Содержание ТМ и тип грунта Волжских водохранилищ

Table 1. Content of heavy metals in bottom sediments of Volga water reservoirs

Станция Site	Тип грунта Type of sediments	Концентрации металла, мкг/г / Metal concentrations, mkg/g								
		Al	V	Cr	Mn	Ni	Sr	Cu	Zn	Σ_{TM}
Рыбинское водохранилище / Rybinsk reservoir										
1	Глинистый ил Clay silt	<u>6.2</u>	50.7	44.3	1283.7	22.6	32.1	13.6	60.8	1514.0
Горьковское водохранилище / Gorky reservoir										
2	Глинистый ил Clay silt	4616.2	23.8	28.6	918.6	21.2	22.6	11.9	56.5	5699.4
3	Песчанистый ил Sandy silt	<u>7.4</u>	63.8	86.3	1621.7	34.7	53.3	21.1	90.6	1978.9
4	Песчанистый ил Sandy silt	1932.7	<u>7.0</u>	11.3	312.6	<u><1.0</u>	<u>8.1</u>	4.2	23.5	2299.4
Чебоксарское водохранилище / Cheboksary reservoir										
5	Песчанистый ил Sandy silt	503.4	<u>2.9</u>	<u>2.7</u>	263.1	<u><1.0</u>	<u>6.6</u>	<u>1.0</u>	<u>4.2</u>	<u>783.9</u>
6	Илистый песок Silty sand	4775.1	19.7	18.1	983.1	10.7	45.0	5.9	21.5	5879.1
7	Глинистый ил Clay silt	2307.2	10.4	<u>9.8</u>	507.8	<u><1.0</u>	23.1	5.4	11.5	2875.2
8	Глинистый ил Clay silt	791.4	107.4	115.7	1065.9	63.0	159.7	24.7	90.3	2418.1
Куйбышевское водохранилище / Kuibyshev reservoir										
9	Глинистый ил Clay silt	<u>6.5</u>	91.0	93.6	1285.4	57.1	142.8	22.1	54.5	1753.0
10	Глинистый ил Clay silt	9271.1	43.2	57.1	794.9	45.0	81.9	17.5	38.7	10349.4
Саратовское водохранилище / Saratov reservoir										
11	Песчанистый ил Sandy silt	361.7	<u>6.9</u>	<u>4.7</u>	280.5	<u>1.1</u>	<u>9.3</u>	<u>1.4</u>	<u>4.6</u>	<u>670.2</u>
12	Глинистый ил Clay silt	10173.1	48.1	43.6	1424.8	30.4	84.4	11.6	32.7	11848.7
Волгоградское водохранилище / Volgograd reservoir										
13	Песчанистый ил Sandy silt	1726.9	<u>7.1</u>	<u>6.0</u>	<u>28.7</u>	<u>8.5</u>	31.8	<u>2.4</u>	20.3	1831.7
14	Глинистый ил Clay silt	7520.3	29.8	33.2	1426.1	17.4	95.5	14.2	38.7	9175.2

Примечание. Жирным шрифтом отмечены наиболее высокие значения по каждому металлу, подчеркнутым – наиболее низкие.

Note. The highest values for each metal are marked in bold, the lowest values are underlined.

Установлено, что ТМ по мере снижения их содержания в ДО располагались в ряду Al>Mn>Sr>Cr>V≥Zn>Ni>Cu (табл. 1), демон-

стрируя при этом высокую вариабельность в зависимости от локализации. Максимальные значения для этого ряда металлов были соот-

ветственно 10173.1, 1621.7, 159.7, 115.7, 107.4, 90.6, 63.0, 24.7, а минимальные – 7.4, 28.7, 6.6, 2.7, 2.9, 4.2, <1, 1 мкг/г. Наиболее широкий диапазон пространственного варьирования выявлен для алюминия: от 6.2 (ст. 1) до 10173.1 мкг/г (ст. 11), а наименьший – для Mn: от 28.7 (ст. 13) до 1621.7 мкг/г (ст. 3). Эти два элемента на большинстве станций вносят наибольший вклад в суммарное содержание ТМ в ДО. Наиболее высокое суммарное содержание ТМ (≥ 5700 мкг/г) выявлено на станциях 2, 6, 10, 12, 14. Наибольшее содержание по >5 металлам отмечено на станциях 8 и 9.

