

БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ НАКОПЛЕНИЯ КАДМИЯ В ОРГАНИЗМЕ РЫБ

Собраны многолетние данные отечественных и зарубежных авторов по изучению накопления и последующего влияния кадмия на организм рыб.

Введение

Проблема высокой токсичности даже незначительных концентраций кадмия для гидробионтов приобретает все большую актуальность в связи с увеличением промышленных стоков в водоемы. В пресных водах концентрация кадмия колеблется от 0,1 до 10 мкг/л, в поверхностных водах, находящихся вблизи промышленных районов, его содержание достигает 50 мкг/л. Следует отметить, что этот элемент в природных водах начали изучать только в конце 70-х годов, так как считалось, что обнаруживаемые в водных объектах следовые количества кадмия не представляют биологической опасности. Но после случаев отравления и смерти людей в результате использования для питья загрязненной кадмием воды и употребления в пищу рыбы (р. Джинтсу; г. Тайам) отношение к этому металлу изменилось [1]. Показано, что он в наибольшей степени накапливается в печени, легких и почках человека и влияет на способность к прогрессированию диабета, гипертонии, остеопороза, лейкемии, развитие сердечнососудистых заболеваний и новообразований [2-6]. В настоящее время ПДК кадмия для водоемов питьевого водоснабжения в России составляет 1 мкг/л, для рыбохозяйственных водоемов – 5 мкг/л. Допустимая концентрация кадмия в рыбопродуктах России – 0,1 мкг/кг [6].

Результаты и их обсуждение

Мировое производство кадмия составляет примерно 21 тыс. т/год. Транспорт, сжигание топлива, суперфосфаты добавляют значительные количества этого элемента в окружающую среду. От 90 до 98 %

Е.А. Флерова*,
кандидат
биологических наук,
заведующая химико-
аналитическим
отделом, доцент
кафедры
биотехнологии,
ФГБОУ ВПО
Ярославская
государственная
сельскохозяйственная
академия

кадмия, поступающего в водные экосистемы, имеет антропогенное происхождение и связано с кислотными осадками [1, 6]. Доминирующей формой миграции металла является растворенная, составляющая 56-100 % от его общего содержания. Привносимый с водным потоком, кадмий может осаждаться в илах в виде органоминеральных комплексов. Поглощаясь из илов, он накапливается в теле бентосных организмов, которые, в свою очередь, являются кормовой базой для многих рыб [7]. Результаты экспериментальных исследований по оценке аккумуляции кадмия в различных органах рыб показали, что по степени накопления кадмия органы располагаются в следующем порядке: почка>печень>жабры. С повышением концентрации кадмия линейно повышаются уровни металлотioneинов в исследуемых органах, их роль в детоксикационных процессах тканеспецифична [8-10]. В опытах с рыбой, которую кормили пищей, содержащей кадмий, также установлено, что наибольшее содержание металла обнаруживается в почках [11, 12].

В природных водоемах рыбы в наибольшей степени подвергаются действию кадмия в период дождевого паводка и снеготаяния, когда происходит его выщелачивание в воду. По способности к его аккумуляции органы и ткани, как и в экспериментальных работах, располагаются в следующем порядке, на который не влияет видовая принадлежность рыб: почка>печень>жабры>скелет>мышцы [6, 13-16].

Показано, что кадмий имеет высокое сродство к SH-группам, содержащимся в протеинах, энзимах и нуклеиновых кислотах, это приводит к его аккумуляции в организме. Поскольку метаболизм кадмия тесно связан с эссенциальными элементами, и особенно цинком, он способен замещать последний во многих жизненно важных ферментативских реакциях, приводя к их разрыву и торможению.

* Адрес для корреспонденции: katarinum@mail.ru

нию. Поэтому кадмий может рассматриваться как антиметаболит цинка. Показано, что накопление цинка может сократить поглощение кадмия и уменьшить его действие на организм, тогда как дефицит цинка, напротив, увеличивает его токсичность [17]. Первичный механизм токсического воздействия кадмия может быть связан с ингибированием переноса кальция протеинами [6].

