

Wpływ morfologii koryta rzeki na akumulację metali ciężkich w osadach dennych

Dariusz Ciszewski*

Mimo stosowania coraz efektywniejszych metod eksploatacji i wzbogacania rud metali, część pierwiastków przedostaje się do środowiska wodnego wraz z wodami dołowymi i nadosadowymi ze zbiorników poflotacyjnych, a także ze składowanych odpadów, które ulegają erozji i ługowaniu. Metale ciężkie są w systemie rzeczonym transportowane zarówno w roztworze, jak i w fazie stałej, a przejście pomiędzy tymi stanami możliwe jest dzięki wytrącaniu oraz procesom adsorpcji/desorpcji. Wytrącanie związków metali z roztworów wodnych jest kontrolowane przede wszystkim przez zmiany pH, potencjału utleniającego lub stężenia wytrącających się składników i może zaistnieć dzięki np. interakcji wody z cząsteczkami, mieszanii się z innymi wodami, a także przez ubytek lub wzrost stężenia gazów (Salomons & Förstner, 1984). Najważniejszą rolę w procesach sorpcji odgrywa ilość i rodzaj cząsteczek zawieszonych w wodzie, szczególnie takich, które mają największą powierzchnię czynną. Należą do nich przede wszystkim substancje organiczne, tlenki i wodorotlenki Mn i Fe oraz minerały ilaste. Ponadto metale ciężkie mogą być transportowane w okruchach minerałów pierwotnych pochodzących z procesu produkcji rud (np. galeny, sfalerytu), z których z biegiem rzeki mogą być uruchamiane (Hudson-Edwards i in., 1996).

Przykład rzeki Tyne, zanieczyszczonej przez starą kopalnię rud Zn i Pb wskazuje, że wraz ze wzrostem odległości od niej coraz mniejszy wpływ na redukcję koncentracji metali ciężkich w osadach mają procesy fizyczne natomiast zwiększa się rola chemicznych procesów sorpcji i desorpcji (Macklin & Dowsett, 1989). Akumulacja zanieczyszczonych metalami ciężkimi osadów zarówno w korycie, jak i poza nim jest przede wszystkim kontrolowana przez czynniki hydrologiczno-sedymentologiczne, z których najważniejszymi są: hydrauliczne sortowanie ziaren o różnej gęstości i wielkości, procesy mieszania z osadami dostarczonymi przez dopływy i wskutek erozji brzegów oraz wielkość depozycji na równinach aluwialnych (Macklin, 1996). Efektem działania tych czynników są zróżnicowane koncentracje metali ciężkich w osadach dennych, a także pozakorytowych.

W korytach rzek klimatu umiarkowanego, o regularnych wezbraniach roztopowych lub opadowych, najwyższe koncentracje metali ciężkich są notowane najczęściej w osadach drobnoziarnistych przy brzegach koryta i w zatoczkach, podczas gdy znacznie niższe stężenia występują w strefie nurtu (Bubb i in., 1991). Odmiennie kształtuje się rozkład koncentracji metali w korytach rzek obszarów półsuchych o epizodycznych wezbraniach różnej wielkości. Maksymalne koncentracje występują tam w strefach najczęstszego przepływu wody natomiast w osadach przybrzeżnych i pozakorytowych są one znacznie niższe (Graf i in., 1991). W korycie arktycznej rzeki roztokowej, najwyższe koncentracje zanotowano w łachach śródkorytowych, szczególnie w ich częściach zaprawowych, a podwyższone koncentracje

metali spotykano również w przegłębieniach koryta (Sear & Carver, 1996).

W dolinach rzek silnie zanieczyszczonych obserwuje się znaczne różnice koncentracji metali ciężkich w sąsiadujących ze sobą warstwach osadów powodziowych (Macklin & Klimek, 1992). Koncentracje metali zmieniają się także w profilu poprzecznym, zalewanego w czasie powodzi dna doliny — generalnie zmniejszają się one ze wzrostem odległości od brzegów rzeki. Spadek ten jest znacznie wolniejszy w stabilnych lateralnie odcinkach koryt niż w odcinkach, w których dno doliny jest przerabiane przez koryto aktywnie migrujące, a zanieczyszczone osady przyrastają przede wszystkim wzdłuż brzegów koryta (Wolfenden & Lewin, 1977; Macklin & Lewin, 1989).

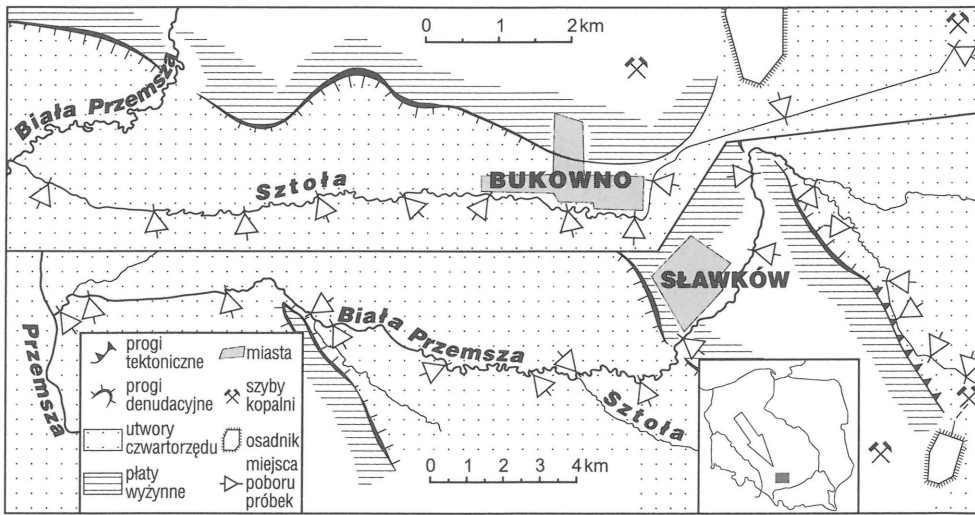
Badania osadów dennych rzek Sztoły i Białej Przemskiej (Górny Śląsk) miały na celu znalezienie związków pomiędzy morfologią koryta rzecznoego a akumulacją osadów zanieczyszczonych metalami ciężkimi. Rzeki te są odbiornikiem wód dołowych z kopalni rud cynku i ołowiu i transportują znaczne ilości silnie zanieczyszczonego metalami ciężkimi drobnoziarnistego materiału mineralnego, który jest intensywnie mieszany z niezanieczyszczonym, niemal jednorodnym materiałem piaszczystym, erodowanym z dna i brzegów koryta. Ponieważ piaszczyste aluwia są łatwo uruchamiane, nawet w czasie niewielkich wahań przepływów, rozkład koncentracji metali w osadach dennych jest silnie związany z intensywnością procesów erozji i akumulacji.

