

УДК 549.281: 502.7

А.Н. Клименко*канд. техн. наук, доц. каф. экологии**Национального университета водного хозяйства и природопользования
(Ровно, Украина)***КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ СОДЕРЖАНИЯ ТЯЖЕЛЫХ
МЕТАЛЛОВ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ И ПРЕДСТАВИТЕЛЯХ
ИХТИОФАУНЫ ГИДРОЭКОСИСТЕМ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ**

Проведено количественное описание и сравнительный анализ влияния качества поверхностных вод на формирование качества рыбы через корреляционные связи между содержанием тяжелых металлов в воде гидроэкосистем различных типов и распределением их содержания в тканях представителей верхушки трофической цепи их ихтиофауны.

Согласно Концепции Украинской Государственной целевой экономической программы развития рыбного хозяйства на 2012–2016 гг., загрязнение воды и, как следствие, истощение запасов водных живых ресурсов является одним из главных фактов необходимости внедрения научных подходов мониторинга состояния рыбного населения и изучения возможностей воспроизведения их природных популяций [1]. Отечественные гидроэкологические исследования подтверждают, что за последние десятилетия качество воды во внутренних водоемах ухудшилась с 1–2 до 3–5 классов [2–5]. Это повлияло как на качественный состав рыбного населения в целом, так и на количественные показатели экологических групп рыб [6–8]. Так, только в реках Украины в начале 1990-х гг. вылавливали 30–40 тыс. т рыбы в год, а на данный момент всего 6–7 тыс. т [8]. В гидроэкосистемах внутренних водоемов стали редкими обычные виды: плотва, щука, лещ, сом, чехонь и т.д., остались более приспособленные к новым условиям карась, окунь, ряд сорных рыб-вселенцев [6].

Чувствительность реакций рыб на качество водной среды объясняется тем, что ихтиофауна является верхушкой трофических связей и, следовательно, важным звеном в непрерывном круговороте микро- и макроэлементов автохтонного и аллохтонного происхождения. Именно поэтому фиксации изменений биологических, физиолого-биохимических и эколого-токсикологических параметров отдельных видов позволяют прогнозировать последствия антропогенного воздействия на водные экосистемы. Ряд ученых считают, что в контроле качества рыбы при мониторинге химического и биологического состояния гидроэкосистем наибольший интерес представляют металлы. Являясь неотъемлемыми компонентами природных вод, вследствие постоянного накопления в окружающей среде, они несут значительную опасность с точки зрения их биологической активности и токсических проявлений (свинец, кадмий, цинк, медь, кобальт, никель, марганец и некоторые др.) [9; 10].

Анализ результатов известных исследований позволяет обобщить основные особенности влияния на организм рыб тяжелых металлов: 1) степень накопления тяжелых металлов в тканях рыб зависит от химической среды, типа водоема, функционального состояния организма и характера пищевых цепочек; 2) тяжелые металлы могут быть причиной интоксикации рыбы только при избыточном их поступлении в водоемы, поскольку в определенных дозах необходимы живому организму для обеспечения нормального прохождения физиологических и биохимических процессов; 3) распределение металлов в организмах рыб характеризуется неоднородностью, зависит от физико-химических свойств самих элементов и функциональных особенностей органов и тканей. Следовательно, выявление связей между загрязнением поверхностных вод тяже-

лыми металлами и ихтиофауной гидроэкосистем является достаточно сложной задачей в силу целого ряда обстоятельств, что затрудняет получение адекватных оценок антропогенной нагрузки и экологического состояния водоемов, разработки и планирования ведения их мониторинга. Одновременно это усиливает значение научных разработок по количественному описанию процессов влияния качества поверхностных вод на качественные характеристики рыбного населения гидроэкосистем различного типа. Это позволит определять экологический резерв и критические нагрузки последних, а также прогнозировать возможность воспроизведения природных ихтиопопуляций. Кроме того, из проведенного нами анализа проблемы было выяснено, что малоизученной остается ситуация влияния качества поверхностных вод на качество рыбы в т.н. фоновых гидроэкосистемах, где антропогенная нагрузка, несмотря на относительно невысокие уровни, имеет длительный кумулятивный характер.