Кадмий поступает в организм через жабры, в результате чего повреждаются клеточные мембраны, наступает гипертрофия жаберного аппарата, слияние и колбообразные вздутия жаберных лепестков, гиперемия и кровяные стазы, некроз, отеки и расслоением жаберного эпителия. Такие изменения вызывают нарушение содержания ионов магния, натрия и кальция в организме, уменьшают общую диффузионную поверхность жабр, меняют гидродинамику потоков воды, несущих органу кислород [18, 19].

Накапливаясь в организме, металл вызывает ряд отклонений от физиологической нормы рыб. Отмечается изменение поведенческих реакций, снижение темпа роста мальков, уменьшение массы тела, относительной массы селезенки, почек и печени рыб [20-22]. Под его влиянием содержание кальция в крови может резко снижаться, вызывая мышечный тетанус и глубокие респираторные нарушения [23]. Известно, что кадмий нарушает метаболические процессы, ингибируя окислительное фосфорилирование, синтез белков и нуклеиновых кислот, увеличивая содержание гликогена и липидов, снижая активность пероксидазы и щелочной фосфатазы, вызывая серьезные нарушения в мембранном гидролизе нутриентов [24, 25]. Зарегистрированы нарушения в динамике холестерина в тканях, которые могут серьезно повлиять на энергетический статус, синтез стероидных гормонов, андрогенов и эстрогенов, приводящих к нарушению созревания половых продуктов, нереста и выживания рыб [26].

На ранних сроках воздействия кадмием (от 0,03 до 6,14 мг/л) у взрослых особей, как правило, в крови значительно снижается уровень гематокрита и гемоглобина, абсолютное количество эритроцитов, бластных форм клеток, лейкоцитов и содержание общего белка [27-29]. В периферической крови и иммунокомпетентных органах регистрируется лимфопения и нейтрофилия, активизируется выработка антибактериальных соединений, в крови возрастает концентрация глюкозы, аспартатаминотрансферазы, креатинкиназы, лактатдегидрогеназы и фосфора [30-32].

С увеличением срока экспозиции до 30-60 сут (0,75 мг/л) происходит постепенное уве-

Ключевые слова:

кадмий,
аккумуляция,
токсичность,
рыбы

личение абсолютного количества лейкоцитов и уровня иммуноглобулинов в крови, хотя кадмий, как элементарное вещество, не обладает свойствами антигена. Авторы выдвигают две гипотезы: кадмий при попадании в организм выступает в роли гаптена, или металл влияет на белки организма таким образом, что модифицирует их, в результате чего иммунная система организма рыб воспринимает их как чужеродные, реагируя синтезом антител [26, 27, 33].

Снятие токсического воздействия на организм приводит к различным последствиям. Показано, что у карпов через 60 сут происходит восстановление иммуноглобулиновой фракции в крови и абсолютного количества лейкоцитов до уровня, близкого к контролю [26, 28]. Мозамбикская тилapia оказалась более чувствительна к токсиканту, замена кадмия чистой водой явилась для рыб дополнительным стрессом: количественные и качественные изменения в крови и селезенке усилились, все рыбы погибли через 30 сут пребывания в чистой воде [34].

По мнению Короткова и Скульского [35], основное действие кадмия связано с его транспортом через биологические мембраны и блокированием дыхательных процессов в митохондриях. Эти данные подтверждаются ультраструктурными исследованиями других авторов, которые обнаружили под воздействием низких концентраций ионов кадмия дегградацию митохондрий в хлоридных клетках жаберного эпителия, гепатоцитах печени и лейкоцитах почек, селезенки и печени рыб [19, 36-38].

Кроме выше описанной гистопатологии, кадмий вызывает гематологические аномалии клеток крови: появление пенистых клеток, вакуолизацию и усиление базофильной зернистости цитоплазмы бластов, эритроцитов и моноцитов, повреждение клеточных мембран, обособление хроматина и вытеснение ядра из клеток [34].

