

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу ЛОЖКИНОЙ Розы Андреевны  
"ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ  
ЭФФЕКТЫ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ В РЫБИНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ",  
представленной на соискание ученой степени кандидата биологических наук  
по специальности 1.5.16 – Гидробиология

Рыбинское водохранилище является третьей ступенью Волжско-Камского каскада водохранилищ на р. Волга и расположено в промышленно развитом северо-западном регионе России. С территории Череповецкого промышленного узла в водохранилище поступают сточные воды металлургического комбината, предприятий по производству минеральных удобрений и коммунально-бытовые стоки. Значительными источниками загрязнения Рыбинского водохранилища являются склоновый сток с сельскохозяйственных территорий и атмосферные выпадения. Годовой объем сточных вод разбавляется водами водохранилища всего в десять раз, что свидетельствует о высокой антропогенной нагрузке на водоем. В связи с тем, что Рыбинское водохранилище служит источником водоснабжения и имеет рыбохозяйственное значение, актуальной становится комплексная оценка воздействия приоритетных загрязнителей – тяжелых металлов и металлоидов на экосистему водоема. Решению этой важной задачи посвящена диссертационная работа Р.А. Ложкиной.

Диссертация изложена на 169 страницах и состоит из введения, пяти глав, выводов и списка литературы (всего 281, в том числе – 121 иностранный источник), включает 35 таблиц и 21 рисунок. Во введении доказана актуальность выбранной темы, формулируются цель и задачи диссертации, обоснованы научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследований. Все положения, выносимые на защиту, базируются на большом эмпирическом материале, статистически доказаны и отражают важнейшие результаты исследований.

В первой главе на основе анализа литературы рассмотрены источники поступления и уровни загрязнения поверхностных вод и донных отложений металлами и металлоидами, проблемы нормирования содержания микроэлементов в воде и донных отложениях, связь биологических эффектов с биодоступностью микроэлементов и их накоплением в биоте. В целом обзор, при написании которого использована современная мировая литература, дает полное представление о важнейших аспектах загрязнения водоемов металлами и металлоидами, которые учитываются автором при оценке токсикологической ситуации в Рыбинском водохранилище.

Во второй главе представлена характеристика района исследований с указанием морфометрических и гидрологических характеристик Рыбинского водохранилища, климатических условий на водосборной территории, основных физико-химических показателей состава воды (прозрачность, цветность, содержание органического вещества, ионный состав, активная реакция среды). Рассмотрены типы донных отложений в разных районах водохранилища, что важно учитывать при изучении процессов накопления металлов в донных осадках. В разделе 2.3 второй главы подробно охарактеризованы методы сбора образцов воды и донных отложений для биотестирования. Схема расположения и координаты 47 станций отбора проб в Рыбинском водохранилище представлены в Приложении. Всего проанализировано 394 пробы воды и 419 проб донных отложений Рыбинского водохранилища. В 2015 г. было отобрано 79 образцов воды на водохранилищах Волжского каскада (Иваньковское, Угличское, Рыбинское, Горьковское, Чебоксарское, Куйбышевское, Саратовское) для оценки связей между показателями биотестирования воды и токсичностью металлов и металлоидов. Необходимо отметить, что автором выполнен огромный объем полевых и экспериментальных работ. При непосредственном участии автора собрано большое количество проб (175 проб воды и 277

проб донных отложений) и проведены широкие экспериментальные исследования, что является большим достоинством работы. Все токсикологические эксперименты, а также определение концентраций микроэлементов в воде, донных отложениях и тканях гидробионтов выполнены строго по стандартным методикам, что обеспечивает корректность полученных данных.

Автором тщательно продумана методология статистической обработки данных при анализе воздействия токсических веществ на биоту, а именно, применены различные методы многомерного статистического анализа для выявления связей между концентрациями химических элементов и показателями биотестирования. Автором учтен характер распределения признаков, что обеспечивает корректность при выявлении различий между выборками и оценке связей между показателями.

