

Ewa Łuszczek-Trojnar*, Ewa Draż-Kozak*, Włodzimierz Popek*

**BIOAKUMULACJA METALI CIĘŻKICH W WYBRANYCH TKANKACH
KARPIA (*CYPRINUS CARPIO* L.) POCHODZĄCEGO ZE STAWÓW
HODOWLANYCH ZASILANYCH WODĄ RZEKI RUDAWY**

**BIOACCUMULATION OF HEAVY METALS IN COMMON CARP
(*CYPRINUS CARPIO* L.) FROM BREEDING PONDS SUPPLIED
WITH THE RUDAWA RIVER**

Słowa kluczowe: bioakumulacja, metale ciężkie, karp, Rudawa.

Key words: bioaccumulation, heavy metals, common carp, the Rudawa River.

The objective of the present study was to determine the concentration of Zn, Cu, Pb and Cd in the muscle, kidney, gill and liver of common carp raised in the breeding ponds with regard to the age of fish and season in the years 2006 – 2007. Ponds of Experimental Station of Department of Ichthyobiology and Fisheries of UR in Cracow are supplied with The Rudawa River, where no heavy metals contamination was recorded in that time.

The order of heavy metal accumulation in the muscle, hepatopancreas and kidney was Zn>Cu>Pb>Cd, and in case of gills Zn>Pb>Cu>Cd. The highest Zn concentration was established in the kidney (234 mg·kg⁻¹), before gills, liver and the muscle. Elevated Cu levels were observed in the hepatopancreas (7.5 mg/kg), next in gills, kidney and the muscle. The highest levels of Pb were observed in the gills (4.8 mg kg⁻¹) and the hepatopancreas (1.8 mg·kg⁻¹) of fry and 1-years old fish (adequately 4.8 and 0.9 mg·kg⁻¹), and in the kidney of 2-years old fish (1.2 mg·kg⁻¹). The highest Cd level in 1-years old carp was observed in the hepatopancreas (1.4 mg·kg⁻¹) and the kidney (0.6 mg·kg⁻¹), but in 2-years old fish the highest Cd level was found in gills (1.0 mg·kg⁻¹) and the kidney (0.4 mg·kg⁻¹).

The bioaccumulation of studied heavy metals in common carp tissues is correlated to fish age. Cadmium concentration gradually increases with age, while Pb level decreases, what is the evidence of different metabolism for heavy metals. Generally the highest metal con-

* Dr Ewa Łuszczek-Trojnar, dr Ewa Draż-Kozak, prof. dr hab. Włodzimierz Popek
– Katedra Ichtiobiologii i Rybactwa Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, ul. Spiczakowa 6,
30-199 Kraków-Mydlniki; tel.: 12 637 51 76; e-mail: e.trojnar@ur.krakow.pl

centrations were observed in 1-years old fish. In case of some tissues the correlation to fish age and season was found.

1. WPROWADZENIE

Metale ciężkie są powszechnie występującym zanieczyszczeniem zarówno gleb, jak i wód powierzchniowych, gdzie dostają się najczęściej wraz ze ściekami przemysłowymi. Jako cięższe od wody opadają na dno i w każdym momencie wzruszenia pokładów dennych mogą się do niej dostać ponownie. Będąc składnikiem osadów podlegają bioakumulacji w roślinach, poprzez ich system korzeniowy, jak również w ciałach żyjących tam bezkręgowców, stanowiących podstawowy pokarm ryb bentosożernych, do jakich należy między innymi karp. Jest to jedna z dróg wnikania metali ciężkich do organizmu ryb. Na skutek nieustannego penetrowania dna przez ryby bentosożerne duże pokłady metali są ponownie uwalniane do wody i mogą dostawać się do organizmów ryb także przez skrzelą podczas procesu oddychania. Inną drogą wchłaniania jest skóra, przez którą mogą przenikać toksyczne związki rozpuszczone w wodzie.

Ryby należą do zwierząt, które nie mogą uwolnić się od zanieczyszczonego środowiska, w którym żyją, i są narażone na ciągłe wchłanianie substancji toksycznych znajdujących się w różnych elementach ich ekosystemu [Olafa i in. 2004]. Z tej przyczyny ryby są ważnym bioindykatorem środowiska.

