



STĘŻENIA WYBRANYCH METALI CIĘŻKICH W OSADACH DENNYCH CIEKU WODNEGO

Kamil Szydłowski, Joanna Podlasińska
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

CONCENTRATION OF CHOSEN TRACE ELEMENTS IN BOTTOM DEPOSITS OF WATERCOURSE

Streszczenie

Badania prowadzono na odcinku cieką wodnego zlokalizowanym we wsi Mostkowo. Ciek ten częściowo płynie rurą w ziemi. Badaniu poddano część nieskanalizowaną o długości 1022 m, na której wydzielono trzy punkty pomiarowe. Osady denne analizowano pod kątem zawartości wybranych metali ciężkich, tj.: Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn. Wykorzystując maksymalne wartości stężeń metali ciężkich w analizowanych próbach przeprowadzono ocenę zanieczyszczenia osadów z cieką wodnego. Celem pracy była ocena stopnia zanieczyszczenia wraz z wskazaniem na możliwość ich zagospodarowania. Uzyskane wyniki analiz chemicznych pozwoliły na stwierdzenie, że najwyższe stężenia badanych metali ciężkich wystąpiły w próbach pobranych z punktu zlokalizowanego w pobliżu zabudowy gospodarczej, ogródków działkowych oraz w pobliżu centrali nasiennej (P-1) w warstwach osadów 5-10 i 20-30 cm. Wyniki wskazują, że w badanych osadach występował różny stopień akumulacji metali ciężkich zależny od miejsca poboru prób. Wskazują na to zróżnicowane szeregi zawartości metali ciężkich w osadach. Dla punktu P-1 szereg ten ma postać; Zn>Pb>Cu>Cr>Ni>Co>Cd, dla punktu P-2; Zn>Cu>Cr>Ni>Pb>Co>Cd oraz dla punktu P-3 szereg ten wygląda następująco; Zn>Cu>Cr>Pb>Ni>Co>Cd. Osady denne klasyfikowane

były do pierwszej i drugiej klasy jakości osadów wodnych dlatego mogą być dowolnie zagospodarowane w środowisku wodnym i lądowym.

Słowa kluczowe: osady denne, ciek wodny, metale ciężkie, materia organiczna

Abstract

The research was carried out on the section of the watercourse located in the village Mostowo. Watercourse flows through the pipe at a certain distance. The study was carried out on the uncanalized part with length of 1022 m. At this section the three measuring points were established. Bottom sediments were analyzed for the contents of selected heavy metals, such as: Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn. Using the maximum concentrations of heavy metals in the analyzed sediment samples the evaluation of watercourse sediment contamination was done. The aim of the study was the assessment of sediments contamination and indication on possibilities of their utilization. The obtained results indicate that the highest concentrations of heavy metals in the sediments were in samples taken from a point located near the business buildings, allotments and near the seed headquarters (P-1) in a layers 5-10 and 20-30 cm. The results indicate that the studied sediments differently accumulated the heavy metals depending on the location of sampling points. That accumulation can be expressed by different series of heavy metals concentration in the sediment. For the point P 1 it takes the following form: Zn> Pb> Cu> Cr> Ni> Co> Cd, for the point P-2: Zn> Cu> Cr> Ni> Pb> Co> Cd and for the point P-3 the series is as follows: Zn> Cu> Cr> Pb> Ni> Co> Cd. Bottom sediments can be classified into first and second water quality class. They can be freely utilized in aquatic and terrestrial environments.

Key words: sediments, watercourse, heavy metals, organic matter

WSTĘP

Ważnym elementem każdego ekosystemu wodnego są osady denne, ponieważ ich skład chemiczny wskazuje na stan zanieczyszczenia środowiska. Analiza chemiczna osadów jest wskazówką dotyczącą wpływu antropopresji w danym rejonie (Kazimierowicz i Kazimierowicz 2014). Metale ciężkie obecne w osadach przenikają do wód wraz ze spływem powierzchniowym z pól oraz ze ściekami przemysłowymi i bytowymi. Znajomość składu chemicznego osadów pozwala na wnioskowanie o źródłach prędkości oraz drogach dystrybucji metali w zbiorniku i jest lepszym wskaźnikiem od bardziej zmiennego składu chemicznego wód powierzchniowych. Metale ciężkie, do których zaliczamy ołów, rtęć,

chrom, cynk i kadm, są jednym z głównych czynników zanieczyszczających osady denne. Metale te uważane są za najbardziej toksyczne (Sidoruk i Potasznik 2013; Kazimierowicz i Kazimierowicz 2014).

