



DOI 10.23859/estr-230403

EDN FEQVXP

УДК 614.777:504.4.064.36:574 (285.2)

Научная статья

Оценка качества воды Горьковского водохранилища (р. Волга, Россия) по данным биотестирования и химического анализа

И.И. Томилина* , Р.А. Ложкина , М.В. Гапеева

Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН, 152742, Россия, Ярославская обл., Некоузский р-н, пос. Борок, д. 109

*i_tomilina@mail.ru

Аннотация. Исследованы токсикологические характеристики воды Горьковского водохранилища методом биотестирования с использованием ветвистоусого рачка *Ceriodaphnia dubia* Richard, 1894 за период 2010–2022 гг. Для озерного участка водохранилища (без учета года наблюдения) зарегистрировано статистически значимое снижение плодовитости рачков по сравнению с речным участком. Химический состав поверхностных вод Горьковского водохранилища в сентябре 2015 г. отличался превышением предельно допустимой концентрации для водных объектов рыбохозяйственного значения (ПДК_{р/х}) по Cu (16.8–38.3 ПДК_{р/х}) и Zn (1.1–3.4 ПДК_{р/х}). Максимальные концентрации этих элементов отмечены на станции речного участка р. Сезема (38.3 и 3.4 ПДК_{р/х} соответственно). Для Sr, Mo, Si, As и V наблюдали постепенное увеличение их концентрации вниз по течению с максимальными значениями в приплотинном участке. Увеличение составило 1.1–3.5 раз. В целом для водохранилища за период наблюдений отмечена тенденция к снижению средних значений индекса токсичности. Для озерного участка водохранилища без учета года наблюдения отмечено статистически значимое снижение плодовитости рачков по сравнению с другими участками. Это связано с загрязнением воды, о чем свидетельствуют данные корреляционного анализа и более высокие концентрации исследованных химических элементов на станциях, расположенных на этом участке.

Ключевые слова: токсичность, *Ceriodaphnia dubia*, загрязнение

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории физиологии и токсикологии водных животных ИБВВ РАН О.А. Угаровой, В.В. Юрченко, Ю.Г. Удоенко, В.А. Подгорной, Д.Э. Котикову за отбор проб воды, сотруднику лаборатории гидрологии и гидрохимии А.И. Цветкову за карту-схему отбора проб.

Финансирование. Работа выполнена в рамках государственного задания № 121050500046–8 и при частичной финансовой поддержке приоритетного проекта «Оздоровление Волги» № г.р. АААА-А18-118052590015-9.

ORCID:И.И. Томилина, <https://orcid.org/0000-0002-5266-877X>Р.А. Ложкина, <https://orcid.org/0000-0003-3087-0691>

Для цитирования: Томилина, И.И. и др., 2025. Оценка качества воды Горьковского водохранилища (р. Волга, Россия) по данным биотестирования и химического анализа. *Трансформация экосистем* 8 (1), 145–160. <https://doi.org/10.23859/estr-230403>

Поступила в редакцию: 03.04.2023

Принята к печати: 02.08.2023

Опубликована онлайн: 28.02.2025

DOI 10.23859/estr-230403

EDN FEQVXP

UDC 614.777:504.4.064.36:574 (285.2)

Article

Water quality assessment in the Gorky Reservoir (Volga River, Russia) based on biotesting and chemical analysis

I.I. Tomilina* , R.A. Lozhkina , M.V. Gapeeva

Papanin Institute for Biology of Inland Waters of the Russian Academy of Sciences, Borok 109, Nekouz District, Yaroslavl Oblast, 152742 Russia

*i_tomilina@mail.ru

Abstract. In 2010–2022, the toxicological characteristics of the Gorky Reservoir waters were studied using the biotesting method with the cladoceran *Ceriodaphnia dubia* Richard, 1894. A statistically significant decline in the fecundity of crustaceans in the lake section (regardless of the year of observation), compared to the river part of the reservoir, was recorded. The chemical composition of the surface waters of the Gorky Reservoir in September 2015 was distinguished by the excess of the maximum permissible concentration established for fishery (MPC_{fish}), i.e. for Cu (16.8–38.3) and Zn (1.1–3.4). Their peak concentrations (38.3 and 3.4, respectively) were detected at the Sezema River station. Downstream, a gradual increase (by 1.1–3.5 times) in concentrations of Sr, Mo, Si, As and V occurred, being maximum at the dam section. During the observation period, a tendency towards a decrease in the average toxicity index was noted for the reservoir as a whole. Unlike other sites, the lake section of the reservoir (regardless of the year of observation) demonstrated a statistically significant reduction in the crustacean fecundity. This was due to water contamination, as evidenced by the results of correlation analysis and the presence of higher concentrations of the studied chemicals in sampling stations located within this section.

Keywords: toxicity, *Ceriodaphnia dubia*, pollution

Acknowledgements. The authors express their gratitude to O.A. Ugarova, V.V. Yurchenko, Yu.G. Udodenko, V.A. Podgornaya, D.E. Kotikov from the Laboratory of Physiology and Toxicology of Aquatic Animals of the

IBIW RAS for water sampling and A.I. Tsvetkov from the Laboratory of Hydrology and Hydrochemistry for the schematic map of sampling sites location.

Funding. The work was carried out within the framework of State Assignment No. 121050500046–8 and with partial financial support from the priority project "Volga Recovery" No. AAAA-A18-118052590015-9.

ORCID:

I.I. Tomilina, <https://orcid.org/0000-0002-5266-877X>

R.A. Lozhkina, <https://orcid.org/0000-0003-3087-0691>

To cite this article: Tomilina, I.I. et al., 2025. Water quality assessment in the Gorky Reservoir (Volga River, Russia) based on biotesting and chemical analysis. *Ecosystem Transformation* 8 (1), 145–160. <https://doi.org/10.23859/estr-230403>

Received: 03.04.2023

Accepted: 02.08.2023

Published online: 28.02.2025

Введение

В Волго-Каспийском бассейне сосредоточен значительный промышленный и сельскохозяйственный потенциал, что в совокупности с природно-климатическими факторами приводит к изменению химико-токсикологических характеристик водной среды и, как следствие, к изменению среды обитания гидробионтов (Рылина и др., 2013). Горьковское водохранилище образовано в 1955–1957 гг. на участке р. Волги между городами Рыбинск и Городец при строительстве Горьковской ГЭС и имеет существенную протяженность в Волжском каскаде, что обуславливает его значимость в водоснабжении, судоходстве и рекреации. Территориально Горьковское водохранилище расположено в пределах густонаселенных промышленных регионов Европейской России (Ярославской, Костромской, Ивановской и Нижегородской областей) и испытывает значительную антропогенную нагрузку. Характеристика воды водохранилища (особенно его верхнего участка) в значительной степени определяется водами вышележащего Рыбинского водохранилища, нижние участки – это районы с водными массами собственно Горьковского водохранилища (Фролова и др., 2020).

Объем поступления загрязненных вод в водохранилище ежегодно составляет до 6 км³. По данным Верхне-Волжского УГМС (Верхне-Волжское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды)¹, воды Горьковского водохранилища на протяжении последних нескольких лет характеризовались как «очень загрязненные» (3 класс, разряд Б) и «грязные» (4 класс, разряд А). Состав основных загрязнителей водохранилища в течение последних лет остается постоянным: медь, цинк, марганец, железо, трудноокисляемые органические вещества по величине химического потребления кислорода (ХПК), легкоокисляемые органические вещества по величине биохимического окисления кислорода (БПК₅), аммонийный азот, а также нефтепродукты, фенолы, нитриты, формальдегиды, синтетические поверхностно-активные вещества (Иголина и др., 2016; Кочеткова, 2010; Фролова и др., 2020).