Obszar badań

Biała Przemśka, o powierzchni zlewni 876 km², ma 66 km długości, a średni przepływ przy jej ujściu wynosi 5,55 m³/s. Odwadnia ona SE część Wyżyny Śląskiej. Charakterystyczną cechą rzeźby doliny jest obecność progów strukturalnych, zbudowanych z wapieni górnej jury oraz środkowego i górnego triasu, o wysokościach 300–400 m n.p.m., w obrębie których dno doliny jest wąskie i ma większy spadek. Pomiędzy nimi występują kotliny wypreparowane w mało odpornych osadach retyko-liasu wypełnionych jednorodnymi piaszczystymi osadami fluwioglacjalnymi. Dna kotlin są położone na wysokości 250–300 m n.p.m. Jednym z nich płynie rzeka Sztoła, lewobrzeżny dopływ Białej Przemskiej o długości 15 km i średnim rocznym przepływie ok. 1,2 m³/s (ryc. 1).

Do Białej Przemskiej są doprowadzane, kanałem betonowym długości ok. 4,5 km (kanał północny), wody dołowe z kopalni cynku i ołowiu Bukowno w ilości ok. 2 m³/s i płyną w jej dolnym i środkowym biegu na długości ok. 40 km. Wody te mieszają się z wodami rzecznoymi i w dolnym biegu stanowią ok. 60% średniego niskiego przepływu rzeki; przy średnich wysokich stanach ich udział zmniejsza się do ok. 30% (Jankowski, 1987). Zawartości Zn w zrzucanych wodach wahają się od 0,5 do 5 mg/dm³, a ołowiu 1–2 mg/dm³. Przeciętne stężenie zawiesiny waha się w granicach 50–80 mg/dm³; zawartość siarczanów jest podwyższona w stosunku do naturalnej i wynosi ok. 150 mg/dm³, a zawartość chlorków ok. 20 mg/dm³, pH jest mało zróżnicowane w granicach 7,9–8,2 (Wójcik i in., 1990). Łączny

*Instytut Ochrony Przyrody PAN, ul. Lubicz 46, 31-512 Kraków



Ryc. 1. Zarys rzeźby terenu badań

ładunek zawiesin w wypompowywanych w ostatnich kilku latach wodach można szacować na ok. 2 tys. t, a zawartość Zn na ok. 100 t, Pb ok. 16,5 t, Cd ok. 0,5 t (na podst. niepubl. danych KGH Bukowno).

Górny odcinek koryta Sztoly stanowi 3 km kanał betonowy (kanał południowy), którym są odprowadzane wody dołowe z kopalni Zn-Pb Bukowno. Niżej położony odcinek długości ok. 12 km jest w całości nieuregulowany i płyną nim jedynie wody kopalniane. Przeciętne zanieczyszczenie tych wód jest niższe niż wód doprowadzonych do Białej Przemszy. Zawartość Zn wynosi ok. 1,0 mg/dm³, a ołowiu ok. 0,05 mg/dm³. Przeciętne stężenie zawiesiny waha się, w ostatnich latach, w granicach 10–20 mg/dm³, chociaż maksymalna koncentracja przekracza 60 mg/dm³. Zawartości siarczanów i chlorków są niskie i wynoszą odpowiednio 60 mg/dm³ i 15 mg/dm³; przeciętne pH powyżej 8. Łącznie roczną zawartość substancji stałych transportowanych w ostatnich latach można szacować na ok. 500 t, a zawartość Zn na ok. 40 t, Pb na 6 t i ok. 200 kg Cd (na podst. niepubl. danych KGH Bukowno).

Metoda badań

Z naturalnego koryta rzeki Sztoly próbki osadów dennych pobrano w 8 miejscach oddalonych przeciętnie ok. 1,5 km od siebie. W każdym z nich próbki były pobierane w 3, jak najmniej od siebie oddalonych (<1000 m) profilach poprzecznych o różnej morfologii i zróżnicowanym natężeniu procesów erozji i akumulacji.

1. Profile typu płosa, w których procesy erozji (E) dominują nad akumulacją; charakterystyczne są: duża głębokość koryta rzeki w stosunku do jego szerokości, brak tarasu zalewowego oraz strome brzegi.

2. Profile typu zakola meandrowego, w których procesy erozji i akumulacji (EA) występują naprzemianległe w zakolach cieków; procesy erozji zachodzą przy brzegu wklęsłym natomiast akumulacji przy brzegu wypukłym.

3. Profile typu koryta roztokowego, w których znaczna akumulacja (A) osadów w opianowanych przez roślinność łachach lub wyspach powoduje, że rzeka w tych odcinkach płynie dwoma lub trzema ramionami; charakterystyczna jest znaczna szerokość koryta rzeki przy stosunkowo niewielkiej jego głębokości.

W każdym profilu poprzecznym próbki osadów pobierano:

1) w najgłębszych punktach w profilu,

2) w łachach lub punktach płycy położonych w profilu,
3) przy brzegu pod powierzchnią wody,
4) z tarasu zalewowego podtapianego okresowo.

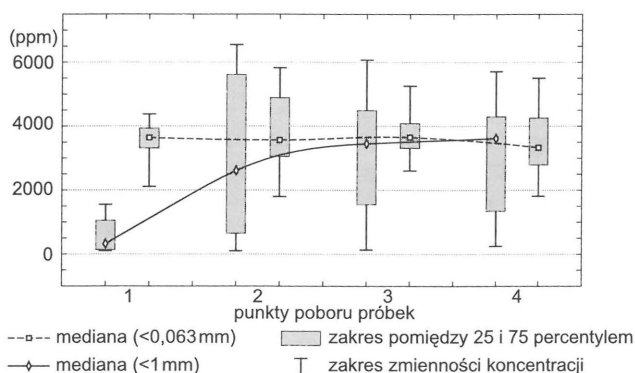
Ponadto w każdym z 8 miejsc pobierano próbki osadów pozakorytowych oraz piasków fluwioglacjalnych. W odcinku, w którym koryto rzeki jest wybetonowane próbki pobierano w trzech miejscach, w każdym z nich w dwóch punktach: ze strefy nurtu oraz strefy przybrzeżnej.