Оценка токсичности ВВДО показала, что во всех исследуемых образцах отмечена 100% выживаемость ветвистоусых рачков, и лишь на ст. 4 зафиксирована 10% (не превышающая допустимый методикой уровень) гибель рачков за 8 сут экспозиции. В большей степени ВВДО влияла на показатели плодовитости рачков (среднее число пометов и среднее количество молоди на 1 самку), за исключением

станций 1, 4 и 9 (табл. 2). Для большинства станций с глинистым типом ДО отмечено хроническое токсическое действие (ХТД) нативного грунта на биологические параметры личинок хирономид. Исключение составил фоновый участок (ст. 1 Коприно), где, как и для ВВДО, не зарегистрировано токсическое действие на исследованные показатели тест-организмов.

Анализ значений биомаркеров показал, что у рыб *Горьковского водохранилища* (ст. 2–4) по сравнению с рыбами на фоновой ст. 1 (Рыбинское водохранилище) повышенный уровень MDA и активность всех компонентов АОЗ (содержание GSH и активность KAT, GST) (табл. 2).

В *Чебоксарском водохранилище* у рыб регистрировался повышенный уровень MDA, но пониженное содержание GSH и активность участвующего в его метаболизме фермента GST. Активность KAT близка к нормальному уровню.

Таблица 2. Значения биомаркеров в печени леща и показатели токсичности ДО Волжских водохранилищ

Table 2. Values of biomarkers in bream liver and toxicity of bottom sediments

Станция Site	n	Значения биомаркеров СОС / Values of biomarkers SOS				Токсичность / Toxicity	
		MDA	GSH	GST	KAT	ВВДО Elutriate	ДО Bottom sediments
Рыбинское водохранилище / Rybinsk reservoir							
1	7	0.135±0.014	4.21±0.13	3.17±0.29	62.6±4.8	НТ	НТ
Горьковское водохранилище / Gorky reservoir							
2	3	0.255±0.032*	3.40±0.58	1.00±0.08*	28.7±4.4*	ХТД	ХТД
3	8	0.344±0.041*	4.54±0.77	1.16±0.36*	24.8±3.4*	ХТД	НТ
4	2	0.249±0.026*	3.12±0.48	1.16±0.16*	29.6±7.3*	НТ	ХТД
Чебоксарское водохранилище / Cheboksary reservoir							
5	9	0.356±0.042*	4.75±0.58	1.73±0.30*	42.3±4.3*	ХТД	НТ
6	6	0.189±0.026	4.33±0.48	2.25±0.37	51.1±4.5	ХТД	НТ
7	4	0.167±0.030	4.85±0.86	2.25±0.42	59.0±8.0	ХТД	ХТД
8	10	0.281±0.030*	3.69±0.38	2.66±0.41	41.6±7.2	ХТД	ХТД
Куйбышевское водохранилище / Kuibyshev reservoir							
9	10	0.221±0.031*	4.78±0.70	6.00±0.35*	72.2±7.3	НТ	ХТД
10	1	0.162	1.51	8.47	58.4	ХТД	ХТД
Саратовское водохранилище / Saratov reservoir							
11	6	0.440±0.048*	5.16±0.53	8.81±1.08*	92.8±7.5*	ХТД	ХТД
12	9	0.190±0.027	5.00±0.58	7.01±1.12*	89.0±7.3	ХТД	ХТД
Волгоградское водохранилище / Volgograd reservoir							
13	2	0.118±0.004	7.27±0.20*	5.54±0.19*	142.8±10.1*	–	НТ
14	10	0.254±0.035*	3.87±0.44	6.13±1.03*	94.3±26.3*	–	ХТД

Примечание. n – количество исследованных образцов печени; MDA – малоновый диальдегид, GSH – глутатион; KAT – каталаза; GST – глутатион-S-трансфераза; содержание MDA и GSH выражены в пкмоль/мкг белка; активность ферментов KAT и GST – в нмоль/мкг белка/мин; НТ – проба не токсична; ХТД – проба, оказывающая хроническое токсическое действие; “*” – статистически значимые различия для каждого показателя по сравнению со ст. 1.