Celem podjętych badań była ocena stopnia zanieczyszczenia badanego ciekłu oraz wskazanie na możliwość ich zagospodarowania.

METODYKA BADAŃ

Do badań wytypowano ciek wodny łączący dwa małe zbiorniki wodne zlokalizowane we wsi Mostkowo (województwo zachodniopomorskie). Ciek ten częściowo płynie rurą umieszczoną w ziemi. Badaniu poddano część otwartą o długości 1022 m, na której wydzielono trzy punkty pomiarowe (ryc. 1) w zależności od sposobu zagospodarowania przylegającego do niego terenu. Pierwszy punkt (P-1) ($52^{\circ}59'19.63''N$ $15^{\circ}3'44.89''E$) zlokalizowany jest w pobliżu zabudowy gospodarczej, ogródków działkowych oraz w pobliżu centrali nasiennej (punkt skupu i przechowywania zbóż). Punkt P-2 ($52^{\circ}59'28.26''N$ $15^{\circ}3'44.48''E$) zlokalizowano w obrębie nieużytków rolnych oraz pól uprawnych. Natomiast punkt trzeci (P-3) zlokalizowany jest w bezpośrednim otoczeniu parku wiejskiego oraz zabudowy po byłym Państwowym Gospodarstwie Rolnym ($52^{\circ}59'37.54''N$ $15^{\circ}3'30.27''E$). Próby osadów pobierano próbnikiem rdzeniowym do osadów dennych KC Denmark typu kajak. Łącznie pobrano 12 prób osadów dennych. Próby pobierano z warstw 0-5 cm, 5-10 cm, 10-20 cm, 20-30 cm. Pobrane osady przygotowano zgodnie z procedurami stosowanymi w gleboznawstwie. Zawartość pierwiastków tj.: Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn oznaczono spektrometrem absorpcji atomowej ASA ICE 3000 Thermo Scientific po uprzedniej mineralizacji w mieszaninie (5:1) stężonych kwasów HNO_3 (65%) i $HClO_4$ (60%). Uzyskane wyniki opracowano statystycznie z wykorzystaniem oprogramowania Statistica 12.0. Dla uzyskanych wyników zastosowano test normalności Shapiro-Wilka ($p \leq 0,05$), który potwierdził normalność rozkładów wyników. Dla określenia istotnych różnic między badanymi punktami pomiarowymi wykonano analizę testem Tukey'a oraz wyliczono współczynnik korelacji liniowej Pearsona. Wszystkie wartości NIR oraz R istotne na poziomie istotności $p \leq 0,05$ wyrażono bezpośrednio w tekście.

Zanieczyszczenie osadów z małych zbiorników wodnych oceniono, używając maksymalnych stwierdzonych wartości stężeń metali, następującymi metodami:

- klasyfikacja jakości osadów wodnych stosowaną przez Państwowy Instytut Geologiczny (Bojakowska i Sokołowska 1998),
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z 16.04.2002 roku w sprawie rodzajów oraz stężeń substancji, które powodują, że urobek jest zanieczyszczony,
- index – Em geokumulacji (Igeo) (Müller 1981).



Rysunek 1. Lokalizacja punktów badawczych (P1-P3)

Figure 1. Location of sampling points (P1-P3)

Wyżej wymienione metody oceny stopnia zanieczyszczenia osadów dennych różnią się liczbą stopni, klas, a także czynnikami wpływającymi na wartości progowe wymienionych klas.

