

Промысловые виды и их биология

УДК 597.553.3:591.8:591.5

Арктический голец как индикатор качества вод горных озёр Хибинского массива в условиях хронического загрязненияА.А. Лукин¹, Ю.Н. Лукина²

¹ Федеральный селекционно-генетический центр рыбоводства «Ропша» (ФСГЦР филиал ФГБУ «Главрыбвод»), пос. Ропша, Ленинградская область

² Санкт-Петербургский филиал ФГБНУ «ВНИРО» («ГосНИОРХ» им. Л.С. Берга»), г. Санкт-Петербург

E-mail: alukin@inbox.ru

Рыбы, населяющие пресные воды Субарктики, предъявляют высокую требовательность к качеству вод, и антропогенное воздействие вызывает быструю ответную реакцию, что позволяет считать их превосходными тест-объектами, отражающими состояние окружающей среды. В условиях загрязнения у рыб развиваются патологии органов, которые являются причиной преобразований популяции и структуры рыбной части сообщества. Активное освоение Кольского полуострова привело к тому, что водные объекты стали приемниками сточных вод горнодобывающих и горноперерабатывающих предприятий, содержащих тяжёлые металлы, нефтепродукты, сульфаты, взвешенные вещества. Оз. Большой Вудъявр, расположенное в центре Хибинского горного массива и принимающее рудничные воды апатито-нефелиновых предприятий, можно рассматривать как рукотворный техногенный полигон, испытывающий хроническое загрязнение. Ихтиофауна озера в 1930-е гг. насчитывала 6 видов: кумжа, арктический голец, сиг обыкновенный, европейский хариус, налим, девятиглая колюшка. Поступление сточных вод привело к практически полному исчезновению рыбы в озере, за исключением арктического гольца — доминирующего представителя ихтиофауны в настоящее время. Оценка качества вод осуществлялась на основе гистологического анализа, в результате которого выявлены изменения в жабрах, печени и почках, свидетельствующие о нарушении метаболизма, ослаблении иммунитета, развитии функциональных нарушений и мобилизации компенсаторных механизмов. Большую часть морфологических изменений следует расценивать как отдалённые последствия хронического сублетального воздействия токсических веществ, аккумулированных в воде и донных отложениях, которые могут являться причиной сокращения продолжительности жизни, раннего полового созревания или бесплодия. Однако ряд выявленных гистопатологий указывает на острую реакцию организма рыб и даёт возможность предполагать, что на фоне хронического загрязнения в оз. Б. Вудъявр происходят спорадические локальные поступления загрязняющих веществ.

Ключевые слова: качество вод, загрязнение, рыбы, арктический голец *Salvelinus alpinus*, организм, ихтиопатологии.

DOI: 10.36038/2307-3497-2019-178-104-111

ВВЕДЕНИЕ

Качество вод — одна из наиболее острых и актуальных проблем современного цивилизованного мира. Водные объекты, как правило, являются коллекторами всех видов загрязняющих веществ в результате сбросов или утечек, что приводит к аккумуляции токсикантов в водных организмах и нарушению их жизнедеятельности. Одним из последствий антропогенного воздействия является интоксикация рыб, способствующая развитию морфофункциональных нарушений, которые интегрируются на более высоких уровнях организации (популяции, сообщество) и являются основой для их последующих преобразований.

«Качество вод — это свойства вод, сформированные в процессе химических, физических и биологических процессов, как на водоёме, так и водосборе. Хорошее качество вод в конкретном водоёме в том случае, если отвечает требованиям сохранения здоровья организма и воспроизводства видов, адаптированных в процессе эволюционного развития к существованию в условиях этого водоёма» [Моисеенко, 2009]. Исходя из данного тезиса, изменения на уровне органов и тканей рыб могут служить надёжными индикаторами загрязнения водных экосистем, которые особенно важны в комплексной системе мониторинга водных объектов Субарктики — наиболее чувствительных к любой техногенной нагрузке. С этой точки зрения, весьма интересны для исследования горные озера Хибинского массива, расположенные в центре Кольского полуострова, рыбы которых предъявляют высокую требовательность к качеству вод и крайне быстро реагируют на антропогенную трансформацию водной экосистемы.