Note. n – the number of studied liver samples; MDA – malondialdehyde; GSH – glutathione; CAT – catalase; GST – glutathione-S-transferase; the content of MDA and GSH is expressed in pmol/μg of protein; activities of KAT and GST enzymes, in nmol/μg protein/min; НТ – the sample is not toxic; ХТД – the sample with chronic toxic effect; “*” – statistically significant differences for each indicator compared to site 1.

В *Куйбышевском водохранилище* все параметры СОС у рыб были в статистических пределах фоновых значений. Несколько выше была только активность GST, что может быть связано с наличием в ДО органических ЗВ, таких как стойкие органические загрязняющие вещества (СОЗ), полициклические ароматические углеводороды, нефтепродукты и др., поскольку данный фермент участвует еще и в процессе биотрансформации таких ксенобиотиков.

В *Саратовском водохранилище* биомаркер интенсивности образования АФК (MDA) не отличался от значения на фоновой ст. 1. При этом активность антиоксидантных ферментов (GST, KAT) была несколько выше фоновых значений. Такой профиль параметров СОС свидетельствует о том, что система АОЗ за счет повышенной активности ферментатив-

ного компонента успешно регулирует количество образующихся АФК, не позволяя развиваться СОС. Данный факт указывает на то, что экотоксикологическое состояние в этом водохранилище такое же, как и в предыдущем.

Интенсивность образования АФК в тканях рыб в *Волгоградском водохранилище* была ниже, чем во всех вышеперечисленных водных объектах. При этом значения всех исследованных компонентов АОЗ были выше фоновых, т.е. антиоксидантная система успешно справлялась с образующимися под действием разных факторов оксидантами, и даже наблюдалась некоторая гиперкомпенсация, выражающаяся в ее некоторой избыточной активности. Все это указывает на благополучное состояние среды обитания рыб.

ОБСУЖДЕНИЕ

Известно, что сорбционная способность ДО напрямую зависит от содержания в них органического вещества, которое в илах заметно выше, чем в песках. Поскольку в пробах преобладали однотипные илистые ДО, то выявленная вариабельность содержания в них ТМ не связана с их структурной разнокачественностью, а отражает разную степень антропогенной нагрузки на различные участки водохранилищ. Так наименьшее антропогенное загрязнение ТМ отмечено для ДО на ст. 1, а на остальных станциях в разной степени выше. Эта станция находится в зоне наименьшего антропогенного воздействия и по другим ЗВ, например СОЗ [Чуйко, Подгорная, 2018 (Chuiiko, Podgornaya, 2018)]. Поэтому она была выбрана фоновой при биодиагностическом анализе.

Одновременное проведение биотестирования ВВДО и нативных грунтов позволяет оценить вклад в общую токсичность водорастворимых и нерастворимых соединений [Бакаева и др., 2009 (Bakaeva et al., 2012)]. Хроническое токсическое действие для цериодафний ВВДО исследованных станций, за исключением станций 1 и 4, свидетельствует о том, что водорастворимые вещества присутствуют в ДО в достаточных количествах, способных оказать токсическое действие на водные организмы, в первую очередь на их репродуктивные показатели. В отличие от ВВДО, токсичность нативного грунта для бентосных организмов определяется наличием в нем всего комплекса загрязняющих веществ. Известно, что глинистые илы за счет большего содержания органического вещества и процентного содержания частиц размером <0.01 мм адсорбируют большее количество ЗВ, в том числе

ТМ [Даувальтер, 2002 (Dauwalter, 2002)]. Так, в проведенном исследовании отмечено токсическое действие глинистых илов на показатели смертности и линейных размеров личинок хирономид.

