

Akumulacja pierwiastków śladowych w osadach jeziornych w zależności od strefy ich sedymentacji

Izabela Bojakowska*, Gertruda Sokołowska*

Badania geochemiczne osadów wodnych — jeziornych i aluwialnych — były przez wiele lat stosowane w prospekcji złóż mineralnych. Obecnie badania osadów wodnych są coraz częściej wykorzystywane w opracowaniach dotyczących oceny zanieczyszczenia środowiska przyrodniczego metalami ciężkimi i szkodliwymi substancjami organicznymi (Ollivon i in., 1995; Catallo i in., 1995). Skład geochemiczny osadów współcześnie deponowanych w wodach powierzchniowych jest bardzo dobrym wskaźnikiem stanu zanieczyszczenia środowiska. Badania profili osadów wodnych, przeprowadzone w różnych regionach świata, wykazały wzrost zawartości pierwiastków śladowych, zwłaszcza metali ciężkich, w osadach powstałych w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat (Förstner, 1989). Na przykład, w Norwegii stwierdzono 3–6-krotny wzrost zawartości niektórych metali w tworzących się obecnie osadach jeziornych, położonych z dala od ośrodków przemysłowych, w porównywaniu do osadów, które powstały w okresie przedindustrialnym (Rognerud & Fjeld, 1993).

Skład chemiczny osadów dennych powstających w jeziorach jest uwarunkowany budową geologiczną danej zlewni, cechami morfologicznymi zbiornika, warunkami klimatycznymi oraz stanem zagospodarowania terenu (Starkel, 1991). W środowisku jeziornym deponowane są materiały klastyczne, biogeniczne i chemiczne. Materiał wchodzący w skład osadów może być pochodzenia autochtonicznego (opadające na dno resztki roślinne i szczątki zwierzęce oraz wytrącające się z wody substancje nieorganiczne i organiczne: węglan wapnia, wodorotlenki żelaza i manganu, niektóre połączenia fosforu, koloidalne połączenia humusowe) lub allochtonicznego (zawiesiny mineralne i organiczne docierające do zbiornika ze spływem powierzchniowym, wodami dopływów, z niszczenia brzegów jeziora oraz ze ściekami przemysłowymi i komunalnymi). W składzie osadów gromadzących się w strefie przybrzeżnej (litorał) przeważa przede wszystkim materiał klastyczny, pochodzący z rozmywanego brzegu oraz dostarczany przez rzeki. Są to głównie żwiry i piaski z mniejszą lub większą zawartością substancji organicznej, głównie pochodzenia roślinnego. W strefie głębinowej (profundal) osadza się głównie materiał ilasto-mułkowy pochodzenia allochtonicznego oraz materiał pochodzenia autochtonicznego: węglan wapnia, produkty rozkładu substancji organicznej (sapropel, gytia lub dy).

Znaczna część pierwiastków śladowych, docierająca do wód powierzchniowych, zarówno ze spływem powierzchniowym jak i odprowadzanymi ściekami, podlega akumulacji w osadach dennych. W naturalnych ekosystemach wodnych zawartość pierwiastków śladowych w osadach jest uzależniona jedynie od budowy litologicznej danej zlewni oraz warunków klimatycznych, które decydują o przebiegu procesów wietrzenia. Obecność podwyższonej

zawartości pierwiastków śladowych wskazuje na występowanie na tym obszarze złóż rud lub kompleksów skalnych wzbogaconych w te pierwiastki (Lis & Pasieczna, 1995; Bojakowska & Borucki, 1992, 1994). Na obszarach uprzemysłowionych skład osadów dennych jest uwarunkowany, oprócz budowy geologicznej danej zlewni i warunków klimatycznych, także stanem zagospodarowania terenu: lokalizacją składowisk odpadów, wylewisk ścieków, zrzutami ścieków, emisją zanieczyszczeń do atmosfery. Na obszarach uprzemysłowionych, w większości przypadków wzbogacenie osadów wodnych w metale ciężkie jest przede wszystkim wynikiem działalności gospodarczej człowieka, w znacznie mniejszym stopniu zaś spowodowane naturalnymi procesami geologicznymi, np. wietrzeniem i erozją odkrytych złóż mineralnych (Helios-Rybicka, 1986).