В селезенке уменьшается количество кровеносных синусов, разрушаются зародышевые и мелано-макрофагальные центры. Обнаружены очаги некроза, а также соединительнотканые тяжи, которые обособляют участки разрушенных клеток от формирующихся структурных элементов [21, 40].

В гепатоцитах печени происходит расширение, фрагментация и везикуляция цистерн эндоплазматической сети, образование в их цитоплазме крупных липидных капель с большим содержанием гликогена [41].

В почках кадмий вызывает патологические повреждения как гемопоэтической ткани, так и нефронов. Зарегистрированы патологические изменения лейкоцитов, лизис

содержимого палочковых клеток, смещение и пикноз ядер фрагментация и везикуляция эндоплазматической сети, увеличение числа лизосом, редукция ресничек эпителиоцитов проксимальных канальцев [33, 38, 42-45]. На тканевом уровне – чрезмерное набухание и распад почечных канальцев, редукция собирательных канальцев, некроз компонентов нефрона. В почечных тельцах отмечается утолщение базальной мембраны и пролиферация капилляров клубочка, в результате которой капиллярные петли заполняют всю полость почечной капсулы [38, 42, 44]. В органе встречаются отложения гемосидерина, обширные кровоизлияния, очаги фиброза и некроза кроветворной ткани, а также соединительно-тканые разрастания вокруг погибших клеток кроветворной ткани, канальцев и почечных телец [14, 38, 42, 46]. Гистологические изменения сопровождаются нарушением осмотических и ионрегулирующих функций, концентрационной способности почек, наблюдается изменение объема выделяемой мочи [42, 44].

Заключение

Таким образом, глобальное, прогрессирующее загрязнение воды кадмием является серьезной проблемой современного общества. Поэтому, несмотря на огромное количество исследований, посвященных действию этого металла на водные организмы, оценка состояния рыбных ресурсов, контроль загрязнения воды кадмием на сегодняшний день остаются приоритетными направлениями развития мониторинговых исследований.