Tabela 1. Podstawowe właściwości chemiczne próbek osadów badanego cieku wodnego

Table 1. Basic chemical properties of tested watercourse sediment samples

Punkt poboru Sampling point	Warstwa Layer [cm]	pH 1M KCL	pH H ₂ O	C:N	C _{org.} Organic carbon [%]	Zawartość substancji organicznej Organic matter content [%]
P-1	0-5	6,45	6,23	15,04	5,71	11,30
	5-10	6,55	6,83	14,43	6,41	13,56
	10-20	6,72	6,92	14,13	5,50	12,33
	20-30	6,72	6,94	14,16	7,34	15,07
Średnia art. arithmetic average		6,61	6,73	14,44	6,24	13,06
P-2	0-5	6,32	6,72	12,41	2,67	6,05
	5-10	6,18	6,63	12,04	1,89	5,35
	10-20	6,26	6,90	9,75	0,49	2,99
	20-30	6,20	7,33	8,30	0,30	2,77
Średnia art. arithmetic average		6,24	6,90	10,63	1,34	4,29
P-3	0-5	7,10	7,27	13,00	1,85	4,83
	5-10	7,07	7,19	13,04	2,15	5,74
	10-20	7,06	7,21	12,48	1,85	4,52
	20 – 30	7,14	7,13	13,00	1,49	4,88
Średnia art. arithmetic average		7,09	7,20	12,88	1,84	4,99

WYNIKI I DYSKUSJA

Osady dennie badanego cieku wodnego (tab. 1) charakteryzowały się lekko kwaśnym i obojętnym odczynem (pH od 6,24 do 7,09 w 1 M KCL, a w H₂O od 6,90 do 7,20). Wartość stosunku węgla do azotu jest zależna od składu chemicznego materiału organicznego jaki jest deponowany w osadach dennych. Niższe wartości występują w przypadku materii organicznej bogatej w białka (wartość

stosunku od 4 do 10), natomiast wyższe wartości stosunku C:N (powyżej 20) charakteryzują materię organiczną, której źródłem są makrofity i rośliny wyższe (Daniszewski 2012). Uzyskane wyniki wykazały, iż badane osady charakteryzują się małym zróżnicowaniem jeśli chodzi o wartość stosunku węgla organicznego i azotu ogólnego (C:N) w poszczególnych punktach pomiarowych. Jest to widoczne w obliczonych wartościach stosunku C:N (tab. 1). Średnia wartość C:N wahała się w przedziale od 10,63 do 14,44. Zachodzące w osadzie dennym przemiany chemiczne powodują znacznie większe straty węgla organicznego niż azotu organicznego (Januszkiewicz 1978). A więc na podstawie stosunku C:N można określić prawdopodobne tempo mineralizacji osadów zdeponowanych w zbiornikach i ciekach wodnych. Mniejsze stosunki C:N świadczą o większej mineralizacji materii organicznej. Czyli im stosunek jest mniejszy, tym stopień mineralizacji jest wyższy (Trojanowski i Antonowicz 2005). Wyższe stosunki C:N wystąpiły w punkcie badawczym P-1, gdzie prawdopodobnie stopień mineralizacji osadu jest najmniejszy. Potwierdza to również zawartość materii organicznej, której najwięcej było w punkcie badawczym P-1. Osady z punktu P-2 oraz P-3 charakteryzują się mniejszymi ilościami materii organicznej, niż w punkcie P-1. Osady z punktów P-2 i P-3 są mineralne, natomiast z punktu P-1 mineralne z domieszką materii organicznej (mineralno – organiczne). Obecnie przy ocenie jakości osadów zwraca się szczególną uwagę na zawartość w nich metali ciężkich (Linczar i in. 2005). Uzyskane wyniki wykazują, że stwierdzone stężenia metali ciężkich w badanych osadach przekraczają zawartości naturalne dla osadów wodnych. Uzyskane badania pozwoliły na stwierdzenie, że najwyższe stężenia badanych pierwiastków śladowych wystąpiły w próbach pobranych z punktu P-1 w warstwie osadów 5-10 i 20-30 cm (tab. 2). Najwyższe stężenia cynku odnotowane w punkcie P-1 ($438,84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) było dziewięć- i dziesięciokrotnie wyższe niż w punktach P-2 i P-3. Najwyższa zawartość kadmu – $1,39 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, była nieznacznie wyższa od najwyższego stężenia kadmu ($1,3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) w osadach rzek zlewni Biebrzy (Kazimierowicz i Kazimierowicz 2014). Stężenia kadmu w punktach P-2 i P-3 wahały się w zakresach podobnych do zawartości tego pierwiastka w osadach rzek Puszczy Knyszyńskiej (Skorbiłowicz 2003), rzeki Bug (Skorbiłowicz 2014) oraz zbiornika wodnego Besko na rzece Wisłok (Madeyski i Tarnawski 2007). Na podstawie podanej przez Bojakowską i Sokołowską (1998) wartości tła geochemicznego dla osadów wodnych ($< 0,5 \text{ mg Cd}\cdot\text{kg}^{-1}$) można zauważyć, że tylko w punkcie P-1 wystąpiły przekroczenia wartości naturalnych. Można tłumaczyć to tym, że głównym źródłem kadmu są spływy powierzchniowe, stosowanie środków ochrony roślin zawierających kadm oraz wykorzystanie odpadów organicznych do nawożenia gleb (Kazimierowicz i Kazimierowicz 2014). Osady cieku wodnego można uznać za słabo zanieczyszczone tym metalem (klasa II) w punkcie P-1 oraz osady niezanieczyszczone (klasa I) w punktach P-2 i P-3 (tab. 2). Zawartość kobaltu