В настоящее время биотестирование является одним из направлений совершенствования системы оценок и контроля качества объектов окружающей среды. Не заменяя количественный химический анализ, биотестирование предваряет и дополняет его благодаря экспрессности, простоте исполнения и невысокой стоимости анализа (Бакаева и др., 2020). Методы биотестирования позволяют дать оценку влияния спектра загрязняющих веществ (ЗВ) на живые организмы разной систематической принадлежности как в контролируемых лабораторных экспериментах, так и при определении экологически значимых эффектов ЗВ в условиях неуставленного фактора токсичности природных сред. Из всего спектра тест-организмов, применяемых в биотестировании, ветвистоусые рачки относятся к наиболее распространенным организмам для оценки качества природных вод

¹ Государственный доклад «Состояние окружающей среды и природных ресурсов Нижегородской области в 2019 году», 2020. Министерство экологии и природных ресурсов Нижегородской области.

(Жмур, 2018). Ранее была проведена оценка токсичности воды отдельных участков Горьковского водохранилища и его притоков (Ковалева, 2003; Крылова и Томилина, 2000; Марченко, 2016; Тюканова и др., 2019). Эти исследования были проведены однократно на притоках водохранилища и на станциях, расположенных вблизи больших городов Ярославля и Рыбинска, не отражали межгодовые тенденции изменения токсичности и не охватывали всей акватории Горьковского водохранилища.

Цель работы – оценить интегральную токсичность воды Горьковского водохранилища методами биотестирования и установить причинно-следственные связи между уровнем содержания загрязняющих веществ и ответными реакциями тест-организмов.

Материалы и методы

Отбор проб воды на 33 станциях проводили в период с 2010 по 2022 гг. в ходе комплексных экспедиций на судне «Академик Топчиев» ИБВВ РАН. Станции отбора проб были приурочены к затопленному руслу р. Волга, к устьям рек, впадающих в водохранилище и населенным пунктам. Районирование водохранилища проводили по условиям седиментации и делили на 3 участка: речной (верхний), озерный (нижний) и Костромское расширение (Рис. 1) согласно В.В. Законнову (2015).

Интегральные пробы воды (139 проб) отбирали метровым батометром системы Элгморка (Корнева, 2015) последовательно с каждого горизонта от поверхности до дна. Воду фильтровали через обеззоленные фильтры «белая лента». Для определения концентраций металлов 50 мл отфильтрованной воды помещали в центрифужные пробирки типа Falcon и подкисляли до 0.1 н по азотной кислоте. Для проведения биотестирования отфильтрованную воду разливали в пищевые пластиковые бутылки объемом 0.5 л с плотно завинчивающейся крышкой для исключения попадания кислорода. Пробы до начала биотестирования хранили в холодильнике при температуре +2...+4 °С не более 14 суток.

Концентрации химических элементов определяли на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой ICP MS ELAN DRC-e (Perkin Elmer, USA) методом Total Quant Analysis. Калибровку прибора выполняли с использованием многоэлементных стандартов фирмы Perkin Elmer (USA), в качестве внутреннего стандарта использовался In (Taylor, 2001).

Биотестирование проб воды проводили с использованием лабораторной культуры планктонных ветвистоусых ракообразных *Ceriodaphnia dubia* Richard, 1894 в соответствии со стандартной методикой (Mount and Norberg, 1984). В ходе эксперимента животных кормили в момент смены среды раз в два дня зелеными водорослями *Chlorella vulgaris* Beijerinck, 1890 в концентрации 250–300 тыс. кл/мл². Критерий острой токсичности – гибель 50% и более рачков за 48 ч в исследуемой воде при условии, что их гибель в контроле не превышает 10 %; хронической – гибель 20% и более тест-организмов и значимое отклонение в плодовитости по сравнению с контролем за время эксперимента³. Увеличение плодовитости рачков более чем на 30% также рассматривалось как проявление хронического токсического действия (Александрова, 2009; Жмур, 2018; Олькова и Дабах, 2014).

В опытах поддерживали оптимальные условия среды: температуру воды 21 ± 3 °С, pH 7.5–8.0, растворенный кислород – на уровне насыщения, световой режим при освещении лампами дневного света – 16 ч свет: 8 ч ночь. Контрольную группу тест-организмов содержали в аналогичных условиях в отстоянной артезианской воде.

Для получения сопоставимых результатов биотестирования рассчитывали индекс токсичности (ИТ) по формуле:

$$\text{ИТ} = \text{ТП}_0 / \text{ТП}_к,$$

где ТП_0 – значение тест-параметра в опыте, $\text{ТП}_к$ – значение тест-параметра в контроле.

Усредненное значение индекса токсичности рассчитывали по участкам и в целом по водохранилищу как среднее арифметическое показателя за год. Также рассчитывали долю станций от общего количества станций отбора проб, вода на которых обладала хроническим токсическим действием (ХТД).

Данные представляли в виде средних значений и их ошибок ($\bar{x} \pm \text{SE}$). Достоверность различий оценивали методом дисперсионного анализа (ANOVA, LSD-тест) при уровне значимости $p = 0.05$

³ ФР.1.39.2007.03221. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости цериодафний.

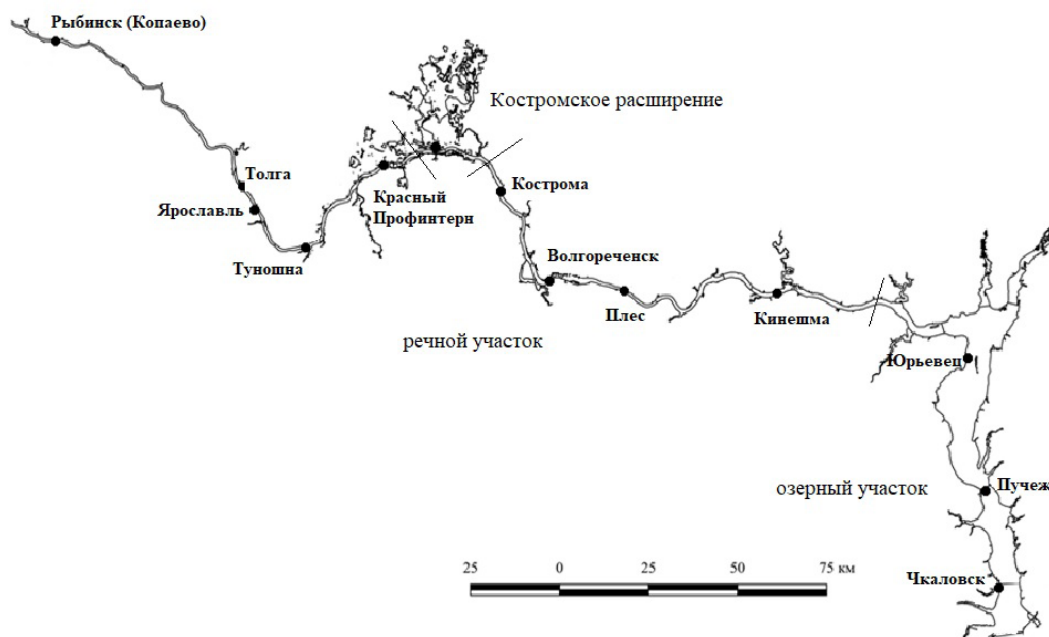


Рис. 1. Карта-схема отбора проб воды в Горьковском водохранилище.

(Sokal and Rohlf, 1995). Корреляционный анализ между исследованными параметрами, значения которых не имели нормального распределения (Shapiro–Wilk test), проводили с использованием непараметрического коэффициента Спирмена (r_s , $p \leq 0.05$).

Результаты

Результаты биотестирования воды по выживаемости цериодафний свидетельствуют об отсутствии острого токсического действия во всех исследуемых пробах за период наблюдений с 2010 по 2022 гг. В пробах, отобранных на станциях возле г. Рыбинска (ниже очистных сооружений, мкр. Копаево), пос. Туношна, пос. Красный Профинтерн, р. Сезема, Костромское расширение, ниже г. Кострома, г. Волгореченск, г. Плес, ниже г. Кинешма, г. Пучеж, устья р. Унжа и р. Которосль зафиксирована гибель рачков, превышающая допустимый 20% уровень за период экспозиции 10 суток, т.е. вода обладала хроническим токсическим действием.