Ландшафты Хибинского горного массива, согласно системе физико-географического районирования, выделяются как особый район Западно-Кольской провинции [Даувальтер и др., 2010]. Начиная с 1920-х гг. XX века, в результате развития горно-перерабатывающего комплекса и строительства городов на водосборные территории горных озёр началось активное поступление загрязняющих веществ, включая кис-

лотообразующие соединения и тяжёлые металлы. Наибольшую техногенную многолетнюю нагрузку испытывает оз. Большой Вудъявр, на берегах которого расположены крупные промышленные предприятия по добыче и переработке апатитового сырья и г. Кировск. Столь длительный техногенный пресс привел к перестройке в сообществах гидробионтов (фито- и зоопланктона, зообентоса), включая численность, распределение, доминантные виды [Денисов и др., 2009; Мазухина и др., 2009; Денисов и др., 2016]. Более того, гидрографическая сеть связывает оз. Большой Вудъявр с оз. Имандрой — третьим по величине европейским водоёмом, стоящим по запасам пресной воды в одном ряду с Ладожским и Онежским озёрами, что может привести к его загрязнению.

Ретроспективный анализ свидетельствует о том, что последствия антропогенной трансформации водных экосистем в Хибинах оценивались в основном по гидрохимическим и гидробиологическим показателям, не заслуженно обходя вниманием рыбное население. Вместе с тем, аккумуляция токсикантов в рыбе происходит как за счёт прямого поступления из воды через жабры и кожу, так и вследствие повышения концентрации токсичных веществ в каждом новом звене пищевой цепи при потреблении загрязнённой пищи. Рассматривая оз. Большой Вудъявр как рукотворный техногенный полигон, испытывающий мультифакторное загрязнение на протяжении многих лет, весьма интересно оценить состояние организмов рыб, до сих пор обитающих в данном водоёме. Это важно для понимания процессов адаптации гидробионтов к изменениям условий среды обитания и существования организмов при хроническом загрязнении вод.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследования проводились в южной части Хибинского горного массива в 2015–2016 гг. на озере Большой Вудъявр — самом крупном внутреннем водоёме Хибинских гор, которое интенсивно загрязняется сточными водами апатитового производства, поступающими по рекам Саамка и Юкспор-

рйок [Природные условия..., 1986]. Питание озера — смешанное за счёт поверхностных и подземных вод, а также атмосферных осадков. Из водоёма вытекает единственная река Белая, которая сбрасывает весь сток бассейна в оз. Имандра.

Отлов рыбы проводился в период открытой воды в августе стандартным набором ставных сетей длиной 25 м и высотой 1,5 м с размерами ячеек: 10, 16, 20, 31, 36, 40, 45 мм из нейлонового монофиламенты, что позволяло отлавливать рыб всех возрастных групп с размерами 8–10 см и более. В качестве тест-объекта был выбран арктический голец в силу доминирующего положения в ихтиофауне.

Оценка состояния организма рыб проводилась на основе патолого-морфологического метода, включающего клинические, патолого-анатомические и гистологические исследования. Количество особей, отобранных для гистологических исследований, составило 15 экземпляров. Для гистологического анализа отбирали жабры, печень и почки — органы, наиболее реактивно реагирующие на изменение качества вод [Решетников и др., 1999; Hodl et al., 2002].

Обработка проб проводилась по общепринятым гистологическим методикам: гистологические препараты готовились методом заливки органов и тканей в парафин, с последующим изготовлением парафиновых блоков и гистологических срезов с использованием санного микротомы [Роскин, 1957]. Препараты окрашивались гематоксилин-эозином. Гемосидерин выявляли по реакции Перлса. Микроскопирование осуществляли при увеличении $\times 50$, $\times 100$, $\times 200$, $\times 320$. При классификации патологических изменений использовали критерии, суть которых изложена в статьях, посвященных гистологическим исследованиям рыб [Mueller et al., 1991; Veiga et al., 2002].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Ихтиофауна озера в 1930-е гг. прошлого века насчитывала 6 видов: кумжа *Salmo trutta* L., 1758, арктический голец *Salvelinus alpinus* (L., 1758), сиг обыкновенный *Coregonus lavaretus* (L., 1758), хариус ев-