Большинство ученых считают, что решение вопросов мониторинга гидроэкосистем не может обходиться без математического описания закономерностей процессов, которые происходят в водоемах [11; 12]. По мнению В.Д. Романенко, получение универсальной математической модели антропогенной нагрузки на гидроэкосистемы в ближайший период невозможно, учитывая многосторонность и сложность процессов, которые имеют место на площади водосбора, недостаточной изученности хода продукционно-деструкционных процессов и, особенно, трансформации многочисленных загрязняющих веществ [13]. Опыт экологического моделирования гидроэкосистем различного типа доказывает, что наибольшей прогностической ценностью отмечаются модели средней степени сложности. При этом, как подчеркивают А.М. Догановский и Е. В. Иванова, математическое моделирование и прогнозирование необходимо проводить только по ограниченному числу наиболее исследованных факторов [14]. Независимо от выбора степени сложности модели процессу математического моделирования предшествует корреляционный анализ, в ходе которого по величине коэффициента корреляции (r) и соответствующего знака при нем между вероятными величинами X и Y определяют оптимальное сочетание взаимосвязанных факторов, степень и направление связи между ними [15].

Целью наших исследований были количественное описание и сравнительный анализ влияния качества поверхностных вод [16] на формирование качества рыбы через корреляционные связи между содержанием тяжелых металлов в воде гидроэкосистем различных типов и распределением их содержания в тканях представителей верхушки трофической цепи ихтиофауны. При установлении корреляционных зависимостей мы использовали результаты трехлетних наблюдений за параметрами качества поверхностных вод и результаты определения содержания тяжелых металлов (ТМ) в тканях организмов рыб, находящихся на верхушке трофических цепей в соответствующих гидроэкосистемах.

Определение содержания ТМ в воде и тканях рыб проводили способом атомно-абсорбционной спектрофотометрии (ААС), методом экспресс-анализа согласно стандартам и нормативным документам с помощью прибора СЕМИ-600 (Украина) в лаборатории кафедры экологии Национального университета водного хозяйства и природопользования (Ровно, Украина). Тесноту корреляционных связей определяли с помощью ПЭВМ, используя пакет программы Microsoft Office Excel. Для обобщения результатов выполненных расчетов устанавливали погрешности коэффициентов корреляции между факторами, которые оценивали по критерию Стюдента для величины вероятности 95%.

Силу корреляционной связи между параметрами определяли согласно шкале Чеддака [15]: если $r = 1$, то связь функциональная; если $0,9 \leq r < 0,99$ – связь очень тесная; если $0,7 \leq r < 0,9$ – связь тесная; если $0,5 \leq r < 0,7$ – связь заметная; если $0,3 \leq r < 0,5$ – связь умеренная; $0,1 \leq r < 0,3$ – связь слабая; если $r < 0,1$ – связь отсутствует.

Определение содержания тяжелых металлов в воде, гидробионтах и донных отложениях проводилось в трех водоемах, которые находятся в одной климатической зоне, однако имеют различный трофический статус и уровень антропогенной нагрузки. Так, *малая река Замчиско*, которая является типичной для зоны Полесья Украины и представлена экосистемой лотического типа (проточная), имеет преимущественно III класс качества воды с высокой категорией в классификации по блоку показателей специфического действия, в частности, по таким элементам, как цинк (6 категория), марганец (7 категория) и медь (7 категория). Трофо-сапробиологические показатели качества воды реки проявляют в основном альфа- и бета-мезосапробность.

Лентическая экосистема «Озеро Белое» относится ко II классу качества поверхностных вод, однако блок специфических веществ токсического действия здесь соответствует 7 категории по содержанию меди, 6 категории по содержанию цинка и 5 категории по содержанию железа. Трофо-сапробиологический блок характеризует его олиготрофный статус, что объясняется особенностями питания озера и позволяет отнести его именно к фоновой гидроэкосистеме, где в поверхностные воды поступают тяжелые металлы антропогенного происхождения.

Экосистема комбинированного типа «Водоем-охладитель Хмельницкой атомной электростанции» характеризуется V классом качества поверхностных вод, где определяющим также оказался блок специфических веществ токсического действия, а именно содержание меди (7 категория), железа (5 категория), цезия-137 (3 категория). Сапробность воды колеблется между альфа-мезосапробностью и полисапробностью с преобладанием последней.

В таблице представлены результаты определения коэффициентов корреляции между содержанием тяжелых металлов в поверхностных водах исследуемых гидроэкосистем и их распределением в тканях организмов рыб. В частности, верхушку трофических цепей представляют щука обыкновенная (*Esox lucius*) для р. Замчиско и водоема-охладителя ХАЭС и угорь европейский (*Anguila Anguila*) для оз. Белое.