В третьей главе рассмотрены закономерности распределения металлов и металлоидов в воде и донных отложениях Рыбинского водохранилища и дана оценка антропогенного загрязнения водоема на основе вычисления коэффициентов загрязнения и геонакопления. Применение интегральных индексов, учитывающих направленность изменения целого комплекса показателей, позволило снизить влияние случайных факторов и увеличить точность оценки загрязненности среды. Ценность работе придает использование как российских, так и международных систем классификации качества воды и донных отложений, апробированных на большом числе водных объектов из различных географических регионов мира.

В ходе прочтения третьей главы возникли вопросы относительно данных, представленных в таблице 5 (С. 51 в диссертации). В диссертации указывается, что "концентрации большинства измеренных химических элементов в воде Рыбинского водохранилища соответствовали их среднему содержанию в поверхностных водах р. Волги (Иваньковское, Угличское водохранилища)". Однако необходимо отметить, что сравнение выборок по содержанию тяжелых металлов выполнено без учета высокой изменчивости показателей (для некоторых элементов в десятки раз). Например, за период 1985–2015 г. средние концентрации меди в воде Рыбинского водохранилища изменялись в диапазоне 1.4–30.2 мкг/л (таблица 5). В воде Иваньковского водохранилища содержание меди изменялось в пределах 2.3–12.5, для Угличского водохранилища приведена одна цифра – 12.4 мкг/л. В данном случае при сравнении выборок необходимо было применять непараметрические методы статистики.

Возникли вопросы по анализу опасности ситуации в Рыбинском водохранилище на основе расчета индексов загрязнения (КЗ). На С. 52 указывается: "По результатам анализа 2014–2015 гг. из большой группы (более 40 наименований) выделены наиболее токсичные элементы с повышенными концентрациями: Cr, Cu, Ni, Zn, Mn, Pb, Sr, V, Co, As (таблица 6)." Однако регламенты на содержание в воде большинства этих элементов не были превышены, за исключением меди и цинка. Об этом говорится на С. 52 в диссертации: "Для всех исследованных элементов за все годы наблюдений не отмечено превышения санитарно-гигиенических ПДК для питьевой воды (таблица 5). Превышение ПДКр/х зафиксировано для Cu и Zn. Максимальное превышение зарегистрировано в 2015 г. и составило для Cu и Zn 44.5 и 2.7 раз соответственно." Возникает вопрос: если в среде не превышены опасные пределы содержания элементов (Cr, Ni, Mn, Pb, Sr, V, Co, As), как ориентироваться на их потенциально высокую токсичность? Об этом же свидетельствуют значения коэффициентов загрязнения. Автор указывает, что высокие значения КЗ воды Рыбинского водохранилища, рассчитанного для 6 тяжелых металлов (Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Pb) зарегистрированы в Шекснинском плесе водохранилища. Но в таблице 7 (С. 55 в диссертации) для всех элементов, кроме Cu, Zn, значения КЗ оказались меньше 1, т.е. концентрации тяжелых металлов в воде были меньше ПДК. Например, для хрома, никеля и кадмия величины КЗ были на два порядка меньше ПДК. Непонятны также нулевые значения КЗ (например, для кадмия и свинца в Главном и Волжском плесах в 2015 г.). Как можно оценить ситуацию, если содержание большинства тяжелых металлов в воде

гораздо меньше ПДК? Однако в диссертации не приводятся объяснений, как расценивать "высокие значения КЗ" (С. 54) и как они характеризуют опасность ситуации в водоеме.

В третьей главе, в разделе 3.2, представлены результаты анализа данных по содержанию тяжелых металлов в донных отложениях Рыбинского водохранилища. Показано, что во многом содержание тяжелых металлов в донных отложениях Рыбинского водохранилища определяет поступление загрязняющих веществ с территории Череповецкого промышленного узла. Автором установлена также тесная связь между концентрацией исследованных химических элементов в донных отложениях и содержанием в илах осадочных пигментов. Таким образом, автором выявлена важная роль фитопланктона в биогеохимических циклах тяжелых металлов, что вполне закономерно, т.к. в последние десятилетия, в условиях потепления климата, усилилось эвтрофирование Рыбинского водохранилища и существенно возросли количественные показатели фитопланктона.

