

METALE W OSADACH DENNYCH JEZIORA WIGRY

Metals in bottom sediments of Wigry Lake

Dorota PROSOWICZ

*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
Zakład Geologii Podstawowej i Ochrony Środowiska;
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków;
e-mail: Dorota.Prosowicz@agh.edu.pl*

Treść: Przedstawiono koncentracje metali głównych (Fe, Mg, Mn) i śladowych (Cd, Cr, Cu, Zn) w osadach dennych jeziora Wigry. Badano osady powierzchniowe oraz rdzenie. Zawartości metali w osadzie zależą od typu osadu (gytia węglanowa, kreda jeziorna, gytia detrytusowa, piasek). Wyniki porównano z tłem geochemicznym (dla skał węglanowych, dla osadów wodnych Polski oraz lokalnym) i osadami dennymi innych jezior. Najwyższe koncentracje stwierdzono w gytii detrytusowej z Zatoki Hańczańskiej – najbardziej zanieczyszczonej części jeziora, najniższe zaś zawartości pierwiastków – w kredzie jeziornej tworzącej dno litoralu. Zaprezentowano korelacje między metalami. Porównując otrzymane wyniki badań koncentracji Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Zn w osadach dennych jeziora Wigry z innymi akwenami w Polsce i na świecie, jednocześnie traktując wszystkie typy osadów jako jeden zbiór, można stwierdzić, że jezioro Wigry jest zbiornikiem niezanieczyszczonym.

Słowa kluczowe: gytia, kreda jeziorna, metale, tło geochemiczne, jezioro Wigry, NE Polska

Abstract: Concentrations of metals (Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Zn) were analyzed in main types of the bottom sediments of Wigry Lake. The concentrations of metals depend strongly on the lithological type of the sediment (carbonate gyttja, lacustrine chalk, detritous gyttja, clastic sediments). Results of the study were compared to geochemical background and bottom sediments of different lakes. The highest concentrations of metals were found in detritous gyttja from Hanczanska Bay – the most polluted part of investigated area. Correlations between metals were presented. Most of presented metals in recent sediments of Wigry Lake occur bellow maximum allowable levels determined for unpolluted sediments. Concentrations of many elements in the recent sediments of Wigry Lake are much lower compared to those in many lakes in Poland and in the world.

Key words: gyttja, lacustrine chalk, trace metals, geochemical background, Wigry Lake, NE Poland

MATERIAŁ DO BADAŃ

Jeziro Wigry jest najgłębszym (73 m) i największym (21.2 km²) zbiornikiem Wigierskiego Parku Narodowego. Posiada ono silnie rozwiniętą linię brzegową (4.43) i jest ono piątym pod względem głębokości maksymalnej i rozwinięcia linii brzegowej oraz drugim pod względem pojemności (336.7 mln m³) jeziorem w Polsce (Jańczak 1999). Jest akwenem o bardzo złożonej batymetrii i morfologii misy jeziornej. Posiada rozległe płycizny i nieregularne lub wydłużone głębie dochodzące do 40–50 m. Jezioro to dzieli się na plosa = akweny = części jeziora (Fig. 1). Ploso Wigierskie (Północne) za pośrednictwem rynnowej części jeziora, zwanej Plosem Szyją, łączy się z Plosem Zakątońskim (Środkowym). Ploso Środkowe przechodzi w Ploso Bryzglowskie (Zachodnie), akwen o charakterze wytopiskowym. Ploso Bryzglowskie łączy się z najbardziej rynnową częścią Wigier, tzw. Zatoką Wigierki, którą od zachodu zamyka Zatoka Uklejowa (Fig. 1).

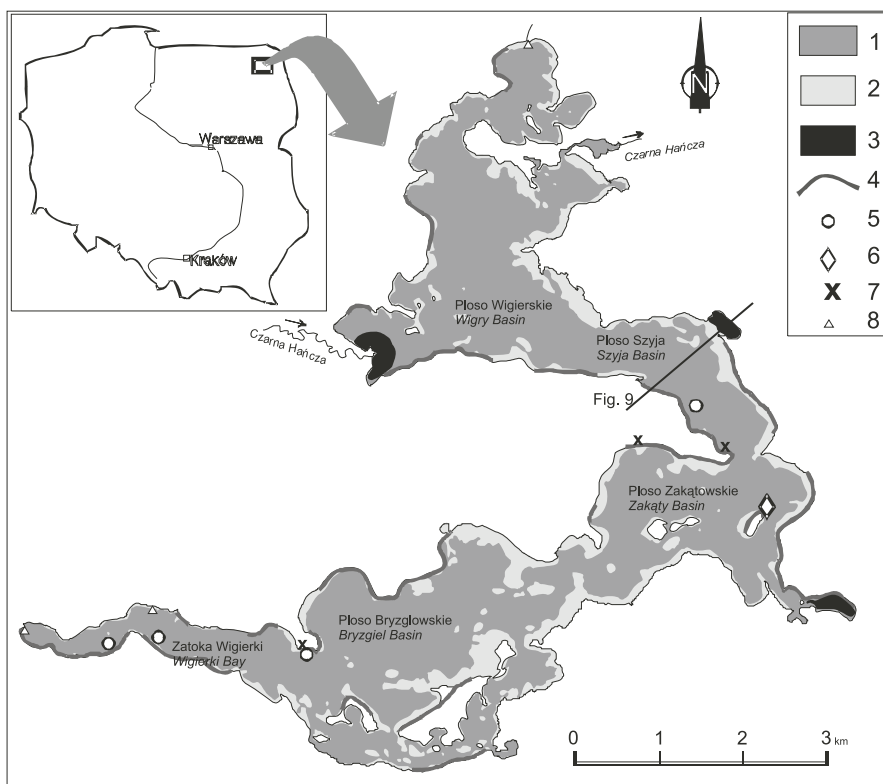


Fig. 1. Obszar badań i mapa osadów dennych jeziora Wigry (Rutkowski 2004): 1 – gytia węglanowa (profundal), 2 – kreda jeziorna (litoral), 3 – gytia detrytusowa, 4 – strefy sedimentacji klastycznej (bez skali), 5 – koluwia (bez skali), 6 – odsyp muszlowy, 7 – terasy, 8 – stożki piaszczyste

Fig. 1. Study area and the map of bottom sediments of Wigry Lake (Rutkowski 2004): 1 – calcarous gyttja (profundal), 2 – lacustrine chalk (littoral), 3 – detritous gyttja, 4 – area of clastic sedimentation (without scale), 5 – colluviums (without scale), 6 – shell outwash, 7 – terrace, 8 – sandy cone

Badania osadów obejmowały cały obszar jeziora Wigry. Próbkę zostały pobrane w latach 1999–2004 przez J. Rutkowskiego i K. Król (Rutkowski *et al.* 2001, 2002a, b, 2003a, b, 2004, 2005) (w latach 2001–2002 przy współudziale autorki) w okresie letnim (czerwiec – sierpień) oraz w latach 2002, 2003 w okresie wiosennym. Rdzenie pobierano sondą grawitacyjną, wbijającą się w dno, co umożliwiło uzyskanie rdzeni zawartych w przezroczystej rdzeniówce. Lokalizowano je za pomocą GPS. Znaczną część sond ulokowano na przekrojach sejsmoakustycznych. Głębokości, z których pobrano próby, mierzono echosondą FCV model 381/382 firmy Furuno, czasami także wieloparametrowym monitorem jakości wody YSI model 6920, a na płytczynach wyskalowaną tyczką.

W celu określenia przestrzennego rozmieszczenia metali śladowych w osadach dennych jeziora Wigry przeprowadzono badania ilości Ca, Mg, Cd, Cu, Cr, Fe, Mn, Zn w próbkach osadów dennych pobieranych w pięciu okresach opróbowania. Celem zbadania zawartości metali w pionowych profilach osadów było określenie ich koncentracji w przeszłości i współcześnie. Przebadano 25 profili głębokościowych. O ich lokalizacji decydowała odległość od brzegów jeziora oraz strefa głębokościowa. Profile poprzeczne pobrano na profilach sejsmoakustycznych.

METODYKA BADAŃ

Do przeprowadzenia metali z osadu do roztworu zastosowano metodę ekstrakcji metali stężonym 65% HNO₃ z dodatkiem 30% H₂O₂. Do ekstrakcji użyto odczynników o najwyższym stopniu czystości, a rozkład przeprowadzono w piecu mikrofalowym (MDS 2000). Badano próbki surowe osadów. Koncentracje Ca, Cd, Cr, Cu w roztworze oznaczono za pomocą spektrometru masowego z plazmą wzbudzoną indukcyjnie (ICP-MS) firmy Hewlett Packard, typ HP 4500. Koncentracje Ca, Fe, Mn, Zn określono metodą absorpcyjnej spektrometrii atomowej (ASA, model PYE UNICAM SP9). Zawartość Ca w całości przeliczono na CaCO₃. Do oznaczeń wybranych metali w próbkach kontrolnych zastosowano metodę atomowej spektrometrii emisyjnej z indukcyjnie wzbudzoną plazmą (ICP-AES – aparat Perkin-Elmer Plasma 40).

WYNIKI BADAŃ

Zakresy zawartości metali w podstawowych typach osadów oraz środowiskach sedymentacji jeziora Wigry podano w tabeli 1, zaś ich średnie zawartości oraz wartości tła geochemicznego podano w tabeli 2. Zmianę zawartości metali śladowych w osadach dennych z głębokością jeziora Wigry, z uwzględnieniem wartości tła geochemicznego lokalnego (T I), określonego przez Turekiana & Wedepohla (1961) dla skał węglanowych (T II) oraz tła geochemicznego dla osadów wodnych Polski (T III, wg Lis & Pasieczna 1995), przedstawiono na figurach 2–8.