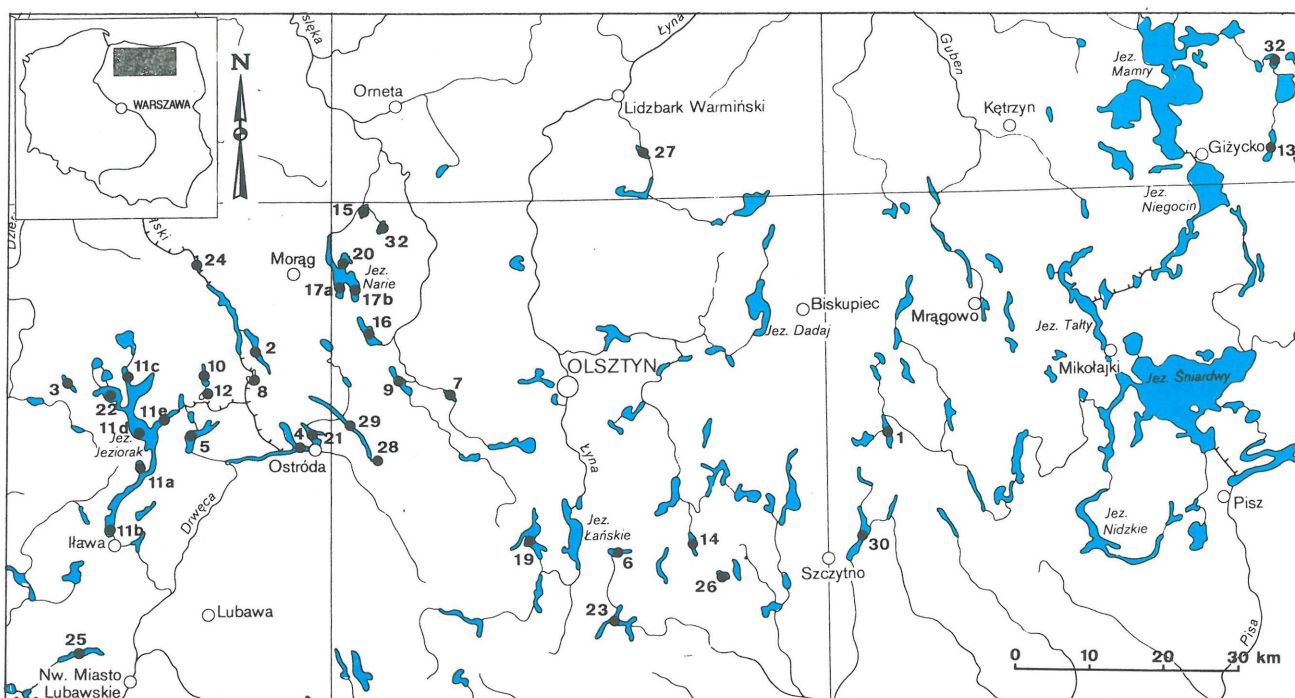
W Polsce badania zawartości pierwiastków śladowych w osadach jeziornych są wykorzystywane do opracowywania map geochemicznych oraz w pracach związanych z monitoringiem środowiska. W części tych prac są pobierane próbki osadów deponowanych w strefie brzegowej, w innych zaś — osadów z głębszych części jezior. W niniejszej pracy porównano zawartości pierwiastków śladowych w osadach 32 jezior z terenu Pojezierza Mazurskiego (ryc. 1) pobranych w strefie brzegowej oraz z głębozczków. W pracy wykorzystano dane analityczne z baz komputerowych Państwowego Instytutu Geologicznego: *Monitoringu geochemicznego osadów wodnych Polski* oraz *Bazy danych mapy geochemicznej Polski w skali 1 : 2 500 000*.