ропейский *Thymallus thymallus* (L., 1758), налим *Lota lota* (L., 1758), девятииглая колюшка *Pungitius pungitius* (L., 1758). Активное поступление стоков промышленного производства (спуск флотационных вод по р. Большая Белая предприятием АНОФ-1, бытовых сточных вод) привело к практически полному исчезновению рыб в озере. В наших уловах было отмечено три вида рыб: арктический голец, девятииглая колюшка и европейская корюшка *Osmerus eperlanus* (L., 1758). Корюшка, численность которой в последние годы в оз. Имандра резко возросла, активно мигрирует в оз. Большой Вудъявр по р. Большая Белая [Терентьев и др., 2017]. Доминирующим представителем ихтиофауны является арктический голец, обитающий на небольшой акватории в приустьевом участке р. Вудъяврйок, которая привносит в водоём чистые воды, незагрязненные промышленными стоками.

Длина выловленных рыб колебалась от 12 до 30 см, масса от 14,3 до 417,5 г. Гонады почти всех исследованных особей находились на III стадии зрелости, за исключением одного ювенильного самца. Соотношение полов составляло 1:1,1 в пользу самцов. Спектр морфологических изменений в организме гольца объединял аномалии жаберного аппарата, печени и почек.

Жаберный лепесток в норме у всех видов рыб разделён на филламент и респираторные ламеллы, что чётко разграничивает основные функции жабр (ионный обмен и дыхание), а также определяет разнокачественность эпителиев этих двух структурно и функционально различных отделов жабр (рис. 1 а). Деструктивные процессы в жаберном аппарате проявлялись, прежде всего, в изменении жаберного эпителия и нарушении статуса кровеносной системы, обуславливающим деградацию филламентов и респираторных ламелл. Доминирующие нарушения кровообращения включали кровоизлияния; аневризмы, обусловленные неполноценностью сосудистого эндотелия (рис. 1 б); застойные явления (стаз), связанные с нарушением капиллярной проводимости. Изменения пролиферативного типа характеризовались чрезвычайной ги-

перплазией ламеллярного эпителия, а также пролиферацией слизистых и хлоридных клеток в составе филамента, в связи с чем отмечалась избыточная продукция слизи. При этом происходило увеличение высоты эпителия жабр и исчезновение свободной поверхности респираторных ламелл, контактирующих с внешней средой. Вследствие прогрессирования данных процессов развивались дегенеративные изменения: отслоение респираторного эпителия; ламеллярный некроз; лизис респираторных ламелл на отдельных участках жаберных филаментов. О развитии воспалительных процессов свидетельствовали отеки респираторного эпителия (рис. 1 в). Кроме того, наблюдалось нарушение архитектоники органа: искривление и укорочение респираторных ламелл.

Печень, ответственная за основные метаболические функции, детоксикацию и биоаккумуляцию проникающих в организм ксенобиотиков, является одним из наиболее чувствительных к загрязнению органов.

Доминировали расстройства микроциркуляции, являющиеся одним из признаков патологических процессов: кровоизлияния (рис. 1 а), гиперваскуляризация органа, гиперемия и гемолиз эритроцитов. У единичных особей нарушения кровообращения сочетались с дегенеративными изменениями гепатоцитов, в частности с дистрофией и некрозами. Жировая дистрофия печени была выявлена у 90% особей (рис. 1 б). Пикнотизированные ядра и некроз гепатоцитов, также относящиеся к разряду дегенеративных изменений, встречались у 100% гольцов (рис. 1 в). У 20% обследованных особей отмечались признаки повышенной митотической активности, что является ранним компенсаторно-приспособительным изменением гепатоцитов.

В почках самой обширной группой были изменения дегенеративного характера, которые выявлены у 100% особей (рис. 3): карипикноз, вакуолизация и некроз эпителия почечных канальцев, и, как следствие,