Таблица. – Корреляционные зависимости между содержанием тяжелых металлов в воде гидроэкосистем различных типов и тканях организма рыб

Параметры содержания	р. Замчиско				Водоем-охладитель				оз. Белое			
	Cu	Zn	Mn	Cd	Cu	Zn	Mn	Cd	Cu	Zn	Mn	Cd
Чешуя	0,17	0,32	0,22	0,1	0,15	0,47	0,47	0,13	0,13	0,47	0,77	0,13
Кожа	0,38	0,21	0,51	0,13	0,43	0,13	0,40	0,43	0,23	0,13	0,43	0,23
Жабры	0,82	0,59	0,57	0,47	0,79	0,48	0,69	0,59	0,59	0,48	0,89	0,59
Печень	0,72	0,47	0,88	0,82	0,65	0,51	0,71	0,61	0,61	0,51	0,91	0,61
Мышцы	0,17	0,21	0,19	0,14	0,22	0,32	0,25	0,12	0,32	0,32	0,21	0,32
Позвоночная кость	0,78	0,47	0,32	0,44	0,86	0,63	0,55	0,56	0,56	0,63	0,65	0,56

В данной таблице выделены коэффициенты, значения которых характеризовали тесноту связи между изучаемыми параметрами в диапазоне «связь умеренная» – «связь очень тесная». Следует отметить прямую связь всех зависимостей, что означает возрастание значений одного показателя от возрастания значений второго.

Так, в гидроэкосистеме лотического типа, которую представляет р. Замчиско, корреляционные связи имели самую высокую тесноту между содержанием меди в воде для трех типов тканей, а именно: 0,82 – жабры; 0,72 – печень; 0,78 – позвоночная кость. Между зависимостями содержания марганца в воде и тканях *Esox lucius* также отмечена достаточно тесная связь для трех типов ткани: 0,51 – кожа; 0,57 – жабры; 0,88 – печень. Несколько ниже здесь оказались корреляционные зависимости содержания цинка

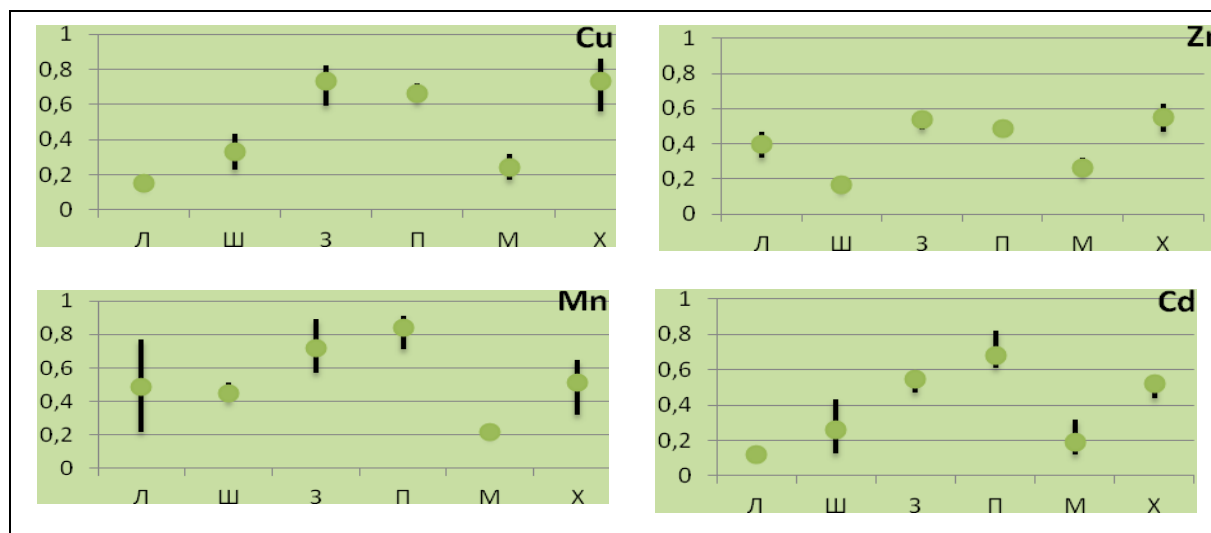
в исследуемых параметрах, хотя их связь тоже была тесная: 0,59 – жабры; 0,47 – печень и позвоночная кость.

В гидроэкосистеме комбинированного типа, которую представляет *водоем-охладитель ХАЭС*, теснота связи между исследуемыми параметрами была заметной для всех элементов тяжелых металлов. В частности, содержание марганца в воде влияло на его содержание в четырех типах тканей *Esox lucius*: 0,71 – печень; 0,69 – жабры; 0,55 – позвоночная кость; 0,47 – чешуя. Заметной была теснота связи для меди, цинка, кадмия и трех типов тканей рыбы: 0,79; 0,48; 0,59 – жабры; 0,65; 0,51; 0,61 – печень; 0,86; 0,63; 0,55 – позвоночная кость соответственно.