Zanieczyszczenia przemieszczające się w procesie biomaganifikacji przez kolejne ogniwa łańcucha troficznego są odpowiedzialne za negatywne zmiany w kondycji i stanie zdrowia organizmów [Farkas i in. 2002]. Metale ciężkie wchodząc do łańcucha pokarmowego mogą ostatecznie zostać zasymilowane przez ostatnie jego ogniwo – człowieka, powodując zagrożenie również jego zdrowia [Agah i in. 2009].

Ryby, stojąc na wysokim szczeblu drabiny troficznej, są istotnym źródłem pożywienia człowieka, dlatego też często są wykorzystywane jako wskaźniki zanieczyszczenia metalami ciężkimi [Blasco i in. 1998, Agah i in. 2009]. Celem niniejszej pracy było zbadanie akumulacji miedzi, cynku, kadmu i ołowiu w różnych tkankach trzech roczników karpia, pochodzącego z hodowli stawowej Rybackiej Stacji Doświadczalnej zasilanej wodą z rzeki Rudawy, w dwóch okresach roku, jesienią pod koniec okresu wegetacyjnego ryb i wiosną na początku kolejnego okresu wegetacyjnego. Rudawa to prawobrzeżny dopływ Wisły wpadający do niej w Krakowie. Przez 35 kilometrów swojego biegu rzeka Rudawa zbiera zanieczyszczenia z Krzeszowic, Rudawy i Zabierzowa oraz wielu miejscowości, przez które przepływają liczne dopływy tej rzeki. Wody Rudawy na 9 kilometrze od ujścia w Szczyglicach są ujmowane do zaopatrzenia w wodę pitną mieszkańców zachodniej części miasta Krakowa. W tej okolicy woda Rudawy zaopatruje również stawy hodowlane Rybackiej Stacji Doświadczalnej w Mydlnikach, skąd pobrano ryby do niniejszych badań.

2. MATERIAŁ I METODY

Badania zostały przeprowadzone na terenie Rybackiej Stacji Doświadczalnej, Katedry Ichtibiologii i Rybactwa Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie. Stawy hodowlane usytuowane są w Mydlnikach, wzdłuż biegu rzeki Rudawy, z której pobierana jest woda uzupełniająca stan zbiorników wodnych Stacji. Jakość wody w latach poboru próbek była zaklasyfikowana jako zadowalająca, w III klasie czystości (Ocena...2007, 2008), z koncentracją badanych metali ciężkich nieprzekraczającą wartości granicznych klasy bardzo dobrej. Wszystkie jednostkowe pomiary stężenia kadmu wykazywały wartości poniżej $0,001 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, miedzi i ołowiu poniżej $0,005 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$, a cynku poniżej $0,08 \text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (dane MPWiK ZUW – Rudawa). Narybek przebywa w stawach zwanych przesadkami drugimi, o średniej powierzchni 1 ha i średniej głębokości 120 cm , w koncentracji 15 tys. sztuk/ha . Jako pokarm oprócz zooplanktonu i drobnych bezkręgowców bentosowych, pobieranych przez ryby bezpośrednio z dna, dożywiany jest śrutą zbożową w dawce dziennej stanowiącej $5 - 10\%$ masy ciała ryb.