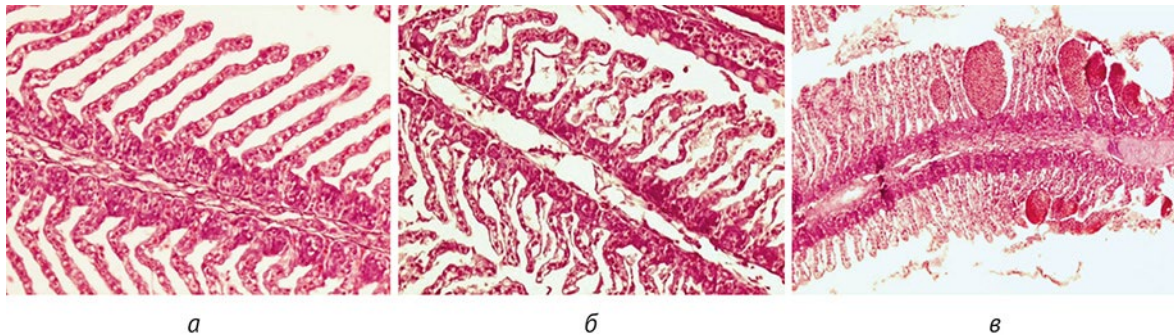


Рис. 1. Гистопатологии жабр:
а — норма; б — отёк респираторного эпителия; в — многочисленные аневризмы

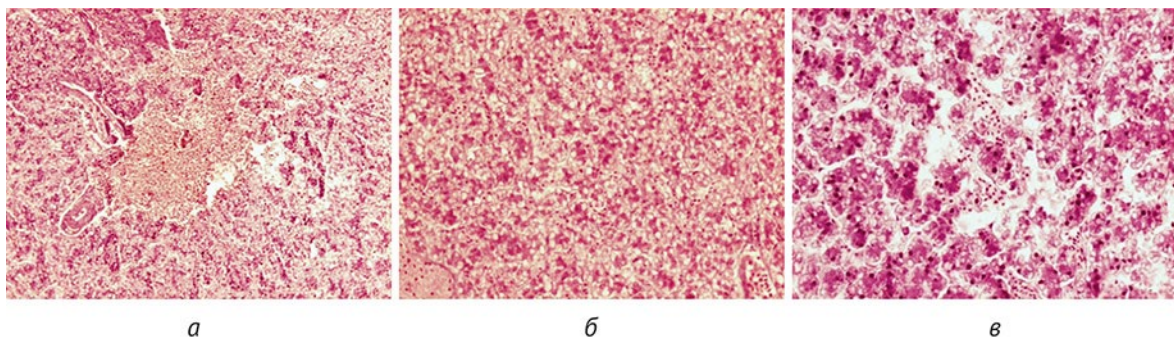


Рис. 2. Гистопатологии печени:
а — обширное кровоизлияние; б — жировая дистрофия; в — некроз гепатоцитов, пикноз ядер

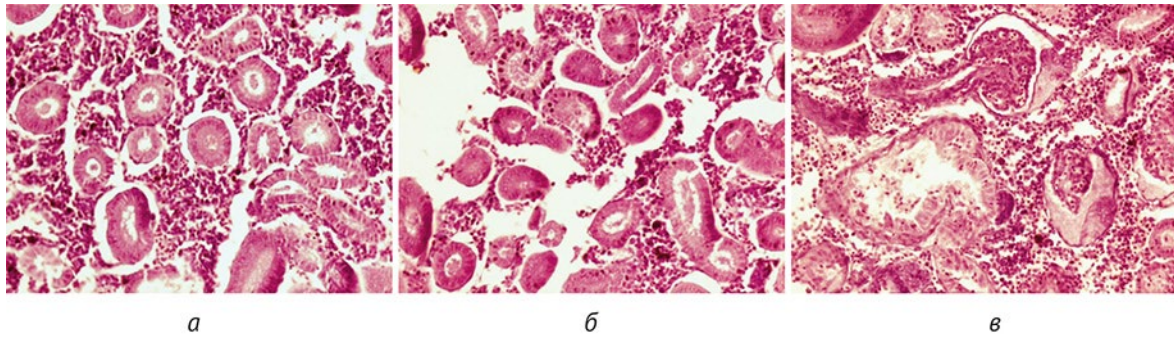


Рис. 3. Гистопатологии почек:

а — блокада канальцев клеточным детритом; б — некроз гемопоэтической ткани; в — дегенерация нефронов

закупорка полости канальцев клеточным детритом; отслоение эпителия от базальной мембраны; дегенерация клубочков; некроз гемопоэтической ткани. О развитии воспалительных процессов свидетельствовало появление большого количества мелано-макрофагальных центров, содержащих пигмент гемосидерин (50% особей) и инфильтрация почечной паренхимы лимфоцитами. Очевидно, пролиферация макрофагов была вызвана необходимостью утилизации продуктов распада клеточных мембран и разрушенных эритроцитов, появившихся в результате воздействия загрязняющих веществ. Нарушения микроциркуляторного кровообращения включали гиперемии и кровоизлияния, диагностируемые у 60% особей.