Zakres i metodyka pracy

Wybrane jeziora Pojezierza Mazurskiego są zróżnicowane pod względem morfometrycznym; powierzchnia ich waha się od 65 ha (jezioro Karnickie) do 3460 ha (jezioro Jeziorak). Dużym zróżnicowaniem charakteryzuje się także głębokość jezior. Do jezior głębokich o maksymalnej głębokości ponad 50 m należą jeziora Wukniki i Babięty Wielkie, a do jezior płytkich, o maksymalnej głębokości mniejszej niż 5 m — jezioro Pouzeńskie i Karnickie. Z każdego jeziora zbadano próbkę osadów akumulujących się w strefie brzegowej, jak i osadów gromadzących się na głębozczkach. W przypadku większych jezior: Jeziorak, Omulew i Drwęckie pobrano kilka próbek osadów w różnych częściach zbiorników.

Przygotowanie próbek osadów jeziornych do badań oraz ich oznaczenia chemiczne zostały wykonane w Centralnym Laboratorium Chemicznym Państwowego Instytutu Geologicznego. Do badań analitycznych wykorzystano frakcję osadów drobniejszą niż 0,2 mm. Próbki osadów jeziornych poddano trawieniu roztworem kwasu solnego 1 : 4 (temp. 90°C). Trawienie kwasowe jest szczególnie przydatne w badaniach geochemicznych z zakresu ochrony środowiska (Lis & Pasieczna, 1995). Podczas trawienia kwasowego są uwalniane pierwiastki słabo związane przez składniki osadów, a więc ta ich część, która może stanowić zagrożenie dla biosfery. Oznaczenia zawartości As, Ba, Cd, Cu, Cr, Co, Ni, Pb, Sr, V, Zn oraz Ca, Fe, Mg, Mn, P, S wykonano za

*Państwowy Instytut Geologiczny, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa



Ryc. 1. Mapa lokalizacyjna badanych jezior

pomocą spektrometru emisyjnego ze wzbudzeniem plazmowym (ICP). Oznaczenia zawartości rtęci wykonano metodą spektrometrii absorpcyjnej z zastosowaniem techniki zimnych par.

Wyniki badań i dyskusja

Dane statystyczne (zawartość minimalna, zawartość maksymalna, średnia arytmetyczna, średnia geometryczna i mediana) oznaczonych pierwiastków dla próbek osadów jeziornych pobranych z głębożków zestawiono w tab. 2, a dla osadów pobranych ze strefy brzegowej w tab. 3. W tab. 4 i 5 przedstawiono współczynniki korelacji między oznaczanymi pierwiastkami (znaczące współczynniki korelacji dla $n = 38$ są wyższe niż $r = 0,304$, przy $P = 95\%$).

Zawartość **arsenu** w większości badanych próbek osadów jeziornych była niższa niż 5 ppm. Jedynie w sześciu próbkach osadów pobranych na głębożkach stwierdzono wyższą zawartość, np. w jeziorach Isąg i Giłwa.

Bar w osadach gromadzących się w jeziorach w strefie brzegowej, jak również w jego głębszych partiach występuje w podobnych zakresach stężeń. Jednak średnia arytmetyczna i średnia geometryczna zawartości baru w osadach pobranych z głębożków były znacznie wyższe niż w osadach pochodzących ze strefy brzegowej (tab. 2 i 3). Zawartość baru w osadach pobranych z głębożków wykazują korelację z zawartością żelaza, w osadach pobranych ze strefy brzegowej zaś, z zawartością żelaza, fosforu i manganu (tab. 4 i 5).

Kadm w analizowanych osadach jeziornych był stwierdzany w niewielkiej ilości, najczęściej poniżej 0,5 ppm (granica wykrywalności). W 34% próbek osadów po-

branych z głębożków stwierdzono zawartość wyższą niż 0,5 ppm, dochodzącą do 2,2 ppm, podczas gdy tylko w jednej próbce osadów ze strefy brzegowej zawartość kadmu wynosiła 0,7 ppm.