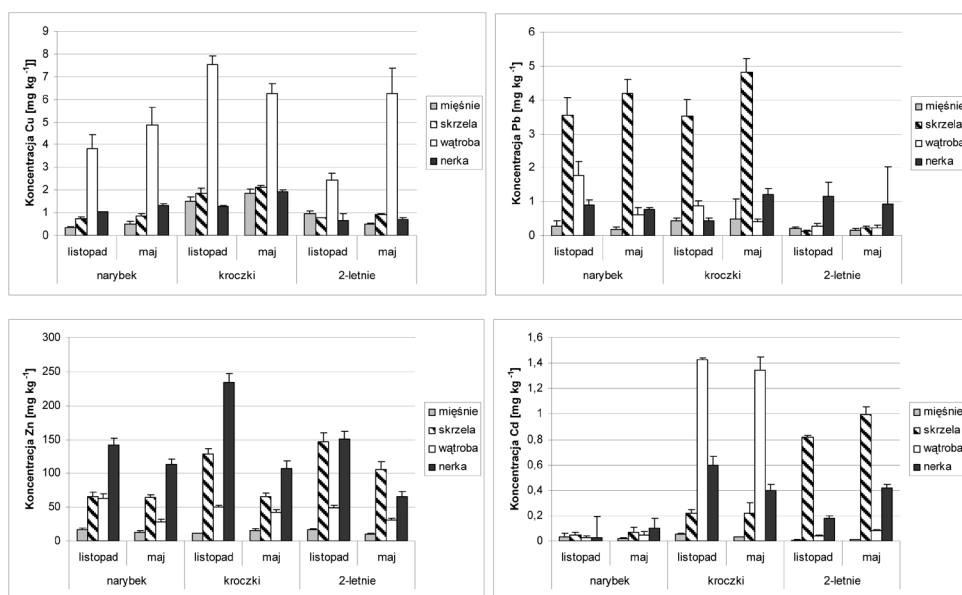
Po zakończeniu sezonu wegetacyjnego ryby zimą w stawach zwanych zimochowami, nie pobierając pokarmu. Wiosną w marcu obsadza się nimi stawy zwane kroczkowymi, które w Stacji Rybackiej w Mydlnikach mają średnią powierzchnię 4 ha i średnią głębokość 150 cm i koncentrację $5 - 7 \text{ tys. sztuk/ha}$. Jako pokarm pobierają bentos z dna i dodatkowo otrzymują śrutę zbożową w dawce $5 - 8\%$ masy ciała ryb. Po zakończeniu sezonu wegetacyjnego w listopadzie są przenoszone do zimochowów, a wiosną do stawów handlowych o powierzchni 1 ha i średniej głębokości 150 cm , gdzie przebywają w koncentracji $1 - 1,5 \text{ tys. szt/ha}$, dożywiane śrutą zbożową w dawce dziennej $3 - 6\%$ masy ciała.

W listopadzie 2006 r. oraz w maju 2007 r. pobrano materiał do badań, który stanowiło 60 sztuk karpia, po 10 sztuk narybku w wieku 6 i 12 miesięcy, krocza w wieku 18 i 24 miesiące oraz karpia handlowego w wieku 30 i 36 miesięcy. Po dekapitacji ryby zostały zważone. Masa ciała narybku wynosiła średnio $66,7 \pm 5,2 \text{ g}$ w okresie jesiennym oraz $354 \pm 23,5 \text{ g}$ w okresie wiosennym, krocza – $600 \pm 51 \text{ g}$ w okresie jesiennym i $1050 \pm 39,1 \text{ g}$ wiosną, a masa ciała karpia 2-letnich wynosiła jesienią $1400 \pm 44,5 \text{ g}$, a wiosną średnio $2000 \pm 37,8 \text{ g}$. Od karpia pobrano do badań próbki mięśni, gruczołu trzustkowo-wątrobowego, nerki oraz skrzeli. W celu określenia koncentracji Cu , Zn , Pb i Cd w tkankach poddano je mineralizacji w mieszaninie kwasu azotowego (HNO_3) i nadchlorowego (HClO_3), a następnie oznaczono poziom metali metodą absorpcji atomowej, z zastosowaniem spektrometru absorpcji atomowej ATI UNICAM 929.

Uzyskane wyniki analizy (w $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ mokrej masy) poddano jednoczynnikowej analizie wariancji oraz zbadano istotność różnic pomiędzy koncentracją metali w tkankach przy pomocy testu t-Studenta. Obliczono współczynniki korelacji Spearmana, określające zależność stężenia metali w tkankach do wieku ryb i do sezonu, przy wykorzystaniu Pakietu Statistica.