Среднее значение количества молоди на 1 самку по участкам водохранилища, как правило, не достигало его значений в контроле (Рис. 2). Исключение составили речной (2010 г.) и озерный (2010, 2015, 2016 гг.) участки, показатели плодовитости рачков на которых были значимо выше контрольных значений. С 2017 г. отмечена тенденция к снижению усредненных значений плодовитости рачков на 30–50% по сравнению с контролем на всех участках водохранилища.

Значимых различий изменения ИТ по плодовитости рачков между участками в зависимости от даты наблюдения не выявлено (Табл. 1). Исключение составил 2017 г., когда ИТ статистически значимо уменьшался (т.е. токсичность воды увеличивалась) вниз по течению. Минимальное значение ИТ зарегистрировано в озерном участке водохранилища (0.24), а максимальное – в речном (0.55). Наименьшее среднее значение ИТ без учета года наблюдения отмечено для Костромского расширения (0.75). За весь период наблюдения минимальное (0.24) и максимальное (1.44) усредненные значения ИТ зарегистрированы для озерного участка в 2017 г. и в 2010 г. соответственно. В целом для водохранилища за период наблюдений отмечена тенденция к снижению средних значений ИТ (Рис. 3).

В 2012 г. пробы воды ни на одной из исследованных станций не были отнесены к токсичным (Рис. 4). Напротив, все пробы воды в 2013 г. обладали хроническим токсическим действием. Максимальные средние значения числа станций с ХТД зарегистрированы для воды речного участка водохранилища: 44.7% от общего числа станций. При этом доля станций, на которых отмечено снижение репродуктивных показателей рачков более чем на 50% по сравнению с контролем, на озерном участке составила 21.9, на речном – 15.5%.

Для выяснения возможных причин токсичности воды необходимо иметь представление об уровне ее загрязнения. Регулярных измерений уровня содержания ЗВ в воде Горьковского во-

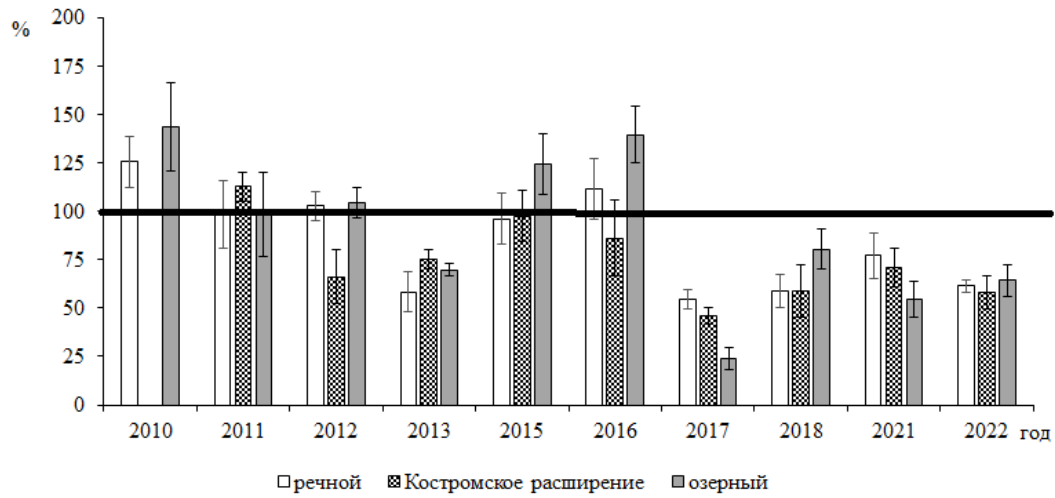


Рис. 2. Динамика хронической токсичности воды различных участков Горьковского водохранилища по показателю плодовитости *Ceriodaphnia dubia* (среднее количество молоди на 1 самку за 7 сут, % от контроля). Прямая линия – контроль (100%).

Табл. 1. Средний индекс токсичности воды различных участков Горьковского водохранилища по показателю «среднее количество молоди на 1 самку *C. dubia*». a,b,c – буквенные индексы статистически значимых различий, в скобках указано количество проб; «–» – нет данных.

Год	Участок			Водоохранилище
	речной	Костромское расширение	озерный	
2010	1.26 ± 0.13 (9)	–	1.44 ± 0.23 (4)	1.31 ± 0.11 (13) ^{de}
2011	0.98 ± 0.17 (6)	1.13 (1)	0.99 ± 0.22 (4)	1.00 ± 0.12 (11) ^c
2012	1.03 ± 0.07 (5)	0.66 (1)	1.05 ± 0.08 (5)	1.00 ± 0.06 (11) ^c
2013	0.59 ± 0.10 (3)	0.76 (1)	0.70 ± 0.03 (7)	0.67 ± 0.03 (11) ^{ab}
2015	0.96 ± 0.13 (10)	0.97 (1)	1.25 ± 0.16 (3)	1.03 ± 0.10 (13) ^c
2016	1.12 ± 0.16 (9)	0.86 (1)	1.40 ± 0.15 (3)	1.16 ± 0.12 (13) ^{cd}
2017	0.55 ± 0.05 (9) ^b	0.46 (1) ^{ab}	0.24 ± 0.06 (3) ^a	0.47 ± 0.05 (13) ^a
2018	0.59 ± 0.09 (9)	0.59 (1)	0.81 ± 0.10 (5)	0.66 ± 0.07 (15) ^{ab}
2021	0.77 ± 0.12 (18)	0.71 (1)	0.55 ± 0.09 (7)	0.71 ± 0.09 (26) ^b
2022	0.61 ± 0.03 (10)	0.58 (1)	0.64 ± 0.08 (2)	0.62 ± 0.03 (13) ^{ab}
Среднее	0.84 ± 0.04 (87)	0.75 ± 0.07 (9)	0.87 ± 0.06 (43)	0.84 ± 0.03 (139)

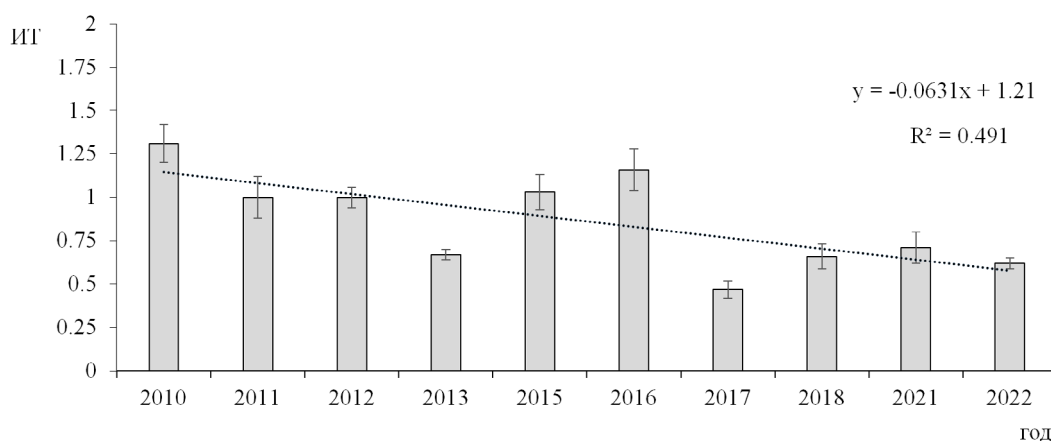


Рис. 3. Индекс токсичности воды Горьковского водохранилища (% от общего числа станций).