Próbki osadów dennych z Białej Przemszy pobierano w jej dolnym i środkowym biegu na odcinku długości 40 km, którym są odprowadzane wody dołowe. Profile poprzeczne, w których pobierano próbki były zlokalizowane w odcinkach prostych z łachą korytową.

Próbki były pobierane z głębokości 0–5 cm i po przewiezieniu do laboratorium wysuszone w temperaturze 105°C. Połowa próbki była przesiewana przez sito polietylenowe 1 mm i 0,063 mm. Uzyskane frakcje (<1 mm i <0,063 mm) były ekstrahowane pod ciśnieniem ok. 10 atm. w bombach teflonowych w roztworze 1:1 HNO₃ a następnie filtrowane przez sączek 0,45 μm. Koncentracje Zn, Cd, Pb, Cu, Ni, Mn, Fe i Ag były oznaczane metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej. W pozostałej połowie próbki oznaczano skład granulometryczny: dla próbek piaszczystych metodą sitową, a dla próbek pylasto-ilastych metodą areometryczną. Próbki piaszczysto-pylaste były oznaczane obydwoma metodami. W wybranych próbkach oznaczano zawartość substancji organicznej (straty prażenia przy 450°C) oraz skład mineralny metodą rentgenografii na aparacie DRON 3.0 (promieniowanie Cu_{Kα}, filtrowane Ni).

Zanieczyszczenie osadów dennych

Wyniki analizy koncentracji metali ciężkich w osadach badanych rzek pozwalają stwierdzić, że stężenia tych metali w osadach dennych Sztoly, a także Białej Przemszy są podobne. Tabela 1 przedstawia średnie koncentracje badanych metali ciężkich w osadach Sztoly we frakcji <0,063 mm w różnej odległości od kopalni obliczone dla 3 profili różnych typów w jednym miejscu (Sztola), a tabela 2, ich koncentracje w osadach przybrzeżnych Białej Przemszy. W wyniku odprowadzania ścieków z przeróbki i wydobywania rud Zn-Pb w największej ilości przechodzą do środowiska rzeczno-piękarskiego związki z wydobywanymi minerałami galeny i sfalerytu. Średnie stężenie Zn, Cd i Pb na niemal całej długości badanych cieków przekracza ponad 100 razy koncentrację tych metali w niezanieczyszczonych piaskach fluwioglacjalnych, a wartości eks-



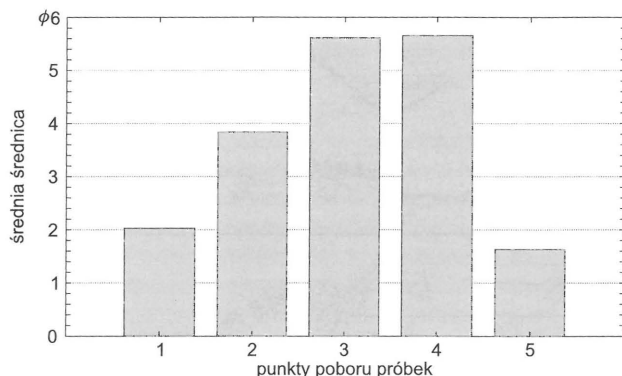
Ryc. 2. Zróżnicowanie koncentracji Cd w typowym profilu poprzecznym koryta Sztoły we frakcji <1 mm i <0,063 mm

tremalne osiągają ponad 20% Zn, 8% Pb i 1500 ppm Cd i są wyższe niż w wydobywanej rudzie (4% Zn, 1–1,5% Pb). Zawartość pozostałych pierwiastków wzrasta nie więcej niż kilkanaście razy w stosunku do wartości tła geochemicznego.

Typowe zróżnicowanie koncentracji metali ciężkich w korycie rzeczny

Niewielki spadek koncentracji badanych metali ciężkich w naturalnym korycie Sztoły, pozwolił na obliczenie mediany ich koncentracji w każdym punkcie profilu poprzecznego (1–4) na podstawie stężeń z wszystkich profili w całym korycie. Wartości te zostały obliczone dla obu badanych frakcji za pomocą analizy wariancji testem Kruskal-Wallisem rekomendowanym szczególnie dla niewielkiej próby danych (Swan & Sandilands, 1995). Zróżnicowanie koncentracji metali w osadach dennych we frakcji <1 mm jest bardzo podobne; przykładem jest Cd (ryc. 2). Wyraźne różnice jego stężeń zaznaczają się pomiędzy najgłębszymi punktami w korycie (1), łachami korytowymi (2) oraz osadami przybrzeżnymi (3 i 4). Na tej podstawie można określić prawdziwą dla wszystkich pierwiastków i typów profili poprzecznych typową sekwencję koncentracji w tej frakcji: 1, 2 < 3, 4.

Sekwencja ta wykazuje dużą zbieżność z rozkładem prędkości prądów wody, naprężenia ścinającego i tarcia w profilu poprzecznym koryta. Minimalne koncentracje metali występują w strefie szybkiego przepływu wody i dużych naprężeń ścinających, w której sedymentacja drobnoziarnistego, najsilniej zanieczyszczonego osadu jest utrudniona. Maksymalne stężenia metali w strefie przybrzeżnej są związane z najniższymi prędkościami wody, które umożliwiają dekantację i akumulację zanieczyszczonej zawiesiny. W strefie nurtu występują osady najbardziej gruboziarniste (ok. 2 ϕ) i najbardziej zbliżone do piasków fluwiolglajalnych



Ryc. 3. Zróżnicowanie średniej średnicy osadów w typowym profilu poprzecznym koryta Sztoły

(ok. 1,5 ϕ), natomiast osady przybrzeżne są wyraźnie wzbogacone w osad drobnoziarnisty — ok. 5–6 ϕ (ryc. 3). Pośrednie wartości ok. 3–4 ϕ są związane z łachami korytowymi. Różnice koncentracji metali ciężkich w osadach frakcji <1 mm, które w korycie Sztoły stanowią ok. 99% badanych osadów, odzwierciedlają przede wszystkim zróżnicowanie natężenia fizycznych procesów sedymentacji osadów.