Jedynie w ok. 30% próbek osadów pobranych w strefie brzegowej **miedź** miała wyższą zawartość niż 3 ppm — tło geochemiczne dla osadów jeziornych strefy brzegowej (Lis & Pasieczna, 1995), podczas gdy w osadach pobranych na głębożkach zawartość Cu niższe niż 3 ppm stwierdzono

Tab. 1. Wykaz opróbowanych jezior

Lp	Jezioro	Dorzecze	Powierzchnia (ha)	Głębokość	
				Max.	Sr.
1	Babięty Wielkie	Krutynia-Pisa	250	65,0	23,9
2	Bartężek	Kanał Elbląski-Drwęca	385	15,0	5,1
3	Bądze	Liwa-Nogat	150	6,7	2,8
4	Drwęckie	Drwęca-Wisła	881	22,3	5,7
5	Gil Wielki	Drwęca-Wisła	616	34,7	8,2
6	Jim	Omulew-Narew	176	25,8	7,6
7	Giłwa	Pastęka-Zalew Wiśłany	101	9,4	3,7
8	Ilińskie	Kanał Elbląski - Drwęca	235	27,4	8,6
9	Isąg	Pastęka-Zalew Wiśłany	401	54,5	14,2
10	Jańskowskie	Kanał Elbląski-Drwęca	153	16,5	7,3
11	Jeziorak	Iława-Drwęca	3 460	12,0	4,3
12	Karwickie	Kanał Elbląski - Drwęca	65	3,1	1,3
13	Kruklin	Węgorapa-Pregola	362	25,1	4,9
14	Małaszewskie	Kiermas-Wadąg	202	16,9	6,3
15	Mildzie	Pastęka-Zalew Wiśłany	112	19,4	9,0
16	Morąg	Pastęka-Zalew Wiśłany	400	20,1	8,0
17	Narie	Pastęka-Zalew Wiśłany	1 266	43,8	10,0
18	Omulew	Omulew-Narew	514	32,5	4,3
19	Pluszne	Marózka-Lyna	908	52,0	15,0
20	Ponary	Pastęka-Zalew Wiśłany	*	*	*
21	Pouzeńskie	Drwęca-Wisła	212	2,0	0,7
22	Piaskie	Iława-Drwęca	629	5,7	2,4
23	Rańskie	Krutynia-Pisa	294	7,8	3,8
24	Sambród	Kanał Elbląski-Drwęca	129	4,3	1,9
25	Skarłińskie	Drwęca-Wisła	294	15,1	7,5
26	Świętajno	Szkwa-Narew	176	9,1	4,6
27	Symsar	Lyna-Pregola	136	9,6	4,8
28	Szeląg Mały	Drwęca-Wisła	84	15,2	5,7
29	Szeląg Wielki	Drwęca-Wisła	599	35,5	13,5
30	Walpusz	Omulew-Narew	439	10,3	4,2
31	Wilkus	Węgorapa-Pregola	96,0	5,6	1,8
32	Wukniki	Pastęka-Zalew Wiśłany	117	68,0	23,3

* jezioro Ponary wchodzi w skład jeziora Narie

Tab. 2. Parametry statystyczne zawartości pierwiastków w osadach jeziornych pobranych z głębozczków

Pierwiastek	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Średnia arytmetyczna	Średnia geometryczna	Mediana
ppm					
Arsen	<5	9	<5	<5	<5
Bar	18	100	53	48	48
Kadm	<0,5	2,2	0,7	0,6	0,5
Chrom	2	27	10	8	8
Miedź	2	24	10	9	8
Kobalt	1	8	3	2	2
Rtęć	<0,05	0,11	<0,05	<0,05	<0,05
Nikiel	2	17	6	5	5
Ołów	11	76	34	30	32
Wanad	3	29	11	10	9
Stront	15	275	88	67	73
Cynk	26	155	83	74	79
Mangan	139	7 150	786	487	420
%					
Fosfor	0,045	0,278	0,108	0,099	0,097
Żelazo	0,12	3,28	1,01	0,78	0,72
Wapń	1,35	22,00	9,58	6,75	7,69
Magnez	0,12	0,57	0,29	0,27	0,29
Siarka	0,05	0,27	0,14	0,13	0,13

Tab. 3. Parametry statystyczne zawartości pierwiastków w osadach jeziornych pobranych z strefy brzegowej (N = 38)