3. WYNIKI I DYSKUSJA

Metale ciężkie nie ulegają rozkładowi, ale są asymilowane, magazynowane i wbudowywane w wodzie, osadach dennych zbiorników oraz w organizmach żywych tam bytujących [Malik i in. 2010]. Bioakumulacja metali w tkankach zwierząt jest zależna od czasu ekspozycji i ich koncentracji w środowisku [Canli i Furness 1993, Allen 1995, Al.-Nagaany 2008] jak również innych czynników, takich jak: zasolenie, temperatura, aktywność metaboliczna tkanki, dawki poboru oraz bioakumulacji i eliminacji [Heath 1987, Langston 1990, Roesijadi i Robinson 1994] i następuje, gdy dawka pobierana przez organizm przekracza dawkę eliminacji [Spacie i Hamelink 1985]. Ryby są zdolne regulować koncentrację metali w tkankach już po wystąpieniu bioakumulacji [Heath 1991]. Obserwowany w niniejszych badaniach profil koncentracji metali przedstawiał się następująco: dla mięśni, gruczołu trzustkowo-wątrobowego i nerki – $Zn > Cu > Pb > Cd$, dla skrzel natomiast – $Zn > Pb > Cu > Cd$.



Rys. 1. Porównanie koncentracji Cu, Zn, Pb i Cd w mięśniach, skrzelach, gruczole trzustkowo-wątrobowym i nerce u narybku, kroczeni i karpia 2-letnich w dwóch okresach roku

Fig. 1. Cu, Zn, Pb i Cd concentration in muscle, gills, hepatopancreas and kidney in fry, 1-year old and 2-year-old carps in two year seasons

Cynk w najwyższych koncentracjach akumuluje się w nerce i skrzelach, gdzie osiąga wartości od $64 \pm 4,3$ mg·kg⁻¹ w skrzelach narybku do $234 \pm 13,1$ mg·kg⁻¹ w nerce kroczków w okresie jesiennym (rys. 1). Obserwuje się istotną korelację bioakumulacji cynku do sezonu dla skrzel 0,39 ($p < 0,01$), gruczołu trzustkowo-wątrobowego 0,65 ($p < 0,0001$) i nerki 0,71

($p < 0,0001$). Koncentracja Zn w skrzelach jest dodatnio skorelowana z wiekiem badanych karp 0,45 ($p < 0,001$), podczas gdy dla gruczolu trzustkowo-wątrobowego i nerki obliczono ujemne współczynniki korelacji, odpowiednio: -0,32 ($p < 0,05$) i -0,38 ($p < 0,005$). Najniższe poziomy Zn odnotowano w tkance mięśniowej od $10 \pm 1,00$ do $17 \pm 2,2$ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, gdzie nie wykazano żadnych korelacji ani w odniesieniu do wieku, ani sezonu. Podobne poziomy Zn w mięśniach odnotowali Polechoński i Dobicki [2001] w mięśniach leszczy.

Miedź należy do pierwiastków śladowych z tendencją do wyższego stopnia akumulacji niż inne, takie jak Zn czy Fe [Heath 1987, Roesijadi i Robinson 1994]. Najwyższe koncentracje miedzi odnotowano w gruczole trzustkowo-wątrobowym badanych ryb (rys. 1), co potwierdza wyniki obserwacji innych autorów [Dobicki i Polechoński 2003, Brucka-Jastrzębska i Protasowicki 2006]. Wśród roczników najwyższy poziom Cu w gruczole trzustkowo-wątrobowym wykazano u kroczków w okresie jesiennym, kiedy wynosił średnio $7,52 \pm 3,39$ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ i był statystycznie istotnie wyższy ($p < 0,01$) niż u pozostałych grup wiekowych. Odmienne wnioski przedstawili Dobicki i Polechoński [2003], którzy obserwowali wzrost koncentracji Cu w wątrobie z wiekiem ryb, zbieżne natomiast zaprezentowała Szulkowska-Wojaczek i in. [1992], która odnotowała wyższe poziomy miedzi w tkankach ryb młodych, co może być skutkiem ich zwiększonego metabolizmu w tym okresie [Dobicki i Polechoński 2003]. Gruczoł trzustkowo-wątrobowy odgrywa istotną rolę w metabolizmie miedzi, a ze względu na swoją detoksykacyjną rolę w organizmie jest narządem szczególnie narażonym na bioakumulację substancji toksycznych dostających się do organizmu drogą pokarmową, dlatego zwykle wykazuje wyższe koncentracje metali ciężkich niż inne tkanki [Thomas i in. 1983, Allen 1994].