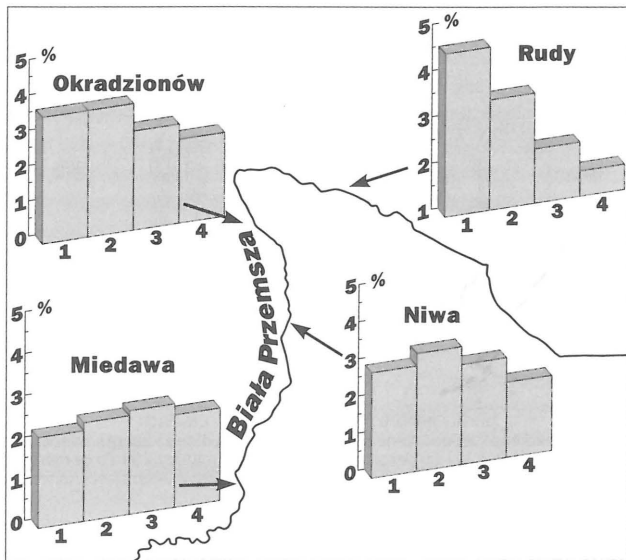
Zróżnicowanie koncentracji pierwiastków we frakcji <0,063 mm w przeciętnym profilu w korycie Sztoły jest znacznie mniejsze (np. Cd, ryc. 2) i w większości przypadków nieistotne statystycznie. Większe zróżnicowanie koncentracji wykazuje jedynie Mn oraz Zn i Ni; koncentracje tych pierwiastków w najgłębszych miejscach koryta są wyższe niż w pozostałych punktach profilu. Wydaje się, że różnice ich koncentracji są w znacznie większym stopniu kontrolowa-

Tab. 1. Średnie koncentracje metali ciężkich w osadach dennych rzeki Sztoły we frakcji <0,063 mm [ppm]

Odległość w m	Zn	Cd	Pb	Cu	Ni	Mn	Fe	AG
Kanał betonowy	17 150–35750	133–251	3 945–9 640	36–40	29–33	592–888	33 000–44 100	5,9–8,9
4 500	19 964	144,5	4 006	45	39	699	33 358	5,5
5 500	19 937	134,1	3 888	43	39	570	33 286	5,0
7 100	18 725	120,1	3 429	48	39	616	29 969	5,2
8 700	19 411	130,8	3 440	44	42	856	30 547	5,4
10 400	18 297	111,5	3 276	42	40	811	26 556	4,7
11 900	18 600	103,8	2 758	41	40	1619	29 332	4,0
13 000	18 727	105,1	3 431	44	42	1240	24 381	4,4
14 800	16 338	109,5	3 363	43	44	1695	27 752	4,5

Tab. 2. Średnie koncentracje metali ciężkich w osadach przybrzeżnych Białej Przemszy we frakcji <0,063 mm [ppm]

Odległość w m	Zn	Cd	Pb	Cu	Ni	Mn	Fe	Ag
Kanał betonowy	47 200–95 800	188–438	6 335–30 000	45–76	49–58	437–609	37 500–60 300	7,1–13,5
6 500	45 500	185	5 080	111	50	822	52 000	7,7
8 400	23 400	110	5 235	47	52	603	32 400	4,5
12 000	30 850	124	2 105	29	44	670	25 600	4,2
14 500	29 550	127	2 650	39	47	841	29 800	4,0
18 300	26 250	111	1 675	30	38	783	27 200	3,5
23 000	28 000	165	3 100	52	39	799	33 400	4,7
29 200	24 050	149	2 425	41	25	726	29 100	3,6
34 000	19 200	173	2 065	65	44	1 068	32 900	3,3
46 000	17 880	163	2 527	97	49	1 377	38 200	2,3



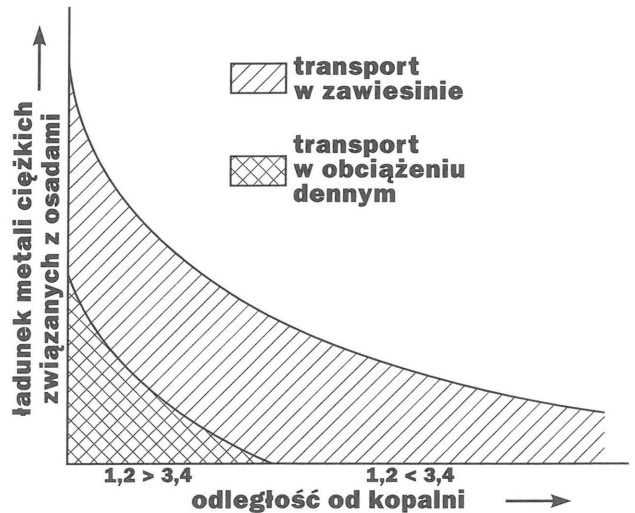
Ryc. 4. Zmiany koncentracji Zn w profilu poprzecznym koryta Białej Przemszy wraz ze wzrostem odległości od kopalni rud Zn-Pb we frakcji $<0,063\text{ mm}$

ne przez czynniki chemiczne niż fizyczne (sedymentację) i dlatego w znacznie mniejszym stopniu odzwierciedlają aktywność procesów hydrologiczno-sedymentologicznych.

Nietypowe zróżnicowanie koncentracji metali ciężkich w korycie rzeczne

W górnych odcinkach Sztoły i Białej Przemszy, położonych w pobliżu wypływu wód dołowych na powierzchnię, najwyższe stężenia Zn, Cd i Pb występują w strefie nurtu lub ogólniej w strefie koryta aktywnego, natomiast niższe są notowane przy brzegach: 1, 2 $>$ 3, 4. Wraz z biegiem rzeki zróżnicowanie koncentracji w przekroju poprzecznym koryta stopniowo zmienia się na „typowe”. Taki efekt można obserwować w korycie Białej Przemszy we frakcji $<0,063\text{ mm}$ (ryc. 4). Wraz ze wzrostem odległości od kopalni następuje stopniowe przesuwanie się miejsca, w którym koncentracje są maksymalne w profilu poprzecznym — od strefy nurtu (profil Rudy 8,4 km) poprzez łachy korytowe (profile Okradzionów 12 km i Niwka 14,5 km) aż do wystąpienia maksymalnych wartości przy brzegach koryta (profil Miedawa 18,3 km). Podobny efekt był obserwowany w obu frakcjach również w korycie Chechła (Ciszewski, 1997).