Jako lokalne tło geochemiczne przyjęto średnią zawartość metali śladowych oznaczonych w pięciu próbkach kredy jeziornej, podścielającej bezpośrednio torf datowany w spągu metodą C-14 na 7970±70 lat BP (Gd –7830, Król 1998); wartości te wynoszą (mg/kg): 6044 Mg, 344 Fe, 82 Mn, 4 Zn, 0,2 Pb, 1,7 As, 0,99 Cr, 0,50 Cu i Cd poniżej granicy oznaczalności metody ICP-MS (Prosowicz & Helios-Rybicka 2002). Należy zaznaczyć, że w owym czasie ludzie na badanym terenie zajmowali się zbieractwem i łowiectwem.

Tabela (Table) 1

Zakresy zawartości CaCO₃ i metali w osadach dennych jeziora Wigry
CaCO₃ and metals contents in bottom sediments of Wigry Lake

Typ osadu/ środowisko sedymantacji <i>Type of sediment/ environment of sedimentation</i>	CaCO ₃	Fe	Cd	Cr	Cu	Mn	Zn
	[% wag.]	[mg/kg]					
Kreda jeziorna (n = 93) <i>Lacustrine chalk</i>	60.6–98.0	0.02–0.33	0.003–0.515	0.197–14.2	0.082–11.8	38.4–460	6.12–103
Gytia węglanowa (n = 192) <i>Calcareous gyttja</i>	18.8–84.3	0.02–1.07	0.005–1.28	0.020–21.6	0.003–54.0	35.8–1698	5.50–381
Gytia detrytusowa (n = 9) <i>Detritous gyttja</i>	3.0–31.3	0.25–2.6	0.120–1.29	0.817–22.6	3.07–59.7	86.4–1029	6.2–491
Piasek (n = 5) <i>Sand</i>	7.3–16.0	0.06–0.22	0.001–0.633	3.39–4.15	0.082–6.55	30.9–85.2	4.26–27.6
Litoral (n = 181) <i>Littoral</i>	3.0–98.0	0.02–2.6	0.001–1.29	0.00X–22.6	0.018–59.7	30.9–1029	4.26–491
Profundal (n = 120) <i>Profundal</i>	21.6–98.0	0.07–1.1	0.001–1.27	0.020–21.6	0.003–54.0	86.2–1698	13.8–369

n – liczba próbek / *number of samples*.

We wszystkich badanych typach osadów koncentracje Cd przekraczają przyjęte lokalne tło geochemiczne (Fig. 2). Większość próbek kredy jeziornej zawiera mniej niż 0.35 mg/kg Cd, a tylko trzy próbki – powyżej 0.5 mg/kg Cd. Większość próbek gytii detrytycznych charakteryzuje zawartość Cd większa niż 0.5 mg/kg. W około 30% próbek stężenie Cd przekracza 0.5 mg/kg.

Przeważająca liczba wszystkich próbek zawiera mniej niż 5 mg/kg Cr (Fig. 3), a tylko w jednej – kredy jeziornej – wartość ta jest przekroczone. Cztery próbki gytii detrytycznej zawierają więcej niż 16 mg/kg Cr. Koncentracje Cu w około 8% badanych próbek osadów są mniejsze niż 0.50 mg/kg, a w około 60% mniejsze niż 6 mg/kg Cr (tylko w jednej próbce piasku przekroczone jest ta wartość) (Fig. 4). Większość próbek gytii detrytycznej zawiera ponad 10 mg/kg Cu. Tylko dziesięć próbek charakteryzuje zawartość Fe powyżej 9000 mg/kg, w tym cztery (gytii detrytycznej) – zawartość przekraczająca 2% Fe (Fig. 5). W sześciu próbkach (2 gytii detrytycznej, 2 kredy jeziornej, 2 gytii węglanowej) stwierdzono zawartość Mg powyżej 6000 mg/kg (Fig. 6). Około 18% badanych próbek osadów zawiera mniej niż 82 mg/kg Mn, a dziesięć próbek – więcej niż 1000 mg/kg Mn (Fig. 7). Żaden z badanych osadów nie zawiera mniej niż 4 mg/kg Zn, a w czterech próbkach gytii detrytycznej przekroczone jest wartość 300 mg/kg Zn. Stężenie tego pierwiastka w około 95% próbek kredy jeziornej nie przekracza 48 mg/kg (Fig. 8).

Tabela (Table) 2

Średnie zawartości metali w podstawowych typach osadów dennych jeziora Wigry
w porównaniu z tłem geochemicznym

*Average values of metals in bottom sediments of Wigry Lake and their comparing
with geochemical background*

Typ osadu/ tło geochemiczne <i>Type of sediment/ geochemical background</i>	Metal [mg/kg] <i>Metal [mg/kg]</i>					
	Cd	Cr	Cu	Fe	Mn	Zn
Kreda jeziorna (<i>n</i> = 93) <i>Lacustrine chalk</i>	0.179	1.65	2.65	896	122	21.9
Gytia węglanowa (<i>n</i> = 192) <i>Calcareous gyttja</i>	0.306	3.82	7.01	3292	307	46.8
Gytia detrytusowa (<i>n</i> = 10) <i>Detritous gyttja</i>	0.625	11.4	28.4	13556	484	215
Piasek (<i>n</i> = 5) <i>Sand</i>	0.320	3.73	2.34	1380	57.7	16.0
Lokalne tło geochemiczne (Prosowicz & Helios-Rybicka 2002) <i>Local geochemical background (Prosowicz & Helios-Rybicka 2002)</i>	<0.001	1	0.50	344	82	4
Tło geochemiczne dla skał węglanowych (Turekian & Wedepohl 1961) <i>Geochemical background for carbonate rocks (Turekian & Wedepohl 1961)</i>	0.35	16	10	9000	1000	25
Tło geochemiczne dla osadów wodnych Polski (Lis & Pasieczna 1995) <i>Geochemical background for aquatic bottom sediments of Poland (Lis & Pasieczna 1995)</i>	<0.5	5	6	–	–	48

n – liczba próbek / *number of samples.*

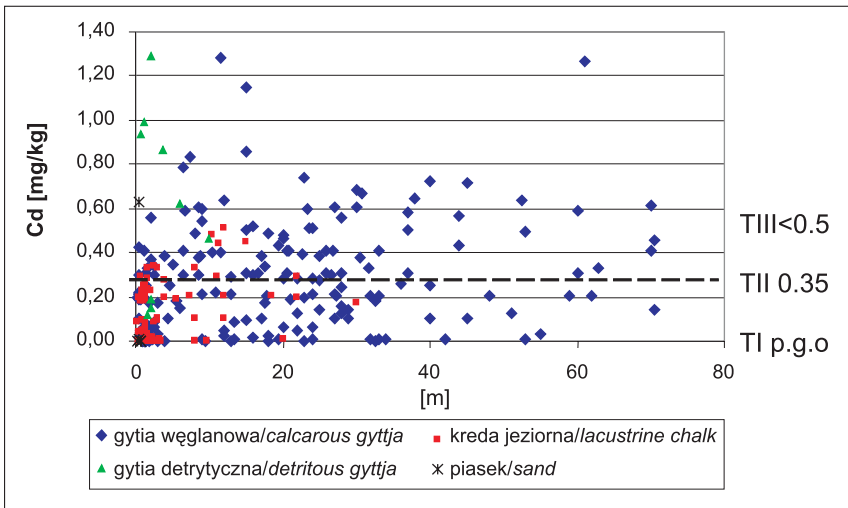


Fig. 2. Zmienność koncentracji Cd w poszczególnych typach osadów dennych z głębokością jeziora Wigry: T I – lokalne tło geochemiczne wg Prosovicz & Rybickiej (2002), T II – tło geochemiczne wg Turekiana & Wedepohla (1961) dla skał węglanowych, T III – tło geochemiczne dla osadów wodnych Polski (Lis & Pasieczna 1995)

Fig. 2. Concentrations of Cd in main types of sediments with the lake depth: T I – local geochemical background (Prosovicz & Helios-Rybicka 2002), T II – geochemical background for carbonate rocks (Turekian & Wedepohl 1961), T III – geochemical background for aquatic bottom sediments of Poland (Lis & Pasieczna 1995)

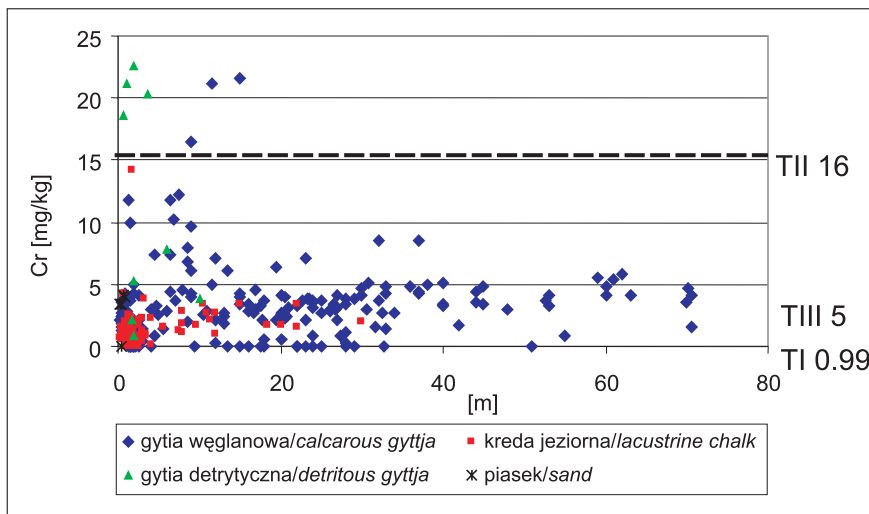


Fig. 3. Zmienność koncentracji Cr w poszczególnych typach osadów dennych z głębokością jeziora Wigry