Skrzela i nerki są narządami, za pośrednictwem których zbędne substancje są usuwane z organizmu, dlatego, podobnie jak w wątrobie i tu istnieje wyższe ryzyko koncentracji metali. W obu tych tkankach obserwowano podobne poziomy miedzi u badanych karp. Najwyższe koncentracje Cu wykazano u kroczków, gdzie osiągnęły wartości statystycznie istotnie wyższe ($p < 0,01$) niż w pozostałych rocznikach. W okresie jesiennym koncentracje miedzi znajdowały się na poziomie $1,87 \pm 0,22$ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ w skrzelach i $1,27 \pm 0,07$ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ w nerce, a wiosną wzrastały odpowiednio do $2,11 \pm 0,1$ i $1,94 \pm 0,05$ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (rys. 1). Najmniejsza bioakumulacja miedzi następuje w mięśniach, gdzie u 6-miesięcznego narybku wynosi $0,36 \pm 0,03$ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, następnie rośnie, osiągając maksymalne poziomy u 24-miesięcznych kroczków wynoszące $1,85 \pm 0,2$ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, a później znów się zmniejsza do wartości $0,51 \pm 0,03$ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ u ryb 36-miesięcznych (rys. 1). Ujemną korelację do wieku ryb obserwowano w koncentracji Cu w nerce -0,47 ($p < 0,001$), gdzie u ryb 36-miesięcznych poziom tego metalu obniżył się niemal trzykrotnie w porównaniu do wartości wcześniejszych. W mięśniach i gruczole trzustkowo-wątrobowym natomiast wykazano istotną korelację ($p < 0,05$) akumulacji miedzi do sezonu, z wyższymi poziomami Cu w sezonie wiosennym. Średnia koncentracja miedzi w osadach dennych stawów karpowych w Mydlnikach wynosiła w roku 2005 od 1,22 do 1,47 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ s.m. (dane niepublikowane). W okresie lepszego natlenienia

dolnych warstw zbiorników wodnych, jakie ma miejsce podczas cyrkulacji wiosennej, uwalniają się zgromadzone w dnio zapasy miedzi [Xue i in. 1997], co może być przyczyną obserwowanych wyższych poziomów tego metalu w tkankach ryb w tym czasie.

Podczas gdy miedź i cynk należące do pierwiastków śladowych pełnią ważną rolę jako składniki enzymów, hormonów i biorą udział w różnych istotnych procesach fizjologicznych, zupełnie inaczej przedstawia się sytuacja jeżeli chodzi o ołów i kadm, które nie odgrywają żadnej funkcji życiowej, a bioakumulując się w organizmach żywych mają działanie toksyczne, teratogenne, mutagenne i negatywnie wpływające na różnorodne procesy.