Учитывая, что на ст. 1 в *Рыбинском водохранилище* антропогенная нагрузка на водный объект минимальна в связи с удаленностью от крупных промышленных, сельскохозяйственных предприятий и городов, профиль биомаркеров СОС принят в качестве фонового. Сходные значения биомаркеров СОС на этой станции были выявлены ранее [Morozov et al., 2012; Morozov et al., 2017; Tenji et al., 2020].

Выявленный у рыб из Горьковского водохранилища профиль биомаркеров СОС (повышенное содержание MDA и пониженный уровень всех компонентов АОЗ) свидетельствует о высокой интенсивности образования АФК и истощении системы АОЗ в организме рыб, т.е. хроническом оксидативном стрессе, и указывает на неблагоприятное качество среды их обитания [Чуйко, 2014 (Chuiiko, 2014); Lushchak, 2011].

Профиль биомаркеров СОС у рыб в *Чебоксарском водохранилище* на станциях 6 и 7 близок к профилю леща на фоновой станции, что свидетельствует об относительной низкой антропогенной нагрузке на этих станциях. На станциях 5 и 8 повышенный уровень MDA и близкие к фоновым значения других биомаркеров СОС указывает на то, что, несмотря на высокую интенсивность образования АФК, система АОЗ частично функционирует в нормальном режиме и не достигает полного истощения своих ресурсов, т.е. способна нейтрализовать оксидативные процессы в клетке и препятствовать вызванным ими морфофункцио-

нальным повреждением биологических молекул и клеточных структур. Исходя из этого, можно предположить, что в этом водохранилище условия обитания рыб лучше, чем в Горьковском.

Профиль большинства биомаркеров СОС у леща в *Куйбышевском водохранилище* близок к фоновому уровню, исключая повышенную активность GST. Известно, что этот фермент, помимо участия в системе АОЗ, играет важную роль в системе биотрансформации ксенобиотиков (СБК) [Борвинская и др., 2009 (Borvinskaya et al., 2009)]. Исходя из этого, можно предположить, что на станциях в этом водохранилище, кроме повышенных по сравнению с фоном уровнем содержания ТМ, имеется повышенный уровень органических ксенобиотиков, таких как нефтепродукты, полициклические ароматические углеводороды (ПАУ), стойкие органические загрязняющие соединения (СОЗ) и др.

Высокий уровень биомаркеров СОС леща на станциях *Саратовского водохранилища* за исключением низкого содержания MDA, близкого к фоновому, свидетельствует об активации системы АОЗ и СБК, что, вероятнее

всего, связано с повышенной антропогенной нагрузкой.

В *Волгоградском водохранилище* лещ имел сходный с рыбами из *Саратовского водохранилища* профиль биомаркеров, что также может быть связано с повышенной антропогенной нагрузкой. Однако в этих двух водохранилищах у рыб был максимально высокий уровень биомаркеров системы АОЗ, что, наряду с повышенным содержанием MDA, указывает на ее высокую функциональную напряженность.

Следует отметить, что прямой корреляции между изменением значений биомаркеров СОС и уровнем содержания какого-то ТМ не выявлено, но прослеживается тенденция связи с их суммарной нагрузкой. Кроме того, следует иметь в виду, что органические токсические ЗВ и другие антропогенные факторы могут влиять на значения биомаркеров СОС [Lushchak, 2011]. В данном исследовании учесть долю этого антропогенного компонента в общем ответе биомаркеров на загрязнение не представляется возможным, т.к. систематизированные актуальные данные по этим ЗВ в экосистеме Волжских водохранилищ отсутствуют.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, по результатам проведенного исследования на основе комплексного анализа можно расположить водохранилища по степени ухудшения экотоксикологического состояния в следующем ряду: Горьковское > Волго-

градское = Саратовское > Куйбышевское > Чебоксарское. Рыбинское водохранилище в районе ст. 1 можно принять за фоновый участок по антропогенной нагрузке.