ОБСУЖДЕНИЕ

Гистопатологическое исследование гольца, обитающего в оз. Большой Вудъявр, выявило широкий спектр морфофункциональных изменений в жабрах, печени и почках, большинство из которых могут быть интерпретированы как неспецифические ответные реакции, которые проявляются под воздействием большого разнообразия поллютантов. Сходные гистопатологии отмечены у рыб в водных объектах, испытывающих комплексное антропогенное воздействие [Моисеенко и др., 2002] или характеризующихся преимущественно загрязнением тяжёлыми металлами [Harper et al., 2009], пестицидами [Ayas et al., 2007], токсинами цианобактерий [Harkea et al., 2016].

Часть выявленных морфофункциональных нарушений (аневризмы, дистрофии, не-

кроз) относится к разряду дегенеративных необратимых изменений, в то время как другие представляют собой компенсаторные реакции, позволяющие организму выжить в изменяющихся условиях среды обитания. В частности, гиперплазия и преципитация слизи на поверхности жабр являются ответными реакциями, в основе которых адаптивные механизмы, поскольку в результате этих процессов происходит увеличение диффузионного барьера между окружающей средой и кровью и, тем самым, предотвращение попадания загрязняющих веществ в организм [Матей, 1996]. Кроме того, гиперплазия направлена на компенсацию функций повреждённого органа. Однако, оз. Большой Вудъявр испытывает хроническое загрязнение, поэтому действие патогенного фактора не блокируется, что приводит к сокращению общей диффузной поверхности жабр и ингибированию респираторных функций.

По ряду структурно-функциональных нарушений, выявленных у рыб оз. Большой Вудъявр, можно судить о продолжительности негативного техногенного воздействия. Большая часть диагностированных морфологических изменений свидетельствует о том, что рыбы подвергаются хроническому сублетальному воздействию. На это указывают диагностированные гиперплазия эпителия жабр, некроз гемопоэтической ткани и гепатоцитов, воспалительные реакции. К признакам острой токсичности следует отнести аневризмы, кровоизлияния в жабрах, появление клеток с пикнотизированными ядрами в печени, вакуолизация эпителия канальцев в почках, что может быть

вызвано недавними поступлениями загрязняющих веществ в водоём.

Большинство выявленных изменений в организме рыб следует расценивать как отдалённые последствия воздействия токсических веществ, растворённых в воде или аккумулярованных в донных отложениях. Они свидетельствуют о нарушении метаболизма, ослаблении иммунитета, развитии функциональных нарушений и усилении защитно-компенсаторных реакций организма. Как следствие, нарушение репродуктивной функции, роста и выживаемости особей, что, в конечном итоге, сказывается на благополучном существовании популяции и вида в целом.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях многофакторного техногенного воздействия определить преобладающий тип загрязнения на основе поставленного диагноза крайне проблематично. Некоторые виды загрязнений можно диагностировать по «функциям-мишеням», и эта система выявления специфических воздействий широко используется в международной практике для идентификации типа загрязнения [Моисеенко, 2009]. Структурно-функциональные нарушения, выявленные в организме арктического гольца оз. Большой Вудъявр, являются неспецифическими стереотипными ответными реакциями, которые не зависят от этиологического фактора. Это усложняет установление причинно-следственных связей, но позволяет оценить взаимосвязь ихтиопатологий с качеством вод оз. Большой Вудъявр. Большинство диагностированных патологий относятся к разряду дегенеративных необратимых изменений, которые могут быть причиной сокращения продолжительности жизни, раннего полового созревания или бесплодия у рыб. Параллельно с ним развиваются компенсаторно-приспособительные реакции, которые позволяют рыбам выживать в существующих условиях. Кроме того, диагностированные патологии дают основание предполагать, что на фоне существующего хронического загрязнения, в оз. Большой Вудъявр происходят спорадические единовременные выбросы токсичных

загрязняющих веществ. Резюмируя все вышеизложенное, можно констатировать, что качество вод оз. Большой Вудъявр в большой степени определяется веществами антропогенного происхождения.