Przyczyną tego jest hydrauliczne sortowanie osadów dennych: wymywanie ziarn lekkich i pozostawianie ziarn najgrubszych o największej gęstości. W strefie nurtu pozostają ziarna minerałów o największej masie (galeny, cerusytu, sfalerytu) ponieważ mogą stawiać opór znacznemu naprężeniu ścinającemu. Ilość tych ziarn jest największa w pobliżu miejsca zrzutu wód kopalnianych. Wraz ze wzrostem odległości od kopalni całkowita ilość gruboziarnistej frakcji mineralnych szybko się zmniejsza, a ziarna drobniejsze akumulują się w największej ilości w łachach korytowych. W odcinkach tych koncentracje metali ciężkich w korycie aktywnym (1, 2 ryc. 5) są wyższe niż w osadach przybrzeżnych, a okruchy mineralne są transportowane w obciążeniu dennym. W niższej położonych odcinkach, w których koncentracja Zn, Cd i Pb jest wyższa przy brzegu niż w korycie aktywnym, cząstki minerałów najmniejszych rozmiarów są transportowane w zawieszynie, nawet przy niskich przepły-



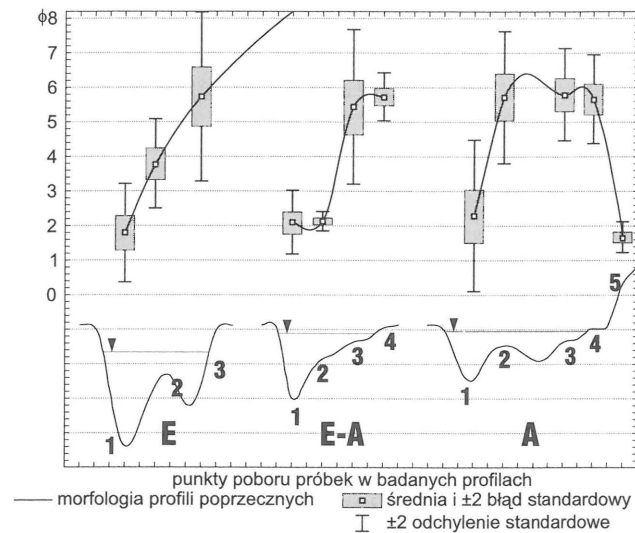
Ryc. 5. Schemat zmian koncentracji i sposobów transportu metali ciężkich ze wzrostem odległości od kopalni

wach wody. Gromadzą się one w największej ilości przy brzegach wskutek zwiększonej tam siły tarcia i zmniejszonej prędkości przepływu (1, 2 $<$ 3, 4 ryc. 5). Odcinki te są znacznie dłuższe od wyżej położonych, w których występują oba rodzaje transportu metali ciężkich.

Akumulacja metali ciężkich w profilach typu płosa (E)

Średnia średnica ziarn osadów najgłębszych punktów w płosach Sztoły (E1, ryc. 6) jest najbardziej zbliżona do średniej średnicy ziarn piasków fluwioglacjalnych (5, ryc. 6), w których wycięte jest jej koryto. Wskazuje to, że sedymentacja materiału drobnoziarnistego jest tam najmniejsza spośród wszystkich badanych punktów w korycie. Znaczące odchylenie standardowe średniej średnicy tych osadów świadczy jednak o zróżnicowaniu proporcji erozji i akumulacji w tych właśnie punktach. Wynikają one ze stosunkowo znacznych różnic morfologii koryta oraz rozkładów prędkości prądów wody występujących pomiędzy badanymi profilami. W niektórych profilach (ujętych w typie płos) duże natężenie erozji dna jest wynikiem zmniejszenia przekroju poprzecznego koryta wskutek rozbudowania łachy korytovej. Powoduje to zwiększenie prędkości przepływu wody, czasami do turbulentnego w strefie nurtu. Zwiększenie siły erozyjnej powoduje powstawanie znacznych przegłębień, w których nie występują sprzyjające warunki do akumulacji pochodzącego z kopalni drobnoziarnistego, najsilniej zanieczyszczonego materiału. Obserwacje pobieranych próbek osadów dennych wskazują, że materiał ten znajdujący się w powierzchniowej warstwie dna, był przemieszany z piaskiem, podczas gdy głębsze warstwy były niemal wyłącznie piaszczyste. Świadczy to o uszczelnieniu dna koryta znajdującym się pod ciśnieniem płynącej wody materiałem pylasto-ilastym.

W opisywanych punktach koryta, następuje wzrost koncentracji cynku, niklu a przede wszystkim manganu, najlepiej widoczny we frakcji $<0,063\text{ mm}$. Koncentracje Mn w takich punktach wynoszą od kilku tys. ppm do nawet kilku procent. Występowanie wytrąceń tlenków manganu w miejscach o znacznej turbulencji wód płynących, w których następuje wzrost zawartości tlenu potwierdzają również badania innych autorów (Evans & Davies, 1994). Zwiększony w takich strefach potencjał utleniający umożliwia wytrącanie uwodnionych tlenków zarówno Mn, jak i Fe. Z kolei



Ryc. 6. Zmienność średniej średnicy osadów Sztoły w punktach 1–5 w profilach typu plosa (E), zakola meandrowego (EA) i koryta roztokowego (A)

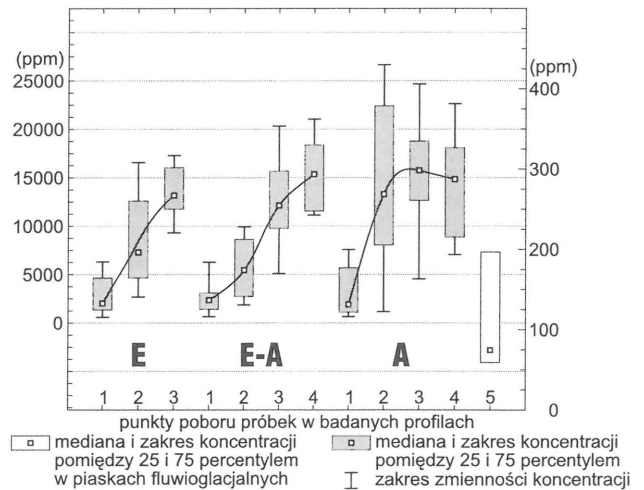
wytrącające się tlenki Mn, ze względu na ich bardzo dużą powierzchnię czynną, powodują intensywną adsorpcję metali ciężkich (Horovitz, 1986). Jak wskazują obserwacje, z przegłębieniami koryta są związane nie tylko przepływy turbulenty. W miejscach takich często występują także wiry pionowe dostarczające natlenioną wodę z powierzchni do warstw przydennych. Obserwowane bezpośrednio wytrącanie tlenków manganu na osadach dennych zaburza opisywaną powyżej prawidłowość spadku koncentracji metali ciężkich ze wzrostem prędkości prądu wody i jego siły erozyjnej w typowym profilu poprzecznym koryta. W takich punktach stężenia metali odzwierciedlają nie tylko fizyczną sedymentację zanieczyszczonej zawiesiny ale także uwarunkowane chemicznie procesy wytrącania pierwiastków.