Работа выполнена в рамках государственного задания №121050500046–8 при частичной финансовой поддержке приоритетного проекта “Оздоровление Волги” по теме № г.р. АААА-А18-118052590015-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бакаева Е.Н., Никаноров А.М., Игнатова И.М. Место биотестовых исследований донных отложений в мониторинге водных объектов // Вестн. Юж. науч. центра РАН. 2009, Т. 5. № 2. С. 84–93.
- Борвинская Е.В., Смирнов Л.П., Немова Н.Н. Глутатион-S-трансферазы рыб – потенциальные эколого-биохимические индикаторы антропогенного воздействия на водную среду (Обзор) // Труды Карельского научного центра РАН. 2009, № 3. С. 8–19.
- Даувальтер В. А. Факторы формирования химического состава донных отложений озер: Учеб. пособие по дисциплине “Геохимия окружающей среды” для направления 511100 “Экология и природопользование”. Мурманск: Изд-во МГТУ, 2002. 75 с.
- Законнов В.В. Характеристика донных отложений // Структура и функционирование экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века. М.: РАН, 2018. С. 59–72.
- Томилина И.И., Гапеева М.В., Ложкина Р.А. Оценка качества воды и донных отложений каскада водохранилищ реки Волга по показателям токсичности и химического состава // Труды Института биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН. 2018. Вып. 81(84). С. 107–131. DOI: 10.24411/0320-3557-2018-1-0015
- Флеров Б.А. Эколого-физиологические аспекты токсикологии пресноводных животных. Ленинград: Наука. Ленинградское отделение, 1989. 144 с.
- Чуйко Г.М. Биомаркеры в гидрэкотоксикологии: принципы, методы и методология, практика использования. Гл. XV. // Экологический мониторинг. Часть VIII. Современные проблемы мониторинга пресноводных экосистем: Учебное пособие. Нижний Новгород: Изд-во Нижегородского государственного университета, 2014. С. 310–326.
- Чуйко Г.М., Подгорная В.М. Пространственное распределение органических загрязняющих веществ в экосистеме водохранилища (ретроспективный аналитический обзор) // Структура и функционирование экосистемы Рыбинского водохранилища в начале XXI века. М.: РАН, 2018. С. 357–371