Fig. 3. Concentrations of Cr in main types of sediments with the lake depth

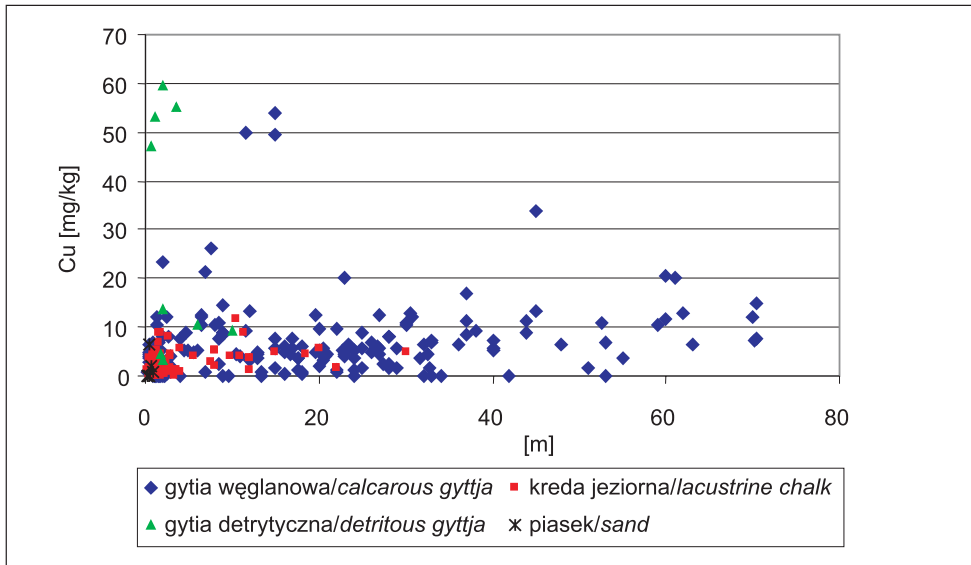


Fig. 4. Zmienność koncentracji Cu w poszczególnych typach osadów dennych z głębokością jeziora Wigry

Fig. 4. Concentrations of Cu in main types of sediments with the lake depth

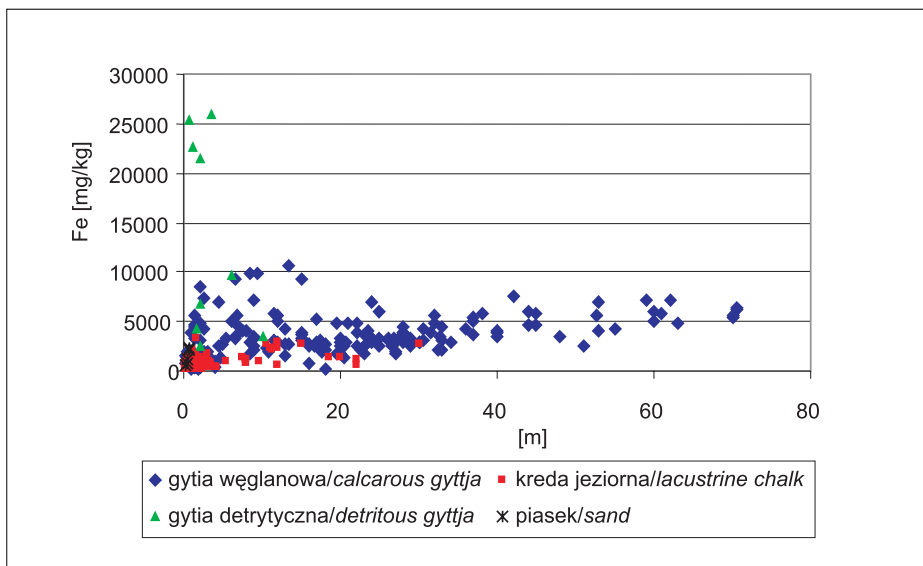


Fig. 5. Zmienność koncentracji Fe w poszczególnych typach osadów dennych z głębokością jeziora Wigry

Fig. 5. Concentrations of Fe in main types of sediments with the lake depth

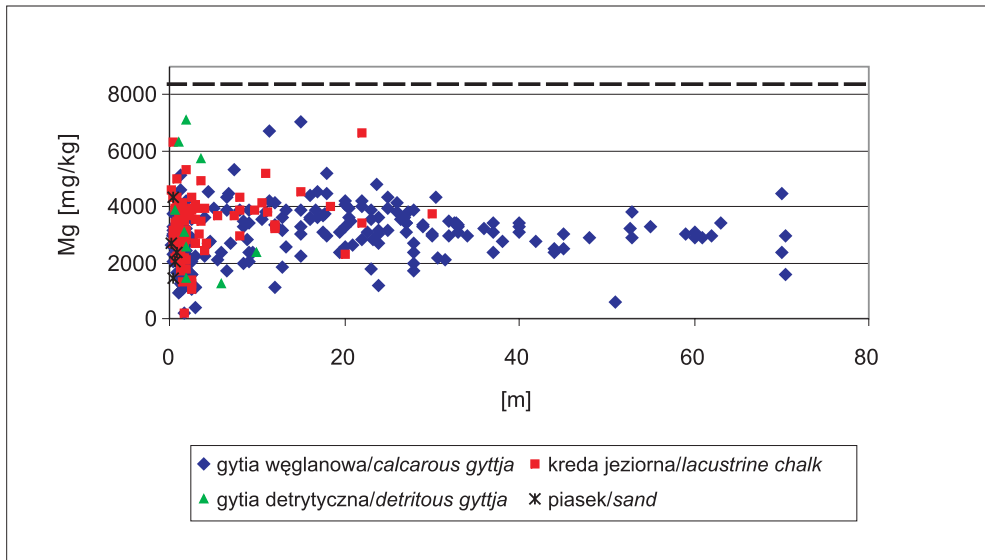


Fig. 6. Zmienność koncentracji Mg w poszczególnych typach osadów dennych z głębokością jeziora Wigry

Fig 6. Concentrations of Mg in main types of sediments with the lake depth

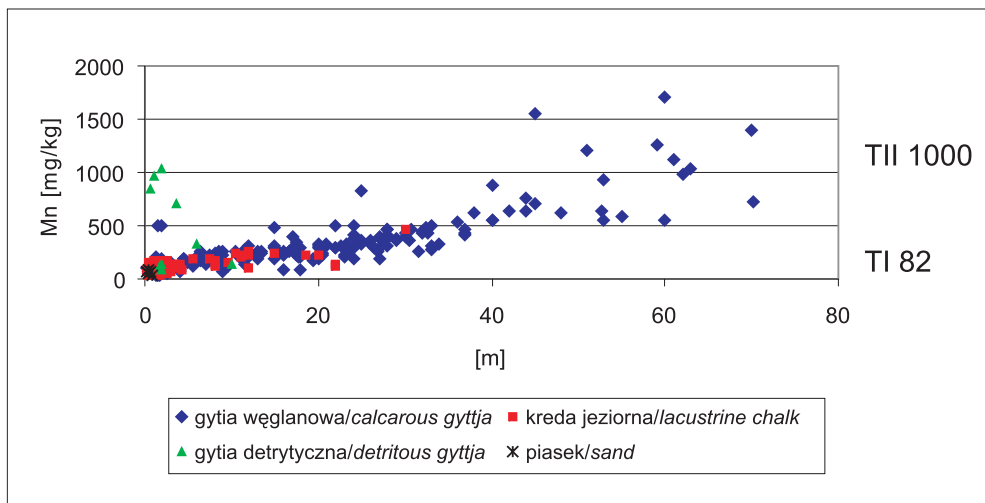


Fig. 7. Zmienność koncentracji Mn w poszczególnych typach osadów dennych z głębokością jeziora Wigry

Fig. 7. Concentrations of Mn in main types of sediments with the lake depth

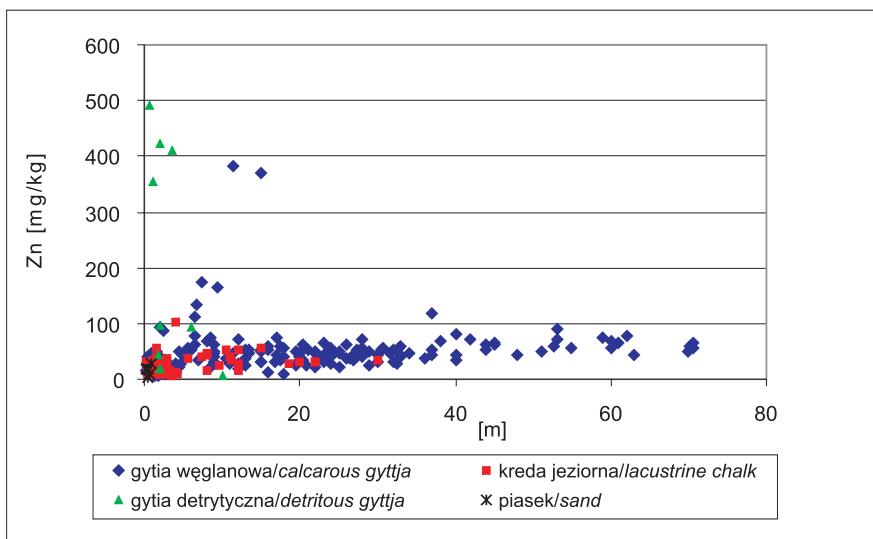


Fig. 8. Zmienność koncentracji Zn w poszczególnych typach osadów dennych z głębokością jeziora Wigry

Fig. 8. Concentrations of Zn in main types of sediments with the lake depth

Porównując wartości średnich arytmetycznych i median koncentracji metali śladowych w różnych środowiskach sedymentacji, tj. litoral i profundal, stwierdzono, że w przeważającej części wartości wyższe są w profundalu niż w litoralu. W osadach Płosa Wigierskiego średnie koncentracje Cd, Cr, Cu i Zn są porównywalne dla osadów z obu stref. Spowodowane jest to zaleganiem w płytkich strefach zatok Hańczańskiej i Zadworze gytii detrytycznych znacznie bardziej zanieczyszczonych od tych z pozostałej części basenu. W badaniach Bojakowskiej & Sokołowskiej (1997) akumulacji pierwiastków śladowych w osadach jeziornych w zależności od stref sedymentacji również zauważono wyższe stężenia metali w strefach głębokich.