Najwyższe stężenia ołowiu wykazano u krocza, a najniższe u ryb 2-letnich (rys. 1). W mięśniach narybku i ryb dwuletnich stężenie badanego metalu było porównywalne i niezależnie od sezonu wahało się od $0,15 \pm 0,04$ do $0,27 \pm 0,16$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, u krocza natomiast istotnie wyższe ($p < 0,05$) i wynosiło $0,43 \pm 0,09$ do $0,48 \pm 0,6$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, przekraczając wartości dopuszczalnego poziomu ołowiu w mięsie rybim, które według rozporządzenia Komisji (WE) z 2006 r. wynosi $0,3$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ świeżej tkanki [Rozporządzenie... 2006]. Z punktu widzenia konsumenta obserwowane zmniejszenie koncentracji ołowiu w mięśniach karpia 2-letnich jest korzystne, ponieważ wtedy dopiero ryby te przeznaczone są do spożycia. Podobne zmiany w bioakumulacji ołowiu w mięśniach ryb odnotowali Dobicki i Polechoński [2003], którzy stwierdzili ujemną korelację koncentracji ołowiu w tej tkance do wieku ryb. Według ich obserwacji stężenie tego metalu było najwyższe u ryb 1-letnich ($0,88$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ u leszcza oraz $1,07$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ u płoci), i obniżające się z wiekiem ($0,2$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ u 7-letnich leszczy i $0,09$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ u 8-letnich płoci). Także Łuczyńska i in. [2000] wykazała niższe stężenia ołowiu w mięśniach starszych ryb. Koncentracja Pb w skrzelach narybku i kroczków była porównywalna i bardzo duża (od $3,5 \pm 0,5$ do $4,8 \pm 0,4$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), podczas gdy u ryb 2-letnich istotnie niższa ($p < 0,0001$), osiągając średnie wartości $0,1 \pm 0,02$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ jesienią i $0,2 \pm 0,05$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ wiosną (rys. 1). Podobne koncentracje ołowiu w skrzelach prezentowali Szulkowska-Wojacek i in. [1992] u karpia ze stawów Polski południowo-zachodniej (od $1,39$ do $7,1$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), a także u innych gatunków jak tołpyga biała $2,5$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [Polechoński i Dobicki 2002], sandacz, okoń, leszcz i płoć z jeziora Wojnowskiego [Dobicki i Polechoński 2003]. Wysokie stężenie ołowiu w skrzelach wskazuje na pochodzenie tego metalu raczej z wody niż z pokarmu. Koncentracja ołowiu w wodzie Rudawy zasilającej stawy rybne Stacji Doświadczalnej była mała i w latach 2006 – 2007 wynosiła $< 0,005$ $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ (dane Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji ZUW – Rudawa). Nie odnotowano przekroczenia tego poziomu w żadnym miesiącu w roku, jednak pokłady ołowiu znajdujące się w osadach dennych stawów (w 2005 roku $42,1$ – $43,3$ mg $\text{Pb}\cdot\text{kg}^{-1}$ s.m. – dane niepublikowane) na skutek nieustannej penetracji dna przez ryby karpiołate uwalniają się, wzbogacając wodę. W związku z tym nawet przy niskich stężeniach metali ciężkich w wodzie obserwuje się ich akumulację w skrzelach. Największe koncentracje ołowiu w gruczole trzustkowo-wątrobowym obserwowano u narybku jesiennego ($1,8 \pm 0,4$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), istotnie mniejsze u karpia rok starszych ($0,9 \pm 0,15$ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) i jeszcze mniejsze ($p < 0,001$) u ryb 2-letnich

($0,3 \pm 0,06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Podobne zmiany obserwowano w próbach pobranych w okresie wiosennym, lecz tam nie wykazano różnic statystycznie istotnych pomiędzy poszczególnymi rocznikami. Odwrotną zależność do akumulacji Pb w tej tkance do wieku potwierdza ujemny współczynnik korelacji $-0,39$ ($p < 0,01$). Istotne różnice ($p < 0,01$) odnotowane w poziomie Pb pomiędzy sezonami u narybku i karpia 1-letnich mogą świadczyć o zależności bioakumulacji Pb w tej tkance od pory roku, co potwierdza współczynnik korelacji $0,3$ ($p < 0,05$). Odnotowana w niniejszych badaniach istotnie wyższa koncentracja Pb w skrzelach w stosunku do gruczolu trzustkowo-wątrobowego obserwowana także w badaniach innych autorów [Tulasi i in. 1992, Allen 1994, Roesijadi i Robinson 1994] może być skutkiem braku w tym gruczole białek wiążących ołów [Reichert i in. 1979, Roesijadi i Robinson 1994].

Nie zaobserwowano korelacji poziomu kadmu w tkankach karpia do sezonu, natomiast wystąpiły istotne współczynniki korelacji do wieku dla nerki $0,32$ ($p < 0,05$) i dla skrzeli $0,89$ ($p < 0,0001$). W skrzelach narybku koncentracja kadmu była niska od $0,05 \pm 0,02$ do $0,07 \pm 0,04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, podczas gdy u ryb 1-letnich wzrosła do wartości $0,21 \pm 0,03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, a u 2-letnich do $1,0 \pm 0,06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Różnice statystyczne poziomu Cd pomiędzy rocznikami były wysoce istotne ($p < 0,001$). U ryb 2-letnich właśnie w skrzelach odnotowano najwyższy poziom Cd, natomiast u 1-letnich w gruczole trzustkowo-wątrobowym, gdzie wyniósł $1,4 \pm 0,01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Jeszcze wiosną odnotowano wysoką koncentrację tego metalu – $1,3 \pm 0,01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, a u ryb 2-letnich koncentracja Cd zmniejszyła się od $0,04 \pm 0,01$ do $0,08 \pm 0,01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Podobne poziomy kadmu w gruczole trzustkowo-wątrobowym obserwowali Brucka-Jastrzębska i Protasowicki [2006] u 5-miesięcznego narybku karpia, podczas badań nad eliminacją tego metalu z organizmu ryb. Koncentracja kadmu w nerce wahała się od $0,02 \pm 0,001$ u narybku do $0,59 \pm 0,07 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ u krocza. W mięśniach natomiast od $0,005 \pm 0,001 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ u ryb 2-letnich do $0,05 \pm 0,01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ u 1-letnich kroczków. Nie stwierdzono przekroczenia dopuszczalnego poziomu kadmu w mięsie ryb, który wynosi $0,05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [Rozporządzenie... 2006].