- Чуйко Г.М., Томилина И.И., Холмогорова Н.В. Методы биодиагностики в водной экотоксикологии // Токсикологический вестник. 2022. Т. 30. № 5. С. 315–322. DOI: 10.47470/0869-7922-2022-30-5-315-322.
- Barhoumi B., Clérandeau C., Gourves P.-Y., Le Menach K., Megdiche Y.E.I., Peluhet L., Budzinski H., Baudrimont M., Driss M.R., Cachot J. Pollution biomonitoring in the Bizerte lagoon (Tunisia), using combined chemical and biomarker analyses in grass goby, *Zosterisessor ophiocephalus* (Teleostei, Gobiidae) // Marine Environmental Research. 2014. Vol. 101. P. 184–195. DOI: 10.1016/j.marenvres.2014.07.002.
- Catteau A., Porcher J.-M., Bado-Nilles A., Bonnard I., Bonnard M., Chaumot A., David E., Dedourge-Geffard O., Delahaut L., Delorme N., François A., Garnero L., Lopes C., Nott K., Noury P., Palluel O., Palos-Ladeiro M., Quéau H., Ronkart S., Sossey-Alaoui K., Turiès C., Tychon B., Geffard O., Geffard A. Interest of a multispecies approach in active biomonitoring: application in the Meuse watershed // Science of The Total Environment. 2021. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152148.
- Ingersoll C.G., Nelson M.K. Testing sediment toxicity with *Hyaella azteca* (Amphipoda) and *Chironomus riparius* (Diptera) // Aquat. Toxicol. and Risk Assessment. Philadelphia: Amer. Soc. Test. and Mater. 1990. Vol. 13. P. 93–109.
- Klimova Y.S., Chuiko G.M., Pesnya D.S. et al. Biomarkers of Oxidative Stress in Freshwater Bivalve Mollusks (Review) // Inland Water Biology. 2020. Vol. 13. P. 674–683. DOI: 10.1134/S1995082920060073.
- Kuz'mina V.V., Komov V.T., Tarleva A.F. et al. Effect of Dietary Metal Exposure on the Locomotor Reactions and Food Consumption in Common Carp *Cyprinus carpio* (L.) // Inland Water Biology. 2019. Vol. 12. P. 356–364. DOI: 10.1134/S1995082919030106.
- Lushchak V.I. Environmentally induced oxidative stress in aquatic animals // Aquatic Toxicology. 2011. Vol. 101. Iss. 1. P. 13–30. DOI: 10.1016/j.aquatox.2010.10.006.
- Madeira C., Madeira D., Diniz M.S., Cabral H.N., Vinagre C. Thermal acclimation in clownfish: An integrated biomarker response and multi-tissue experimental approach // Ecological Indicators. 2016. Vol. 71, P. 280–292. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.07.009.
- Morozov A.A., Chuiko G.M., Yurchenko V.V. Annual variations in hepatic antioxidant defenses and lipid peroxidation in a temperate fish, common bream *Abramis brama* (L.) // International Aquatic Research. 2017. Vol. 9. Iss. 3. P. 249–257. DOI: 10.1007/s40071-017-0176-z
- Morozov A.A., Chuiko G.M., Brodskii E.S. Functional state of the antioxidant system of liver of bream (*Abramis brama* L.) from the regions of Rybinsk reservoir with different anthropogenic load // Inland Water Biology. 2012. Vol. 5. № 1. P. 147–152. DOI: 10.1134/S1995082911040134.
- Mount D.I., Norberg T.J. A seven-day life-cycle cladoceran toxicity test // Environ. Toxicol. Chem. 1984. Vol. 3. P. 425–434.
- Mount D.I., Norberg T.J. A seven-day life-cycle cladoceran toxicity test // Environ. Toxicol. Chem. 1984. Vol. 3. P. 425–434.
- Tenji D., Micic B., Sipos S. et al. Fish biomarkers from a different perspective: evidence of adaptive strategy of *Abramis brama* (L.) to chemical stress // Environ Sci Eur. 2020. Vol. 32. Iss. 47. P. 32–47. DOI: 10.1186/s12302-020-00316-7
- Zabotkina E.A., Golovanov V.K., Golovanova I.L. Effects of Roundup Herbicide and Increase in Water Temperature on the Parameters of Peripheral Blood Cells in Amur Sleeper *Perccottus glenii* Dybowski // Inland Water Biology. 2018. Vol. 11. P. 207–213. DOI: 10.1134/S1995082918020190.