Wyniki przeprowadzonych badań potwierdzają istotne znaczenie wyznaczenia lokalnego tła geochemicznego. Wartości tła geochemicznego podane przez Turekiana & Wedepohla (1961) dla skał węglanowych są wyższe, a w wypadku Cu i Cr znacznie wyższe, od wartości przyjętego tła lokalnego, które określono dla kredy jeziornej datowanej, izolowanej od wpływów antropogenicznych, o takim samym pochodzeniu i podobnych właściwościach fizykochemicznych jak kreda jeziorna z jeziora Wigry.

Uzyskane wyniki badań wykonanych przez Migaszewskiego *et al.* (2003) wskazują na wyraźnie obniżone poziomy koncentracji pierwiastków śladowych w osadach kopalnych, pobranych z rdzenia z Płosa Bryzglowskiego na głębokości 108–120 cm i z rdzenia z Zatok Wigierki na odcinku 39–50 cm, reprezentujące wg autorów lokalne tło geochemiczne. Wartości istotnie nie odbiegają od tych podanych przez Prosovicz & Helios-Rybicka (2002) w osadzie datowanym. Faktem jest, że rdzeń, z którego interwały miałyby wskazywać obniżone poziomy zawartości pierwiastków śladowych, pochodzi z Płosa Bryzglowskiego podobnie jak osad datowany.

Nasuwa się jednak pytanie, czy wartości przyjętego lokalnego tła geochemicznego powinno się odnosić do każdego typu osadu jeziora Wigry, czy tylko do kredy jeziornej, bo takową był osad wzorcowy. Z przeprowadzonych badań wynika, że osady kredy jeziornej są uboższe w metale śladowe niż osady gytii węglanowej czy też gytii detrytycznej. Zawierają one mniej substancji organicznej i przeważnie zalegają w strefie litoralnej (Rutkowski 2004), zatem odmiennej strefie sedimentacji niż pozostałe typy osadów. Z mapy osadów dennych pokrywających dno jeziora Wigry wg Rutkowskiego (2004) wynika, że na przeważającej powierzchni dna zbiornika zalega gytia węglanowa. Wydaje się, że w celu dokładniejszego rozpoznania jakości osadów dennych Wigier należałoby oznaczyć zawartości metali śladowych w kolejnych datowanych profilach.

Birch *et al.* (1996) badali profil pobrany z meromiktycznego, alpejskiego jeziora Cadagno i przyjęli za tło zawartości metali ciężkich w osadzie z głębokości poniżej 25 cm w profilu, gdzie wykresy pierwiastków osiągały asymptoty. Koncentracje wybranych metali ciężkich we współczesnych osadach jeziornych z obszarów odosobnionych, jezior europejskich i amerykańskich oraz w jeziorze Cadagno są wyższe, a nawet znacznie wyższe (Fe, Cr, Cu), od tych w osadach jeziora Wigry (Tab. 3). W pracy Johanssona *et al.* (1995) przedstawiono wyniki badań metali ciężkich w osadach dennych 49 jezior południowej Szwecji, jezior z obszarów odosobnionych (Tab. 4). Próbkę pobierano z najgłębszych partii jezior. Jako tło geochemiczne w szwedzkich osadach jeziornych przyjęto koncentracje metali ciężkich na odcinku 25–30 cm rdzeni.

Tabela (Table) 3

Koncentracje [ppm] wybranych metali ciężkich w preindustrialnych (przed rokiem 1850) osadach porównane do wartości tła geochemicznego określonego w osadach jeziora Cadagno (Birch *et al.* 1996)

Concentrations in ppm of selected heavy metals determined in several pre-industrial (pre 1850) sediments, compared to the background concentrations measured in Cadagno Lake sediments (Birch et al. 1996)

Pierwiastek <i>Element</i>	Współczesne osady jeziorne z obszarów odosobnionych* <i>Recent lake sediments from remote areas</i>	Średnie z europejskich i amerykańskich jezior** <i>Averages from European and American lakes</i>	Jezioro Cadagno <i>Cadagno Lake</i>
Fe	43400	26700	35000
Mn	760	860	500
Zn	118	111	100
Cr	62	49	35–45
Ni	66	50	40
Cu	45	29	50
Pb	34	35	20
Co	16	19	–
Hg	0.35	0.12	–
Cd	0.40	0.58	0.40

* Förstner & Salomons (1981),

** Håkanson (1980).

Tabela (Table) 4

Koncentracje [ppm] metali ciężkich w powierzchniowych osadach jeziornych
(Johansson *et al.* 1995)

*Concentrations of heavy metals [ppm] in the surface bottom lake sediments
(Johansson *et al.* 1995)*

Pierwiastek <i>Element</i>	49 jezior (południowa Szwecja) <i>49 lakes (Southern Sweden)</i>	54 jeziora (obszary odosobnione) <i>54 lakes (remote areas)</i>	Tło geochemiczne w północnej Szwecji <i>Geochemical background (Northern Sweden)</i>
Hg	0.15–0.60	0.10	0.07
Pb	40–400	30	<10
Cd	1–6	0.6	0.3
Zn	150–450	90	100
Cu	10–40	16	16

Zależność pomiędzy poszczególnymi pierwiastkami w osadzie może informować o powiązaniach geochemicznych między tymi pierwiastkami, a także o mobilności pierwiastków i źródłach ich pochodzenia. Pierwiastki o istotnym współczynniku korelacji ($0.5 \leq r < 1.0$) wskazują na to, że są one podobnie sorbowane na minerałach i uwalniane. Sprawdzono istnienie takich zależności w poszczególnych typach osadów jeziora Wigry. W tym celu obliczono współczynniki korelacji rangowej Spearmana pomiędzy poszczególnymi metalami (Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Zn) i głębokością zbiornika, a otrzymane wartości zestawiono w tabeli 5.

W kredzie jeziornej nie stwierdzono istotnych korelacji między metalami śladowymi, CaCO₃ i głębokością jeziora. W gytii węglanowej stwierdzono wysoką korelację pomiędzy Mn i Fe, Zn i Mn oraz Fe i Zn i głębokością jeziora w punktach opróbowania. Bardzo wysoką korelację zaobserwowano pomiędzy Zn i Fe oraz Mn i głębokością akwenu (Tab. 5). W gytii detrytycznej stwierdzono wysoką korelację pomiędzy parami pierwiastków Ca i Mn, Ca i Zn, Cd i Mn, Cr i Mn, Cu i Mn, Mg i Zn oraz Mg i głębokością jeziora w punktach opróbowania. Bardzo wysoką zależność zaobserwowano pomiędzy Ca i Mg, Cd i Zn, Cr i Zn, Cu i Zn, Fe i Mg, Fe i Mn, Fe i Zn, Mg i Mn, Mn i Zn oraz Ca i głębokością Wigier w punktach opróbowania. Prawie pełna korelacja istnieje w wypadku par metali: Ca i Fe, Cd i Cr, Cd i Cu, Cr i Cu (Tab. 5).

Figura 9 przedstawia zmienność koncentracji metali w osadach dennych pobranych wzdłuż profilu poprzecznego przez Płoso Szyja. Najlepszą korelację pomiędzy ilością metalu w osadzie a głębokością jeziora zaobserwowano na przykładzie Fe i Mn. Maksymalne stężenia Cd i Cu (0.67 i 12.08 mg/kg) stwierdzono w gytii węglanowej pobranej z głębokości 30.7 m, natomiast Cr, Fe i Zn (odpowiednio 7.79, 9675 i 93.4 mg/kg) w gytii detrytycznej (558). Ostatnie punkty opisywanego profilu (558 i 479) są usytuowane w odizolowanej Zatoce Cieszkinałki, gdzie zalega osadzona w warunkach antropopresji gytia detrytusowa.