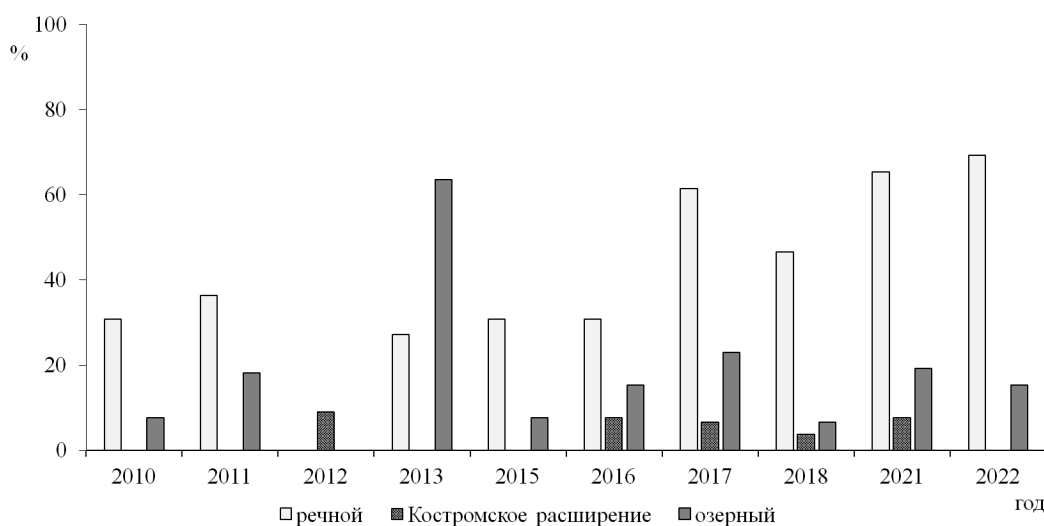


Рис. 4. Доля станций (% от общего числа) на различных участках Горьковского водохранилища с хроническим токсическим действием воды за период 2010–2022 гг.

дохранилища не проводилось. Имеются собственные данные по загрязнению воды некоторыми химическими элементами за 2015 г. (Табл. 2). Содержание тяжелых металлов в воде в большинстве случаев было ниже или соответствовало ранее зарегистрированным средним концентрациям верхнего и нижнего течений р. Волги (Моисеенко и др., 2006; Татарников и Гаврилова, 2019). Исключение составили такие элементы, как Cr, Cu и Zn. Для Cr, его более высокие концентрации отмечены на станциях речного участка: пос. Толга, пос. Туношна, р. Сезема и ниже г. Кинешма. Более высокие концентрации Cu и Zn по сравнению с их средними концентрациями для р. Волги зарегистрированы для всех исследованных станций водохранилища. Превышение в среднем составило 7 и 5 раз соответственно. Концентрации Cu и Zn превышали ПДК_{р/х} на всех станциях отбора проб (Табл. 2). Превышение по Cu составило 16.8–38.3 ПДК_{р/х}. Концентрации выше 30 мкг/л зафиксированы на станциях пос. Туношна, устье р. Сезема и г. Пучеж. Для Zn превышение составило 1.1–3.4 ПДК_{р/х} с высокими концентрациями (более 6.5 мкг/л) на станциях пос. Туношна, устье р. Сезема, г. Юрьево, г. Пучеж. Максимальные концентрации Cu и Zn отмечены на станции р. Сезема (38.3 и 3.4 ПДК_{р/х} соответственно), через которую Костромское расширение соединяется с Горьковским водохранилищем. Неравномерное распределение концентраций химических элементов по акватории водохранилища отмечено для Cr, Ni, Cu и Zn. Для Sr, Mo, Si, As и V наблюдали постепенное увеличение их концентрации в 1.1–3.5 раза вниз по течению с максимальными значениями в приплотинном участке (Табл. 2).

Табл. 2. Содержание некоторых химических элементов (мкг/л) в воде Горьковского водохранилища в сентябре 2015 г. «–» – нет данных; жирным шрифтом выделены показатели, превышающие ПДК_{р/х}.

Станция	Si	V	Cr	Ni	Cu	Zn	As	Sr	Mo
Речной участок									
г. Рыбинск (мкр Копаево)	289.2	0.2	0.0	0.0	23.6	19.4	0.5	125.4	0.2
пос. Толга	370.7	0.3	1.8	0.0	16.8	11.2	0.7	136.6	0.3
пос. Туношна	325.3	0.3	1.4	0.0	36.5	27.5	0.7	137.5	0.3
пос. Красный Профинтерн	379.1	0.3	0.0	0.0	19.9	14.4	0.8	130.4	0.3
р. Сезема	404.7	0.3	1.7	0.3	38.3	34.2	0.8	136.5	0.4
ниже г. Кострома	359.4	0.4	0.0	0.0	22.3	13.2	0.9	137.2	0.4
г. Волгореченск	245.8	0.4	0.0	0.3	29.6	15.6	0.9	140.8	0.4
ниже г. Плес	256.4	0.5	0.0	0.0	29.7	11.8	0.9	141.8	0.4
ниже г. Кинешма	370.2	0.6	1.4	0.0	19.1	20.2	1.1	143.0	0.4
Костромское расширение									
Костромское расширение	356.9	0.4	0.0	0.2	25.9	20.8	0.8	135.1	0.4
Озерный участок									
г. Юрьевец	502.5	0.7	0.0	0.3	25.2	23.8	1.3	141.9	0.5
г. Пучеж	477.4	0.7	0.0	0.4	31.5	24.2	1.3	148.8	0.5
г. Чкаловск	756.4	0.7	0.0	0.2	23.4	10.6	1.5	143.1	0.4
среднее содержание в воде р. Волга (верхнее и среднее течение) (Моисеенко и др., 2006)	860	1.1	0.7	2.1	3.7	4.0	1.6	169	0.5
ПДК _{р/х} ³	–	1	70	10	1	10	50	400	1

³ Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды, водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (Зарегистрировано в Минюсте РФ 13.01.2017 N 45203).

Табл. 3. Связь содержания химических элементов и анализируемых показателей *C. dubia* при биотестировании воды Горьковского водохранилища (данные 2015 г.)

Параметр	Коэффициент корреляции по Спирмену, $p \leq 0.5$	Уравнение регрессии	R ²
Гибель, 10 сут	Cu (-0.570)	$9.706 - 0.311 \times \text{Cu}$, $r = -0.54$, $p = 0.056$	0.293
	Li (0.766)	$-8.794 + 5.872 \times \text{Li}$, $r = 0.781$, $p = 0.002$	0.610
	Na (0.697)	$-2.637 + 0.002 \times \text{Na}$, $r = 0.703$, $p = 0.007$	0.494
	V (0.752)	$1.890 + 2.952 \times \text{V}$, $r = 0.806$, $p = 0.001$	0.650
Среднее число пометов	As (0.750)	$1.688 + 1.619 \times \text{As}$, $r = 0.727$, $p = 0.005$	0.528
	Rb (-0.636)	$6.485 - 3.388 \times \text{Rb}$, $r = -0.541$, $p = 0.057$	0.292
	Sr (0.769)	$-7.807 + 0.080 \times \text{Sr}$, $r = 0.771$, $p = 0.002$	0.595
	Mo (0.758)	$1.125 + 5.583 \times \text{Mo}$, $r = 0.661$, $p = 0.014$	0.436
Среднее количество молоди на 1 самку	Li (0.64)	$104.251 + 63.037 \times \text{Li}$, $r = 0.615$, $p = 0.025$	0.378
	Na (0.624)	$-59.495 + 0.030 \times \text{Na}$, $r = 0.742$, $p = 0.004$	0.551
	V (0.591)	$-11.121 + 30.174 \times \text{V}$, $r = 0.604$, $p = 0.029$	0.366
	As (0.586)	$9.556 + 16.018 \times \text{As}$, $r = 0.527$, $p = 0.064$	0.278
	Sr (0.663)	$-117.741 + 1.029 \times \text{Sr}$, $r = 0.731$, $p = 0.005$	0.535

Для установления связей между содержанием ЗВ в воде и ее пригодностью для гидробионтов был выполнен корреляционный анализ. Была выявлена зависимость ($r_s = -0.57$, $p = 0.05$) гибели цериодафний от содержания Cu в воде (Табл. 3). Несмотря на значимые корреляционные связи содержания Cu и гибели рачков, регрессионная модель оказалась не значимой ($R^2 = 0.293$). Репродуктивные показатели зависели от концентраций таких элементов, как Li, Na, V, As, Sr и Mo. Тем не менее, регрессионные модели, построенные для среднего числа молоди на 1 самку и концентраций Li, V, As, оказались недостоверными. Наиболее сильные зависимости ($r_s = 0.77-0.81$, $p = 0.001-0.002$) были обнаружены между содержанием Li, V, As, Sr и средним числом пометов на 1 самку (Табл. 3).