REFERENCES

- Bakaeva E.N., Nikanorov A.M., Ignatova I.M. Mesto biotestovykh issledovanij donnykh otlozhenij v monitoringe vodnykh ob'ektov. *Vestn. Yuzh. nauch. centra RAN*, 2009, vol. 5, no. 2, pp. 84–93. (In Russian)
- Barhoumi B., Clérandeau C., Gourves P.-Y., Le Menach K., Megdiche Y.E.I., Peluhet L., Budzinski H., Baudrimont M., Driss M.R., Cachot J. Pollution biomonitoring in the Bizerte lagoon (Tunisia), using combined chemical and biomarker analyses in grass goby, *Zosterisessor ophiocephalus* (Teleostei, Gobiidae). *Marine Environmental Research*, 2014, vol. 101, pp. 184–195. doi: 10.1016/j.marenvres.2014.07.002
- Borvinskaya E.V., Smirnov L.P., Nemova N.N. Glutathione-S-transferases in fish as potential ecological and biochemical indicators of anthropogenic impact on the aquatic environment (Review). *Trudy Karel'skogo nauchnogo centra RAN*, 2009, vol. 3, pp. 8–19. (In Russian)
- Catteau A., Porcher J.-M., Bado-Nilles A., Bonnard I., Bonnard M., Chaumot A., David E., Dedourge-Geffard O., Delahaut L., Delorme N., François A., Garnero L., Lopes C., Nott K., Noury P., Palluel O., Palos-Ladeiro M., Quéau H., Ronkart S., Sossey-Alaoui K., Turiès C., Tychon B., Geffard O., Geffard A. Interest of a multispecies approach in active biomonitoring: application in the Meuse watershed. *Science of The Total Environment*, 2021. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.152148
- Chuiko G.M. Ecological monitoring. Biomarkery v gidroekotoksikologii: principy, metody i metodologiya, praktika ispol'zovaniya. [Biomarkers in hydroecotoxicology: principles, methods and methodology, practice of use]. Nizhniy Novgorod, Izd-vo Nizhegorodskogo gosuniversiteta, 2014, pp. 310–326. (In Russian)
- Chuiko G.M., Podgornaya V.A. Struktura i funkcionirovanie ekosistemy Rybinskogo vodohranilishcha v nachale XXI veka. Prostranstvennoe raspredelenie organicheskikh zagryaznyayushchih veshchestv v ekosisteme vodohranilishcha (retrospektivnyj analiticheskij obzor) [Spatial distribution of organic pollutants in the reservoir ecosystem (retrospective analytical review)]. Moscow, RAN, 2018, pp. 357–371. (In Russian)