Pierwiastek	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Średnia arytmetyczna	Średnia geometryczna	Mediana
ppm					
Arsen	<5	<5	<5	<5	<5
Bar	4	104	18	13	13
Kadm	<0,5	0,7	<0,5	<0,5	<0,5
Chrom	1	10	3	3	2
Miedź	1	117	7	3	2
Kobalt	<1	3	1	1	1
Rtęć	<0,05	0,09	<0,05	<0,05	<0,05
Nikiel	<1	7	2	2	2
Ołów	<5	156	15	8	7
Wanad	1	10	4	3	3
Stront	2	59	19	14	16
Cynk	12	233	41	28	23
Mangan	12	416	84	63	61
%					
Fosfor	0,01	0,296	0,049	0,039	0,039
Żelazo	0,12	3,28	1,01	0,78	0,72
Wapń	0,06	10,19	1,72	1,01	1,26
Magnez	0,01	0,29	0,12	0,10	0,13
Siarka	0,05	0,27	0,14	0,13	0,13

Tab. 4. Współczynniki korelacji (próbki pobrane na głębozczkach) r = 0,325, P = 0,05

	Ba	Co	Cr	Cu	Ni	Pb	Sr	V	Zn
Ca	0,252	-0,485	-0,596	-0,558	-0,536	-0,318	0,812	-0,590	-0,387
Mg	0,447	0,751	0,627	0,643	0,742	0,120	-0,182	0,640	0,360
Fe	0,763	0,622	0,383	0,309	0,375	-0,115	0,105	0,455	0,056
Mn	0,378	0,013	-0,183	-0,092	-0,187	-0,093	0,302	-0,048	-0,131
P	0,224	0,144	0,154	0,201	0,127	0,094	-0,127	0,109	0,206
C	-0,184	-0,023	0,454	0,305	0,310	0,727	-0,214	0,359	0,512
S	-0,013	-0,136	0,220	0,172	-0,014	0,521	-0,013	0,206	0,248

Tab. 5. Współczynniki korelacji (próbki pobrane ze strefy brzegowej)

	Ba	Cr	Cu	Ni	Pb	Sr	V	Zn
Ca	0,136	-0,077	-0,130	-0,047	-0,034	0,858	0,005	-0,099
Mg	0,361	0,412	-0,186	0,431	0,333	0,629	0,387	0,139
Fe	0,681	0,910	0,083	0,708	0,551	0,308	0,881	0,480
Mn	0,812	0,508	0,022	0,519	0,688	0,624	0,363	0,600
P	0,820	0,707	-0,005	0,636	0,871	0,457	0,589	0,687
S	0,168	0,188	0,023	0,291	0,060	0,342	0,409	0,246

tylko w 3 próbkach. Osady akumulujące się w głębszych partiach jezior charakteryzują się zwykle dużą zawartością substancji organicznej. Miedź wykazuje dużą zdolność do tworzenia połączeń z kwasami humusowymi, produktami rozkładu materiału organicznego (Kabata-Pendias & Pen-

dias 1993). Badania specjacji miedzi w osadach wodnych wykazały, że w dużej mierze jest ona związana z frakcją organiczno-siarczkową (Bojakowska, 1995).

Zawartość **chromu** w osadach deponowanych na głębozczkach jezior, jego średnia arytmetyczna i geometryczna zawartość oraz mediana były znacznie wyższe niż w osadach strefy brzegowej (tab. 2 i 3). Zaobserwowano korelację zawartości chromu z zawartością magnezu.

Kobalt w osadach badanych jezior był obecny w niewielkiej ilości, bardzo rzadko przekraczającej 3 ppm.

Rtęć w osadach jeziornych najczęściej występowała w bardzo niskich stężeniach. Podwyższoną zawartość Hg stwierdzono w kilku próbkach osadów, pobranych w strefie brzegowej, podczas gdy zawartość wyższą niż 0,05 ppm stwierdzono tylko w jednej próbce pobranej z głębozcza jeziora Ponary.

Nikiel — w osadach jeziornych pobranych z głębozczków obecny był w wyższych zawartościach (do 17 ppm), niż w próbkach pobranych w strefie brzegowej (do 7 ppm). W osadach z głębozczków obserwuje się wysoką korelację niklu z magnezem, a w strefie brzegowej — z żelazem.

Ołów występował w większym stężeniu w osadach deponowanych w strefie brzegowej, ale jego średnia geometryczna i arytmetyczna zawartość oraz mediana były znacznie wyższe dla osadów gromadzących się w głębozczkach. Zawartość ołowiu, w osadach pobranych w strefie brzegowej, wykazuje znaczącą korelację z zawartością manganu i fosforu, zaś osady pobrane na głębozczkach z zawartością siarki.