Четвертая глава посвящена оценке токсичности воды и донных отложений Рыбинского водохранилища и выявлению связей между показателями токсичности и химическим составом изученных сред. Автором выполнена большая кропотливая работа по биотестированию образцов воды и донных отложений Рыбинского водохранилища. В качестве тест-организма для биотестирования воды был применен планктонный рачок *Ceriodaphnia affinis* Lilljeborg, 1900, для биотестирования донных отложений – представитель донной фауны (личинки комара звонца *Chironomus riparius* Meigen, 1804). Маточные культуры этих видов были получены Институтом биологии внутренних вод РАН из Колумбийского научного центра США. В Приложении к диссертации приводится подробная характеристика биологических и экологических особенностей видов *Ceriodaphnia affinis* и *Chironomus riparius*, свидетельствующая об их высокой чувствительности к загрязнению, что обеспечивает надежность выявления токсичности образцов воды и донных отложений.

Автором было показано, что большинство проб воды были безопасны по показателю выживаемости за весь период наблюдений. Более информативными оказались репродуктивные показатели, которые позволили выявить разнообразную реакцию *Ceriodaphnia affinis* – от угнетения до увеличения плодовитости в разных пробах воды, т.е. оценить токсический эффект. Во время прочтения раздела 4.1 возник вопрос по анализу временной динамики токсичности воды в Рыбинском водохранилище. Автором были рассчитаны значения индекса токсичности в целом по водохранилищу как среднее арифметическое показателя за год (рисунок 5, С. 87). Усредненное значение индекса токсичности включало отклонения показателей как в сторону увеличения по сравнению с контролем, так и снижения. Однако увеличение плодовитости и размеров тела можно интерпретировать как отклик не столько на угнетающее токсичное действие загрязняющих веществ, а скорее, как признак адаптации организмов к загрязнению или реакцию на присутствие в среде биостимуляторов. В связи с этим, следует ли рассматривать эффекты стимуляции роста и плодовитости отдельно от случаев угнетения тест-объектов, когда наблюдается снижение физиологических показателей, особенно, в случаях увеличения смертности организмов в пробах?

Проблема поиска связей между реакцией гидробионтов и химическим составом среды является одной из наиболее сложных в мониторинге водных экосистем, что связано с многофакторностью воздействия на биоту. Большим достоинством работы является примененное автором сочетание данных химического анализа и биотестирования. Использование методов многомерной статистики (анализ избыточности, кластерный анализ и другие) позволило учесть изменчивость показателей и изучить структуру связей между химическим составом водной среды и показателями токсичности проб. Одним из главных результатов диссертационной работы является классификация проб воды по токсичности и выявление основных микроэлементов, определивших токсическое действие изучаемых образцов воды на тест-организмы. С использованием метода Random Forest

автором показано, что наибольший вклад в токсичность среды вносят стронций, литий и мышьяк, заметный вклад – сурьма, молибден и ванадий, меньший вклад – вольфрам, скандий, уран и никель. Корректность классификации микроэлементов была подтверждена использованием иерархического кластерного анализа с высокой бутстреп-поддержкой. Предложенные в диссертации подходы к выявлению факторов токсичности водной среды имеют большое методологическое значение, поскольку могут быть в дальнейшем эффективно использованы для оценки роли других загрязняющих веществ, например, хлорорганических соединений, которые относятся к числу приоритетных загрязнителей Рыбинского водохранилища.

Оценка токсичности донных отложений была выполнена по смертности и изменению размеров тела личинок *Chironomus riparius*. Автором показано, что наиболее токсичные донные отложения были отобраны в районе Шекснинского плеса водохранилища, в непосредственной близости от Череповецкого промышленного узла. Показано, что показатели гибели личинок комара *Chironomus riparius* и изменения линейных размеров значимо зависели от физико-химических характеристик грунта и содержания металлов, редкоземельных элементов, осадочных пигментов и органического вещества в донных отложениях.

В качестве критериев токсического действия илов были использованы такие чувствительные показатели как морфологические деформации структур ротового аппарата личинок (ментума, мандибул, комплекса верхней губы, антенн) и рассчитаны индексы тяжести антеннальной деформации ISAD и деформаций сильнохитинизированных структур ISMMD. Установлено, что доля деформированных сильнохитинизированных структур ротового аппарата личинок *Chironomus riparius* зависела от содержания в донных отложениях полихлорированных бифенилов, высокие уровни которых отмечаются в Шекснинском плесе. Таким образом, автором было выявлено тератогенное действие донных отложений, что необходимо для оценки отдаленных последствий загрязнения водоема.