В лентической гидроэкосистеме оз. Белое, которая нами выбрана в качестве фоновой с длительным кумулятивным эффектом, теснота связей была похожа на распределение зависимостей параметров в гидроэкосистеме комбинированного типа. Так, содержание марганца в воде здесь наиболее заметно коррелировало с его содержанием в четырех типах тканей *Anguila Anguila*: 0,91 – печень; 0,89 – жабры; 0,77 – чешуя; 0,65 – позвоночная кость. Содержание меди, цинка и кадмия в поверхностных водах проявляли тесноту связи в трех типах тканей, соответственно: 0,59; 0,48; 0,59 – жабры; 0,61; 0,51; 0,61 – печень; 0,56; 0,63; 0,56 – позвоночная кость.

Полученные зависимости доказывают существование прямого влияния качества поверхностных вод на качество верхушки трофических цепей гидроэкосистем, что особенно четко прослеживается в экосистемах лентического и комбинированного типов. Понижение тесноты корреляционных связей для элементов можно обобщить следующим образом: лентическая гидроэкосистема: Cu – Mn – Zn – Cd; лентическая: Mn – Cu – Zn – Cd; комбинированная: Mn – Cu – Zn – Cd.

На рисунке в виде диаграмм представлены результаты проведенного анализа относительно способности отдельных элементов тяжелых металлов накапливаться в органах и тканях рыб. На диаграммах указаны средние значения и диапазон распределения корреляционных связей между исследуемыми параметрами.



Ч – чешуя; К – кожа, Ж – жабры; П – печень, М – мышцы; Пк – позвоночная кость

Рисунок. – Распределение колебаний коэффициентов корреляции зависимостей содержания тяжелых металлов в поверхностных водах гидроэкосистем и тканях рыб

Здесь четко прослеживается связь между содержанием всех четырех элементов в воде и их содержанием в жабрах, печени и позвоночной кости исследуемых видов

рыб. В частности, среди исследуемых гидроекосистем высокими оказались значения коэффициентов корреляции между содержанием в воде и тканях печени марганца (0,71–0,91). Тесную связь проявили также зависимости содержания в воде и позвоночной кости (0,56–0,86), в воде и жабрах (0,73–0,82) меди.

Тесноту корреляционных связей тяжелых металлов (в порядке убывания) между исследуемыми параметрами влияния качества воды гидроекосистем различных типов на формирование качества их рыбного населения можно обобщить следующим образом: Cu: П – Ж – Пк – Ч – К – М; Zn: Пк – Ж – П – Ч – М – К; Mn: П – Ж – Пк – Ч – К – М; Cd: П – Ж – Пк – К – М – Ч.

Полученные зависимости в целом достаточно полно отвечают особенностям тканей рыб к способности аккумуляции элементов тяжелых металлов, о чем говорится в специальной токсикологической литературе [17]. Однако однозначно судить о соотношении тяжелых металлов в организмах рыб и поверхностных водах мы не осмеливаемся, поскольку, помимо биохимических особенностей тканей, на восприятие организмом макро- и микроэлементов автохтонного и аллохтонного происхождения влияют также множество общих и частных факторов. Поэтому полученные на основании ограниченного количества факторов результаты можно сформулировать как тенденции влияния качества воды на качество рыбного населения, а именно:

1. В гидроекосистемах различных типов существуют определенные различия между чувствительностью верхушки трофических цепей и содержанием тяжелых металлов в поверхностных водах:

- а) лотическая гидроекосистема: $Cu > Mn > Zn > Cd$;
- б) лентическая гидроекосистема: $Mn > Cu > Zn > Cd$;
- в) комбинированная гидроекосистема: $Mn > Cu > Zn \geq Cd$.

2. Качество воды гидроекосистем различных типов способно формировать качество рыбного населения по содержанию элементов тяжелых металлов:

- а) Cu: печень > жабры > позвоночная кость > чешуя > кожа > мышцы;
- б) Zn: позвоночная кость > жабры > печень > чешуя > мышцы > кожа;
- в) Mn: печень > жабры > позвоночная кость > чешуя > кожа > мышцы;
- г) Cd: печень > жабры > позвоночная кость > кожа > мышцы > чешуя.