Tabela (Table) 5

Korelacja rangowa Spearmana składników chemicznych z głębokością jeziora Wigry
Spearman correlation coefficients of chemical components and Wigry Lake depth

	CaCO ₃	Cd	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn	Głębokość jeziora [m] <i>Lake's depth</i>
Kreda jeziorna / <i>Lacustrine chalk</i> n = 93									
CaCO ₃	X	0.161	-0.345	-0.003	-0.125	0.433	0.363	0.288	0.132
Cd		X	-0.302	0.077	-0.070	0.161	-0.091	-0.234	0.001
Cr			X	0.399	0.425	-0.246	0.022	0.242	0.275
Cu				X	0.277	-0.159	0.145	0.206	0.368
Fe					X	0.087	0.432	0.253	0.454
Mg						X	0.321	0.412	0.087
Mn							X	0.414	0.498
Zn								X	0.361
Głębokość jeziora [m] <i>Lake's depth</i>									X
Gytia węglanowa / <i>Calcareous gyttja</i> n = 192									
CaCO ₃	X	0.147	-0.271	-0.025	-0.230	0.296	0.013	-0.164	0.136
Cd		X	0.039	0.459	-0.020	0.124	0.018	0.108	0.033
Cr			X	0.207	0.228	0.020	0.171	0.308	0.156
Cu				X	0.395	0.090	0.291	0.431	0.293
Fe					X	0.157	0.699	0.728	0.528
Mg						X	0.235	0.288	0.210
Mn							X	0.589	0.863
Zn								X	0.560
Głębokość jeziora [m] <i>Lake's depth</i>									X
Gytia detrytusowa / <i>Detritous gyttja</i> n = 10									
CaCO ₃	X	0.071	0.000	-0.036	-0.964	-0.714	-0.679	-0.607	0.750
Cd		X	0.964	0.915	0.273	0.236	0.527	0.709	0.141
Cr			X	0.976	0.333	0.297	0.552	0.745	0.141
Cu				X	0.345	0.321	0.515	0.770	0.166
Fe					X	0.756	0.855	0.733	-0.497
Mg						X	0.806	0.624	-0.632
Mn							X	0.758	-0.423
Zn								X	-0.399
Głębokość jeziora [m] <i>Lake's depth</i>									X

 Korelacja wysoka ($0.5 \leq r < 0.7$) / *Moderate correlation* ($0.5 \leq r < 0.7$),

 Korelacja bardzo wysoka ($0.7 \leq r < 0.9$) / *Strong correlation* ($0.7 \leq r < 0.9$),

 Korelacja prawie pełna ($0.9 \leq r < 1.0$) / *Perfect correlation* ($0.9 \leq r < 1.0$),

n – liczba próbek / *number of samples*.

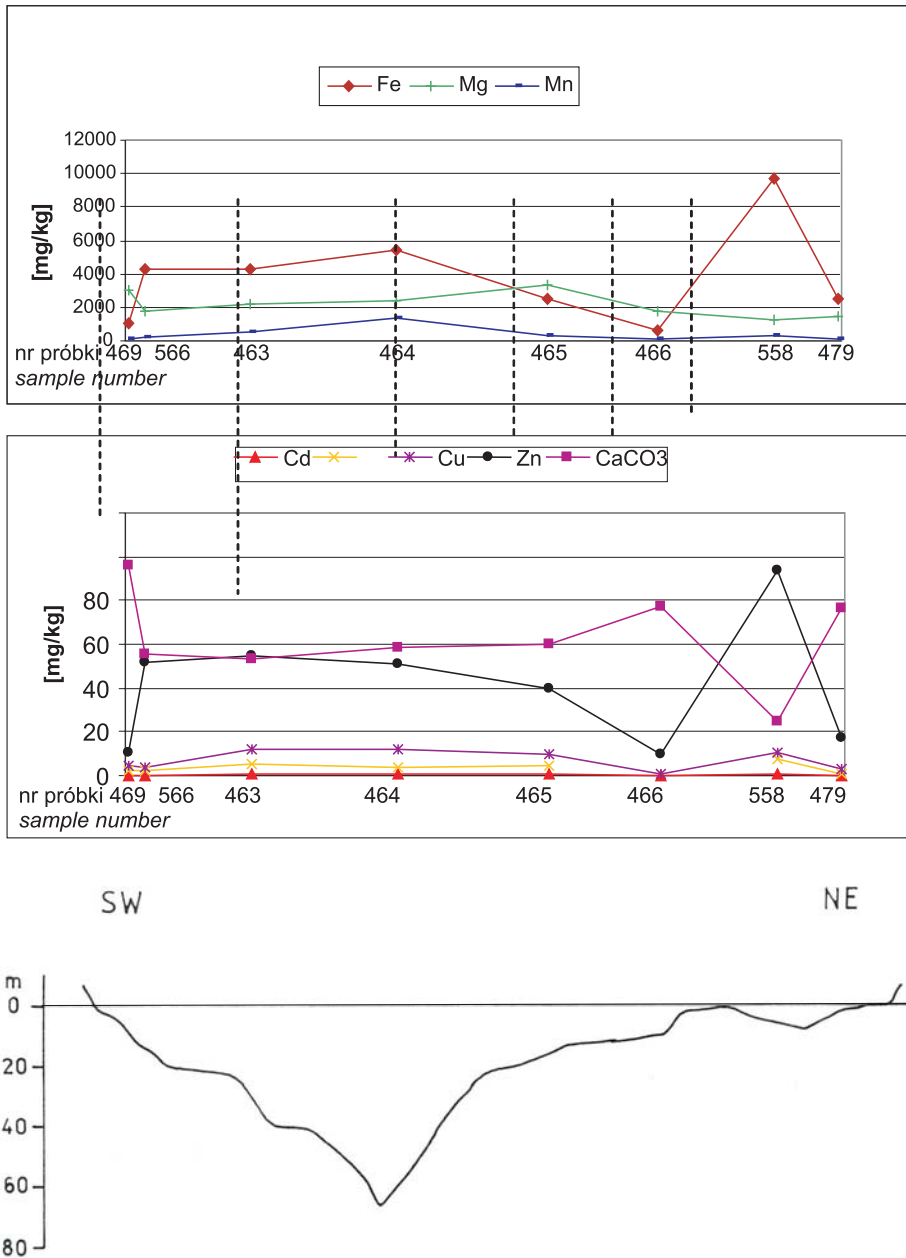


Fig. 9. Zawartość Fe, Mg, Mn, Cd, Cr, Cu, Zn oraz CaCO₃ w próbkach osadów dennych w przekroju poprzecznym Płosa Szyja; przekrój batymetryczny wg Rutkowskiego *et al.* (2003a)

Fig. 9. Concentration of Fe, Mg, Mn, Cd, Cr, Cu, Zn and CaCO₃ in bottom sediments samples situated along the cross section in Szyja Basin; bathimetric profile (Rutkowski *et al.* 2003a)

Tabela (Table) 6

Zawartości CaCO₃ i metali w wybranych rdzeniach osadów jeziora Wigry
CaCO₃ and metal contents in vertical profiles of bottom sediments of Wigry Lake

Profil (nr punktu)/ litologia <i>No. of profile/ lithology</i>	Przedział głębokości <i>Range of depth [cm]</i>	CaCO ₃	Cd	Cr	Cu	Fe	Mg	Mn	Zn
		[%]	[mg/kg]						
649 (Ploso Zakątowskie / <i>Zakąty Basin</i>)									
Gytia węglanowa <i>Calcareous gyttja</i>	0–5	59.5	0.142	0.00X	1.60	3362	4352	356	47.7
Gytia węglanowa <i>Calcareous gyttja</i>	25–30	40.9	0.010	0.00X	0.531	4068	1999	466	18.6
Gytia węglanowa <i>Calcareous gyttja</i>	50–55	38.5	0.00X	0.00X	0.276	4032	1897	359	17.2
466 (Ploso Szyja / <i>Szyja Basin</i>)									
Kreda jeziorna <i>Lacustrine chalk</i>	0–5	77.0	0.070	0.00X	0.918	672	1734	98	9.95
Kreda jeziorna <i>Lacustrine chalk</i>	25–30	78.1	0.099	0.150	0.889	1622	4630	70	6.29
Kreda jeziorna <i>Lacustrine chalk</i>	60–65	88.5	0.134	0.213	1.17	536	4476	60	6.89
Kreda jeziorna <i>Lacustrine chalk</i>	110–115	98.4	0.185	0.407	2.16	384	4908	54	7.43
196 (Ploso Wigierskie / <i>Wigry Basin</i>)									
Gytia węglanowa <i>Calcareous gyttja</i>	0–3	35.2	1.28	21.2	50.0	5863	6706	275	381
Gytia węglanowa <i>Calcareous gyttja</i>	8–12	25.7	1.60	24.1	58.9	6996	6707	293	503
Gytia węglanowa <i>Calcareous gyttja</i>	18–23	29.7	1.24	20.8	48.3	7818	5545	281	338
Gytia węglanowa <i>Calcareous gyttja</i>	27–30	25.0	0.943	20.3	59.6	19493	5595	304	231
178 (Ploso Bryzglowskie / <i>Bryzgiel Basin</i>)									
Kreda jeziorna <i>Lacustrine chalk</i>	0–5	88.3	0.186	1.58	4.10	909	3680	191	36.1
Kreda jeziorna <i>Lacustrine chalk</i>	18–24	83.7	0.006	0.00X	0.00X	17	2296	65.7	15.6
Kreda jeziorna <i>Lacustrine chalk</i>	50–54	85.9	0.005	0.00X	0.00X	714	2236	55.1	15.1

Pośród badanych profili wglębnych osadów dennych jeziora Wigry występują zarówno takie, w których widać wyraźną zmienność pionową zawartości metali śladowych, jak i takie, w których nie zauważa się żadnej prawidłowości (Tab. 6). Gytie węglanowe z profundalu wykazują wyraźną zmienność pionową. Próby pobrane z najgłębszych warstw rdzeni zawierają więcej CaCO_3 , mniej wody i wykazują większą gęstość objętościową niż te, które pochodzą bezpośrednio spod dna (Rutkowski *et al.* 2003a). Spośród badanych profili pionowych maksymalne stężenia metali śladowych stwierdzono w rdzeniu 196 gytii węglanowej z najsilniej zanieczyszczonej Zatoki Hańczańskiej (Tab. 6). Profile gytii węglanowej oraz kredy jeziornej z Płosa Szyja nie wykazują prawidłowości w zakresie korelacji pomiędzy ilością metali śladowych i głębokością. W profilu gytii węglanowej (649) z Płosa Zakątowskiego ilość Cd, Cu, Zn maleje w głąb osadu, podobnie w profilu kredy jeziornej (178) z Płosa Bryzglowskiego (Cd, Cr, Cu, Mg, Mn, Zn) (Tab. 6).