Литература

1. Линник П.Н. Кадмий в поверхностных водах; содержание, формы нахождения, токсическое действие / П.Н. Линник, И.В. Искра // Гидробиол. журнал. 1997. Т. 33/ № 6. С. 72-87.
2. Зубаренко А.В. Нефропатії у дітей з підвищеним вмістом свинцю та кадмію в сироватці крові / А.В. Зубаренко, Л.Г. Кравченко, Г.В. Касьяненко // Педіатрія, акушерство та гінекол. 2000. № 6. С. 85.
3. Abe T. Application of path analysis to urinary findings of cadmium-induced renal dysfunction / T. Abe, E. Kobayashi, Y. Okubo, Y. Suwazono, T. Kido, Z.A. Shaikh, K. Nogawa // J. of Environmental, Science and Health. 2001. V. 36, № 1. P. 75-87.
4. Satarug S. Changes in zinc and copper homeostasis in human livers and kidneys associated with exposure to environmental cadmium / S. Satarug, J.R. Baker, P.E.B. Reilly, M.R. Moore, D.J. Williams // Human and Experimental Toxicology. 2001. V. 20, № 4. P. 205-213.
5. Касьяненко Г.В. Вплив солей важких металів на стан серцево-судинної системи у дітей / Г.В. Касьяненко, О.В. Зубаренко, Л. Г. Кравченко // Педіатрія, акушерство та гінекол. № 2. 2000. С. 47.
6. Моисеенко Т.И. Рассеянные элементы в поверхностных водах суши: технофильность, биоаккумуляция и экотоксикология / Т.И. Моисеенко, Л.П. Кудрявцева, Н.А. Гашкина М.: Наука, 2006. 261 с.
7. Степанова Н.Ю. Некоторые закономерности распределения микроэлементов между абиотическими и биотическими компонентами Куйбышевского водохранилища / Н.Ю. Степанова, В.З. Латыпова, Е.А. Минакова // Тез. докл. Междун. конф. «Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем», С.-Петербург, 2006. С. 143-144.
8. Dallinger R. The role metallothionein in cadmium accumulation of Arctic char (*Salvelinus alpinus*) from high alpine lakes / R. Dallinger, M. Egg, G. Kцck, R. Hofer // Aquatic Toxicology. 1997. V. 38. P. 47-66.
9. De Smet H. Dynamics of (Cd, Zn)-metallothioneins in gills, liver and kidney of common carp *Cyprinus carpio* during cadmium exposure / H. De Smet, B. De Wachter, R. Lobinski, R. Blust // Aquatic Toxicology. 2001. V. 52. № 3-4. P. 269-281.
10. Panchanathan J.P. Patterns of cadmium accumulation in selected tissues of the catfish *Clarias batrachus* (Linn.) exposed to sublethal concentration of cadmium chloride / J.P. Panchanathan, P.I. Vattapparumbil // Veterinary archive. 2006. V. 76. № 2. P. 167-177.
11. Berntssen M.H.G. Tissue lipid peroxidative responses in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) per fed high levels of dietary copper and cadmium / M.H.G. Berntssen, A-K. Lundebye, K. Hamre // Fish Physiology and Biochemistry. 2000. V. 23, № 1. P. 35-48.
12. Chowdhury M.J. Gastrointestinal uptake and fate of cadmium in rainbow trout acclimated to sublethal dietary cadmium / M.J. Chowdhury, D.G. McDonald, C.M. Wood // Aquatic Toxicology. 2004. V. 69, № 2. P. 149-163.
13. Терентьев П.М. Ответы организмов сига *Coregonus lavaretus* (L) озера Чунозеро (Лапландский биосферный заповедник, Кольский полуостров) на продолжительное воздействие малых доз загрязнения / П.М. Терентьев, Н.А. Кашулин, Л.П. Кудрявцева // Мат. докл. XII конф. Молодых ученых

«Биология внутренних вод: проблемы экологии и биоразнообразия», Борок, 2002. С. 148-149.

14. Кашулин Н.А. Анализ и оценка содержания металлов в органах и тканях рыб в водах бассейна р. Пасвик в 2002 году / Н.А. Кашулин, И.В. Гладышева // Мат. докл. Междун. конф. «Структурно-функциональные особенности биосистем Севера (особи, популяции, сообщества)», Петрозаводск, 2005. Петрозаводск: ПетрГУ, 2005. Ч. 1. С. 162-164.

15. Velcheva I. Content and transfer of cadmium (Cd) in the organism of fresh-water fishes // Acta zoologica Bulgarica. 2002. V.54. № 3. P. 109-114.

16. Filipovic V. Metallothionein and metal levels in cytosol of liver, kidney and brain in relation to growth parameters of *Mullus surmuletus* and *Liza aurata* from the Eastern Adriatic Sea / V. Filipovic, B. Raspor // Water Research. 2003. V. 37. № 13. P. 3253-3262.

17. Brzoska M.M. Interactions between cadmium and zinc in the organism / M.M. Brzoska, J. Moniuszko-Jakoniuk // Food and Chemical Toxicology. 2001. V. 39. P. 967-980.

18. Матей В.Е. Жабры пресноводных костистых рыб: Морфофункциональная организация, адаптация, эволюция. СПб.: Наука, 1996. 204 с.

19. Tao S. Uptake of Cadmium Adsorbed on Particulates by Gills of the Goldfish (*Carassius auratus*) / S. Tao, C. Liu, R. Dawson, A. Long, F. Xu // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2000. V. 47. P.306-313.

20. Заботкина Е.А. Влияние кадмия на структурно-функциональное состояние иммунокомпетентных органов карпа / Е.А. Заботкина, Т.Б. Лапирова // Современные проблемы физиологии и биохимии водных организмов: Мат. докл. Петрозаводск, 2004. С. 46-47.