ЛИТЕРАТУРА

- Даувальтер В.А., Кашулин Н.А., Сандимиров С.С., Денисов Д.Б. 2010. Химический состав донных отложений Хибинских озер Большой и Малый Вудъявр // Мат. Всерос. (с между. участием) науч.-практ. конф., посвящённой 80-летию Кольского НЦ РАН. Геологический институт КНЦ РАН. Кольское отделение РМО, Апатиты, 20–23.06. 2010 г. Апатиты: КНЦ РАН. С. 37–40.
- Денисов Д.Б., Кашулин Н.А., Терентьев П.М., Валькова С.А. 2009. Современные тенденции изменения биоты пресноводных экосистем Мурманской области // Вестник МГТУ. Т. 12. № 3. С. 525–538.
- Денисов Д.Б., Валькова С.А., Кашулин Н.А. 2016. Экологические особенности перифитона и зообентоса водных экосистем Хибинского горного массива (Кольский п-ова) // Вестник МГТУ. Т. 19. № 2. С. 165–175.
- Мазухина С.И., Денисов Д.Б., Вандыш О.И., Маслובев В.А. 2009. Влияние антропогенного воздействия на водные экосистемы Хибинского горного массива // Водные ресурсы. Т. 36. № 1. С. 102–116.
- Матей В.Е. 1996. Жабры пресноводных костистых рыб: морфофункциональная организация, адаптация, эволюция. СПб.: Наука. 204 с.
- Моисеенко Т.И., Даувальтер В.А., Лукин А.А., Кудрявцева Л.П. 2002. Антропогенные модификации экосистемы озера Имандра. М.: Наука. 403 с.
- Моисеенко Т.И. 2009. Водная токсикология: фундаментальные и прикладные аспекты. М.: Наука. 400 с.
- Природные условия Хибинского учебного полигона. 1986. // Уч. пособие по практикам студентов-географов в Хибинах / Ред. С.М. Мягков. М.: Изд-во МГУ. 170 с.
- Терентьев П.М., Кашулин Н.А., Зубова Е.М. 2017. Роль европейской корюшки (*Osmerus eperlanus* L.) в структуре ихтиофауны озера Имандра (Мурманская область) // Труды ЗИН РАН. Т. 321. № 2. С. 228–243.
- Роскин Г.И. Левинсон Л.Б. 1957. Микроскопическая техника. М.: Изд-во Советская наука. 486 с.
- Решетников Ю.С., Попова О.А., Кашулин Н.А., Лукин А.А., Амундсен П.А., Сталдвик Ф. 1999. Оценка благополучия рыбной части водного сообщества по результатам морфопатологического анализа рыб // Успехи современной биологии Т. 119. № 2. С. 165–177.
- Ayas Z., Ekmekci G., Ozmen M., Yerli S.V. 2007. Histopathological changes in the liver and kidneys

- of fish in Sariyar Reservoir, Turkey // *Environ. Toxicol. Pharmacol.* Vol. 23. P. 242–249.
- Harkea M.J., Steffen M.M., Gobler C.J., Ottend T.G., Wilhelm S.W., Wood S.A., Paerl H.W. 2016. Review of the global ecology, genomics and biogeography of the oxicyanobacterium *Microcystis* spp. // *Harmful Algae*. V. 54. P. 4–20.
- Harper D.D., Farag A.M., Hogstrand C., MacConnell E. 2009. Trout density and health in stream with variable water temperatures and trace element concentrations: does a cold-water source attract trout to increases metal exposure? // *Environ. Toxicol. Chem.* Vol. 28. № 4. P. 800–808.
- Hödl E., Felder E., Chabicovsky M., Dallinger R. 2002. Cadmium stress stimulates tissue turnover in *Helix pomatia*: increasing cell proliferation from metal tolerance to exhaustion in molluscan midgut gland // *Cell and Tissue Research*. V.34. № 1. P. 159–171.
- Mueller M.E., Sanchez D.A., Bergman H.L., McDonald D.G., Rhem R.G., Wood C.M. 1991. Nature and time course of accumulation to aluminum in juvenile brook trout II. Gill histology // *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* V. 48. P. 2016–2027.
- Veiga M.L., Veiga E.L., Rodrigues F.J., Pacheco M.J.T. 2002. Histopathologic changes in the kidney tissue of *Prochilodus lineatus*, 1836 (Characiformes, Prochilodontidae) induced by sublethal concentration of Trichlorfon exposure // *Brazilian Archives of Biology and Technology*. V. 45. P. 171–175.