Подобные зависимости могут иметь прогностическую ценность в мониторинге гидроекосистем различных типов и обосновании альтернативных водоохранных мероприятий.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Про схвалення Концепції Державної цільової економічної програми розвитку рибного господарства на 2012–2016 роки : розпорядження, Концепція від 05.10.2011 № 1003-р. / Кабінет Міністрів України. – К. : КМУ, 2011. – 7 с.
2. Клименко, Н. А. Экологические нормативы качества воды рек Ровенской области: методология, результаты / Н. А. Клименко, В. И. Мельник // Вестн. Ровен. гос. техн. ун-та : сб. науч. тр. – Ровно. – 2000. – Вып. 4 (6). – С. 30–36.
3. Васенко, А. Г. Анализ методологических подходов к оценке качества поверхностных вод / А. Г. Васенко, А. А. Верниченко, Д. Ю. Верниченко-Цветков // Вода: химия и экология. – 2013. – № 10. – С. 46–51.
4. Набиванец, Б. И. Аналитическая химия поверхностных вод : монография / Б. И. Набиванец [и др.] – К. : Наукова думка, 2007. – 456 с.
5. Клименко, Н. А. Экологическое состояние украинской части Еврорегиона «Буг» : монография / Н. А. Клименко, Н. М. Вознюк. – Ровно : НУВГП, 2007. – 203 с.
6. Гринжевский, Н. В. Аквакультура Украины (организационно-экономические

аспекты) / Н. В. Гринжевский. – Луганск : Свободная Украина, 1998. – 364 с.

7. Мальцев, В. И. Особенности ихтиофаунистического комплекса водоемов и водотоков Украины. Исследования и мониторинг малых рек : практ. пособие / В. И. Мальцев. – Киев ; Хмельницкий ; Бережаны ; Сумы ; Чернигов, 2005. – 215 с.

8. Бедункова, О. А. Оценка состояния водной экосистемы малой реки по характеристикам ихтиопопуляций / О. А. Бедункова, С. М. Шепелюк // материалы междунар. науч.-прак. конф. «Сбалансированное природо-пользование: современный взгляд, тенденции и перспективы». – Херсон : Колос, 2010. – С. 19–22.

9. Запорожец, О. А. Некоторые методологические аспекты определения сосуществующих форм тяжелых металлов в природных водах / О. А. Запорожец, Р. П. Линник // Тез. докл. Всерос. конф. «Актуальные проблемы аналитической химии». – М., 2002. – С. 28–29.

10. Пилипенко, Ю. В. Миграционные пути распространения ионов тяжелых металлов в органах и тканях рыб-биомелиораторов в условиях малых водохранилищ / Ю. В. Пилипенко, О. А. Бедункова, Е. Ю. Пилипенко // Вестн. Нац. ун-та водн. хоз-ва и природопользования. – 2007. – Вып. 2 (38). – С. 313–318.

11. Меншуткин, В. В. Имитационное моделирование водных экологических систем / В. В. Меншуткин. – СПб. : Наука, 1993. – 160 с.

12. Щепетова, В. А. Математическое моделирование как метод прогнозирования изменения состояния водных экосистем на примере Пензенского водохранилища / В. А. Щепетова, В. В. Кузина // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 8, ч. 6. – С. 1373–1377.

13. Романенко, В. Д. Основы гидроэкологии : учебник для студ. высш. учеб. заведений / В. Д. Романенко. – Киев : Генеза, 2004. – 664 с.

14. Догановский, А. М. Исследование возможностей оценки динамики биопродуктивности озер по ограниченному числу абиотических факторов (на примере Ладожского, Большие Чаны и других): расчетные гидрологические характеристики / А. М. Догановский, Е. В. Иванова // Сб. науч. тр. (междуведом.) Ленингр. гидромет. ин-та. – 1991. – Вып. 110. – С. 86–94.

15. Виленкин, С. Я. Статистические методы исследования / С. Я. Виленкин. – М. : Сов. радио, 1967. – 421 с.

16. Романенко, В. Д. Методика экологической оценки качества поверхностных вод по соответствующим категориям / В. Д. Романенко [и др.]. – К. : Символ–Т, 1998. – 28 с.

17. Метелев, В. В. Водная токсикология / В. В. Метелев, А. И. Канаев, Н. Г. Дзасохова. – М. : Колос, 1971 – 247 с.

Рукапіс паступіў у рэдакцыю 12.03.2015

Klimenko A.N. Correlation of Heavy Metals in Surface Waters and Representatives of Ichthyofauna of Hydroekosistems of Different Types

A quantitative description and comparative analysis of the influence of surface water quality in shaping the quality of fish through the correlations between the content of heavy metals in water hydroekosistems of various types and the distribution of their content in the tissues of the top food chain of fish fauna