21. Hansen J.A. The effects of long-term cadmium exposure on the growth and survival of juvenile bull trout (*Salvelinus confluentus*) / J.A. Hansen, P.G. Welsh, J. Lipton, M.J. Suedkamp // Aquatic Toxicol. 2002. V. 58. № 3-4. P. 165-174.

22. Sloman A.K. Cadmium affects the social behavior of a trout of rainbow (*Oncorhynchus mykiss*) / A.K. Sloman, R.G. Skott, Z. Diao, C. Rouleau, M.C. Wood, D.G. McDonald // Aquatic Toxicol. 2003. V. 65. P. 171-185.

23. Fu H. Involvement of cortisol and metallothionein-like proteins in the physiological responses of tilapia (*Oreochromis mossambicus*) to sublethal cadmium stress / H. Fu, O.M. Steinbach, C.J. van der Hamer, D.H. Balm, R.A. Lock // Aquatic Toxicol. 1990. V. 90. № 16. P. 257-269.

24. Коновалов Ю.Д. Связывание кадмия и ртути белками и низкомолекулярными тиоловыми соединениями рыб (обзор) // Гидробиол. журнал. 1993. Т. 29. № 1. С. 42-51.

25. Алиновская Ю.Б. Патологические репаративные процессы в тканях карпа после отравления кадмием / Ю.Б. Алиновская, Д.А. Бедняков // Мат. докл. северокавказской региональной научной конференции молодых ученых, аспирантов и студентов «Перспектива-2001», Нальчик, 2001. С. 4-7.

26. Мурадова Г.Р. Влияние хлорида кадмия на показатели липидного обмена рыб / Г.Р. Мурадова, М.М. Габитов, Б.С. Мусаев, А.И. Рабаданова // Вестник ДГУ. 2006. № 1. С. 94-98.

27. Алиновская Ю. Б. Восстановление некоторых физиологических показателей карпа после отравления ионами кадмия // Тез. докл. Всерос. конф. мол. ученых «Рыбохозяйственная наука на пути в 21 век», Владивосток, 2000. Владивосток: ТИПРО-Центр, 2000. С. 4-6.

28. Валедская О.М. Влияние тяжелых металлов на некоторые показатели иммунитета карпа / О.М. Валедская, М.А. Сайед, В.Ф. Зайцев // Исследования по рыбоводству в регионе Северного Прикаспия. 2001. С. 189-194.

29. Ruparellia S.G. Effect of cadmium on blood of *Tilapia Jreochromis mossambicus* (Peters), during prolonged exposure / S.G. Ruparellia, J. Verma, S.R. Sayed, U.M. Rawae // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 1990. V. 45. № 2. P. 305-312.

30. Saxena M.P. Immune responses to *Aeromonas hydrophila* in cat fish (*Heteropneustis fossilis*) exposed to cadmium and hexachlorocyclohexane / M.P. Saxena, K. Gopal, W. Jones, P. Ray // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 1992. V. 48. № 2. P. 194-201.

31. Микряков В.Р. Влияние солей некоторых тяжелых металлов на картину белой крови молоди ленского осетра *Acipenser baeri* Brandt / В.Р. Микряков, Т.Б. Лапирова // Вопросы ихтиологии. 1997. Т. 37. № 4. С. 538-542.

32. Drastichova J. The effect of cadmium on haematological and biochemical indices of carp (*Cyprinus carpio* L.) / J. Drastichova, Z. Syobodova, V. Luskova, J. Machova, O. Celechovska, E. Svestkova // Toxicology Letters. 2003. V. 144. P. 174.

33. Крючков В.Н. Изучение механизма нефротоксичности кадмия для рыб / В.Н. Крючков, А.В. Бойко // Мат. докл. Междун. конф., посвященной 105-летию КаспНИРХ «Современные проблемы Каспия Астрахань», Астрахань 2002. Астрахань: КаспНИРХ, 2002: С. 152-155.