Osady łach korytowych w profilach typu plosa charakteryzuje wyższa koncentracja metali ciężkich, czego przykładem jest zróżnicowanie koncentracji Zn (E2, ryc. 7) oraz mniejsza średnica ziarn niż w osadach pobranych z najgłębszych części profilu (E1, ryc. 6). Łachy te mają formy podwodnych kęp mniej lub bardziej wydłużonych w kierunku prądu wody, o stromych stokach i znacznej wysokości względnej przekraczającej w niektórych przypadkach 1 m wysokości nad dno koryta przy głębokości rzeki ok. 1,5 m. Przerośnięte są one mchem wodnym, na którym następuje systematyczna akumulacja piasku drobno- i bardzo drobnoziarnistego erodowanego z dna, jak i bezpośrednie wychwytywanie bardzo drobnej zanieczyszczonej zawiesiny. Akumulacja materiału pylasto-ilastego w takich łachach, możliwa jest tylko dzięki porastającej je roślinności i właśnie temu łachy zawdzięczają swoją specyfikę.

Złe wysortowanie (ok. 1,5 δ) oraz mała średnica osadów przybrzeżnych (E3, ryc. 6) wskazuje na lokalne domieszki piasku pochodzącego z erozji brzegów koryta do zgromadzonych głównie drobnoziarnistych osadów zanieczyszczonych.

Akumulacja metali ciężkich w profilach typu zakola meandrowego (EA)

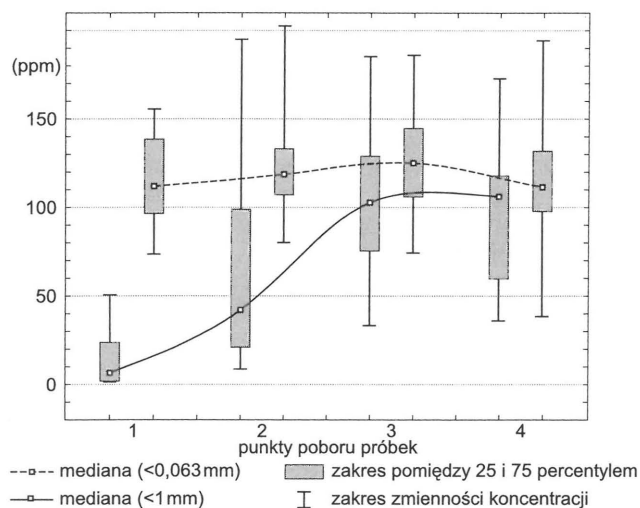
W zakolach meandrowych (EA) jest charakterystyczna duża różnica, zarówno średniej średnicy ziarn osadów, jak i mediany koncentracji Zn (ryc. 6, 7), pomiędzy strefą koryta



Ryc. 7. Zróżnicowanie koncentracji Zn w osadach rzeki Sztoły w punktach 1–5 w profilach typu plosa (E), typu zakola meandrowego (EA) i koryta roztokowego (A)

aktywnego i strefą przybrzeżną. Osady najgłębszych punktów w profilu mają bardzo zbliżone uziarnienie do osadów łach meandrowych, chociaż większe odchylenie standardowe wskazuje na znacznie większe zróżnicowanie średnicy ziarn osadów w najgłębszych punktach. Przyczyną tego są różnice w tempie erozji bocznej w zakolach meandrowych, a także dennej w odcinkach położonych bezpośrednio powyżej nich. Intensywniejsza erozja powoduje zwiększoną dostawę bardziej drobnoziarnistego materiału piaszczystego; w profilach, w których dostawa jest mniejsza osady są bardziej gruboziarniste. Obserwacja meandrów Sztoły wskazuje, że na tempo erozji brzegu wklęsłego może mieć wpływ akumulacja dużych ilości osadów pochodzących z kopalni przy brzegu wypukłym. Drobnoziarniste osady (średnia średnica 5–6 ϕ) cechuje duża kohezynność, a ponadto są utrwalone przez porastającą roślinność. Systematyczne ich lateralne przyrastanie powoduje zmniejszenie przekroju poprzecznego koryta i w rezultacie zwiększenie prędkości, i siły erozyjnej rzeki przy brzegu wklęsłym. Odzwierciedleniem takiego mechanizmu są różnice w koncentracji metali ciężkich. Ponadto, ogólnie wyższa zawartość metali w miejscach najszybszego przepływu wody od wartości tła geochemicznego wskazuje, że zanieczyszczona metalami ciężkimi zawiesina jest tam akumulowana, chociaż w stosunkowo niewielkiej ilości.

W łachach korytowych występują osady źle wysortowane i o największej średniej średnicy (frakcji piasku drobnoziarnistego) spośród łach badanych trzech typów profili. Materiał akumulowany w takich punktach pochodzi przeważnie z położonych w górę rzeki podcinanych brzegów i przenoszony jest w kierunku brzegów wypukłych przez prądy spiralne. Po stronie zaprawowej ripplemarków tworzonych przez te prądy, obserwowano stosunkowo niewielką, krótkotrwałą sedymentację zanieczyszczoną zawiesiną. Bardzo drobne cząstki, zatrzymywane na proksymalnej stronie ripplemarków, mogą przemieszczać się także wgłąb dna wraz z wodami przesiąkającymi — w tych miejscach pod wyższym ciśnieniem niż na stronie dystalnej (Jobson & Carey, 1989). Prowadzi to do wymieszania powierzchniowej warstwy piasku z cząstkami zanieczyszczonymi metalami ciężkimi. Rezultatem opisywanych procesów jest podniesienie koncentracji Zn we frakcji <1 mm w stosunku do osadów o



Ryc. 8. Zróżnicowanie koncentracji Pb w profilu akumulacyjnym we frakcji <1 mm i <0,063 mm

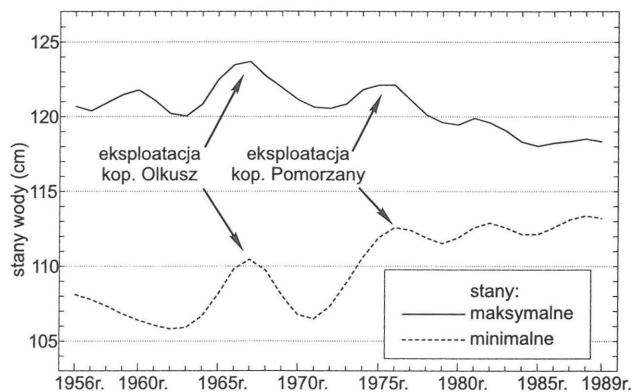
zbliżonej średnicy położonych w strefie nurtu (ryc. 7).