we wszystkich pobranych próbach przekraczała wartość naturalną, wynoszącą $2,0 \text{ mg Co} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Bojakowska i Sokołowska 1998). Najwyższe stężenia kobaltu wystąpiło w punkcie P-1. Stężenia kobaltu w badanych osadach wahały się w zakresach zbliżonych do zawartości tego pierwiastka w osadach rzek zlewni Biebrzy (Kazimierowicz i Kazimierowicz 2014) oraz Bugu, gdzie zawartość kobaltu wyniosła od $3,1$ do $6,2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Skorbiłowicz 2014). Osady pod względem zawartości kobaltu klasyfikowane są jako niezanieczyszczone (I klasa) we wszystkich punktach badawczych. Zawartość chromu we wszystkich punktach przekroczyła również wartość tła geochemicznego wynoszącą $5 \text{ mg Cr} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Bojakowska i Sokołowski 1998). Osady z punktów P-2 i P-3 klasyfikowane były jako niezanieczyszczone, natomiast osady z punktu P-1 należy sklasyfikować jako osady miernie zanieczyszczone (II klasa). Osady w punkcie P-1 charakteryzowały się porównywalnymi stężeniami chromu do zawartości tego pierwiastka w osadach z punktów badawczych Mielnica ($7,5$ - $24,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) badanych przez Licznara i in. (2005). Podane średnie zawartości chromu w osadach dla Europy wnoszą $64,0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Kabata-Pendias i in. 1999), i są znacząco wyższe niż uzyskane w badaniach własnych. Niższe wartości stężeń chromu ($2,75$ - $8,75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) uzyskał Nocoń (2006) dla osadów rzeki Kłodnica. Według klasyfikacji Bojakowskiej (2001) wszystkie badane próby osadów w punkcie P-1 zaklasyfikować można jako osady słabo zanieczyszczone (II klasa), natomiast z punktów P-2 i P-3 klasyfikowane są jak osady niezanieczyszczone miedzią. Tło geochemiczne ($6 \text{ mg Cu} \cdot \text{kg}^{-1}$) zostało przekroczone we wszystkich punktach pomiarowych. Przyczyną podwyższonych stężeń mogą być spływy powierzchniowe z przyległych terenów. Zawartość miedzi w osadach z punktów P-1 i P-2 jest znacznie wyższa niż w osadach rzek zlewni Biebrzy, gdzie wartości te mieściły się w zakresie $0,5$ - $8,8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Kazimierowicz i Kazimierowicz 2014) oraz w zakresie $8,5$ - $17,5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ w osadach cieką Mielnica (Linczar i in. 2005). Wartości te są znacząco niższe niż stężenia miedzi w osadach z rzeki Bytomka (40 - $130 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) podawanych przez Noconia (2009). Najwyższe stężenie miedzi w osadach rzeki Kłodnicy wynoszące $36,3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (Nocoń 2006), było zbliżone do najwyższego stwierdzonego w badaniach własnych stężenia miedzi w osadach z punktu P-1 ($41,21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) (tab. 2). Osady badanego cieką z punktów P-1 i P-2 posiadały wyższe zawartości niklu, niż z rzek zlewni Biebrzy ($0,6$ - $22,9 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, średnia $6,33 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) (Kazimierowicz i Kazimierowicz 2014). Porównywalne do stwierdzonych w badaniach własnych zawartości niklu podają Linczar i in. (2005) dla cieką Mielnica ($7,5$ - $16,8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). Biorąc pod uwagę zawartość niklu osady klasyfikowane są jako osady niezanieczyszczone. We wszystkich badanych punktach zostało przekroczone podane przez Bojakowską i Sokołowską (1998) tło geochemiczne dla niklu, które wynosi $5 \text{ mg Ni} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Tabela 2. Zawartość metali ciężkich w badanych osadach dennych [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] oraz klasyfikacja osadów dennych**Table 2.** The heavy metal content [$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$] in the analyzed bottom sediments and bottom sediments classification