Обсуждение результатов

Отсутствие острой токсичности проб воды Горьковского водохранилища и невысокая смертность рачков при ее биотестировании за период экспозиции позволяют утверждать, что большинство проб за весь период наблюдений безопасны по показателю выживаемости. Отсутствие острой токсичности проб воды в акватории Горьковского водохранилища отмечено и другими авторами. При биотестировании воды притоков р. Волги (Сунжа, Казоха, Кинешемка, Мера) не зарегистрирована острая токсичность для рачка *Daphnia magna* Straus, 1820 (Марченко и др., 2016). Такие же выводы о токсичности воды перечисленных водотоков при биотестировании на *Ch. vulgaris* Beijerinck, 1890 и *D. magna* получены К.А. Тюкановой с соавторами (2019).

За период наблюдений отмечена тенденция к снижению усредненных значений ИТ, т.е. зафиксировано увеличение интегральной токсичности воды по показателю плодовитости рачков (Рис. 2). Для озерного участка водохранилища без учета года наблюдения отмечены статистически значимые более низкие показатели плодовитости рачков по сравнению с другими участками. Это явление связано с загрязнением воды, о чем свидетельствуют данные корреляционного анализа (Табл. 3) и более высокие концентрации As и Sr в воде озерного участка (Табл. 2).

Эксперименты по установлению хронического токсического действия, в ходе которых измеряются такие параметры, как изменение двигательной и пищевой активности, скорости размножения и др., более адекватно отражают загрязнение природной воды. К наиболее чувствительным отно-

сятся и репродуктивные показатели (Олькова и Маханова, 2018). В нашем исследовании усредненные показатели плодovitости цериодафний по участкам не достигали контрольных значений (Рис. 2). Исключение составили речной (2010 г.) и озерный (2010, 2015, 2016 гг.) участки: показатели плодovitости рачков были значимо выше контрольных значений. Возможно, это связано с повышенной средней температурой воды в этот период. В годы с обычным температурным режимом среднемесячная температура поверхностного слоя воды колебалась в пределах 18.4–23.0 °С при среднем многолетнем значении 20 °С. В 2015–2016 гг. прогрев поверхности воды чаще всего превышал норму на 1.5–6 °С, особенно сильно вода прогревалась летом 2016 г. (Герасимов и др., 2017). Однако такого сильного прогрева воды на значительной акватории Горьковского водохранилища, как летом 2010 г., предыдущими исследованиями не зарегистрировано. Летом 2010 г. она составила в среднем 27.6 °С (Копылов и др., 2013). Известно, что увеличение температуры воды удлиняет вегетационный период, увеличивает доступность питательных веществ, уменьшает количество хищников и приводит к неконтролируемому росту водорослей (Cazzolla Gatti, 2016), которые могут служить дополнительным кормом для рачков в условиях лабораторного тестирования. Об увеличении продукции фитопланктона в период с 2015–2020 гг. свидетельствуют и повышенные концентрации хлорофилла *a*, отмеченные в мелководном Костромском расширении Горьковского водохранилища и повсеместно – ниже впадения притоков (Минеева и др., 2022).

Химический состав поверхностных вод Горьковского водохранилища в сентябре 2015 г. отличался превышением норматива ПДК_{р/х} по Cu⁴ (16.8–38.3 ПДК_{р/х}) и Zn (1.1–3.4 ПДК_{р/х}) (Табл. 3). Превышение ПДК по Zn (1.3 ПДК_{р/х}) и Cu (7.7 ПДК_{р/х}) отмечено и в других исследованиях⁵. Среднегодовой объем притока в Горьковском водохранилище равен 55.4 км³ и на 70–90% сформирован волжскими водами, поступающими из вышележащего Рыбинского водохранилища (Минеева и др., 2022). Ранее для Рыбинского водохранилища установлены высокие концентрации Cu и Zn, в том числе обусловленные природными геохимическими особенностями данного региона (Гапеева, 2019; Томилина и др., 2018). Кроме того, обнаружено превышение концентраций Fe (в среднем 3.2 ПДК_{р/х}), Mn (5.8 ПДК_{р/х}) и показателя ХПК (2.7 ПДК_{р/х}). Средняя концентрация таких компонентов, как сульфаты, БПК₅, нефтепродукты, аммонийный азот, хлориды, нитриты, нитраты, фенолы, растворенный кислород и ионы Ni на протяжении всего периода находились на уровне ПДК_{р/х}. Для водохранилищ Волжского каскада, к числу которых относится Горьковское водохранилище, характерно увеличение содержания биогенных веществ, обусловленное высокой антропогенной нагрузкой на экосистему водохранилищ, расположенных в густонаселенных промышленных регионах Европейской России (Rivers..., 2021).

Оценка качества поверхностных вод зависит от целей, подходов и методов исследования. Так, для получения информации о химическом загрязнении водного объекта достаточно оценки качества воды с помощью индексов загрязнения. Среднее значение удельного комбинаторного индекса загрязненности воды за исследованный период в Горьковском водохранилище – 2.77, что соответствует классу качества 3А, «загрязненная». Качество воды верхнего проточного речного плеса (от г. Рыбинска до г. Юрьевца) в основном определяется водами, поступающими из Рыбинского водохранилища, и связано с водностью, объемом промышленных и бытовых сбросов и содержанием в них 3В (Кочеткова, 2010).

Одной из проблем методологии биотестирования является интерпретация данных о токсичности природных вод, находящихся под техногенным влиянием, а также поиск зависимостей между содержанием 3В и обнаруженной интегральной токсичностью (Олькова и Дабах, 2014). Методами корреляционного анализа выявлены сильные значимые связи содержания некоторых химических элементов с биологическими параметрами ветвистоусого рачка *C. dubia* (Табл. 3). Металлы относятся к элементам, которые всегда присутствуют в природе в различных концентрациях. Микроконцентрации многих металлов играют важную роль в метаболических процессах живых организмов, принимают участие в биологических функциях, таких как транспорт кислорода, связывание свободных радикалов, входят в состав макромолекул, энзимов, гормонов, обеспечивая нормальную жизнедеятельность. Однако в

⁴ Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды, водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (Зарегистрировано в Минюсте РФ 13.01.2017 N 45203).

⁵ Отчет о состоянии качества воды Горьковского, Чебоксарского и Куйбышевского водохранилищ зоны ответственности Учреждения в I полугодии 2016 года, 2016. Федеральное Агентство Водных ресурсов ГФУ инженерных защит Чебоксарского водохранилища по Нижегородской области.

высоких концентрациях они способны оказывать токсическое действие на гидробионтов. Наиболее сильные зависимости были обнаружены между содержанием Li, V, As, Sr и средним числом пометов на 1 самку (Табл. 3). Некоторые авторы (Byeon et al., 2021, Zhang et al., 2022) рассматривают As как жизненно важный микроэлемент и причисляют его к ультрамикроэлементам – микроэлементам, необходимым в особо малых концентрациях (подобно Se, V, Cr и Ni). В высоких концентрациях соединения As и V токсичны для живых организмов (Meina, 2020; Sharma and Sohn, 2009).