Próbki do badań zmienności pionowej pobierano z tego odcinka rdzenia, w którym obserwowano zmienność litologiczną osadu (a nie z regularnie wytypowanych odcinków o jednakowej miąższości). Stąd też nie wiadomo, czy nie są to zapisy zmian fizykochemicznych w środowisku jeziornym. W niedalekiej przeszłości ryby w jeziorze łowiono niewodami, które były ciągnięte po dnie zbiornika, co powodowało przemieszanie osadów. Brak prawidłowości w zmienności pionowej profili osadów może być spowodowana przemieszaniem osadów związanym z prawdopodobną bioturbacją. Kolejnym powodem może być fakt wbijania pali na płycznach. Może występować także efekt wentylacyjny wody i osadów, zwłaszcza w strefie litoralnej, który jest związany ze znacznym ruchem wody przy dnie, a co za tym – idzie zubożenie powierzchniowej warstwy o metale śladowe i przejście ich do toni wodnej. Jednak tak duża zawartość frakcji pylasto-ilastej w osadzie może obniżać wodoprzepuszczalność. Jak wykazują badania sejsmoakustyczne Rudowskiego *et al.* (2001) oraz Rutkowskiego *et al.* (2002b, 2003b), w przegłębieniach i na skłonach dna jeziora Wigry lokalnie występują osady zaburzone. Wyżej wymienieni autorzy uważają, że rozpoznanie sejsmoakustyczne powinno wyprzedzać wiercenia i być podstawą ich lokalizacji.

Wyższe niż w jeziorze Wigry zawartości Cd, Cr, Cu, Zn w osadach uzyskano w *Wynikach monitoringu geochemicznego osadów wodnych Polski* wykonanego na zlecenie Państwowej Inspekcji Ochrony Środowiska przez Państwowy Instytut Geologiczny (Bojakowska & Sokołowska 1994, 1996b, Bojakowska *et al.* 2000) (Tab. 7). W tych badaniach wyekstrahowano do roztworu również labilne formy metali, gdyż mineralizację próbek osadów jeziornych przeprowadzono rozcieńczonym HNO_3 (1+1) w piecu mikrofalowym. Przy takiej mineralizacji prawdopodobnie nie następuje całkowity rozkład substancji organicznej. W prezentowanej pracy zastosowano rozkład osadu za pomocą stężonego 65% HNO_3 i 30% H_2O_2 , co powoduje efektywniejszą mineralizację i przejście metali do roztworu (Sobczyński *et al.* 1996, 1997).

Wyniki koncentracji metali śladowych w 16 próbkach osadów jeziora Hańcza uzyskane przez Choińskiego *et al.* (1999) (Tab. 7) również są wyższe niż te dla jeziora Wigry. Autorzy jednak nie podają metodyki wyekstrahowania metali do roztworu, a szkoda, gdyż jezioro to jest najgłębsze w Polsce i leży w niedalekim sąsiedztwie jeziora Wigry.

Wyniki otrzymane przez Bojakowską *et al.* (1996a, 1997, 2000) oraz Bojakowską & Gliwicz (2003) dotyczą próbek pobranych z najgłębszych partii jezior. To może być poddyktowane założeniem gromadzenia się zanieczyszczeń w tych partiach akwenów. Takie

badania nie muszą być reprezentatywne dla całych zbiorników. Nie uwzględniają one fizykochemicznych różnic osadów pobranych z odmiennych stref sedymentacji (litoral, profundal) (Sobczyński *et al.* 1997, Zerbe *et al.* 1999, Prosovicz & Helios-Rybicka 2002). Poza tym porównanie otrzymanych własnych wyników ze średnimi wartościami uzyskanymi dla jezior Pojezierza Mazurskiego na podstawie jednej tylko próbki w przypadku każdego jeziora wykazało, że zawartości metali śladowych w osadach jeziora Wigry są niższe.

Tabela (Table) 7

Średnie zawartości metali [mg/kg] w osadach dennych jeziora Wigry i w innych jeziorach Polski

Mean concentrations of metals [mg/kg] in the bottom sediments of Wigry Lake and others lakes in Poland

Pochodzenie osadów <i>Origin of sediment</i>	Fe	Mn	Zn	Cd	Cr	Cu	Autor <i>Author</i>
Jezioro Wigry Gytia węglanowa (<i>n</i> = 192) <i>Wigry Lake</i> <i>Calcareous gyttja</i>	3292	307	46.8	0.306	3.82	7.01	niniejsza praca <i>this study</i>
Jezioro Wigry Kreda jeziorna (<i>n</i> = 93) <i>Wigry Lake</i> <i>Lacustrine chalk</i>	896	122	21.9	0.179	1.65	2.65	niniejsza praca <i>this study</i>
Jezioro Wigry Gytia detrytyczna (<i>n</i> = 9) <i>Wigry Lake</i> <i>Detritous Gyttja</i>	13556	484	215	0.625	11.4	28.4	niniejsza praca <i>this study</i>
Jezioro Wigry Piasek (<i>n</i> = 5) <i>Wigry lake</i> <i>Clastic sediment</i>	1380	57.7	16.0	0.320	3.73	2.34	niniejsza praca <i>this study</i>
Jezioro Wigry (<i>n</i> = 299) <i>Wigry lake</i>	2824	250	43.6	0.287	3.73	3.45	niniejsza praca <i>this study</i>
93 jeziora Polskie <i>93 lakes in Poland</i>	1900	75	29	<0.5	2	3	Lis & Pasieczna 1995
48 jezior Pojezierza Kaszubskiego <i>Kaszubskie lake district</i>	–	–	126	0.7	18	11	Bojakowska & Sokołowska 1996a
Jeziora RZGW Poznań 1994–1995 (<i>n</i> = 34)	–	–	144	0.9	9	9	Bojakowska & Sokołowska 1996b
Jeziora RZGW Gdańsk 1991–1997 (<i>n</i> = 139)	–	–	101	0.8	17	12	Bojakowska & Sokołowska 1996b

Tabela (Table) 7 cd.

Pojezierze Mazurskie <i>Mazurskie lake district</i>	10010	786	83	–	–	10	Bojakowska & Sokołowska 1997
Jeziora RZGW Poznań 1995–1999 (<i>n</i> = 185)	–	–	98	1.0	12	17	Bojakowska <i>et al.</i> 2000
Jeziora RZGW Szczecin 1995–1999 (<i>n</i> = 48)	–	–	110	1.1	13	13	Bojakowska <i>et al.</i> 2000
Jeziora RZGW Warszawa 1991–1999 (<i>n</i> = 196)	–	–	91	1.1	12	10	Bojakowska <i>et al.</i> 2000
Jeziora RZGW Wrocław 1995–1999 (<i>n</i> = 22)	–	–	111	1.4	11	29	Bojakowska <i>et al.</i> 2000
Jezioro Hańcza <i>Hańcza Lake</i>	9300	961	68.2	–	4.5	10	Choiński <i>et al.</i> 1999
Jezioro Góreckie <i>Góreckie Lake</i>	9150	350	64	3.4	9.7	12	Sobczyński 2000
11 jezior Wielkopolskiego Parku Narodowego <i>11 lakes in Wielkopolski National Park</i>	8800	538	86.2	4.5	11.3	15.2	Sobczyński 2000
Jezioro Maśluchowskie <i>Masluchowskie Lake</i>	5121	172	61.7	–	–	25.6	Solecki & Chibowski 2000
Jezioro Piaseczno <i>Piaseczno Lake</i>	5396	184	85.5	–	–	24.5	Solecki & Chibowski 2000
Zalew Zembrzyce <i>Zembrzyce Reservoir</i>	–	–	13.2	0.118	2.15	–	Dobrowolski, & Skowrońska 2001
Jezioro Zegrzyńskie <i>Zegrzyńskie Lake</i>	–	–	83	–	59	23	Taboryska & Dojlido 2001
Jeziora RZGW Gdańsk 1991–2002	–	–	105	0.9	29	–	Bojakowska & Gliwicz 2003
Jeziora RZGW Poznań 1991–2002	–	–	101	0.9	12	–	Bojakowska & Gliwicz 2003
Jeziora RZGW Szczecin 1991–2002	–	–	118	1.1	12	–	Bojakowska & Gliwicz 2003
Jeziora RZGW Warszawa 1991–2002	–	–	86	1.0	–	–	Bojakowska & Gliwicz 2003
Jeziora RZGW Wrocław 1991–2002	–	–	119	1.2	–	–	Bojakowska & Gliwicz 2003

RZGW – Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej,
n – liczba próbek / *number of samples*.

Wyniki badań uzyskane przez Soleckiego & Chibowskiego (2000) dla Cu, Zn, Fe w osadach jezior Maśluchowskiego i Piaseczno (położonych na stosunkowo czystym Pojezierzu Łęczyńsko-Włodawskim) wykazują mniejsze koncentracje, a w przypadku Mn – większe niż w jeziorze Wigry. Również w badaniach Sobczyńskiego (2000) w osadach dennych jeziora Góreckiego i 11 innych jezior Wielkopolskiego Parku Narodowego stwierdzono wyższe stężenia Fe, Mn, Cr, Cu, Cd, Zn we frakcji < 0.2 mm, przy czym stosowano tę samą metodykę roztwarzania próbek jak w badaniach autorki. W osadach dennych Zalewu Zemborzycyckiego Dobrowolski & Skowrońska (2001) stwierdzili niższe stężenia Cd, Cr i Zn niż te w jeziorze Wigry. W pracy jednak nie wspomniano o reagentach użytych do ekstrakcji metali do roztworu, jak i o frakcji granulometrycznej badanych 10 próbek osadów. Badania osadów dennych Jeziora Zegrzyńskiego wykazały wyższe niż łącznie we wszystkich facjach jeziora Wigry stężenia Zn, Cu, Cr w pięciu próbkach osadów dennych (mineralizowanych w HCl (1+1) + 30% H₂O₂) (Taboryska & Dojlido 2001).