Punkty Points	Warstwa Layer [cm]	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
P-1	0-5	0,99 (I)	4,86 (I)	21,96 (II)	33,16 (II)	18,98 (I)	44,93 (I)	311,41 (II)
	5-10	1,39 (II)	6,44 (I)	30,96 (II)	41,21 (II)	21,5 (I)	71,47 (II)	438,84 (II)
	10-20	1,11 (II)	5,83 (I)	26,61 (II)	35,48 (II)	18,54 (I)	61,97 (II)	306,61 (II)
	20-30	1,09 (II)	6,21 (I)	33,59 (II)	40,12 (II)	22,42 (I)	58,23 (II)	319,05 (II)
Średnia art. arithmetic average		1,14 (II)	5,84 (I)	28,28 (II)	37,49 (II)	20,36 (I)	59,15 (II)	343,98 (II)
P-2	0-5	0,23 (I)	3,41 (I)	15,05 (I)	23,2 (II)	11,73 (I)	19,65 (I)	67,21 (I)
	5-10	0,24 (I)	3,41 (I)	13,21 (I)	28,61 (II)	11,64 (I)	16,08 (I)	47,27 (I)
	10-20	0,13 (I)	5,06 (I)	16,63 (I)	13,63 (I)	15,55 (I)	5,06 (I)	33,8 (I)
	20-30	0,01 (I)	5,13 (I)	12,41 (I)	10,07 (I)	13,4 (I)	0,005 (I)	27,3 (I)
Średnia art. arithmetic average		0,15 (I)	4,25 (I)	14,33 (I)	18,88 (I)	13,08 (I)	10,2 (I)	43,89 (I)
P-3	0-5	0,28 (I)	2,51 (I)	9,04 (I)	9,75 (I)	7,42 (I)	9,66 (I)	49,48 (I)
	5-10	0,24 (I)	2,59 (I)	9,15 (I)	9,78 (I)	7,14 (I)	10,93 (I)	59,01 (I)
	10-20	0,22 (I)	2,48 (I)	8,9 (I)	8,9 (I)	7,31 (I)	8,68 (I)	46,32 (I)
	20-30	0,21 (I)	2,98 (I)	9,34 (I)	8,14 (I)	8,36 (I)	5,65 (I)	41,47 (I)
Średnia art. arithmetic average		0,24 (I)	2,64 (I)	9,11 (I)	9,14 (I)	7,56 (I)	8,73 (I)	49,07 (I)