Поступила в редакцию 14.08.2019 г.
Принята после рецензии 21.12.2019 г.

Trudy VNIRO

2019. Vol. 178

Commercial species and their biology

Arctic charr as indicator of water quality of mountain lakes of the Khibiny massif under chronic pollution

A. A. Lukin¹, J. N. Lukina²

¹ Federal Selection and Genetic Center for Fish Culture «Ropsha» (FSGCFC branch of FGBU «Glavyrbvod»), p. n. Ropsha, Leningrad reg., Russia

² St. Petersburg branch of FSBSI «VNIRO» (L.S. Berg «GosNIORKh»), St. Petersburg, Russia

Fishes in Subarctic lakes are highly demanding to the water quality and pollution results in organism response that allows to use it as a test objects reflecting state of water quality. Ichthyopathologies cause transformations of population and ichthyofauna under anthropogenic impact. The development of Kola Peninsula resulted in pollution of water bodies with wastewater from mining enterprises containing heavy metals, surfactants, petroleum products, sulfates and others. Lake Bolshoi Vud'yavr that is located in the center part of the Khibiny mountain massif and can be considered as a man-made technogenic water area under multifactorial chronic pollution for decades. Ichthyofauna of the lake in the 1930's, consisted of 6 species: brown trout, arctic char, whitefish, grayling, burbot, nine-spined stickleback. The sewage resulted in almost complete disappearance of fish in the lake, excepting Arctic char, which currently dominates the ichthyofauna. Water quality assessment was carried out on the basis of histological analysis and revealed changes in the gills, liver and kidneys, indicating metabolic disorders, weakened immunity, the development of functional disorders and the mobilization of compensatory mechanisms. Most of the morphological changes should be regarded as the long-term consequences of chronic sublethal exposure to toxicants, which can cause a reduction in life expectancy, early maturation or infertility. However, a number of histopathologies testify to acute reaction of fish organism and make it possible to assume that there are sporadic local discharges of pollutants.

Keywords: water quality, pollution, fish, arctic charr *Salvelinus alpinus*, organism, histopathologies.