Stront stwierdzany był w wyższym stężeniu w osadach gromadzących się na głębozczkach, niż w osadach strefy brzegowej. Pierwiastek ten wykazuje wysoką korelację z zawartością wapnia (tab. 4 i 5), którego stężenie w osadach pobranych z głębozczków jest znacznie wyższe. Stosunek strontu do wapnia w osadach wodnych pobranych ze strefy brzegowej mieści się w zakresie od 0,006 do 0,036 i jest wyższy niż w osadach pobranych z głębozczków (0,0006–0,0016).

Wanad w osadach jeziornych pobranych z głębozczków cechuje się wyższą zawartością niż w osadach gromadzących się w strefie brzegowej. W osadach pobranych z głębozczków zawartość wanadu wykazuje korelację z zawartością magnezu i żelaza, a w osadach pobranych w strefie brzegowej korelację z żelazem; przy czym jest ona znacznie wyższa.

Cynk w osadach deponowanych w strefie brzegowej był stwierdzony w większym zakresie stężeń, ale jego średnia arytmetyczna i geometryczna zawartość oraz mediana były niższe w porównaniu do osadów deponowanych na głębozczkach jezior. Zawartość cynku w osadach pobranych z głębozczków wykazywała korelację z zawartością siarki, podczas gdy w osadach pobranych w strefie brzegowej z zawartością żelaza i fosforu

W celu określenia czynników wpływających na występowanie pierwiastków śladowych w osadach jeziornych zastosowano analizę czynnikową. Użycie tej metody statystycznej uzasadniają wyniki testu Kaisera–Mayera–Olkina (0,772 — dla zbioru danych ze strefy brzegowej oraz 0,762 — dla zbioru danych z głębozczków). Z analizy tej wyłączone wyniki oznaczeń arsenu, kadmu i rtęci występujących w większości próbek w bardzo niskiej zawartości.

Najważniejszy czynnik łączy występowanie kobaltu, chromu, niklu, wanadu z obecnością żelaza, zarówno w osadach pobranych z głębozczków, jak i osadach pobranych w strefie brzegowej. Współwystępowanie tych pierwiastków wskazuje, że najprawdopodobniej ich źródłem jest wietrzenie

Tab. 6. Analiza czynnikowa osady pobrane na głęboczkach

Pierwiastek	Czynnik 1	Czynnik 2	Czynnik 3
Kobalt	0,940	0,034	0,012
Nikiel	0,893	0,299	-0,164
Magnez	0,867	-0,130	-0,012
Wanad	0,850	0,419	-0,119
Chrom	0,822	0,445	-0,191
Miedź	0,772	0,497	-0,137
Żelazo	0,658	-0,094	0,564
Ołów	0,228	0,864	-0,209
Siarka	-0,198	0,808	0,067
Cynk	0,465	0,709	-0,158
Fosfor	0,134	0,358	0,198
Bar	0,516	0,016	0,787
Stront	-0,319	-0,138	0,734
Mangan	-0,104	0,151	0,682
Wapń	-0,502	-0,232	0,637
Eigenvalue	6,725	2,204	1,695
% var	44,8	14,7	11,3

okruchów skał, które są składnikami utworów polodowcowych.

Czynnik drugi łączy obecność w osadach ołowiu i cynku, których występowanie w tym środowisku jest przypuszczalnie pochodzenia antropogenicznego (np. transport samochodowy). W osadach pobranych z głęboczków występowanie tych metali jest związane z siarką, a więc może wskazywać na obecność ich w formie siarczków albo połączeń z siarką organiczną. W osadach pobranych w strefie brzegowej, pierwiastki te są połączone z fosforem i manganem.

Trzeci czynnik obejmuje współwystępowanie w osadach jeziornych wapnia i strontu. W przypadku osadów tworzących się na głęboczkach, jest to związane przede wszystkim z deponowaniem materiału autochtonicznego, głównie pochodzenia biogenicznego. W przypadku osadów pobranych ze strefy brzegowej czynnik ten łączy także z nimi występowanie magnezu, co wskazuje raczej na allogeniczne pochodzenie materiału.