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Profil koncentracji badanych metali ciężkich w tkankach karpia pochodzących ze stawów hodowlanych zasilanych wodą rzeki Rudawy jest następujący dla mięśni, gruczolu trzustkowo-wątrobowego i nerki $\text{Zn} > \text{Cu} > \text{Pb} > \text{Cd}$, natomiast dla skrzeli – $\text{Zn} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{Cd}$. W skrzelach badanych ryb obserwuje się dodatnie korelacje akumulacji Zn i Cd do wieku ryb oraz korelację ujemną dla Pb, a także istotną zależność bioakumulacji Zn od sezonu.

W gruczole trzustkowo-wątrobowym występuje ujemna korelacja koncentracji Zn i Pb do wieku ryb i istotna zależność akumulacji Zn, Cu i Pb od sezonu. W nerce akumulacja Cu i Zn jest negatywnie skorelowana z wiekiem ryb, podczas gdy dla Cd odnotowano korelację dodatnią, a dla Zn i Pb istotną zależność bioakumulacji od sezonu. W tkance mięsniowej zaobserwowano zależność koncentracji Cu od sezonu i brak korelacji akumulacji metali do wieku ryb.

PIŚMIENNICTWO

- AGAH H., LEERMAKERS M., ELSKENS M., FATEMI SMR, BAEYENS W. 2009. Accumulation of trace metals in the muscle and liver tissues of five fish species from the Persian Gulf. *Environ. Mon. Assess.* 157: 499–514.
- AL.-NAGAAWY A.M. 2008. Accumulation and elimination of copper and lead from *O. niloticus* fingerlings and consequent influence on their tissue residues and some biochemical parameters. 8 International Symposium on Tilapia in Aquaculture 2008. Materiały konferencyjne (<http://ag.arizona.edu/azaqua/ista/ISTA8/ProceedingsISTA8.htm>).
- ALLEN P. 1994. Accumulation profiles of lead and the influence of cadmium and mercury in *Oreochromis aureus* (Steindachner) during chronic exposure. *Toxicol. Environ. Chem.* 44: 101–112.
- ALLEN P. 1995. Chronic accumulation of cadmium in the edible tissues of *Oreochromis aureus* (Steindachner): Modification by mercury and lead. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 29: 8–14.
- BLASCO J., RUBIO JA., FORJA J., GOMEZ-PARRA A., ESTABLIER R. 1998. Heavy metals in some fishes of the mugilidae family from salt-pounds of Codiz Bay SW Spain. *Ecotox. Environ. Res.* 1: 71–77.
- BRUCKA-JASTRZEBSKA E., PROTASOWICKI M. 2006. Changes of cadmium content in various organs of common carp (*Cyprinus carpio* L.) during the fast growth period following initial rearing in contaminated water. *Arch. Pol. Fish.* 14(2): 183–194.
- CANLI M., FURNESS R.W. 1993. Toxicity of heavy metals dissolved in sea water and influences of sex and size on metal accumulation and tissue distribution in the Norway lobster *Nephrops norvegicus*. *Mar. Environ. Res.* 36: 217–236.
- DOBICKI W., POLECHOŃSKI R. 2003. Relationship between age and heavy metal bioaccumulation by tissues of four species inhabiting Wojnowskie Lakes. *Acta Scient. Pol. Piscaria* 2(1): 27–44.
- FARKAS A., SALANKI J., SPECZIAR A. 2002. Relation between growth and the heavy metal concentration in organs of bream *Abramis brama* L. populating lake Balaton. *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 43(2): 236–243.
- HEATH A.G. 1987. *Water Pollution and Fish Physiology*. CRC Press, Florida, USA.
- HEATH A.G. 1991. Effect of water-borne copper on physiological responses of bluegill (*Lepomis macrochirus*) to acute hypoxic stress and subsequent recovery. *Comp. Biochem. Physiol.* 100(C): 559–564.
- LANGSTON W.J. 1990. Toxic effects of metals and the incidence of marine ecosystems. W: heavy metals in the marine environment (Red: Furness R.W., Rainbow P.S.), CRC Press, Nowy Jork.
- ŁUCZYŃSKA J., JAWORSKI J., MARKIEWICZ K. 2000. Wybrane metale w tkance mięśniowej ryb z Jeziora Łąńskiego. *Kom. Ryb.* 3: 22–24.