DOI: 10.36038/2307-3497-2019-178-104-111

REFERENCES

- Dauval'ter V.A., Kashulin N.A., Sandimirov S.S., Denisov D.B.* 2010. Khimicheskij sostav donnykh otlozhenij Khibinskikh ozer Bol'shoj i Malyj Vud'yavr [Chemical composition of sediments Khibin lakes Bol'shoj and Malyj Vud'yavr] // *Mat. Vseros. (s mezhd. uchastiem) nauch.-prakt. konf., posvyashchennoj 80-letiyu Kol'skogo NC RAN. Geologicheskij institut KNC RAN. Kol'skoe otdelenie RMO, Apatity, 20–23.06. 2010 g. Apatity: KNTC RAN. S. 37–40.*
- Denisov D.B., Kashulin N.A., Terent'ev P.M., Val'kova S.A.* 2009. Sovremennye tendencii izmeneniya bioty presnovodnykh ehkositem Murmansknoj oblasti [Comprehensive tendencies of biota changes in freshwater ecosystems from Murmansk region] // *Vestnik MGTU. T. 12, № 3. S. 525–538.*
- Denisov D.B., Val'kova S.A., Kashulin N.A.* 2016. Ehkologicheskie osobennosti perifitona i zoobentosa vodnykh ehkositem Khibinskogo gornogo massiva (Kol'skij p-ova) [Ecological features of zoobenthos and periphyton from water ecosystems of Khibiny mountain, Kola peninsula] // *Vestnik MGTU. T. 19, № 2. S. 165–175.*
- Mazukhina S.I., Denisov D.B., Vandysh O.I., Masloboev V.A.* 2009. Vliyanie antropogennogo vozdejstviya na vodnye ehkositemy Khibinskogo gornogo massiva [Anthropogenic impact on water ecosystems in Khibiny mountain] // *Vodnye resursy. T.36. № 1. S. 102–116.*
- Matej V.E.* 1996. Zhabry presnovodnykh kostistykh ryb: morfofunkcional'naya organizaciya, adaptaciya, evolyuciya. [Gills of freshwater bony fish: morphofunctional organization, adaptation, evolution]. SPb.: Nauka. 204 s.
- Moiseenko T.I., Dauval'ter V.A., Lukin A.A., Kudryavceva L.P.* 2002. Antropogennye modifikacii ehkositemy ozera Imandra [Anthropogenic transformation of Imandra Lake ecosystem]. M.: Nauka. 403 s.
- Moiseenko T.I.* 2009. Vodnaya toksikologiya: fundamental'nye i prikladnye aspekty. [Water toxicology: fundamental and practice aspects]. M.: Nauka. 400 s.
- Prirodnnye usloviya Khibinskogo uchebnogo poligona* [Natural conditions of Khibiny polygon]. 1986. // *Uch. posobie po praktikam studentov — geografov v Khibinakh / Red. S.M. Myagkov. M.: Izd-vo MGU. 170 s.*
- Terent'ev P.M., Kashulin N.A., Zubova E.M.* 2017. Rol' evropejskoj koryushki (*Osmerus eperlanus* L.) v strukture ikhtiofauny ozera Imandra (Murmanskaya oblast') [The role of European smelt (*Osmerus eperlanus* L.) in the structure of ichthyofauna in Imandra Lake (Murmansk region)] // *Trudy ZIN RAN. T. 321. № 2. S. 228–243.*
- Roskin G.I., Levinson L.B.* 1957. Mikroskopicheskaya tekhnika [Microscopic technique]. Izd-vo: M.: Sovetskaya nauka. 486 s.
- Reshetnikov Yu.S., Popova O.A., Kashulin N.A., Lukin A.A., Amundsen P.A., Staldivik F.* 1999. Ocenka blagopoluchiya rybnoj chasti vodnogo soobshchestva po rezul'tatam morfopatologicheskogo analiza ryb [Assessment of ichthyofauna health on the basis of fish morphopathological analyses] // *Uspekhi sovremennoj biologii T.119. № 2. S. 165–177.*
- Ayas Z., Ekmekci G., Ozmen M., Yerli S.V.* 2007. Histopathological changes in the liver and kidneys of fish in Sariyar Reservoir, Turkey // *Environ. Toxicol. Pharmacol. Vol. 23. P. 242–249.*
- Harkea M.J., Steffen M.M., Gobler C.J., Ottend T.G., Wilhelm S.W., Wood S.A., Paerl H.W.* 2016. Review of the global ecology, genomics and biogeography of the oxicyanobacterium *Microcystis* spp. // *Harmful Algae. V. 54. P. 4–20.*
- Harper D.D., Farag A.M., Hogstrand C., MacConnell E.* 2009. Trout density and health in stream with variable water temperatures and trace element concentrations: does a cold-water source attract trout to increases metal exposure? // *Environ. Toxicol. Chem. Vol. 28. № 4. P. 800–808.*
- Hödl E., Felder E., Chabicozsky M., Dallinger R.* 2002. Cadmium stress stimulates tissue turnover in *Helix pomatia*: increasing cell proliferation from metal tolerance to exhaustion in molluscan midgut gland // *Cell and Tissue Research. V.34. № 1. P. 159–171.*
- Mueller M.E., Sanchez D.A., Bergman H.L., McDonald D.G., Rhem R.G., Wood C.M.* 1991. Nature and time course of accumulation to aluminum in juvenile brook trout II. Gill histology // *Can. J. Fish. Aquat. Sci. V. 48. P. 2016–2027.*
- Veiga M.L., Veiga E.L., Rodrigues F.J., Pacheco M.J.T.* 2002. Histopathologic changes in the kidney tissue of *Prochilodus lineatus*, 1836 (Characiformes, Prochilodontidae) induced by sublethal concentration of Trichlorfon exposure // *Brazilian Archives of Biology and Technology. V. 45. P. 171–175.*

FIGURE CAPTIONS

- Fig. 1.** Histopathologies of gills: a — normal structure; b — oedema of respiratory epithelium; c — aneurisms
- Fig. 2.** Histopathologies of liver: a — extensive hemorrhage; b — fatty degeneration; c — hepatocyte necrosis, pycnosis of nuclei
- Fig. 3.** Histopathologies of kidney: a — cell detritus in the renal tubules; b — necrosis of hematopoietic tissue; c — nephron degeneration