Podsumowanie

Porównanie wyników badań geochemicznych osadów jeziornych pobranych z głęboczków i w strefie brzegowej wykazały, że zawartość większości badanych pierwiastków śladowych — As, Ba, Cr, Ni, V, Zn jest wyższa w próbkach osadów pobranych z głęboczków, niż w osadach pobranych ze strefy brzegowej. Jest to związane z akumulacją w głębszych partiach jezior osadów, charakteryzujących się dużą zawartością substancji organicznej oraz drobnych frakcji mineralnych, składników wiążących metale ciężkie, podczas gdy osady strefy brzegowej cechuje znacznie mniejszy udział tych składników.

Występowanie Co, Cr, Ni i V w osadach jezior jest uwarunkowane budową geologiczną terenu (utwory polodowcowe), na którym znajdują się badane jeziora. Obecność tych pierwiastków w osadach łączy się z występowaniem Fe; w strefie brzegowej mogą być one przede wszystkim związane z wodorotlenkami żelaza, w głęboczkach zaś przypuszczalnie z siarczkami żelaza. Źródłem tych pierwiastków w osadach jeziornych jest przede wszystkim wietrzenie materiału polodow-

Tab. 7. Analiza czynnikowa osady pobrane ze strefy brzegowej

Pierwiastek	Czynnik 1	Czynnik 2	Czynnik 3
Wanad	0,906	0,144	0,077
Chrom	0,869	0,397	-0,008
Żelazo	0,845	0,368	0,063
Nikiel	0,775	0,394	0,081
Kobalt	0,767	0,374	0,138
Siarka	0,403	-0,026	0,197
Bar	0,376	0,854	0,195
Cynk	0,232	0,824	-0,045
Ołów	0,359	0,811	0,080
Fosfor	0,498	0,739	0,225
Mangan	0,227	0,732	0,478
Miedź	-0,149	0,368	-0,296
Wapń	-0,135	-0,031	0,928
Stront	0,159	0,264	0,910
Magnez	0,415	0,132	0,694
Eigenvalue	6,952	2,277	1,473
% var	46,3	15,2	9,8

cowego i migracja uruchomionych składników do jezior wraz ze wpływem powierzchniowym.

Wyższe stężenie strontu w osadach pobranych z głęboczków, w porównaniu do osadów ze strefy brzegowej jest wynikiem akumulacji w nich większych ilości węglanów wapnia.

Obecność w osadach podwyższonej zawartości kadmu, ołowiu i cynku jest związana głównie z działalnością człowieka (transport samochodowy, stosowanie nawożenia). Akumulacja tych pierwiastków w osadach głęboczków jest związana z istnieniem związków siarką najprawdopodobniej z siarczkami lub w formie połączeń ze związkami organicznymi. W osadach powstających w strefie brzegowej metale te są związane przypuszczalnie z wytrąceniami związków fosforu i manganu.

L i t e r a t u r a

- BOJAKOWSKA I. 1995 — Instr. i Metody Bad. Geol., FIG, 55: 1–78.
- BOJAKOWSKA I. & BORUCKI J. 1992 — Kwart. Geol., 36: 469–480.
- BOJAKOWSKA I. & BORUCKI J. 1994 — Geol. Quart., 38: 155–168.
- CATALLO W.J., SCHLENKER M., GAMBRELL R.P. & SHANE B.S. 1995 — Environ. Sci. and Technol., 29: 1436–1445.
- FORSTNER U. 1989 — Contaminated Sediments. Springer-Verlag.
- HELIOS-RYBICKA E. 1986 — Z. Nauk. AGH. Geologia, 32: 1–123.
- KABATA-PENDIAS A. & PENDIAS H. 1993 — Biogeochemia pierwiastków śladowych. PWN.
- LIS J. & PASIECZNA A. 1995 — Mapa geochemiczna Polski w skali 1 : 2 500 000. Państw. Inst. Geol.
- OLLIVON D., GARBAN B. & CHESTERIKOFF A. 1995 — Water, Air and Soil Pollution, 81: 135–152.
- ROGNERUD S. & FJELD E. 1993 — Ambio, 4: 207–212.
- STARKEL L. 1991 — Geografia Polski. Środowisko Przyrodnicze. PWN.