Для составления полного представления об эколого-токсикологической ситуации в водохранилище важно проводить эту оценку как с помощью физико-химических, так и биологических методов анализа. При этом результаты, полученные разными методами контроля качества вод, могут не всегда совпадать. Так, по гидрохимическим показателям вода Горьковского водохранилища и его притоков соответствует уровню «загрязненная» и «грязная», по гидробиологическим – «слабо загрязненная». Разногласия в оценках вызваны активным перемещением водными массами подвижных гидробионтов и отложенным эффектом воздействия на виды-индикаторы фито- и зоопланктона. Качество воды, определяемое с помощью методов биотестирования, принято оценивать как токсичное и/или нетоксичное; таким образом, результаты биотестирования дают интегральную оценку качества воды, учитывая воздействие всех химических соединений. Биоиндикация в большей мере опирается на трофический фактор (эвтрофирование) и дает возможность оценить качество воды с разной степенью загрязнения (Бакаева и др., 2022). При этом на структуру и функционирование водных сообществ влияют не только химические параметры, но и физико-географические особенности водоема.

Заключение

За период наблюдений с 2010 по 2022 гг. отмечено снижение в 2.2 раза средних значений индекса токсичности воды Горьковского водохранилища. Для озерного участка водохранилища без учета года наблюдения зафиксированы более низкие показатели плодовитости рачков по сравнению с другими участками, что связано с загрязнением воды, о чем свидетельствуют данные корреляционного анализа и более высокие концентрации химических элементов на станциях, расположенных в озерном участке водохранилища.

Химический состав поверхностных вод Горьковского водохранилища в сентябре 2015 г. отличался превышением норматива ПДК_{р/х} по Cu и Zn. Максимальные концентрации этих элементов отмечены на станции речного участка р. Сезема. Для Sr, Mo, Si, As и V наблюдали постепенное увеличение их концентрации вниз по течению с максимальными значениями в приплотинном участке.

Максимальное среднее значение числа станций с хроническим токсическим действием воды на рачка *C. dubia* зарегистрировано для речного участка водохранилища.

Биотестирование воды может служить дополнительным источником информации при химических и гидробиологических исследованиях и эффективным инструментом для оценки возможных биологических последствий загрязнения.

Список литературы

- Александрова, В.В., 2009. Применение метода биотестирования в анализе токсичности природных и сточных вод (на примере Нижневартовского района Тюменской области). Нижневартовский гуманитарный университет, Нижневартовск, Россия, 94 с.
- Бакаева, Е.Н., Тарадайко, М.Н., Игнатова, Н.А., Запорожцев, А.Ю., 2020. Динамика качества воды реки Темерник с учетом степеней токсичности по набору биотестов. *Водные биоресурсы и среда обитания* 3, 25–35. http://www.doi.org/10.47921/2619-1024_2020_3_3_25
- Бакаева, Е.Н., Тарадайко, М.Н., Аль-Гиззи, М.А.Б., 2022. Методологические проблемы оценки токсичности среды обитания гидробионтов. *Тезисы Всероссийской научной конференции «Чтения памяти В.И. Жадина: к 125-летию со дня рождения»*. Санкт-Петербург, Россия, 14–15.
- Гапеева, М.В., 2019. Обзор данных по содержанию тяжелых металлов в почвах, воде, донных отложениях, мхах в зоне влияния Череповецкой промышленной зоны за период с 1961 по 2014 годы (Вологодская область, Россия). *Тезисы VII Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 30-летию Института проблем промышленной*

экологии Севера ФИЦ КНЦ РАН и 75-летию со дня рождения доктора биологических наук, профессора В.В. Никонова. Апатиты, Россия, 16–17.

Герасимов, Ю.В., Малин, М.И., Соломатин, Ю.И., Косолапов, Д.Б., Лазарева, В.И. и др., 2018. Итоги комплексного исследования структуры и функционирования экосистем каскада Волжских водохранилищ в 2017 г. *Тезисы конференции «Экспедиционные исследования на научно-исследовательских судах ФАНО России и архипелаге Шпицберген в 2017 г.»*. Москва, Россия, 178–187.

Жмур, Н.С., 2018. Экотоксикологический контроль. Приемы исследований и лабораторная практика. Акварос, Москва, Россия, 472 с.

Законнов, В.В., 2015. Районирование водохранилищ Волги по условиям седиментации. *Материалы международной научно-практической конференции «География и регион»*. Пермь, Россия, 31–37.

Иголина, М.В., Чебан, Е.Ю., Володченко, Е.В., Бердникова, Е.Ю., Рачкова, Е.С. и др., 2016. Распределение показателей качества воды в озерной части Горьковского водохранилища и на участке р. Волга выше г. Н. Новгорода в 2016 г. (предварительные результаты). *Вестник Волжской государственной академии водного транспорта* 48, 129–137.

Ковалева, М.И., 2003. Оценка генотоксической активности воды Верхней Волги. *Биология внутренних вод* 2, 107–111.

Копылов, А.И., Стройнов, Я.В., Заботкина, Е.А., Романенко, А.В., Масленникова, Т.С., 2013. Гетеротрофные микроорганизмы и вирусы в воде Горьковского водохранилища в период аномальной высокой температуры воды. *Биология внутренних вод* 2, 16–24. <https://doi.org/10.7868/S0320965213010075>

Корнева, Л.Г., 2015. Фитопланктон водохранилищ бассейна Волги. Костромской печатный дом, Кострома, Россия, 284 с.

Кочеткова, М. Ю., 2010. Формирование качества воды Горьковского и Чебоксарского водохранилищ. *Известия РАН. Серия географическая* 2, 100–111.

Крылова, И.Н., Томилина, И.И., 2000. Оценка токсических и мутагенных свойств природной воды и донных отложений водохранилищ Верхней Волги (территория Ярославской области). *Биология внутренних вод* 1, 110–117.

Марченко, Т.А., Извекова, Т.В., Гушин, А.А., Гриневич, В.И., Головкина, Е.А., 2016. Качество воды в притоках р. Волга в акватории Горьковского водохранилища. *Известия высших учебных заведений. Серия «Химия и химическая технология»* 59 (5), 89–94.

Минеева, Н.М., Поддубный, С.А., Степанова, И.Э., Цветков, А.И. 2022. Абиотические факторы и их роль в развитии фитопланктона водохранилищ Средней Волги. *Биология внутренних вод* 6, 640–651. <https://doi.org/10.31857/S0320965222060158>

Моисеенко, Т.И., Кудрявцева, Л.П., Гашкина, Н.А., 2006. Рассеянные элементы в поверхностных водах суши: Технофильность, биоаккумуляция и экотоксикология. Наука, Москва, Россия, 261 с.

Олькова, А.С., Дабах, Е.В., 2014. Опыт интерпретации результатов биотестирования поверхностных вод при химическом и радиоактивном загрязнении. *Теоретическая и прикладная экология* 3, 21–28.

Олькова, А.С., Маханова, Е.В., 2018. Выбор биотестов для экологических исследований вод, загрязненных минеральными формами азота. *Вода и экология: проблемы и решения* 4 (76), 70–81.