- MALIK N., BISWAS A.K., QURESHI T.A., BORANA K., VIRHA R. 2010. Bioaccumulation of heavy metals in fish tissues of a freshwater lake of Bhopal. *Environ. Monit. Assess.* 160: 267–276.
- Ocena jakości wód powierzchniowych w województwie małopolskim w roku 2006.** 2007. Raport WIOŚ. Kraków; http://www.krakow.pios.gov.pl/publikacje/2007/wody_ocena_2006.pdf.
- Ocena jakości wód powierzchniowych w województwie małopolskim w roku 2007.** 2008. Raport WIOŚ. Kraków; http://www.krakow.pios.gov.pl/publikacje/2008/wody_ocena_2007.pdf.
- OLAIFA F.G., OLAIFA A.K., ONWUDE T.E. 2004. Lethal and sublethal effects of copper to the African Cat fish (*Clarias gariepinus*). *Afr. J. Biomed. Res.* 7: 65–70.
- POLECHOŃSKI R., DOBICKI W. 2001. Accumulation of heavy metals (Pb, Hg, Dc, Cr, Ni, Cu, Zn) in fish tissues of predominant species in ichtiofauna from Wojnowskie Lakes. *Pol. J. Env. Stud.* 11(1): 5–9.
- POLECHOŃSKI R., DOBICKI W. 2002. Lead in chosen elements of the Lake Sława ecosystem. *Limnolog. Rev.* 2: 313–321.
- REICHERT W.L., FEDERIGHI D.A., MALINS D.C. 1979. Uptake and metabolism of lead and cadmium in coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). *Comp. Biochem. Physiol.* 63C: 229–234.
- ROESIJADI G., ROBINSON W.E. 1994. Metal regulation in aquatic animals: Mechanism of uptake, accumulation and release. W: *Aquatic Toxicology; Molecular, Biochemical and cellular Perspectives* (Red: Malins D.C., Ostrander G.K.) Lewis Publishers, Londyn.
- Rozporządzenie Komisji (WE) nr 1881/2006 z dnia 19 grudnia 2006 r. ustalające najwyższe poziomy niektórych zanieczyszczeń w środkach spożywczych** (Dz. Urz. UE, L 364): 5–20.
- SPACIE A., HAMELINK J.L. 1985. Bioaccumulation. W: *Fundamental in Aquatic Toxicology: Methods and application of hemisphere.* (Red: Rand G.M., Petrocelli S.R.). Waszyngton.
- SZULKOWSKA-WOJACZEK E., MAREK J., DOBICKI W., POLECHOŃSKI R. 1992. Heavy metals in the pond environment. *Zesz. Nauk. AR. Wroc. Zoot.* 37: 7–25.
- THOMAS D.G., CRYER A., SOLBE F.D., KAY J. 1983. A comparison of the accumulation and protein binding of environmental cadmium in the gills, kidney and liver of rainbow trout (*Salmo gairdneri* Richardson). *Comp. Biochem. Physiol.* 76C: 241–246.
- TULASI S.J., REDDY P.U., RAMANA RAO J.V. 1992. Accumulation of lead and effects on total lipid derivatives in the freshwater fish *Anabas testudineus* (Bloch). *Ecotox. Environ. Safe.* 23: 33–38.
- XUE H., GACHTER R., SIGG L. 1997. Comparison of Cu and Zn cycling in eutrophic lakes with oxic and anoxic hypolimnion. *Aquat. Sci.* 59: 176–189.