źródło: Bojakowska i Sokołowska (1998) – klasyfikacja osadów dennych

Zawartość ołowiu była bardzo zmienna i wahała się w szerokim zakresie od 0,005 do 71,47 mg · kg⁻¹ (tab. 2). Najniższe stężenia Pb stwierdzono w najgłębszej warstwie osadów 20-30 cm (P-2). Najwyższe stężenia odnotowano w warstwie przypowierzchniowej 5-10 cm w punkcie P-1. Porównywalne zawartości ołowiu jak w punkcie P-1, występowały w osadach jeziora Sunia (10,5-54,0 mg · kg⁻¹) badanym przez Sidoruk i Potasznik (2013). Tło geochemiczne zawartości ołowiu dla osadów wodnych wynosi 10 mg Pb · kg⁻¹. Stężenia ołowiu w punktach P-1 i P-2 były wyższe od zawartości naturalnej. Na podwyższone zawartości ołowiu w badanych osadach może mieć wpływ stosowanie nawozów mineralnych i organicznych na przyległych ogródkach działkowych, jak i stosowanie paliw do napędzania maszyn na terenie centrali nasiennej. Osady pod względem zawartości ołowiu klasyfikowane są jako osady niezanieczyszczone (I klasa) w punktach P-2 i P-3, natomiast w punkcie P-1 osady te klasyfikowane są do osadów miernie zanieczyszczonych (II klasa). Największe koncentracje cynku wystąpiły w punkcie P-1. Najwyższe stężenie cynku wynoszące 438,84 mg · kg⁻¹ było dziewięciokrotnie wyższe, niż wartość tła geochemicznego (48 mg Zn · kg⁻¹) podaną przez Bojakowską i Sokołowską (1998). Za tak wysokie stężenia cynku odpowiedzialne mogą być niedostatecznie oczyszczone ścieki z nieskanalizowanych terenów powstających w wyniku działalności bytowo gospodarczej człowieka na obszarze zlewni (Haziak i in. 2013). Porównując podaną przez Lisa i in. (1995) średnią zawartość cynku w osadach dennych w Polsce wynoszącą 73 mg · kg⁻¹, można stwierdzić, że stężenia cynku w punktach P-2 i P-3 są znacznie mniejsze, niż podana średnia dla Polski, zaś w punkcie P-1 zawartości cynku w osadach są znacząco większe. Porównywalne zawartości cynku w osadach z badanych punktów P-2 i P-3 występowały w osadach jeziora Sunia (46,9-100,6 mg · kg⁻¹) badanych przez Sidoruk i Potasznik (2013). Osady w punktach P-1 i P-2 klasyfikowane są jak osady słabo zanieczyszczone (II klasa), natomiast osady w punkcie P-3 klasyfikowane są do grupy osadów niezanieczyszczonych (I klasa). Z wytycznych podawanych we wszystkich zastosowanych w niniejszej pracy metodach najmniej restrykcyjne oceny jakość osadów występują w Rozporządzeniu Ministra Środowiska (Dz.U. Nr 55 poz.498). Według w/w rozporządzenia stężenia analizowanych metali śladowych były niższe od wartości granicznych dla osadów zanieczyszczonych.

Według klasyfikacji Igeo analizowane osady mieszczą się pomiędzy klasą 0 – praktycznie nie zanieczyszczoną, a ekstremalnie zanieczyszczoną. We wszystkich punktach najniższe wartości Igeo charakteryzują kadm (praktycznie nie zanieczyszczone). Natomiast pod względem zawartości pozostałych metali ciężkich w badanych próbkach osadów dennych, osady te należy zakwalifikować od umiarkowanie mocno zanieczyszczonych do ekstremalnie zanieczyszczonych (tab. 3, 4).

W celu określenia, czy miejsce pobrania próbek wpływa na zawartość metali ciężkich w osadach wyliczono średnie zawartości metali ciężkich w ca-

łym badanym profilu (w warstwie 0-30 cm) dla wszystkich punktów badawczych (tab. 2). Wyniki wskazują, że w badanych osadach występował różny stopień akumulacji metali ciężkich zależy od miejsca poboru prób. Potwierdzeniem tego są zróżnicowane szeregi zawartości metali ciężkich w osadach, które mają następującą postać: dla punktu P-1 $Zn > Pb > Cu > Cr > Ni > Co > Cd$, P-2; $Zn > Cu > Cr > Ni > Pb > Co > Cd$, oraz dla punktu P-3 szereg wygląda następująco: $Zn > Cu > Cr > Pb > Ni > Co > Cd$.