- Chuiko G.M., Tomilina I.I., Holmogorova N.V. Methods of biodiagnostics in aquatic ecotoxicology. *Toksikol. vestnik*, 2022, vol. 30, no. 5, pp. 315–322. doi: 10.47470/0869-7922-2022-30-5-315-322. (In Russian)
- Dauval'ter V. A. Faktory formirovaniya himicheskogo sostava donnyh otlozhenij ozer: Ucheb. posobie po discipline "Geohimiya okruzhayushchej sredy" dlya napravleniya 511100 "Ekologiya i prirodopol'zovanie". Murmansk, Izd-vo MGTU, 2002. 75 p. (In Russian)
- Flerov B.A. Ekologo-fiziologicheskie aspekty toksikologii presnovodnyh zivotnyh [Ecological and physiological aspects of toxicology of freshwater animals]. Leningrad, Nauka, Leningradskoe otdelenie, 1989. 144 p. (In Russian)
- Ingersoll C.G., Nelson M.K. Testing sediment toxicity with *Hyalella azteca* (Amphipoda) and *Chironomus riparius* (Diptera). *Aquat. Toxicol. and Risk Assessment*. Philadelphia, Amer. Soc. Test. and Mater. 1990, vol. 13, pp. 93–109.
- Klimova Y.S., Chuiko G.M., Pesnya D.S. et al. Biomarkers of Oxidative Stress in Freshwater Bivalve Mollusks (Review). *Inland Water Biology*, 2020, vol. 13, pp. 674–683. doi: 10.1134/S1995082920060073.
- Kuz'mina V.V., Komov V.T., Tarleva A.F. et al. Effect of Dietary Metal Exposure on the Locomotor Reactions and Food Consumption in Common Carp *Cyprinus carpio* (L.). *Inland Water Biology*. 2019, vol. 12, pp. 356–364. doi: 10.1134/S1995082919030106
- Lushchak V.I. Environmentally induced oxidative stress in aquatic animals. *Aquatic Toxicology*, 2011, vol. 101, iss. 1, pp. 13–30. doi: 10.1016/j.aquatox.2010.10.006
- Madeira C., Madeira D., Diniz M.S., Cabral H.N., Vinagre C. Thermal acclimation in clownfish: An integrated biomarker response and multi-tissue experimental approach. *Ecological Indicators*, 2016, vol. 71, pp. 280–292. doi: 10.1016/j.ecolind.2016.07.009.
- Morozov A.A., Chuiko G.M., Yurchenko V.V. Annual variations in hepatic antioxidant defenses and lipid peroxidation in a temperate fish, common bream *Abramis brama* (L.). *International Aquatic Research*, 2017, vol. 9, no. 3, pp. 249–257. doi: 10.1007/s40071-017-0176-z
- Morozov A.A., Chuiko G.M., Brodskii E.S. Functional state of the antioxidant system of liver of bream (*Abramis brama* L.) from the regions of Rybinsk reservoir with different anthropogenic load. *Inland Water Biology*, 2012, vol. 5, no. 1, pp. 147–152. doi: 10.1134/S1995082911040134
- Mount D.I., Norberg T.J. A seven-day life-cycle cladoceran toxicity test. *Environ. Toxicol. Chem.*, 1984, vol. 3, pp. 425–434.
- Tenji D., Micic B., Sipos S. et al. Fish biomarkers from a different perspective: evidence of adaptive strategy of *Abramis brama* (L.) to chemical stress. *Environ. Sci. Eur.*, 2020, vol. 32, no. 47, pp. 32–47. doi: 10.1186/s12302-020-00316-7.
- Tomilina I.I., Gapeeva M.V., Lozhkina R.A. Ocenka kachestva vody I donnyh otlozhenij kaskada vodohranilishch reki Volga po pokazatelyam toksichnosti I himicheskogo sostava. *Transactions of Papanin Institute for Biology of Inland Waters RAS*, 2018, iss. 81 (84), pp. 41–46. doi: 10.24411/0320-3557-2018-1-0015. (In Russian)
- Zabotkina E.A., Golovanov V.K., Golovanova I.L. Effects of Roundup Herbicide and Increase in Water Temperature on the Parameters of Peripheral Blood Cells in Amur Sleeper *Perccottus glenii* Dybowski. *Inland Water Biology*. 2018, vol. 11, pp. 207–213. doi: 10.1134/S1995082918020190.
- Zakonov V.V. Structure and functioning of the ecosystem of the Rybinsk reservoir at the beginning of the XXI century. *Harakteristika donnyh otlozhenij* [Characteristics of bottom sediments]. Moscow, RAN, 2018, pp. 59–73. (In Russian)

INTEGRATED ASSESSMENT OF THE ECOTOXICOLOGICAL STATE OF RESERVOIRS IN THE MIDDLE AND LOWER VOLGA BY METHODS OF BIODIAGNOSIS AND ANALYSIS OF HEAVY METALS IN BOTTOM SEDIMENTS

G. M. Chuiko, V. A. Podgornaya, I. I. Tomilina, R. A. Lozhkina, V. V. Zakonov, M. V. Gapeeva

Papanin Institute for Biology of Inland Waters, Russian Academy of Sciences,

152742 Borok, Russia, e-mail: gchuiko@ibiw.ru

Revised 11.09.2022

A comprehensive assessment of the ecotoxicological state of the reservoirs of the Middle and Lower Volga was carried out using the method of biodiagnostics (biomarking, biotesting) and analysis of the content of heavy metals in bottom sediments. The spatial variability of the content of heavy metals in bottom sediments and the values of biomarkers of the state of oxidative stress in the liver of bream from different reservoirs was established. The toxicity of bottom sediments was determined. According to the results of the study, it is possible to arrange the reservoirs according to the degree of deterioration of the ecotoxicological state in the following order: Gorky > Volgograd = Saratov > Kuibyshev > Cheboksary. The Rybinsk reservoir in the area of station 1 can be taken as a background area in terms of anthropogenic load.

Keywords: biomarking, biotesting, oxidative stress, common bream, reservoirs