Bardzo charakterystyczne dla koryta Sztoły są osady przybrzeżne w zakolach meandrowych (EA 3, 4 ryc. 6), gdzie tworzą kilku-, kilkunastometrowej szerokości tarasy o wysokości nie przekraczającej kilka centymetrów nad średnim poziomem wody. Znaczna część ich powierzchni, szczególnie w pobliżu koryta jest często zatopiona. W wyniku zatopienia tarasu te są nadbudowywane drobnoziarnistym, pochodzącym z kopalni silnie zanieczyszczonym materiałem. Jego osadzanie jest ułatwione dzięki zwiększeniu szorstkości powierzchni tarasu przez porastającą roślinność, która odgrywa największą rolę w przechwytywaniu drobnej zawiesiny bezpośrednio z wody o czym świadczy częsta obecność cząstek ilastych na liściach. Takie procesy sedymentacji powodują, że osady przybrzeżne są zbudowane wyłącznie z zanieczyszczonych osadów o małej średniej średnicy (5–6 φ) i wysokiej zawartości Zn (EA 3,4 ryc. 7).

Akumulacja metali ciężkich w odcinkach roztokowych (A)

W przeciwieństwie do wyżej omówionych typów profili, koncentracje metali w korycie roztokowym wykazują małe zróżnicowanie zarówno we frakcji <1 mm, jak i <0,063 mm. Ilustrują to różnice koncentracji Pb (ryc. 8). Jedynie koncentracje w strefie nurtu, w której akumulacja zawiesiny jest utrudniona ze względu na szybki przepływ wody są istotnie niższe. W pozostałych punktach przekroju poprzecznego akumulacja zanieczyszczonego materiału frakcji pylastej i ilastej jest bardzo duża, na co wskazują wysokie koncentracje Pb (a także Zn, A, ryc. 7) oraz mała średnia średnica osadów (A, ryc. 6).

Nieco odmienne jest zróżnicowanie koncentracji Zn i Mn we frakcji <0,063 mm; maksymalne koncentracje tych pierwiastków występują w najgłębszych punktach koryta roztokowego. W odcinkach tych, w wyniku nadbudowywania łachy śródkorytowej następuje skierowanie strumienia wody w kierunku brzegów oraz intensyfikacja erozji zarówno bocznej, jak i dennej wskutek powstania przepływu o zwiększonej prędkości i turbulencji. Skutkiem tego jest opi-



Ryc. 9. Maksymalne i minimalne stany wody w posterunku Ryszka w latach 1956–1989 (wygładzone średnią trzyletnią)

sywane wcześniej, wzmożone wytrącanie tlenków manganu i związanego z nimi cynku.

Osady łach korytowych w odcinkach roztokowych (A2) ze względu na znaczną koncentrację metali jak i najmniejszą spośród analizowanych typów łach średnią średnicę ziarn są znacznie bardziej zbliżone do typu osadów przybrzeżnych (A3, 4) niż pozostałych łach korytowych (ryc. 6, 7). Jest to związane ze specyfiką badanego koryta, którym odprowadzana jest znaczna ilość pochodząca z kopalni zawiesiny. Niemal w całości osadza się ona w 12 kilometrowym naturalnym korycie Sztoły. Intensywną akumulację prowadząca miejscami do nadbudowywania dna koryta w znacznym stopniu umożliwiają niewielkie wahania przepływów wody w Sztole. Odzwierciedlają je minimalne wahania rocznych ekstremalnych stanów wody (ryc. 9). Brak znaczących wahań powoduje, że nie występują przepływy zdolne erodować zgromadzony w korycie pylasto-ilasty materiał. Dzięki temu łachy pylasto-ilaste mogą narastać do znacznych rozmiarów tworząc wyspy w górnym biegu, a w dolnym — duże łachy porośnięte często ziołoroślami, np. w pobliżu przeszkód z pni drzew.

Zmienność koncentracji metali ciężkich w badanych punktach koryta

Przedstawione wyniki wskazują na istotny wpływ fizycznych procesów sedymentacji na zróżnicowanie koncentracji metali ciężkich w osadach dennych. Szczególnie wyraźnie zaznacza się on we frakcji <1 mm, ale wpływ taki jest widoczny także w zmienności tych koncentracji w poszczególnych typach badanych punktów w korycie. W celu porównania wielkości tych zmian zostały obliczone współczynniki zmienności ($CV = \frac{\delta}{x} \cdot 100$) stężeń wszystkich pierwiastków (z wyjątkiem Mn) dla każdego typu profilu koryta (tab. 3).

W zestawieniu tym dla frakcji <1 mm zwraca uwagę ogólny spadek współczynnika zmienności koncentracji CV od najgłębszych punktów w profilu do brzegu koryta. Wskazuje to, że bardziej zróżnicowane koncentracje metali ciężkich występują w strefie koryta aktywnego niż w strefie przybrzeżnej. Zaznacza się tam silny wpływ częstych, lokalnych zmian prędkości i kierunku prądów wody. Powodują one szybkie i częste zmiany proporcji pomiędzy ilością drobnoziarnistego osadu zanieczyszczzonego i frakcji piasz-

Tab. 3. Współczynnik zmienności CV koncentracji metali ciężkich (z wyjątkiem Mn) w miejscach poboru próbek z koryta Sztoły

	<1mm				<0,063 mm			
	1	2	3	4	1	2	3	4
E	83,5	60,9	23,8	—	25,5	14,8	13,5	—
EA	70,7	66,9	32,4	32,6	17,7	14,6	13,8	19,1
A	85,9	60,3	42,4	47,1	15,0	39,1	20,2	33,4

czystej w powierzchniowej ruchomej warstwie dna. Jest wobec tego oczywiste, że pobranie próbek reprezentatywnych dla monitoringu zanieczyszczeń z koryta aktywnego gdzie mieszanie tych dwóch typów osadów jest intensywne i nieregularne jest bardzo trudne i może powodować błędą ocenę wielkości zanieczyszczenia osadów. Błędy takie w pewnym stopniu eliminuje badanie osadów mniejszej średnicy.