Tabela 3. Klasyfikacja osadów dennych według indeksu geoakumulacji
Table 3. Bottom sediments classification according to the geoaccumulation index

Klasa Class	Jakość osadów dennych Quality of bottom sediments
0	praktycznie nie zanieczyszczony
1	słabo zanieczyszczony
2	średnio zanieczyszczony
3	umiarkowanie mocno zanieczyszczony
4	silnie zanieczyszczony
5	umiarkowanie ekstremalnie zanieczyszczony
6	ekstremalnie zanieczyszczony

*źródło: Müller (1981)

Tabela 4. Klasy zanieczyszczenia osadów dennych według indeksu geoakumulacji
Table 4. Classes of bottom sediments pollution according to the geoaccumulation index

Punkty Points	Cd	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
P-1	0	3	6	6	6	6	6
P-2	0	4	6	6	6	6	6
P-3	0	2	5	6	5	6	6

*źródło: Müller (1981)

Obliczony współczynnik korelacji liniowej Pearsona ($p \leq 0,05$), wykazał dla osadów z punktu P-2 (tab. 5) wysoce istotnie statystyczną dodatnią korelację (0,956) pomiędzy zawartością kadmu i ołowiu oraz wysoce istotnie statystycznie ujemną korelację (-0,956) między zawartością kobaltu i miedzi oraz pomiędzy zawartością kobaltu i ołowiu (-0,968). W osadach z punktu P-3 stwierdzono występowanie wysoce istotnie statystycznie dodatniej korelacji (0,958) pomiędzy zawartością miedzi i ołowiu. Analiza statystyczna wykazała statystycznie istotne różnice (test Tukeya $p \leq 0,05$) dla stężeń poszczególnych metali, pomiędzy ba-

danymi miejscami poboru osadów (tab. 5). Wszystkie stężenia metali ciężkich w osadach z punktu P-1 różniły się istotnie statystycznie od zawartości tych metali w pozostałych dwóch punktach.

Tabela 5. Istotność zróżnicowania wyników stężeń metali ciężkich w osadach cieku pomiędzy badanymi punktami poboru

Table 5. The significance of variation of the heavy metals concentrations in the bottom sediments of the watercourse between sampling points

Metale ciężkie Heavy metals	Punkty badawcze Sampling points		
	P-1	P-2	P-3
Cd	*	n.i.	n.i.
Co	*	*	*
Cr	*	n.i.	n.i.
Cu	*	n.i.	n.i.
Ni	*	*	*
Pb	*	n.i.	n.i.
Zn	*	n.i.	n.i.

Objaśnienia: * – istotność przy poziomie $p \leq 0,05$; n.i. – nieistotne

Explanations: * – significance at level $p \leq 0,05$; n.i. – not significant

WNIOSKI

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że:

1. Najwyższe stężenia badanych pierwiastków śladowych wystąpiły w próbach pobranych z punktu zlokalizowanego w pobliżu zabudowy gospodarczej, ogródków działkowych oraz w pobliżu centrali nasiennej (P-1).
2. Największa kumulacja metali ciężkich wystąpiła w warstwie osadów dennych pobranych z głębokości 5-10 i 20-30 cm.
3. Badane osady pod względem najwyższych stężeń metali ciężkich według klasyfikacji Bojakowskiej i Sokołowskiej (1998) w punkcie P-1 oraz P-2 klasyfikowane są jako osady niezanieczyszczone (I klasa) oraz słabo zanieczyszczone (II klasa). Natomiast w punkcie P-3 osady klasyfikowane są do osadów niezanieczyszczonych metalami śladowymi (I klasa).
4. Według Rozporządzenia Ministra Środowiska [Rozporządzenie 2002] stężenia analizowanych metali śladowych były niższe od wartości granicznych dla osadów zanieczyszczonych.