34. Степанова В.М. Хроническое действие кадмия на клетки ретикуло-лимфоидной ткани селезенки и периферической крови мозамбикской тилапии / В.М. Степанова, Д.Ф. Павлов, Г.М. Чуйко // Биология внутренних вод. 1998. № 3. С. 68-75.
35. Коротков С.М. Изменение влияния Cd²⁺ на дыхание изолированных митохондрий печени крысы после их преинкубации с Ca²⁺, Sr²⁺, Ba²⁺, Mn²⁺ и рутениевым красным / С.М. Коротков, И.А. Скульский // Цитология. 1996. Т. 38. № 4/5. С. 500-510.
36. Балабанова Л.В. Влияние кадмия на ультраструктуру иммунокомпетентных клеток селезенки и почек осетра *Acipenser baeri* Brandt // Биология внутренних вод. 1998. № 2. С. 80-85.
37. Suchada T. Ultrastructural alterations in the liver and kidney of white sea bass, *Lates calcarifer*, in acute and subchronic cadmium exposure / T. Suchada, P. Prayad, C. Kashane, U. Suchart, S. Somphong // Environmental Toxicology. 2004. № 19 (1). P. 11-19.
38. Назарова Е.А. Последовательность морфо-патологических изменений в почках пресноводных костистых рыб при хронической интоксикации солями кадмия // Токсикологический вестник. 2011. № 4. С. 46-51.
39. Beena S. Effect of cadmium and mercury on the hematological parameters of the fish *Cyprinus carpio* L. / S. Beena, S. Viswaranjan // C.A. Sel. Environmental pollution. 1988. № 11. P. 108-113.
40. Лапинова Т.Б. Реакция иммунной системы карпа на действие сублетальной концентрации кадмия / Т.Б. Лапинова, Е.А. Заботкина, Л.В. Балабанова, В.Р. Микряков, Е.А. Назарова, Е.В. Бубенкова // Мат. докл. Всерос. науч.-практич. конф. «Экологические проблемы уникальных природных и антропогенных ландшафтов», Ярославль, 2004. Ярославль: Яросл. гос. ун-т, 2004. С. 229-234.
41. Suchada T. Ultrastructural alterations in the liver and kidney of white sea bass, *Lates calcarifer*, in acute and subchronic cadmium exposure / T. Suchada, P. Prayad, C. Kashane, U. Suchart, S. Somphong // Environmental Toxicology. 2004. № 19 (1). P. 11-19.
42. Фомин И.В. Функциональные изменения в выделительной системе карповых рыб при отравлении кадмием и нефтью // XXI век – перспективы развития рыбохозяйственной науки. 2002. С. 82-85.
43. Гамбарян С.П. Нефротоксическое действие соединений платины, хрома и кадмия на морских костистых рыб / С.П. Гамбарян, Е.А. Лаврова // Журнал эволюционной биохимии и физиологии. 1989. Т. 25. № 6. С. 729-735.
44. Singhal R.N. Cadmium induced changes in the histology of kidneys in common carp, *Cyprinus carpio* (Cyprinidae) / R.N. Singhal, M. Jain // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 1997. V. 58. № 3. P. 456-462.
45. Gill T.S. Erythrocytic and leucocytic responses to cadmium poisoning in a freshwater fish, *Puntius conchonus* Ham / T.S. Gill, J.C. Pant // Environmental Research. 1985. V. 36. № 2. P. 327-337.
46. Ray P.K. Immune responses to *Aeromonas hydrophila* in Cat Fish *Heteropomus fossilis* exposed to cadmium and hexachlorocyclohexane // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 1992. V. 48, № 2. P. 194-201.



E.A. Flerova

BIOLOGICAL CONSEQUENCES OF CADMIUM ACCUMULATION IN FISH

Long term data from national and foreign experience on the study and the subsequent accumulation of

cadmium effects on the body of fish has been analyzed.

Key words: cadmium accumulation, toxicity, fish