- Рылина, О.Н., Карыгина, Н.В., Попова, О.В., Попова, Э.С., Галлей, Е.В. и др., 2013. Оценка степени загрязнения основных водотоков дельты р. Волги. *Научный потенциал регионов на службу модернизации* 2 (5), 74–79.
- Татарников, В.О., Гаврилова, Е.В., 2019. Многолетняя динамика и прогноз стока тяжелых металлов на Нижней Волге в связи с реализацией государственной программы «Оздоровление Волги». *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология* 1, 85–91.
- Томилина, И.И., Гапеева, М.В., Ложкина, Р.А., 2018. Экотоксикологическая оценка качества воды и донных отложений. В: Лазарева, В. И. (ред.), *Структура и функционирование Рыбинского водохранилища в начале XXI века*. РАН, Москва, Россия, 371–388.
- Тюканова, К.А., Спирина, А.А., Извекова, Т.В., Гуцин, А.А., 2019. Мониторинг природных вод и донных отложений малых рек Горьковского водохранилища. *Тезисы Международной научно-технической конференции «Инновационные подходы в решении современных проблем рационального использования природных ресурсов и охраны окружающей среды»*. Алушта, Россия, 103–110.
- Фролова, Е.А., Баянов, Н.Г., Минин, А.Е., Минина, Л.М., 2020. Макрозообентос Горьковского водохранилища. Таксономическая структура и количественное развитие. *Труды Мордовского государственного природного заповедника им. П.Г. Сидовича* 25, 381–392.
- Byeon, E., Kang, H.M., Yoon, C., Lee, J.S., 2021. Toxicity mechanisms of arsenic compounds in aquatic organisms. *Aquatic Toxicology* 237, 105901. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2021.105901>
- Cazzolla Gatti, R., 2016. Freshwater biodiversity: a review of local and global threats. *International Journal Environmental Studies* 73 (6), 887–904. <https://doi.org/10.1080/00207233.2016.1204133>
- Meina, E.G., Niyogi, S., Liber, K., 2020. Investigating the mechanism of vanadium toxicity in freshwater organism. *Aquatic Toxicology* 229, 105648. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105648>
- Mount, D.I., Norberg, T.J., 1984. A seven-day lifecycle cladoceran toxicity test. *Environmental Toxicology and Chemistry* 3, 425–434. <https://doi.org/10.1002/etc.5620030307>
- Rivers of Europe, 2022. 2nd Edition. Tickner, K. et al. (eds.). Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 924 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03745-X>
- Sharma, V.K., Sohn, M., 2009. Aquatic arsenic: toxicity, speciation, transformations, and remediation. *Environ International* 35 (4), 743–759. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.01.005>
- Sokal, R.R., Rohlf, F.J., 1995. *Biometry: the principles and practice of statistics in biological research*. W.H. Freeman and Company, New York, USA, 887 p.
- Taylor, H.E., 2001. *Inductively coupled plasma-mass spectrometry. Practices and techniques*, Academic Press, San Diego, USA, 294 p.
- Zhang, W., Miao, A.J., Wang, N.X., Li, C., Sha, J. et al., 2022. Arsenic bioaccumulation and biotransformation in aquatic organisms. *Environ International* 163, 107221. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107221>

References

- Aleksandrova, V.V., 2009. *Применение метода биотестирования в анализе токсичности природных и сточных вод (на примере Нижневартовского района Тюменской области)* [Application of the biotesting method in the analysis of the toxicity of natural and waste waters (on the example of

the Nizhnevartovsk district of the Tyumen region)]. Nizhnevartovsk Humanitarian University, Nizhnevartovsk, Russia, 94 p. (In Russian).

Bakaeva, E.N., Taradayko, M.N., Ignatova, N.A., Zaporozhtsev, A.Yu., 2020. Dinamika kachestva vody reki Temernik s uchetom stepenei toksichnosti po naboru biotestov [Dynamics of water quality in the Temernik River, taking into account the degrees of toxicity according to a set of bioassays]. *Vodnye bioresursy i sreda obitaniya [Aquatic Bioresources and Habitat]* **3**, 25–35. (In Russian). http://www.doi.org/10.47921/2619-1024_2020_3_3_25

Bakaeva, E.N., Taradayko, M.N., Al'-Gizzi, M.A.B., 2022. Metodologicheskie problemy otsenki toksichnosti sredy obitaniya gidrobiontov [Methodological problems of assessing the toxicity of the habitat of hydrobionts]. *Tezisy Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii "Chteniya pamyati V.I. Zhadina: k 125-letiyu so dnya rozhdeniya" [Theses of the All-Russian scientific conference "Readings in memory of V.I. Zhadin: on the 125th anniversary of his birth"]*. Saint Petersburg, Russia, 14–15. (In Russian).

Byeon, E., Kang, H.M., Yoon, C., Lee, J.S., 2021. Toxicity mechanisms of arsenic compounds in aquatic organisms. *Aquatic Toxicology* **237**, 105901. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2021.105901>

Cazzolla Gatti, R., 2016. Freshwater biodiversity: a review of local and global threats. *International Journal Environmental Studies* **73** (6), 887–904. <https://doi.org/10.1080/00207233.2016.1204133>

Frolova, E.A., Bayanov, N.G., Minin, A.E., Minina, L.M., 2020. Makrozoobentos Gor'kovskogo vodokhranilishcha. Taksonomicheskaya struktura i kolichestvennoe razvitie [Macrozoobenthos of the Gorky reservoir. Taxonomic structure and quantitative development]. *Trudy Mordovskogo gosudarstvennogo prirodnogo zapovednika im. P.G. Smidovicha [Proceedings of the Mordovian State Natural Reserve named P.G. Smidovich]* **25**, 381–392. (In Russian).

Gapeeva, M.V., 2019. Obzor dannykh po sodержaniyu tyazhelykh metallov v pochvakh, vode, donnykh otlozheniyakh, mkhakh v zone vliyaniya Cherepovetskoj promyshlennoj zony za period s 1961 po 2014 gody (Vologodskaya oblast', Rossiya) [Review of data on the content of heavy metals in soils, water, bottom sediments, mosses in the zone of influence of the Cherepovets industrial zone for the period from 1961 to 2014 (Vologda region, Russia)]. *Tezisy VII Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, posvyashchennoj 30-letiyu Instituta problem promyshlennoj ekologii Severa FITS KNC RAN i 75-letiyu so dnya rozhdeniya doktora biologicheskikh nauk, professora V.V. Nikonova [Theses of the VII All-Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 30th anniversary of the Institute of Industrial Ecology Problems of the North of the Federal Research Center of the Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences and the 75th anniversary of the birth of Doctor of Biological Sciences, Professor V.V. Nikonov]*. Apatity, Russia, 16–17. (In Russian).

Gerasimov, Yu.V., Malin, M.I., Solomatin, Yu.I., Kosolapov, D.B., Lazareva, V.I. et al., 2018. Itogi kompleksnogo issledovaniya struktury i funkcionirovaniya ekosistem kaskada Volzhskikh vodokhranilishch v 2017 g. [Results of a comprehensive study of the structure and functioning of the ecosystems of the Volga reservoir cascade in 2017 years]. *Abstracts of the conference "Ekspeditsionnye issledovaniya na nauchno-issledovatel'skikh sudakh FANO Rossii i arhipelage Shpitsbergen v 2017 g." [Abstracts of the conference "Expeditionary research on research vessels of the Federal Agency for Scientific Organizations of Russia and the Spitsbergen archipelago in 2017"]*. Moscow, Russia, 178–187. (In Russian).

Igonina, M.V., Cheban, E.Yu., Volodchenko, E.V., Berdnikova, E.Yu., Rachkova, E.S. et al., 2016. Raspredelenie pokazatelei kachestva vody v ozernoi chasti Gor'kovskogo vodokhranilishcha i na uchastke r. Volga vyshe g. N. Novgoroda v 2016 g (predvaritel'nye rezul'taty). [Distribution of water quality indicators in the lake part of the Gorky reservoir and in the section of the river. Volga above Nizhny Novgorod in 2016 year (preliminary results)]. *Vestnik Volzhskoi gosudarstvennoi akademii vodnogo transporta [Bulletin of the Volga State Academy of Water Transport]* **48**, 129–137. (In Russian).