5. Analizowane osady dennie mogą być dowolnie zagospodarowane w środowisku wodnym i lądowym. Mogą być wykorzystywane do użytku gleb, odtwarzania uszkodzonych przez prąd plaż oraz wykorzystywane do budowy grobli i nabrzeży (Bojakowska 2001).

LITERATURA

Bojakowska I. (2001). *Kryteria oceny zanieczyszczenia osadów wodnych*. Przegląd Geologiczny, 49(3), 213-218.

Bojakowska I., Sokołowska G. (1998). *Geochemiczne klasy czystości osadów wodnych*. Przegląd Geologiczny, 46(1), 49-54.

Daniszewski P. (2012). *Wartości stosunku C:N dla osadów dennych jeziora Barlineckiego (wiosna, lato i jesień 2008 r.)*. International Letters of Chemistry, Physics and Astronomy, 2, 46-52.

Haziak T., Czaplicka-Kotas A., Ślusarczyk Z., Szalińska E. (2013). *Przestrzenne zmiany cynku w osadach dennych Zbiornika Czorszyńskiego*. Inżynieria i Ochrona Środowiska, 16(1), 57-68.

Januskiewicz T. (1978). *Studia nad metodą analizy chemicznej składu współczesnych osadów dennych jezior*. Zesz. Nauk. ART., 8, 3-30.

Kabata-Pendias A., Pendias H. (1999). *Biogeochemia pierwiastków śladowych*. Warszawa: Wyd. Nauk PWN.

Kazimierowicz Z., Kazimierowicz J. (2014). *Badania zawartości metali ciężkich w zlewni rzeki Biebrzy i jej trzech dopływów*. Inżynieria Ekologiczna, 40, 25-32.

Linczar M., Linczar S.E., Linczar P., Żmuda R. (2005). *Właściwości osadów dennych ciekłu Mielnica*. Acta Agrophysica, 5(2), 345-355.

Lis J., Pasieczna A. 1995. *Atlas geochemiczny Polski w skali 1: 2 500 000*. Warszawa: Państwowy Inst. Geol.

Madeyski M., Tarnawski M. (2007). *Wstępna ocena ilości i jakości osadów dennych wydzielonej części zbiornika wodnego Besko na rzece Wisłok*. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 4(1), 101-110.

Müller G. (1981). *Die Schwermetallbelastung der Sedimenten des Neckers und Seiner Nebenflüsse*. Chemiker – Zeitung, 6, 157-164.

Nocoń W. (2006). *Zawartość metali ciężkich w osadach dennych rzeki Kłodnicy*. Journal of Elementology, 11(4), 457-466.

Nocoń W. (2009). *Metale ciężkie w osadach dennych wybranych dopływów rzeki Kłodnicy*. Inżynieria i Ochrona Środowiska, 12(1), 65-76.

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 16 kwietnia 2002 r. w sprawie rodzajów oraz stężeń substancji, które powodują, że urobek jest zanieczyszczony (Dz.U. Nr 55 poz.498).

Sidoruk M., Potasznik A. (2013). *Ocena stanu zanieczyszczenia ołowiem, cynkiem i chromem osadów dennych jeziora Sunia*. Proceedings of ECOpole, 7(2): 713-720.

Skorbiłowicz E. (2003). *Ocena stanu zanieczyszczenia małych cieków Puszczy Knyszyńskiej*. Acta Agrophysica, 1(2), 311-320.

Skorbiłowicz E. (2014). *Assessment of heavy metals contents in bottom sediments of Bug River*. Journal of Ecological Engineering, 13(3), 82-89.

Trojanowski J., Antonowicz J. (2005). *Właściwości chemiczne osadów dennych jeziora Dołgie Wielkie*. Słupskie Prace Biologiczne, 2, 123-133.

mgr inż. Kamil Szydłowski
dr hab. inż. Joanna Podlasińska,
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Katedra Ekologii, Ochrony i Kształtowania Środowiska
al. Piastów 17, 70-310 Szczecin
Kamil.Szydowski@zut.edu.pl
Joanna.Podlasinska@zut.edu.pl

Wpłynęło: 11.01.2016

Akceptowano do druku: 7.03.2016