Uwzględniając zaproponowaną przez Bojakowską & Sokołowską (1998) klasyfikację osadów wodnych na podstawie kryteriów geochemicznych, można stwierdzić, że średnie dla całego jeziora Wigry stężenia badanych metali śladowych (Cd, Cr, Cu, Zn) są niższe od tła geochemicznego proponowanego przez autorki. Oceny jakości osadów jeziora Wigry nie można przeprowadzić na podstawie klasyfikacji Müllera (1981), gdyż podane w niej zakresy stężeń pierwiastków odnoszą się do frakcji < 20 µm osadów.

Stosując klasyfikację stopnia zanieczyszczenia osadów słodkowodnych (U.S. EPA, 1977, *vide* Migaszewski & Gałuszka 2003) do osadów jeziora Wigry, stwierdzono, że są one niezanieczyszczone. Wyjątkiem jest tu Fe, którego zawartość znacznie przekracza ustalone dopuszczalne normy, ustalone na poziomie 25 ppm. W osadach Wigier koncentracje Fe są typowe dla osadów silnie zanieczyszczonych (biorąc pod uwagę poszczególne typy osadu). Wysokie zawartości tego pierwiastka nie tylko w osadach powierzchniowych świadczą o jego naturalnym pochodzeniu. Wytyczne dla osadów słodkowodnych ustalone przez Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME 1995, *vide* Migaszewski & Gałuszka 2003) nie podają dopuszczalnych zawartości Fe i Mn, które niekorzystnie wpływałyby na organizmy wodne.

Ustalenie stopnia zanieczyszczenia osadów wodnych na podstawie światowych lub krajowych standardów nie zawsze jest zadowalające ze względu na istnienie lokalnych anomalii geochemicznych. Inną przyczyną istniejących różnic nawet w obrębie tego samego obszaru badań jest odmienna litologia, inna metodyka badań i różna frakcja granulometryczna badanego osadu. Badania osadów dennych są prowadzone dla frakcji ziarnowych (w mm): <0.2, <0.18, <0.125, <0.1, <0.063, <0.04, <0.02, <0.016, <0.006 i <0.002 (Förstner & Wittmann 1979, Müller 1979, Salomons & Förstner 1984, Förstner 1989, Müller & Furrer 1994, Kralik 1999). Aleksander-Kwaterczak (2007) analizując w osadach rzeki Odry rozkład zawartości metali ciężkich pomiędzy frakcje ziarnowe (w mm): 2–0.2, 0.2–0.1, 0.1–0.063, 0.063–0.02 i <0.02 stwierdziła, że największy ładunek wszystkich metali wnoszą do osadu frakcje: drobnoziarnista o dużej powierzchni rozwiniętej, ze względu na wysokie zawartości w niej metali lub/i frakcja gruboziarnista ze względu na jej duży udział w całkowitej masie osadu.

Zawartość metali śladowych we frakcji poniżej 2 mm współczesnych osadów jeziornych waha się w dosyć szerokich granicach, a wartości mediany dla 87 próbek są następujące

(mg/kg): Fe: 43400, Mn: 760, Zn: 118, Cr: 62, Cu: 45, Pb: 34, Ni: 66, Co: 16, Hg: 035, Cd: 0.40, przy zawartości CaCO₃ równej 16% (Förstner & Wittmann 1981).

Zakresy stężeń niektórych pierwiastków śladowych, otrzymanych z 12 próbek osadów dennych jeziora Ładoga (Rosja), wyniosły (mg/kg): Cr: <1–80, Mn: 121–3403, Fe: 8928–43623, Cu: <1–36, Zn: 23–188, Cd: <1–3.5, i są uważane za charakterystyczne dla zbiorników niezanieczyszczonych (Ristola *et al.* 1996). W zanieczyszczonym jeziorze Hazar (Turcja) zakresy stężeń pierwiastków śladowych w 8 próbkach osadów wyniosły (mg/kg): Cr: 17–79, Mg: 6250–22500, Zn: 46–210, Fe: 3650–30000, Mn: 85–625, Cu: 10–59 (Özmen *et al.* 2005). Średnie zawartości w osadach dennych oligotroficznego jeziora Pääjärvi (Finlandia) wynosiły (mg/kg): Fe 21200, Mn 140, Zn 58, Cu 13, Cr 13 (Kähkönen 1997). Zakresy stężeń Cu i Cd w osadach dennych 11 jezior Łotwy wynoszą odpowiednio 4.37–16.34 i 0.41–5.31 mg/kg (Kļaviņš *et al.* 1998).

Bojakowska (2001) przedstawiła propozycję klasyfikacji osadów wodnych zanieczyszczonych (m.in. metalami śladowymi) (Tab. 8). Traktując typy osadów jeziora Wigry jako osobne zbiory, zauważono, że jedynie gytia detrytusowa znajduje się w II klasie (ze względu na zawartość Cu i Zn). Pozostałe typy osadów można zaklasyfikować do I klasy czystości.

Tabela (Table) 8

Propozycja klasyfikacji osadów wodnych zanieczyszczonych metalami śladowymi (Bojakowska 2001, zmienione).

Proposal classification of aquatic bottom sediments contaminated by trace metals (Bojakowska 2001, modified)

	Klasa I <i>Class I</i>	Klasa II <i>Class II</i>	Klasa III <i>Class III</i>	Klasa IV <i>Class IV</i>
Pierwiastki [mg/kg] / <i>Elements [mg/kg]</i>				
As	7	30	70	>70
Cd	0.7	3.5	6	>6
Cr	50	100	400	>400
Cu	20	100	300	>300
Pb	30	100	200	>200
Hg	0.2	0.7	0.7	>0.7
Ni	16	40	50	>50
Zn	125	300	1000	>1000

PODSUMOWANIE

Przedstawione w pracy wyniki badań wiążano z konkretnym typem osadu i środowiskiem sedymentacji. Stwierdzono, że najwyższe koncentracje Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Zn zawiera allochtoniczna gytia detrytusowa, zalegająca w silnie zanieczyszczonych, najczęściej o eutroficznym charakterze, zatokach (Hańczańska, Cieszkinajki). Niższym udziałem badanych metali charakteryzuje się gytia węglanowa, pokrywająca przeważającą część dna jeziora Wigry. Najmniejsze ilości pierwiastków śladowych stwierdzono w kredzie jeziornej tworzącej dno litoralu.

Analiza wykazała, że rdzenie kredy jeziornej zawierają przeważnie niższe stężenia metali niż rdzenie gytii węglanowej. Wydaje się, że pionowa zmienność stężenia metali może być spowodowana fluktuacją czynników fizykochemicznych i biogenicznych.

Porównując otrzymane wyniki badań koncentracji Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Zn w osadach dennych jeziora Wigry z innymi akwenami w Polsce i na świecie, jednocześnie traktując wszystkie typy osadów jako jeden zbiór, można stwierdzić, że jezioro Wigry jest zbiornikiem niezanieczyszczonym.

Przedstawione wyniki badań metali śladowych w osadach dennych jeziora Wigry wykazują, jak duże może być przestrzenne zróżnicowanie zawartości określonych pierwiastków. Tym samym nietrudno stwierdzić, że badania wykonane w jednym punkcie (bez względu na typ osadu i strefę sedimentacji) nie są miarodajne dla oceny stopnia zanieczyszczenia zbiornika i nie muszą wyrażać stanu średniego.

Niniejszy artykuł jest częścią pracy doktorskiej, której promotorem była Profesor dr hab. inż. Edeltrauda Helios-Rybicka. Pragnę Jej w tym miejscu podziękować za opiekę. Szczególne podziękowania składam Profesorowi dr. hab. Jackowi Rutkowskiemu za cenne merytoryczne dyskusje i uwagi podczas prowadzenia badań. Pracownikom Węgierskiego Parku Narodowego jestem bardzo wdzięczna za wszelką pomoc i życzliwość w trakcie prac terenowych.

LITERATURA

- Aleksander-Kwaterczak U., 2007. *Rozmieszczenie metali śladowych w rdzeniach osadów wybranych rzek Polski*. UWND AGH, Kraków, 1–114.
- Birch L., Hanselmann K.W. & Bachofen R., 1996. Heavy metal conservation in lake Cadagno sediments: historical records of anthropogenic emissions in a meromictic alpine lake. *Water Research*, 30, 3, 679–687.
- Bojakowska I., 2001. Kryteria oceny zanieczyszczenia osadów wodnych. *Przegląd Geologiczny*, 49, 3, 213–219.
- Bojakowska I. & Gliwicz T., 2003. *Wyniki geochemicznych badań osadów wodnych Polski w latach 2000–2002*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa, 46–79.
- Bojakowska I., Gliwicz T. & Sokołowska G., 2000. *Wyniki monitoringu geochemicznego osadów wodnych Polski w latach 1998–1999*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa, 1–80.
- Bojakowska I. & Sokołowska G., 1994. *Wyniki monitoringu geochemicznego osadów wodnych Polski w latach 1991–1993*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Państwowa Inspekcja Ochrony Środowiska, Warszawa, 1–55.
- Bojakowska I. & Sokołowska G., 1996a. Metale ciężkie w osadach jezior Pojezierza Kaszubskiego. *Przegląd Geologiczny*, 44, 9, 920–923.
- Bojakowska I. & Sokołowska G., 1996b. *Wyniki monitoringu geochemicznego osadów wodnych Polski w latach 1994–1995*. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Państwowy Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa, 1–65.