W przeprowadzonych badaniach wybór frakcji <0,063 mm pozwolił na wyeliminowanie pewnego zakresu zmienności koncentracji metali ciężkich spowodowanego zmiennością fluwalnego środowiska sedimentacji. Przeważnie wartości CV są znacznie niższe niż dla frakcji <1 mm z wyjątkiem strefy przybrzeżnej w profilach typu plos (E3), w których wartości te są do siebie najbardziej zbliżone. Wydaje się, że oznaczenie stężeń metali w próbkach pobieranych przy brzegach, których morfologia jest podobna do tych w typie plosa (E3), daje wyniki najmniej obciążone doborem badanej frakcji. W punktach tych brak trasy zalewowej, a drobnoziarnisty, silnie zanieczyszczony materiał jest wychwytywany przede wszystkim dzięki korzeniom przybrzeżnej roślinności trawiastej. Jego chemiczny i mechaniczny skład jest więc najbliższy zawartości materiału zawieszono transportowanego przez rzeki. Jest to szczególnie istotne ponieważ, jak wskazano wcześniej, na przeważających odcinkach koryt dominuje transport metali ciężkich w zawieszynie. Pylasto-ilasta frakcja tych osadów pozwala je zazwyczaj makroskopowo odróżnić od bardziej gruboziarnistego materiału, który do osadów przybrzeżnych może dostawać się wskutek obrywów ze stosunkowo stromego, w tych profilach poprzecznych, brzegu koryta. Miejsca takie, jak podwodne części brzegów o widocznych cechach stabilności tzn. bez nawisów darni, śladów osunięć brzegów itp. przy których gromadzą się transportowane korytem rzeczonym zanieczyszczone metalami osady, można rekomendować jako najwłaściwsze dla poboru próbek do celów monitoringu osadów rzecznych.

Wnioski

1. Zróżnicowanie koncentracji metali we frakcji <1 mm w profilach poprzecznych koryt Białej Przemszy i Sztoły, w których wartości minimalne występują w korycie aktywnym, a maksymalne w strefie przybrzeżnej jest typowe dla rzek, w których osady zanieczyszczone metalami ciężkimi są transportowane jako obciążenie zawieszinowe.

2. W odcinkach poniżej zrzutu wód z kopalni rud metali zróżnicowanie koncentracji metali we frakcji <1 mm, a także <0,063 mm może być odmienne od typowego — maksymalne stężenia występują w strefie nurtu a minimalne przy brzegu. W tych odcinkach metale ciężkie związane z okruciami minerałów rudnych o dużej masie, akumulowane

w korycie aktywnym są transportowane w obciążeniu dennym.

3. W miejscach, w których występuje turbulentny przepływ wody lub częste wiry, częste są ekstremalne koncentracje tlenków manganu oraz związanych z nimi pierwiastków. Występują one nie w wyniku fizycznej sedimentacji zanieczyszczeń ale bezpośredniego wytrącania na osadach dennych i zaburzają obserwowane, typowe zróżnicowanie koncentracji metali w profilu poprzecznym.

4. Najintensywniejsza akumulacja najdrobniejszego, silnie zanieczyszczonego osadu zachodzi w miejscach zwolnionego przepływu wody i znacznego tarcia. Warunki takie występują w porośniętych trawą i ziołoroślami strefie brzegowej, tarasach zalewowych i łąkach korytowych.

5. Najmniejsza zmienność koncentracji metali ciężkich w jednorodnych, drobnoziarnistych osadach przybrzeżnych zgromadzonych poniżej poziomu wody, które są wychwytywane z przepływającej wody pozwala rekomendować je jako najbardziej odpowiednie dla monitoringu zanieczyszczeń.

Literatura

- BUBB J. M., RUDD T. & LESTER J. N. 1991 — Distribution of heavy metals in the river Yare and its associated Broads, lead and zinc. *Sciences of the Total Environment*, 102: 169–188.
- CISZEWSKI D. 1997 — Source of pollution as a factor controlling distribution heavy metals in bottom sediments of Chechta River (south Poland). *Environmental Geology*, 28: 50–57.
- EVANS D. & DAVIES B. E. 1994 — The influence of channel morphology on the chemical partitioning of Pb and Zn in contaminated river sediments. *Applied Geochemistry*, 9: 45–52.
- GRAF W. L., CLARK S. L., KAMMERER M. T., LEHMAN T., RANDALL K. & SCHROEDER R. 1991 — Geomorphology of heavy metals in the sediments of Queen Creek, Arizona, USA. *Catena*, 18: 567–582.
- HOROVITZ A. J. 1986 — Primer on trace metal-sediment chemistry. *US Geological Survey Paper*, 2277: 1–65.
- HUDSON-EDWARDS K. A., MACKLIN M., CURTIS C. D. & VAUGHAN D. J. 1996 — Processes of formation and distribution of Pb, Zn-, Cd- and Cu-bearing mineral species in the Tyne basin, NE England: implications for metal contaminated river systems. *Environmental Science and Technology*, 30: 72–80.
- JANKOWSKI A. T. 1987 — Wpływ urbanizacji i przemysłowania na zmianę stosunków wodnych w rejonie śląskim w świetle dotychczasowych badań. *Pr. Nauk. UŚl.*, 813: 62–99.
- JOBSON H. E. & CAREY W. P. 1989 — Interaction of fine sediment with alluvial stream beds. *Water Resources Research*, 25: 135–140.
- MACKLIN M. 1996 — Fluxes and storage of sediment-associated heavy metals in floodplain systems: assessment and river basin management issues at a time of rapid environmental change. [W:] Anderson M. G., Walling D. E. & Bates P. D., *Floodplain processes*. Wiley: 441–460.
- MACKLIN M. & DOWSETT R. B. 1989 — The chemical and physical speciation of trace metals in fine grained overbank flood sediments in the Tyne basin NE England. *Catena*, 16: 135–151.
- MACKLIN M. & KLIMEK K. 1992 — Dispersal, storage and transformation of metal contaminated alluvium in the upper Vistula basin, SE Poland. *Applied Geography*, 12: 7–30.
- MACKLIN M. & LEWIN J. P. 1989 — Sediment transfer and transformation of an alluvial valley floor: the river South Tyne, Northumbria, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, 14: 233–246.
- SALOMONS W. & FÖRSTNER U. 1984 — *Metals in the hydrocycle*. Springer.
- SEAR D. & CARVER S. J. 1996 — The release and dispersal of Pb and Zn contaminated sediments within an Arctic braided river system. *Applied Geochemistry*, 11: 187–195.
- SWAN A. R. H. & SANDILANDS M. 1995 — *An introduction to geological data analysis*. Blackwell.
- WÓJCİK W., SZYDŁO J. & STOLARSKI Z. 1990 — Charakterystyka zanieczyszczenia wód powierzchniowych rejonu olkuskiego. *Zesz. Nauk. AGH*, 1368: 33–40.