- Kovaleva, M.I., 2003. Otsenka genotoksicheskoi aktivnosti vody Verhnei Volgi [Estimation of the genotoxic activity of the Upper Volga water]. *Biologiya vnutrennikh vod [Inland Water Biology]* **2**, 107–111. (In Russian).
- Kochetkova, M.Yu., 2010. Formirovanie kachestva vody Gor'kovskogo i Cheboksarskogo vodokhranilishch [Formation of water quality in the Gorky and Cheboksary reservoirs]. *Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Geographic series]* **2**, 100–111. (In Russian).
- Kopylov, A.I., Stroynov, Ya.V., Zobotkina, E.A., Romanenko, A.V., Maslennikova, T.S., 2013. Geterotrofnye mikroorganizmy i virusy v vode Gor'kovskogo vodokhranilishcha v period anomal'noi vysokoi temperatury vody [Heterotrophic microorganisms and viruses in the water of the Gorky reservoir during the period of abnormally high water temperature]. *Biologiya vnutrennikh vod [Inland Water Biology]* **2**, 16–24. (In Russian). <https://doi.org/10.7868/S0320965213010075>
- Korneva, L.G., 2015. Fitoplankton vodokhranilishch basseina Volgi [Phytoplankton of reservoirs of the Volga basin]. Kostroma Printing House, Kostroma, Russia, 284 p. (In Russian).
- Krylova, I.N., Tomilina, I.I., 2000. Otsenka toksicheskikh i mutagennykh svoystv prirodnoi vody i donnykh otlozhenii vodokhranilishch Verhnei Volgi (territoriya Yaroslavskoi oblasti) [Evaluation of the toxic and mutagenic properties of natural water and bottom sediments of the Upper Volga reservoirs (the territory of the Yaroslavl region)]. *Biologiya vnutrennikh vod [Inland Water Biology]* **1**, 110–117. (In Russian).
- Marchenko, T.A., Izvekova, T.V., Gushchin, A.A. Grinevich, V.I., Golovkina, E.A., 2016. Kachestvo vody v pritokakh reki Volga v akvatorii Gor'kovskogo vodokhranilishcha [The quality of water in the tributaries of the river Volga in the waters of the Gorky reservoir]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya [News of Higher Educational Institutions. Series Chemistry and Chemical Technology]* **59** (5), 89–94. (In Russian).
- Meina, E.G., Niyogi, S., Liber, K., 2020. Investigating the mechanism of vanadium toxicity in freshwater organism. *Aquatic Toxicology* **229**, 105648. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2020.105648>
- Mineeva, N.M., Poddubnyy, S.A., Stepanova, I.E., Tsvetkov, A.I., 2022. Abioticheskie faktory i ih rol' v razvitii fitoplanktona vodokhranilishch Srednei Volgi [Abiotic factors and their role in the development of phytoplankton in the reservoirs of the Middle Volga]. *Biologiya vnutrennikh vod [Inland Water Biology]* **6**, 640–651. (In Russian). <https://doi.org/10.31857/S0320965222060158>
- Moiseenko, T.I., Kudryavtseva, L.P., Gashkina, N.A., 2006. Rasseyannye elementy v poverkhnostnykh vodakh sushy: Tekhnofil'nost', bioakkumulyatsiya i ekotoksikologiya [Trace elements in terrestrial surface waters: Technophilicity, bioaccumulation and ecotoxicology]. Nauka, Moscow, Russia, 261 p. (In Russian).
- Mount, D.I., Norberg, T.J., 1984. A seven-day lifecycle cladoceran toxicity test. *Environmental Toxicology and Chemistry* **3**, 425–434. <https://doi.org/10.1002/etc.5620030307>
- Ol'kova, A.S., Dabakh, E.V., 2014. Opyt interpretatsii rezul'tatov biotestirovaniya poverkhnostnykh vod pri khimicheskoy i radioaktivnoy zagryaznenii [Experience in interpreting the results of biotesting of surface waters with chemical and radioactive contamination]. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya [Theoretical and Applied Ecology]* **3**, 21–28. (In Russian).
- Ol'kova, A.S., Makhanova, E.V., 2018. Vybory biotestov dlya ekologicheskikh issledovaniy vod, zagryaznyonnykh mineral'nymi formami azota [Selection of bioassays for ecological studies of waters polluted with mineral forms of nitrogen]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya [Water and Ecology: Problems and Solutions]* **4** (76), 70–81. (In Russian).

- Rivers of Europe, 2022. 2nd Edition. Tickner, K. et al. (eds.). Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 924 p. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03745-X>
- Rylina, O.N., Karygina, N.V., Popova, O.V., Popova, E.S., Galley, E.V. et al., 2013. Otsenka stepeni zagryazneniya osnovnykh vodotokov del'ty r. Volgi [Assessment of the degree of pollution of the main watercourses of the delta of the river Volga]. *Nauchnyi potentsial regionov na sluzhbu modernizatsii [The Scientific Potential of the Regions at the Service of Modernization]* 2 (5), 74–79. (In Russian).
- Sharma, V.K., Sohn, M., 2009. Aquatic arsenic: toxicity, speciation, transformations, and remediation. *Environ International* 35 (4), 743–759. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2009.01.005>
- Sokal, R.R., Rohlf, F.J., 1995. Biometry: the principles and practice of statistics in biological research. W.H. Freeman and Company, New York, USA, 887 p.
- Tatarnikov, V.O., Gavrilova, E.B., 2019. Mnogoletnyaya dinamika i prognoz stoka tyazhelykh metallov na Nizhnei Volge v svyazi s realizatsiei gosudarstvennoi programmy “Ozdorovlenie Volgi” [Multiyear dynamics and forecast of heavy metal runoff in the Lower Volga in connection with the implementation of the state programme “Volga rehabilitation”] *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya [Herald of Voronezh State University. Series: Geography. Geoecology]* 1, 85–91. (In Russian).
- Taylor, H.E., 2001. Inductively coupled plasma-mass spectrometry. Practices and techniques, Academic Press, San Diego, USA, 294 p.
- Tomilina, I.I., Gapeeva, M.V., Lozhkina, R.A., 2018. Ekotoksikologicheskaya otsenka kachestva vody i donnykh otlozhenii [Ecotoxicological assessment of the quality of water and bottom sediments]. In: Lazareva, V.I. (ed.), *Struktura i funktsionirovanie Rybinskogo vodokhranilishcha v nachale XXI veka [The structure and functioning of the Rybinsk Reservoir at the beginning of the 21st century]*. Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia, 371–388. (In Russian).
- Tyukanova, K.A., Spirina, A.A., Izvekova, T.V., Gushchin, A.A., 2019. Monitoring prirodnykh vod i donnykh otlozhenii mal'nykh rek Gor'kovskogo vodokhranilishcha [Monitoring of natural waters and bottom sediments of small rivers of the Gorky reservoir]. *Tezisy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii “Innovatsionnye podkhody v reshenii sovremennykh problem ratsional'nogo ispol'zovaniya prirodnykh resursov i okhrany okruzhayushchei sredy” [Theses of the International Scientific and Technical Conference “Innovative approaches to solving modern problems of rational use of natural resources and environmental protection”]*. Alushta, Russia, 103–110. (In Russian).
- Zakonov, V.V., 2015. Raionirovanie vodokhranilishch Volgi po usloviyam sedimentatsii [Zoning of the Volga reservoirs according to the conditions of sedimentation]. *Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii “Geografiya i region” [Proceedings of the international scientific and practical conference “Geography and Region”]*. Perm, Russia, 31–37. (In Russian).
- Zhang, W., Miao, A.J., Wang, N.X., Li, C., Sha, J. et al., 2022. Arsenic bioaccumulation and biotransformation in aquatic organisms. *Environ International* 163, 107221. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107221>
- Zhmur, N.S., 2018. Ekotoksikologicheskii kontrol'. Priemy issledovaniia i laboratornaya praktika [Ecotoxicological control. Research methods and laboratory practice]. Akvaros, Moscow, Russia, 472 p. (In Russian).