- Bojakowska I. & Sokołowska G., 1997. Akumulacja pierwiastków śladowych w osadach jeziornych w zależności od strefy ich sedimentacji. *Przegląd Geologiczny*, 45, 5, 505–508.
- Bojakowska I. & Sokołowska G., 1998. Geochemiczne klasy czystości osadów wodnych. *Przegląd Geologiczny*, 46, 49–54.
- Choiński A., Grzebisz W. & Skowron R., 1999. Chemizm osadów dennych jeziora Hańcza. *Konferencja Limnologiczna „Naturalne i antropogeniczne przemiany jezior”*, Radzyń k. Sławy 20–22 września 1999, 27–33.
- Dobrowolski R. & Skowrońska M., 2001. Distribution and Environmental Mobility of Selected Trace Metals in the Zemborzyce Reservoir. *Polish Journal of Environmental Studies*, 10, 5, 383–388.
- Förstner U., 1989. *Contaminated Sediments*. Springer-Verlag, Berlin, 1–157.
- Förstner U. & Salomons W., 1981. Trace metal analysis on polluted sediments. *Delft Hydraulics Laboratory*, 248, 1–13.
- Förstner U. & Wittmann G.T.W., 1981. *Metal Pollution in the Aquatic Environment*. Springer-Verlag, Berlin. 1–486.
- Håkanson L., 1980. An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach. *Water Research*, 14, 975–1101.
- Jańczak J., 1999. *Atlas jezior Polski. Tom III*. IMGiW, Poznań, 1–240.
- Johansson K., Andersson A. & Andersson T., 1995. Regional accumulation pattern of heavy metals in lake sediments and forest soils in Sweden. *The Science of the total Environment*, 160/161, 373–380.
- Kļaviņš M., Briede A., Parele E., Rodinov V. & Kļaviņa I., 1998. Metal accumulation in sediments and benthic invertebrates in lakes of Latvia. *Chemosphere*, 36, 15, 3043–3053.
- Kralik M., 1999. A rapie procedure for environmental sampling and evaluation of polluted sediments. *Applied Geochemistry*, 14, 807–816.
- Król K., 1998. Wstępne wyniki badań kredy jeziornej z jeziora Wigry. *Sprawozdania z czynności i posiedzeń PAU*, LXI, Kraków, 11–112.
- Lis J. & Pasieczna A., 1995. *Atlas geochemiczny Polski*. PiG, Warszawa, 1–74.
- Migaszewski Z.M. & Gałuszka A., 2003. *Zarys geochemii środowiska*. Wydawnictwo Akademii Świętokrzyskiej, Kielce, 1–339.
- Migaszewski Z. M., Gałuszka A. & Paślawski P., 2003. Baseline versus background concentrations of trace elements in sediments of Lake Wigry, NE Poland. *Limnological Review*, 3, 165–172.
- Müller G., 1979. Schwermetalle in den Sedimenten des Rheins – Veränderungen seit 1971. *Umschau*, 79, 778–783.
- Müller G., 1981. Die Schwermetallbelastung der Sedimente des Neckars und seiner Nebenflüsse: Eine Bestandsaufnahme. *Chemiker Zeitung, Chemie, Technische Chemie, Chemiewirtschaft*, 105, 6, 157–164.
- Müller G. & Furrer R., 1994. Die Belastung der Elbe mit Schwermetallen, Erste Ergebnisse von sedimentuntersuchungen. *Naturwissenschaften*, 81, 401–405.

- Özmen H., Kūlahci F., Çukurovali A. & Dođru M., 2005. Concentrations of heavy metal and radioactivity in surface water and sediment of Hazar Lake (Elazig, Turkey). *Chemosphere*, 55, 401–408.
- Prosołowicz D. & Helios-Rybicka E., 2002. Trace metals in recent bottom sediments of Lake Wigry (Bryzgiel Basin). *Limnological Review*, 2, 323–332.
- Ristola T., Pellinen J., Van Hoof P. L., Leppänen M. & Kukkonen J., 1996. Characterization of Lake Ladoga sediments II. Toxic chemicals. *Chemosphere*, 32, 6, 1179–1192.
- Rudowski S., Rutkowski J., Król K. & Krzysztofiak L., 2001. O niektórych strukturach sedymentacyjnych w osadach dennych jeziora Wigry w świetle badań sejsmoakustycznych. *Sprawozdania z czynności i posiedzeń PAU*, LXIV, Kraków, 189–194.
- Rutkowski J., 2004. Osady jeziora Wigry. *Rocznik Augustowsko-Suwalski*, 4, 19–36.
- Rutkowski J., Król K., Krzysztofiak L. & Prosołowicz D., 2002a. Recent sediments of the Wigry Lake (Bryzgiel Basin). *Limnological Review*, 2, 353–363.
- Rutkowski J., Król K., Krzysztofiak L. & Prosołowicz D., 2003a. Recent sediments of the Wigry Lake (Szyja Basin), NE Poland. *Limnological Review*, 3, 197–204.
- Rutkowski J., Król K., Krzysztofiak L. & Prosołowicz D., 2004. Osady rynnowych części jeziora Wigry – Płoso Szyja i Zatoka Wigierki – porównanie. *Prace Komisji Paleogeografii Czwartorzędu PAU*, I, Kraków, 43–51.
- Rutkowski J., Król K., Krzysztofiak L. & Prosołowicz D., 2005. Mapa osadów pokrywających dno jeziora Wigry. *Prace Komisji Paleogeografii Czwartorzędu Polskiej Akademii Umiejętności, t. III*, Kraków, 171–178.
- Rutkowski J., Rudowski S., Pietsch K., Król K. & Krzysztofiak L., 2002b. Sediments of Lake Wigry (NE Poland) in the light of high-resolution seismics (seismoacoustic) survey. *Limnological Review*, 2, 363–373.
- Rutkowski J., Rudowski S., Pietsch K., Król K. & Krzysztofiak L., 2003b. Odwzorowanie współczesnych osadów jeziora Wigry w obrazie sejsmoakustycznym. *Prace Komisji Paleogeografii Czwartorzędu PAU*, I, Kraków, 31–39.
- Salomons W. & Förstner U., 1984. *Metals in Hydrocycle*. Berlin, Springer-Verlag, 1–653.
- Sobczyński T., 2000. *Badania specjacji metali i kumulacji związków biogennych w osadach dennych jezior Wielkopolskiego Parku Narodowego*. Poznań, 1–141 (praca doktorska).
- Sobczyński T., Elbanowska H., Zerbe J. & Siepak J., 1996. Mineralizacja próbek osadów dennych jako etap poprzedzający oznaczanie ogólnej zawartości metali ciężkich. Ochrona wód przed zanieczyszczeniami. *Gospodarka Wodna*, 6, 173–176.
- Sobczyński T., Elbanowska H., Zerbe J. & Siepak J., 1997. Mineralizacja próbek osadów dennych jezior do oznaczania zawartości metali ciężkich. W: Siepak J. (ed.), *Metody pobierania i przygotowania próbek wód, ścieków i osadów do analiz fizyczno-chemicznych* (materiały pokonferencyjne), Poznań, 47–50.
- Solecki J. & Chibowski S., 2000. Examination of Trace Amounts of Some Heavy Metals in Bottom Sediments of Selected Lakes of South-Eastern Poland. *Polish Journal of Environmental Studies*, 9, 3, 203–208.

- Taboryska B. & Dojlido J.R., 2001. *Metale ciężkie w osadach dennych Jeziora Zegrzyńskiego. Problemy analityczne badań osadów dennych*. Wydawnictwo Uniwersytetu Adama Mickiewicza, Poznań, 7–19.
- Turekian K.K. & Wedepohl K.H., 1961. Distribution of the elements in some major units of the earth's crust. *Bulletin of the Geological Society of America*, 72, 175–192.
- Zerbe J., Sobczyński T., Elbanowska H. & Siepak J., 1999. Speciation of Heavy Metals in Bottom Sediments of Lakes. *Polish Journal of Environmental Studies*, 8, 5, 331–339.

Summary

Wigry Lake is situated in the north-eastern part of Poland (Suwalskie Lake District) and in the central part of Wigry National Park. This lake is the tenth largest (21.2 km²) and fifth deepest (73 m) lake in Poland. It is principally a mesotrophic lake, supplied by waters of the Czarna Hańcza River, a few smaller streams, as well as by underground inflows and rainfalls. The degree of coastline development is very high and the lake's bathymetry is very complicated (Rutkowski *et al.* 2002b).

The samples of bottom sediments were taken by Rutkowski and Król in 1999–2004 and Rutkowski, Król and Proszowicz in 2001–2002. The core samples were taken using gravity sampler that was thrust into the bottom and could have been collected into a transparent sampler. The location of sampling sites was done using GPS, and the depth was measured with the help of echosonde FCV, Furuno model 381/382, and sometimes also with a multiparameter monitor of water quality YSI, model 6920. The scaled rod was used in shallows.

Lithological surveys of surface sediments samples from Wigry Lake showed that they are typically white and white-gray, partially grained lacustrine chalk in the shallows (Fig. 1). They contain from 46 to 85% of water, a few percent of organic matter and about 80% of CaCO₃ as dry. There are also dark gray or dark brown, liquid to semi-liquid slime carbonate gyttjas but mainly in the deeper parts of lake. These sediments comprise from 74 to 94% of water, 8–30% of organic matter and 50–78% of CaCO₃ as dry (Rutkowski *et al.* 2002).

Current research has been focused on the distribution of main (Fe, Mg, Mn) and trace (Cd, Cr, Cu, Zn) metals in bottom sediments of Wigry Lake, located in the NE Poland within borders of Wigierski National Park. