

Научная статья

УДК 597.554: 576.809.7 + 591.5

DOI: 10.18101/2542-0623-2026-1-37-49

Биоиндикация загрязнения тяжелыми металлами в акваториях озера Байкал: гематологические и иммунологические ответы у сибирской плотвы *Rutilus rutilus lacustris* (Pallas, 1814)

**О. Е. Мазур, С. В. Гомбоева, С. Д. Жамсаранова,
С. Н. Лебедева, Г. П. Ламажапова, Е. В. Сардонова**

© Мазур Ольга Евгеньевна

кандидат биологических наук, научный сотрудник,
Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
Россия, 670047, г. Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6;
магистрант,
Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления
Россия, 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40в, стр. 1
olmaz33@yandex.ru

© Гомбоева Саяна Владимировна

кандидат биологических наук, доцент
sv2@rambler.ru

© Жамсаранова Сэсэгма Дашиевна

доктор биологических наук, профессор
zhamsarans@mail.ru

© Лебедева Светлана Николаевна

доктор биологических наук, профессор
lebedeva1959@mail.ru

© Ламажапова Галина Петровна

доктор биологических наук, профессор
lamazhap@mail.ru

© Сардонова Елена Валериановна

кандидат биологических наук, доцент
lena_mangsord@mail.ru

Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления
Россия, 670013, г. Улан-Удэ, ул. Ключевская, 40в, стр. 1

Аннотация. Исследование направлено на оценку уровня содержания тяжелых металлов (ТМ) в печени сибирской плотвы *Rutilus rutilus lacustris* (Pallas, 1814) из двух акваторий оз. Байкал — залива Черкалов (часть авандельты р. Селенги) и условно-фонового Чивыркуйского залива (ценный природный комплекс с минимальным антропогенным прессом) — и их влияния на гематологические и иммунологические параметры.

В тканях печени были проанализированы концентрации четырех тяжелых металлов — кадмия, меди, свинца, цинка. Результаты показали, что содержание металлов зависело от экосистемы: у плотвы, обитающей в заливе Черкалов, был более высокий уровень содержания всех ТМ. Гематологический анализ черкаловской популяции показал значимые сдвиги: снижение общего числа лейкоцитов и угнетение нейтрофильного ростка. Иммунологический статус этих рыб характеризовался подавлением Т-клеточного звена иммунитета. Корреляционный анализ показал сильные связи между содержанием ТМ и негативными изменениями в гемо- и иммунопоэзе плотвы. Выявленные нарушения коррелировали с уровнем содержания ТМ в печени, что подтверждает репрезентативность данных параметров для биоиндикации. Полученные данные подчеркивают необходимость регулярного мониторинга физиологического состояния гидробионтов для ранней диагностики негативных последствий загрязнения уникальной экосистемы оз. Байкал.

Ключевые слова: *Rutilus rutilus lacustris*, тяжелые металлы, лейкоциты, биоиндикация, озеро Байкал, авандельта.

Благодарности

Авторы выражают благодарность С. В. Гармаевой (Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления) за помощь в сборе материала, О. Б. Жепхоловой (Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН) за помощь в определении возраста рыб. Работа выполнена при частичной поддержке гранта РФФИ (грант № 05-04-97268) и проекта (FWSM-2021-0002).

Для цитирования

Биоиндикация загрязнения тяжелыми металлами в акваториях озера Байкал: гематологические и иммунологические ответы у сибирской плотвы *Rutilus rutilus lacustris* (Pallas, 1814) / О. Е. Мазур, С. В. Гомбоева, С. Д. Жамсаранова [и др.] // Природа Внутренней Азии. Nature of Inner Asia. 2026. № 1(34). С. 37–49. DOI: 10.18101/2542-0623-2026-1-37-49

Введение

Пресноводные экосистемы испытывают возрастающую антропогенную нагрузку, связанную с поступлением загрязняющих веществ, среди которых особую опасность представляют тяжелые металлы (ТМ). В отличие от органических поллютантов ТМ не подвергаются деструкции, а мигрируют и перераспределяются между компонентами экосистем, что обуславливает актуальность оценки масштабов и последствий такого загрязнения в рамках экологического мониторинга. Эффективным инструментом для этого служит биоиндикация, основанная на анализе накопления токсичных элементов в организмах-индикаторах. В частности, анализ аккумуляции ТМ в органах и тканях рыб в бассейне Байкала позволит не только выявить закономерности включения поллютантов в трофические цепи водоема [Гомбоева и др., 2003; Хажеева и др., 2005], но и получить интегральную оценку токсикологической нагрузки на экосистему.

Особую значимость эти вопросы приобретают в контексте крупных трансграничных водосборов, каким является бассейн р. Селенги — главного притока оз. Байкал. Бассейн р. Селенги подвержен воздействию ряда антропогенных факторов, включая промышленные, сельскохозяйственные и коммунальные стоки

[Чебыкин и др., 2012; Ульзетуева, Гомбоев, 2016]. Залив Черкалов, представляющий собой мелководную прибрежную зону оз. Байкал, является частью аванделты р. Селенги, которая исполняет роль природного биофильтра [Тулохонов, Плюснин, 2022]; однако ее буферная емкость может быть ограничена при хроническом токсическом воздействии, что потенциально приводит к загрязнению акватории самого залива [Белозерцева и др., 2018]. Однако Чивыркуйский залив представляет собой ценный природный комплекс с минимальным техногенным прессом на момент исследования [Гомбоева и др., 2003]. Залив является частью территории Забайкальского национального парка, что делает его важным объектом для получения фоновых экологических данных.

Накопление ТМ в организме гидробионтов приводит к многообразным негативным последствиям, нарушающим их нормальное функционирование [Лапинова, 2017; Чуйко и др., 2022]. Токсичность ТМ для рыб обусловлена в первую очередь запуском окислительного стресса, что влечет за собой иммунодефицитные состояния, повреждение органов, нарушения онтогенеза и репродукции. В связи с этим исследования физиологического состояния рыб основаны на высокоинформативном подходе диагностики патологий, поскольку гематологические и иммунологические параметры чутко реагируют на негативные воздействия, отражая степень напряжения адаптационных механизмов организма [Salinas et al., 2017; Seibe, Bassmann, Rebl, 2021]. Кроме того, будучи ценным пищевым ресурсом, богатым белком, витаминами и полиненасыщенными жирными кислотами, рыба становится ключевым каналом поступления металлов в организм человека, потенцируя развитие ряда заболеваний. Таким образом, исследование источников загрязнения и специфики токсического действия ТМ на рыб имеет не только экологическое, но и непосредственное медико-социальное значение, являясь основой для разработки эффективных природоохранных мер.

Перспективным объектом для таких исследований является сибирская плотва *Rutilus rutilus lacustris* (Pallas, 1814), имеющая большое значение в структуре ихтиоценоза оз. Байкал [Рыбы озера Байкал... 2007]. Плотва характеризуется эврифагией, демонстрируя высокую пластичность в использовании различных пищевых ресурсов [Матвеев и др., 2012]. Достижение половой зрелости происходит на 3–4-м году жизни, а нерестовый период протекает с середины мая до начала июня [Рыбы озера Байкал... 2007]. Универсальность плотвы как эврибионтного вида в сочетании с отсутствием выраженных миграций делает ее репрезентативным объектом для биоиндикации, позволяя оценивать состояние здоровья локальных популяций и качество среды их обитания.

Цель работы — сравнить уровни содержания тяжелых металлов (Cd, Cu, Pb, Zn) в печени сибирской плотвы двух акваторий оз. Байкал (Чивыркуйский залив и залив Черкалов) и оценить взаимосвязь этих металлов с некоторыми показателями гемо- и иммунопоэза.

Материал и методы

Исследование проведено на особях сибирской плотвы, отловленных в подледный период (март 2007 г.) оз. Байкал из промысловых уловов подледным неводом.

Пробы взяты у рыб из двух локаций: залив Черкалов (авандельта р. Селенги) ($n = 17$) и Чивыркуйский залив ($n = 14$) соответственно. Условно-фоновой группой служила популяция из Чивыркуйского залива оз. Байкал. Выборка рыб представлена 5+ – 7+-летним возрастом особей, при одинаковом гендерном соотношении, III–IV стадии зрелости гонад, длиной и массой тела 155–200 мм 50–115 г соответственно. Забор крови у живых рыб осуществляли из гемального канала хвоста. Мазки крови фиксировали раствором-красителем Май-Грюнвальда и окрашивали по Романовскому с последующим стандартным гематологическим анализом [Сборник... 1999]. Идентифицировали следующий популяционный состав лейкоцитов: агранулоциты (лимфоциты и моноциты), агарнулоциты (нейтрофилы на разных стадиях развития), вакуолизированные клетки. Клетки крови определяли до вида по классификации Ивановой (1983). Часть крови стабилизировали гепарином для определения популяционного состава лимфоцитов (Т- и В-клетки) в реакции розеткообразования, концентрацию общего белка в сыворотке определяли рефрактометрически, а общее количество иммуноглобулинов — методом осаждения насыщенным раствором фосфатов [Сборник... 1999]. Содержание ТМ (Cu, Zn, Cd, Pb) определяли в печени исследованных рыб методом атомно-абсорбционной спектроскопии. Статистическая обработка данных проведена с использованием пакета «Statistica». Для оценки взаимосвязи параметров использовали коэффициент корреляции Спирмена (r_s).

Результаты исследований

В ходе проведенных исследований были получены данные о содержании ряда ТМ в печени сибирской плотвы, отловленной в двух различных акваториях оз. Байкал: в Чивыркуйском заливе (условно-фоновый район) и в заливе Черкалов (рис. 1). Сравнительный анализ выявил статистически значимое повышение концентраций всех исследуемых металлов у особей из залива Черкалов по сравнению с условно-фоновой группой из Чивыркуйского залива.

Содержание **цинка** в печени рыб популяции из залива Черкалов составило $88,02 \pm 1,09$ мкг/г, что значимо превышает показатель условно-фоновой группы ($68,2 \pm 0,91$ мкг/г). Аналогичная закономерность установлена для **меди**: ее концентрация в заливе Черкалов ($0,8 \pm 0,01$ мкг/г) была значимо выше, чем в Чивыркуйском заливе ($0,5 \pm 0,01$ мкг/г).

Наиболее выраженные межпопуляционные различия отмечены для токсичных элементов — **свинца** и **кадмия**. Уровень свинца в тканях печени рыб из залива Черкалов ($0,8 \pm 0,06$ мкг/г) более чем в два раза превышал таковой у рыб из условно-фоновой зоны ($0,4 \pm 0,04$ мкг/г). Концентрация **кадмия**, несмотря на низкие значения, также была статистически значимо выше в заливе Черкалов ($0,004 \pm 0,0001$ мкг/г против $0,003 \pm 0,0001$ мкг/г таковых особей чивыркуйской популяции).

Следует отметить, что превышение предельно допустимой концентрации (ПДК) [Сан ПиН 2.3.2.1078-02] отмечено только для цинка во всех исследуемых образцах. Вместе с тем необходимо указать, что цитируемые ПДК разработаны для пищевых продуктов и учитывают воздействие нормируемого вещества только на людей, а не на рыб.

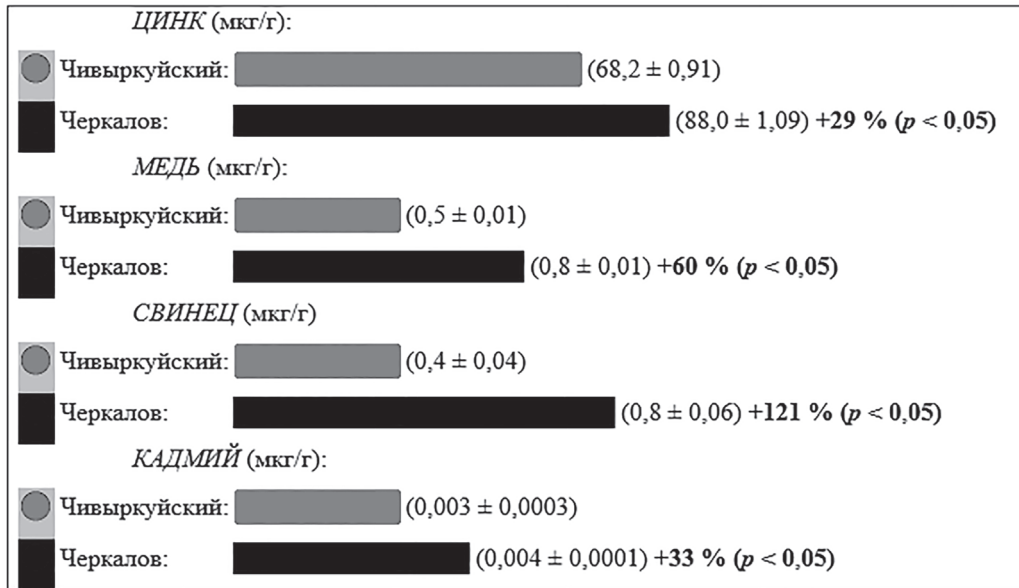


Рис. 1. Содержание тяжелых металлов в печени сибирской плотвы из озера Байкал

Примечание. Длина столбцов пропорциональна значениям показателей; все различия между заливами статистически значимы ($p < 0,05$); $n = 9$ для каждой популяции рыб; проценты показывают увеличение содержания ТМ в заливе Черкалов относительно условно-фоновому участку (Чивыркуйский залив)

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о значительно более высокой нагрузке на гидробионтов, в частности на сибирскую плотву, со стороны ТМ в акватории залива Черкалов по сравнению с условно-фоновым Чивыркуйским заливом.

Сравнительный гематологический и иммунологический анализ сибирской плотвы из двух акваторий озера Байкал — залива Черкалов и условно-фоновому Чивыркуйскому заливу — выявил ряд статистически значимых различий (рис. 2–3). У рыб из залива Черкалов зарегистрировано снижение **общего числа лейкоцитов** до 23% ($p < 0,05$) по сравнению с таковым особей чивыркуйской популяции. В лейкоцитарной формуле наблюдались следующие сдвиги. Относительное содержание **лимфоцитов** было выше в 1,1 раза ($p < 0,05$). В отличие от этого нейтрофильный росток кроветворения оказался подавленным. Численность клеток на всех стадиях дифференцировки у рыб из залива Черкалов была значимо снижена (в 4–7 раза, $p < 0,05$), в периферической крови отмечено отсутствие **метамиелоцитов** и **миелоцитов** в отличие от условно-фоновой группы. При оценке иммунологического статуса рыб у особей из залива Черкалов по сравнению с условно-фоновой группой наблюдалось статистически значимое снижение относительного числа Т-лимфоцитов (в 1,3 раза). Уровень В-лимфоцитов, индекс обилия лейкоцитов, содержание общего белка и иммуноглобулинов у плотвы черкаловской популяции варьировал в широких пределах и значимо не отличался между группами.

Проведенный корреляционный анализ выявил статистически значимые взаимосвязи между содержанием ТМ в печени плотвы и изменениями параметров крови. Результаты демонстрируют комплексное влияние токсикантов на иммунную систему рыб.