Во время прочтения раздела 4.2 возник вопрос по результатам определения интервалов наиболее важных элементов в составе донных отложений, обеспечивающих оптимальный рост личинок *Chironomus riparius* (С. 112 в диссертации). Поскольку выборка включала и токсичные пробы донных отложений, то на чем было основано предположение об оптимальных условиях для роста личинок?

Пятая глава диссертации посвящена изучению процессов накопления ртути в мышцах леща *Abramis brama* в Рыбинском водохранилище. Особенности биогеохимического цикла ртути в водных экосистемах связаны с образованием в донных осадках ее метилированной формы, которой свойственна липофильность, что определяет быстрое накопление ртути в тканях гидробионтов, особенно, в организмах высших трофических уровней. Актуальными становятся исследования последствий биомагнификации, когда в тканях рыбы содержание ртути может достигать опасных для человека уровней. Автор изучает накопление ртути в мышцах леща с учетом взаимодействий между структурными компонентами экосистемы Рыбинского водохранилища – популяциями леща, бентосным сообществом, донными отложениями и водной толщей. При этом автор учитывает связи между содержанием ртути в мышцах леща и скоростями течений, прозрачностью, цветностью воды, содержанием хлорофилла в воде, гранулометрическим и химическим составом донных отложений, состоянием кормовой базы (структурными показателями бентосных сообществ, содержанием ртути в личинках хирономид) и характеристиками питания леща. Показано, что содержание ртути в мышцах леща не зависело от возраста, веса и пола рыб, но значимо различалось для разных районов водохранилища. Основным фактором накопления ртути в мышцах леща оказался трофический, на что указывают наиболее высокие значимые коэффициенты корреляции между содержанием ртути в мышцах леща, с одной стороны, и численностью хирономид, частным индексом потребления хирономид и общим индексом потребления,

с другой стороны. Выявлена тесная связь между цветностью воды и содержанием ртути в мышцах леща и личинках хирономид, что свидетельствует о поступлении ртути в комплексе с гумусовыми веществами с водосборной территории. Таким образом, применение системного подхода позволило автору изучить процессы миграции и накопления ртути в Рыбинском водохранилище на популяционном, ценоотическом и экосистемном уровнях.

По результатам исследований автором сформулированы пять выводов, которые соответствуют цели и поставленным задачам работы, являются логичными и обоснованными.

Замечания к диссертации не имеют принципиального характера, не снижают высокой научной значимости рассматриваемого диссертационного исследования и не меняют общую хорошую оценку работы.

Важно еще раз подчеркнуть, что диссертация Р.А. Ложкиной посвящена актуальной теме – изучению пространственно-временных закономерностей распределения в воде и донных отложениях Рыбинского водохранилища приоритетных загрязнителей – тяжелых металлов и металлоидов. Результаты исследований имеют большое теоретическое значение, поскольку вносят значимый вклад в представления о закономерностях распределения металлов и металлоидов в компонентах экосистемы равнинных водохранилищ, путях накопления загрязняющих веществ гидробионтами и роли микроэлементов в формировании токсичности среды. Новизна исследований определяется тем, что впервые на основе комбинированного использования методов биотестирования и аналитической химии показано соответствие результатов биотестирования и распределения тяжелых металлов в воде и донных отложениях Рыбинского водохранилища. Впервые на основе системного подхода рассмотрены закономерности накопления ртути в мышечной ткани леща *Abramis brama* в Рыбинском водохранилище в связи с важнейшими абиотическими и биотическими факторами среды. Практическая значимость полученных результатов связана с их использованием в целях мониторинга для выявления зон хронической и острой токсичности и разработки мероприятий по улучшению экологической ситуации в Рыбинском водохранилище.

В целом диссертация Р.А. Ложкиной представляет собой завершённое научное исследование. Работа оформлена в соответствии с требованиями ВАК и содержит небольшое количество опечаток. Автореферат в полной мере отражает основное содержание диссертации. По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ при защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (включая 3 статьи в журналах, индексируемых в Web of Science Core Collection и/или Scopus), что свидетельствует о хорошем профессиональном уровне соискателя.

По актуальности, научной новизне, методическому уровню, объёму исследований, теоретическому и практическому значению, объёму и уровню публикаций диссертационная работа «ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ И БИОЛОГИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОИДОВ В РЫБИНСКОМ ВОДОХРАНИЛИЩЕ» полностью соответствует критериям, установленным пп. 9-14 Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 «О порядке присуждения ученых степеней» (ред. от 11.09.2021), а ее автор Роза Андреевна Ложкина заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата биологических наук по специальности 1.5.16 – Гидробиология.

Доктор биологических наук,  
ведущий научный сотрудник,  
руководитель лаборатории гидробиологии

Института водных проблем Севера – обособленного подразделения Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Федерального исследовательского центра  
«Карельский научный центр Российской академии наук»

*Калинина*

Наталья Михайловна Калинкина

185030 Республика Карелия, г. Петрозаводск, просп. А. Невского, 50  
e-mail: [serioda@mail.ru](mailto:serioda@mail.ru); телефон: 8(8142) 57-65-20

28 сентября 2023

Подпись Н.М. Калинкиной заверяю:

*С. Мухоморова*



*С. Мухоморова  
Заведующий  
Ф.И.Ц. Карелия РАН*

Я, **Калинкина Наталия Михайловна**, даю согласие выступить официальным оппонентом по диссертации **Ложкиной Розы Андреевны** на тему "**Пространственно-временное распределение и биологические эффекты металлов и металлоидов в Рыбинском водохранилище**", представленной на соискание ученой степени кандидата биологических наук по специальности 1.5.16. – гидробиология.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ ОППОНЕНТЕ

1. Ученая степень, ученое звание, отрасль науки, по которой защищена диссертация: доктор биологических наук, биологические науки, экология.
2. Место работы (полное наименование организации): Институт водных проблем Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук»
3. Сокращенное наименование организации: "ИВПС КарНЦ РАН"
4. Почтовый адрес организации с указанием индекса: 185030 г. Петрозаводск, пр. А.Невского, 50
5. Адрес официального сайта в сети Интернет: <http://water.krc.karelia.ru/>
6. Наименование структурного подразделения: лаборатория гидробиологии
7. Должность: ведущий научный сотрудник
8. Телефон с указанием кода города: 8 (814-2) 57-63-81
9. Адрес электронной почты: [serioda@mail.ru](mailto:serioda@mail.ru)
10. Список основных публикаций по профилю оппонируемой диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет (не более 15):

1. Kalinkina N. M., Polyakova T. N., Syarki M. T., Tekanova E. V. Scientific Principles of Biomonitoring of Lake Onego // *Doklady Earth Sciences*. Pleiades Publishing, 2018. V. 482. № 1. P. 1185-1188.
2. Теканова Е.В., Калинкина Н.М., Кравченко И.Ю. Геохимические особенности функционирования биоты в водоемах Карелии // *Известия РАН. Серия географическая*. 2018. №1. С. 90-100.
3. Vysotskaya R. U., Tkach N. P., Kalinkina N. M. The Influence of Sodium Lignosulfonate on the Lipid Composition in the Invasive Amphipod *Gmelinoides fasciatus* Stebbing of Lake Onego // *Inland Water Biology*, 2019, Vol. 12, No. 2, pp. 240–247
4. Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Сабылина А. В., Рыжаков, А. В. Изменения гидрохимического режима Онежского озера с начала 1990-х годов // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2019. № 1. С. 62-72.
5. Kalinkina N., Tekanova E., Korosov A., Zobkov M., Ryzhakov A. What is the extent of water brownification in Lake Onego, Russia? // *Journal of Great Lakes Research*. 2020. V. 46. P. 850–861
6. Калинкина Н. М., Теканова Е. В., Ефремова Т. В., Пальшин Н. И., Назарова Л. Е., Баклагин В. Н., Здоровеннов Р. Э., Смирнова В. С. Реакция экосистемы Онежского озера в весенне-летний период на аномально высокую температуру воздуха зимы 2019/2020 годов // *Известия РАН. Серия географическая*. 2021. Т. 85. № 6. С. 888–899.