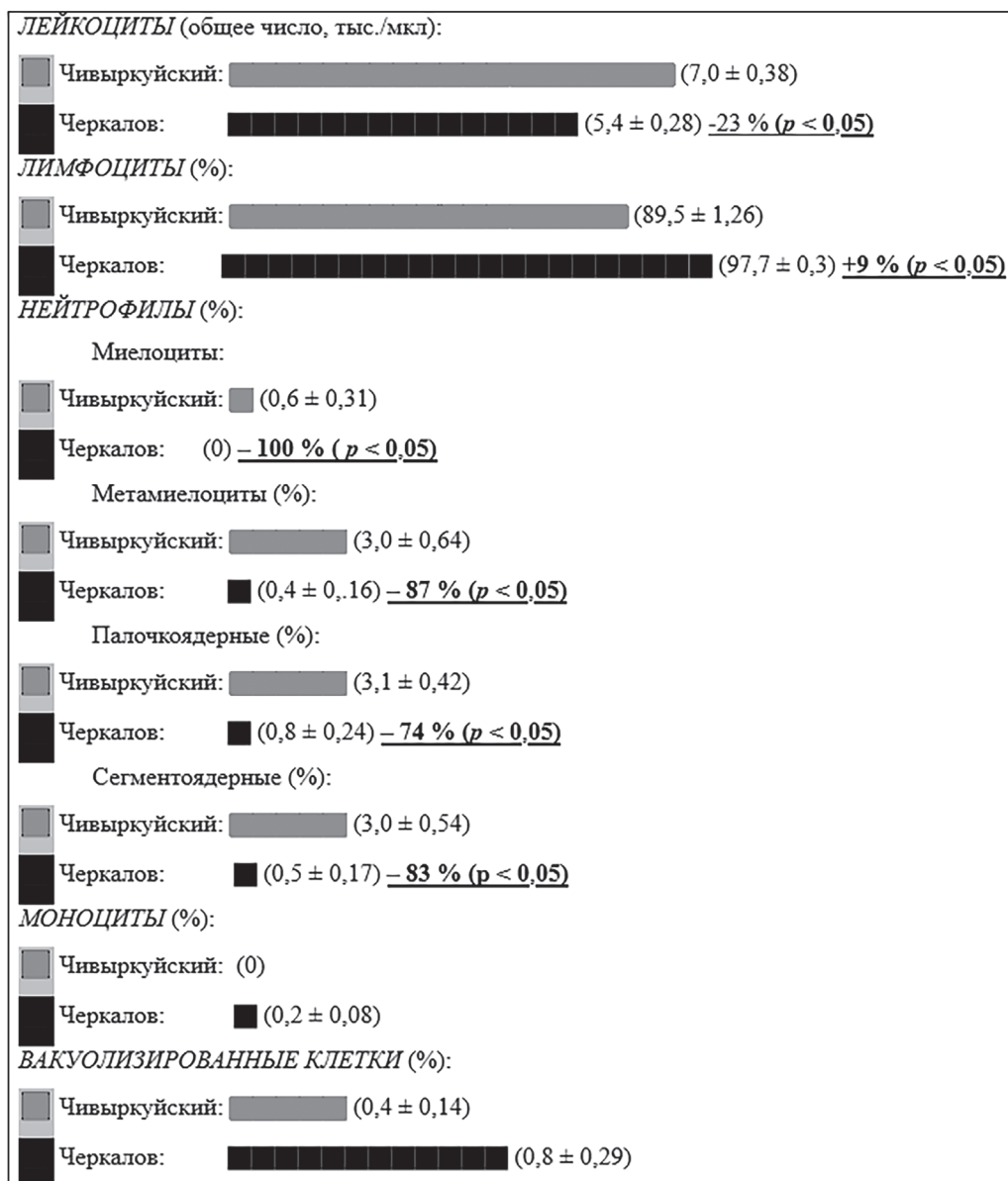


Рис. 2. Характеристики белой крови сибирской плотвы оз. Байкал

Примечание. Длина столбцов пропорциональна значениям показателей; различия между заливами статистически значимы при $p < 0,05$; проценты показывают изменение относительно условно-фоновому участку (Чивыркуйский залив); $n = 17$ и $n = 14$ для черкаловской и чивыркуйской популяций рыб соответственно для рисунков 2 и 3.

Установлена сильная положительная связь между числом **вакуолизированных клеток** и содержанием **меди** ($r_s = 0,63$) и **цинка** ($r_s = 0,76$; $p < 0,03$), причем с цинком корреляция была максимальной. Одновременно выявлены значимые отрицательные корреляции: между общим числом **лейкоцитов** и содержанием **цинка** ($r_s = -0,85$; $p < 0,004$), между долей **палочкоядерных и сегментоядерных нейтрофилов** и содержанием **свинца** ($r_s = -0,67$; $p < 0,05$), а также между количеством **Т-лимфоцитов** и содержанием **меди и цинка** ($r_s = -0,57$).

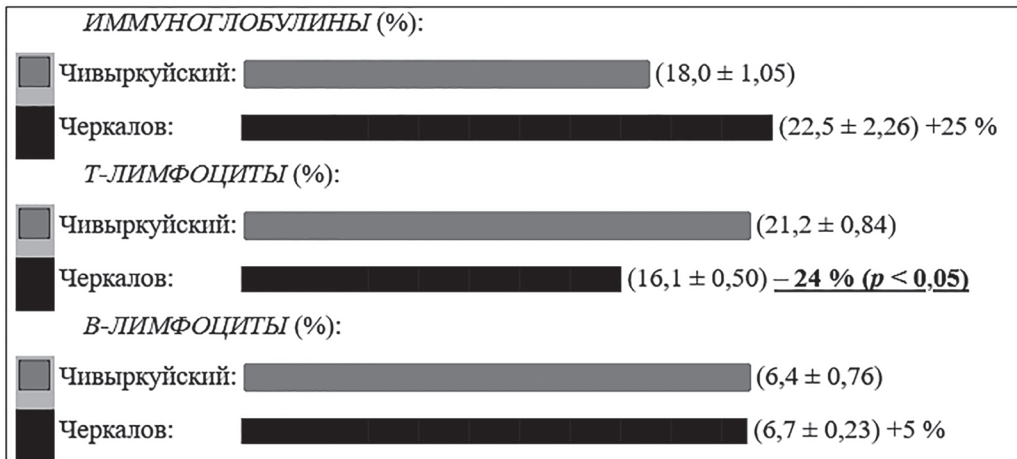


Рис. 3. Иммунологические характеристики сибирской плотвы из оз. Байкал

Обсуждение

Полученные данные выявили значительную пространственную неоднородность в содержании ТМ в печени сибирской плотвы в подледный период. Регистрируемое превышение концентраций цинка, меди, свинца и кадмия в печени плотвы из залива Черкалов над уровнем, отмеченным в условно-фоновом Чивыркуйском заливе, хорошо согласуется с концепцией локального загрязнения прибрежных акваторий, испытывающих антропогенную нагрузку [Холодкевич и др., 2018].

Данный феномен может быть обусловлен, в частности, процессами, описанными для дельты/авандельты, которые аккумулируют химические вещества, поступающие с загрязненными промышленными, коммунальными и сельскохозяйственными стоками через речную сеть [Ульзетуева, Гомбоев, 2016; Воробьева и др., 2018; Тулохонов, Плюснин, 2022]. Анализ литературных данных свидетельствует об интенсивном антропогенном загрязнении р. Селенги на всем ее протяжении. Исследования фиксируют обширное распространение и высокие концентрации ксенобиотиков различной природы от монгольской части бассейна до дельты на территории России. Основными источниками такого загрязнения являются г. Улан-Удэ, а также промышленные объекты региона — Джидинский, Селенгинский и Тимлюйский комбинаты [Тугарина, Пронин, 2006]. Кроме того, в барьерной зоне оз. Байкал в подледный период отмечается превышение рыбохозяйственных нормативов по многим химическим веществам, чему способствуют специфические гидрологические условия ледостава и возрастающая доля подземного стока

[Чебыкин и др., 2012]. Таким образом, имеющиеся данные однозначно указывают на интенсивное загрязнение речной экосистемы.

Результаты настоящего исследования демонстрируют пространственно-градиентное изменение гематологического и иммунологического статуса сибирской плотвы, что коррелирует с предполагаемым воздействием антропогенной нагрузки на акваторию оз. Байкал. Выявленные изменения у исследуемой плотвы согласуются с общемировыми данными о негативном воздействии ТМ на гидробионтов [Jaishankar et al., 2014; Lee et al., 2019; Jovičić et al., 2025]. В целом согласно литературным данным воздействие ТМ на гемо- и иммунопоэз рыб характеризуется дозозависимой двойственностью и зачастую носит противоречивый характер, проявляясь как подавлением, так и стимуляцией [Головина, 1996; Bols et al., 2001; Крючков, 2004; Javed, Usmani 2015; Butrimavičienė et al., 2021]. Конкретный характер и выраженность ответа организма рыб определяются комплексом факторов, включая вид, оцениваемый физиологический параметр, а также условиями окружающей среды, в том числе наличием комплекса ксенобиотиков.

Выбранный для исследования вид — сибирская плотва — представляет собой типичный эврифаг с онтогенетическими изменениями спектра питания. Взрослые особи потребляют бентос, детрит и водную растительность, что обуславливает их прямой контакт с донными отложениями — основным депо ТМ и стойких органических загрязнителей [Хажеева и др., 2005; Rashmi, Pratima, 2013]. Печень рыб как центральный орган метаболизма и детоксикации активно аккумулирует ксенобиотики, что делает ее идеальным объектом для оценки уровня загрязнения среды [Гомбоева и др., 2003; Authman et al., 2015]. Она играет важную роль в связывании металлов с металлотионеинами и их последующем накоплении [Wang et al., 2014; Jovičić et al., 2017]. Однако при превышении буферной емкости этой системы ТМ инициируют в первую очередь окислительный стресс, что подтверждается многочисленными исследованиями [Wang et al., 2015; Zeng et al., 2025].

Среди ТМ особый интерес представляют медь и цинк в силу их двойственной биологической роли. Медь является важным микроэлементом, однако при избыточном поступлении и хроническом накоплении в организме проявляет свойства токсичного ТМ. Этот элемент, являясь мощным прооксидантом, способен как подавлять, так и (в некоторых условиях) стимулировать различные компоненты врожденного иммунитета рыб [Bols et al., 2001]. Cu индуцирует апоптоз и некроз клеток в лимфоидных органах [Gaetke, Chow, 2003; Wang et al., 2015], что согласуется с выявленным нами у плотвы черкаловской популяции угнетением клеточного звена иммунитета и появлением вакуолизированных лейкоцитов, положительно коррелирующим с уровнем этого металла в печени. Схожей эссенциально-токсической двойственностью обладает и цинк, который является жизненно важным кофактором [Lall, Kaushik, 2021], но в высоких концентрациях он действует как супрессор и его токсичность во многом опосредована именно нарушением баланса с медью (антагонизм) [Гармаза, Слобожанина, 2021]. В природных условиях цинк редко встречается в чистом виде и его эффекты могут модулироваться присутствием других металлов, что усложняет прогнозирование воздействия [Bols et al., 2001]. Вместе с тем выявленная отрицательная корреляция

в наших исследованиях между цинком и общим числом лейкоцитов, в том числе Т-лимфоцитов, положительная корреляция с избыточным образованием вакуолизированных клеток свидетельствуют о его негативном влиянии на лейкопоз и адаптивные иммунные реакции. Токсичность меди и цинка может наблюдаться даже при концентрациях, соответствующих установленным для окружающей среды предельно допустимым нормам (ПДК), если эти металлы присутствуют в комплексном составе [Stankevičiūtė et al., 2018].

В отличие от меди и цинка свинец и кадмий не выполняют известные физиологические функции и рассматриваются как безусловные ксенобиотики. Свинец вызывает окислительный стресс, в результате чего мишенями становятся липиды, белки и ДНК клеток; также обладает высоким сродством с фосфатными группами и может имитировать цинк и кальций, нарушая внутриклеточную сигнализацию, что критично для активации иммунокомпетентных клеток и регуляции клеточных процессов [Lee et al., 2019; Титов и др., 2020]. Выявленная в нашем исследовании отрицательная корреляция между уровнем свинца и числом созревающих и зрелых нейтрофилов свидетельствует об угнетении нейтрофильного звена у исследуемых рыб. Данный эффект, описанный в литературе как проявление гемотоксичности ТМ, может быть связан с супрессией миелопоэза. Кадмий проявляет свою токсичность, главным образом, за счет вытеснения микроэлементов (таких как цинк, селен и медь) из активных ферментных центров. Это приводит, в частности, к ингибированию активности ключевых антиоксидантных ферментов, нарушению работы всей антиоксидантной системы и дезорганизации клеточного метаболизма [Nawrot et al., 2010; Matović et al., 2015]. Отмечено негативное воздействие этого металла на некоторые параметры врожденного иммунитета у рыб [Zabotkina et al., 2009] и угнетение гемопоэза [Крючков, 2004]. В ходе проведенных нами исследований не было установлено статистически значимой корреляции между содержанием кадмия и изучаемыми гематологическими параметрами у плотвы. Тем не менее, учитывая общеизвестную высокую токсичность этого элемента и данные литературы о его способности угнетать кроветворение у рыб, его косвенное участие в формировании общего токсикологического стресса у исследуемой популяции исключать нельзя.

Таким образом, обнаруженные гематологические сдвиги — лейкопения, относительный лимфоцитоз, угнетение нейтрофильного ростка и лимфоцитарного звена иммунитета — соответствуют картине хронической интоксикации у рыб. При этом выявленные изменения носили неспецифический характер, типичный для стресс-индуцированных состояний [Головина, 1996; Крючков, 2004]. Наблюдаемые нами трансформации, вероятно, обусловлены видовыми особенностями, а их характер и выраженность опосредованы условиями конкретного водоема и параметрами воздействия: уровнем концентраций ТМ, длительностью экспозиции и составом полиметаллических смесей. Выявленные эффекты согласуются с общебиологическими механизмами токсичности ТМ и подтверждают репрезентативность представителей семейства карповых и возможность эффективного использования гематологических показателей крови рыб в качестве объектов биоиндикации для мониторинга состояния водных экосистем, в том числе таких уникальных, как бассейн оз. Байкал.

Выводы

1. У сибирской плотвы из залива Черкалов оз. Байкал установлено статистически значимо более высокое содержание в печени цинка (+ 29 %), меди (+ 60 %), свинца (+ 121 %) и кадмия (+ 33 %) по сравнению с рыбами из условно-фонового Чивыркуйского залива.

2. Для плотвы из залива Черкалов, отличающейся повышенным содержанием ТМ, был характерен специфический гематологический профиль: лейкопения в сочетании с угнетением нейтрофильного роста.

3. Значимое снижение числа Т-лимфоцитов у рыб из залива Черкалов, выявленное в сравнении с условно-фоновой группой, в комплексе с другими гематологическими сдвигами указывает на угнетение клеточного иммунитета.

4. Полученные данные подчеркивают необходимость регулярного мониторинга физиологического состояния гидробионтов для ранней диагностики негативных последствий загрязнения уникальной экосистемы оз. Байкал.

Литература

1. Экологическое состояние побережья озера Байкал и его влияние на загрязнение озера / И. А. Белозерцева, И. Б. Воробьева, Н. В. Власова [и др.] // Успехи современного естествознания. 2018. № 11. С. 85–95.

2. Современное состояние водотоков в устьевых областях восточного побережья озера Байкал / И. Б. Воробьева, И. А. Белозерцева, Н. В. Власова, М. С. Янчук // Успехи современного естествознания. 2018. № 1. С. 86–92. DOI: 10.17513/use.36656

3. Гомбоева С. В., Пронин Н. М., Цыренов В. Ж. Распределение тяжелых металлов в органах и тканях рыб с различным типом питания в прибрежно-соровой зоне Байкала // Сибирский экологический журнал. 2003. № 5. С. 561–564.

4. Иванова Н. Т. Атлас клеток крови рыб (сравнительная морфология и классификация форменных элементов крови рыб). Москва : Легкая и пищевая промышленность, 1983. 184 с.

5. Крючков В. Н. Эколого-морфологические особенности патологии и адаптации органов и тканей рыб при воздействии токсикантов: специальность 03.00.16 : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора биологических наук. Махачкала, 2004. 46 с.

6. Лапирова Т. Б. Реакция показателей белкового и углеводного обмена рыб на воздействие кадмия (обзор) // Труды ИБВВ РАН. 2017. № 77(80). С. 77–91.

7. Плюснин А. М., Тулохонов А. К. Дельта реки Селенги — естественный биофильтр и индикатор состояния озера Байкал. Новосибирск : Изд-во Сибирского отделения Российской академии наук, 2008. 314 с.

8. Сборник инструкций по борьбе с болезнями рыб / под общей редакцией Н. А. Ярёмченко. Москва : Агро-Вестник, 1999. Ч. 2. 236 с.

9. Слобожанина Е., Гармаза Ю. Цинк в живом организме: биологическая роль и механизмы. Минск : Белорусская наука, 2022. 189 с.

10. Влияние свинца на живые организмы / А. Ф. Титов, Н. М. Казнина, Т. А. Карапетян, Н. В. Доршакова // Журнал общей биологии. 2020. Т. 81(2). С. 147–160. DOI: 10.31857/S0044459620020086

11. Тугарина П. Я., Пронин Н. М. Влияние техногенного загрязнения на воспроизводство хариусовых рыб в водотоке Восточной Сибири // Использование и охрана природных ресурсов в России. 2006. № 2. С. 100–103.

12. Ульзетуева И. Д., Гомбоев Б. О. Состояние поверхностных вод бассейна реки Селенги // Природа Внутренней Азии. Nature of Inner Asia. 2016. № 1. С. 61–68. DOI:10.18101/2542-0623-2016-1-61-68
13. Тяжелые металлы в воде и донных отложениях дельты р. Селенги / З. И. Хажеева, С. Д. Урбазаева, А. К. Тулохонов [и др.] // Геохимия. 2005. № 1. С. 105–111.
14. Новый методологический подход к оперативной оценке экологического состояния прибрежных морских акваторий / С. В. Холодkevич, Т. В. Кузнецова, А. С. Куракин [и др.] // Известия ТИНРО (Тихоокеанского научно-исследовательского рыбохозяйственного центра). 2018. Т. 194. С. 215–238. DOI: 10.26428/1606-9919-2018-194-215-238.
15. Современное состояние вод р. Селенги на территории России по главным компонентам и следовым элементам / Е. П. Чебыкин, Л. М. Сорокикова, И. В. Томберг [и др.] // Химия в интересах устойчивого развития. 2012. № 5. С. 613–631.
16. 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
17. Authman M. M., Zaki M. S., Khallaf E. A., Abbas H. H. Use of fish as bio-indicator of the effects of heavy metals pollution. *J. Aquaculture Research Development*. 2015; 6(4): 1–13. DOI: 10.4172/2155-9546.1000328
18. Bols N. C., Brubacher J. L., Ganassin R. C., Lee L. E. Ecotoxicology and innate immunity in fish. *Developmental Comparative Immunology*. 2001; 25(8-9): 853–873. DOI:10.1016/S0145-305X(01)00040-4
19. Butrimavičienė L., Nalivaikienė R., Kalcienė V., Rybakovas A. Impact of copper and zinc mixture on haematological parameters of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*): acute exposure and recovery. *Ecotoxicology*. 2021; 30(5): 873–884. DOI: 10.1007/s10646-021-02404-7
20. Cui J., Yin S., Zhao C., Fan L., Hu H. Combining Patulin with Cadmium Induces Enhanced Hepatotoxicity and Nephrotoxicity in vitro and in vivo. *Toxins*. 2021; 13: 221. DOI: 10.3390/toxins13030221
21. Gaetke L. M., Chow C. K. Copper toxicity, oxidative stress, and antioxidant nutrients. *Toxicology*. 2003; 189(1–2): 147–163.
22. Jaishankar M., Tseten T., Anbalagan N., Mathew B. B., Beeregowda K. N. Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*. 2014; 7(2): 60–72. DOI: 10.1007/s40011-014-0404-x
23. Javed M., Usmani N. Impact of heavy metal toxicity on hematology and glycogen status of fish : a review. *Proceedings of the National Academy of Sciences, India Section B: Biological Sciences*. 2015; 85(4): 889–900.
24. Jovičić K. et al. Assessment of hepatic enzyme biomarkers in northern pike (*Esox lucius*) from lotic and lentic freshwater habitats: implications for monitoring metal pollution and ecological stress in aquatic ecosystems. *Fishes*. 2025; 10(11): 541. DOI: 10.3390/fishes10110541
25. Lall S. P., Kaushik S. J. Nutrition and metabolism of minerals in fish. *Animals*. 2021; 11(9): 2711. DOI: 10.3390/ani11092711
26. Lee J. W., Choi H., Hwang U. K., Kang J. C., Kang Y. J., Kim K. I., Kim J. H. Toxic effects of lead exposure on bioaccumulation, oxidative stress, neurotoxicity, and immune responses in fish : a review. *Environmental Toxicology Pharmacology*. 2019; 68: 101–108. DOI: 10.1016/j.etap.2019.03.010
27. Matović V., Buha A., Đukić-Čosić D., Bulat, Z. Insight into the oxidative stress induced by lead and/or cadmium in blood, liver and kidneys. *Food and Chemical Toxicology*. 2015; 78: 130–140. DOI: 10.1016/j.fct.2015.02.011
28. Nawrot T. S., Staessen J. A., Roels H. A. et al. Cadmium exposure in the population: from health risks to strategies of prevention. *Biometals*. 2010; 23(5): 769–782.

29. Rashmi V., Pratima D. Heavy metal water pollution — a case study. *Recent Research in Science and Technology*. 2013; 5(5): 98–99.
30. Stankevičiūtė M., Sauliūtė G., Makaras T., Markuckas A., Virbickas T., Baršienė J. Responses of biomarkers in *Atlantic salmon (Salmo salar)* following exposure to environmentally relevant concentrations of complex metal mixture (Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Cd). Part II. *Ecotoxicology*. 2018; 27(8): 1069–1086. DOI: 10.1007/s10646-018-1960-2
31. Wang B., Feng L., Jiang W. D. et al. Copper-induced tight junction mRNA expression changes, apoptosis and antioxidant responses via NF- κ B, TOR and Nrf2 signaling molecules in the gills of fish: preventive role of arginine. *Aquatic Toxicology*. 2015; 158: 125–137. DOI: 10.1016/j.aquatox.2014.10.025
32. Wang W. C., Mao H., Ma D. D., Yang W. X. Characteristics, functions, and applications of metallothionein in aquatic vertebrates. *Frontiers in Marine Science*. 2014; 1: 34. DOI: 10.3389/fmars.2014.00034
33. Zabolotkina E. A., Lapirova T. B., Nazarova E. A. Influence of cadmium ions on some morphofunctional and immune-physiological parameters of perch (*Perca fluviatilis*, Perciformes, Percidae) underyearlings. *Journal of Ichthyology*. 2009; 49(1): 111–118. DOI: 10.1134/S0032945209010147
34. Zeng, Y., Song, Z., Song, G. et al. Oxidative stress and antioxidant biomarker responses in fish exposed to heavy metals : a review. *Environ. Monit. Assess.* 2025; 197: 892. DOI: 10.1007/s10661-025-14376-w

Статья поступила в редакцию 05.02.2026; одобрена после рецензирования 12.02.2026; принята к публикации 02.03.2026.

Bioindication of Heavy Metal Pollution in the Aquatic Areas of Lake Baikal: Hematological and Immunological Responses in the Siberian Roach *Rutilus rutilus lacustris* (Pallas, 1814)

O. E. Mazur, S. V. Gomboeva, S. D. Zhamsaranova,
S. N. Lebedeva, G. P. Lamazhapova, E. V. Sardonova

Olga E. Mazur

Cand. Sci. (Biol.), Researcher,
Institute of General and Experimental Biology SB RAS
6 Sakhyanovoy St., Ulan-Ude 670047, Russia;

Master's Student,
East-Siberian State University of Technology and Management
40v/1 Klyuchevskaya St., Ulan-Ude 670013, Russia
olmaz33@yandex.ru

Sayana V. Gomboeva

Cand. Sci. (Biol.), A/Prof.
sv2@rambler.ru

Sesegma D. Zhamsaranova

Dr. Sci. (Biol.), Prof.
zhamsarans@mail.ru

Svetlana N. Lebedeva
Dr. Sci. (Biol.), Prof.
lebedeva1959@mail.ru

Galina P. Lamazhapova
Dr. Sci. (Biol.), Prof.
lamazhap@mail.ru

Elena V. Sardonova
Cand. Sci. (Biol.), A/Prof.
lena_mangsord@mail.ru

East-Siberian State University of Technology and Management
40v/1 Klyuchevskaya St., Ulan-Ude 670013, Russia

Abstract. The study is aimed at assessing the concentration of heavy metals (HMs) in the liver of the Siberian roach *Rutilus rutilus lacustris* (Pallas, 1814) from two aquatories of Lake Baikal: Cherkalov Bay (part of the Selenga River prodelta) and conditionally background Chivyrkuy Bay (a valuable natural complex with minimal anthropogenic pressure). Furthermore, we have evaluated the effects of these heavy metals on the fish's hematological and immunological parameters, and analyzed concentrations of four HMs (cadmium, copper, lead, and zinc) in the liver tissue. The results show that metal accumulation is ecosystem-dependent: roach inhabiting Cherkalov Bay exhibit significantly higher levels of all HMs. Hematological analysis of the Cherkalov population has revealed a significant decrease in the total leukocyte count and neutrophil lineage suppression. The immunological status of these fish is characterized by suppression of the T-cell-mediated immune response. Correlation analysis demonstrates strong relationships between metal content and negative changes in the hemato- and immunopoiesis of the roach. The identified disturbances correlate with the level of HM accumulation in the liver, confirming the representativeness of these parameters for bioindication. The obtained data emphasize the necessity for regular monitoring of the physiological state of aquatic organisms for the early diagnosis of the negative consequences of pollution in the unique ecosystem of Lake Baikal.

Keywords: *Rutilus rutilus lacustris*, heavy metals, leukocytes, bioindication, Lake Baikal, prodelta.

Acknowledgments

We express our gratitude to S. V. Garmaeva (East-Siberian State University of Technology and Management) for assistance in material collection, and to O. B. Zhepkholova (Institute of General and Experimental Biology SB RAS for assistance in fish age determination. This work was partially supported by a grant from the Russian Foundation for Basic Research No. 05-04-97268 and the project FWSM-2021-0002.

For citation

Mazur O. E., Gomboeva S. V., Zhamsaranova S. D. et al. Bioindication of Heavy Metal Pollution in the Aquatic Areas of Lake Baikal: Hematological and Immunological Responses in the Siberian Roach *Rutilus lacustris* (Pallas, 1814). *Nature of Inner Asia*. 2026; № 1(34): 37–49 (In Russ.). DOI: 10.18101/2542-0623-2026-1-37-49

The article was submitted 05.02.2026; approved after reviewing 16.12.2026; accepted for publication 02.03.2026.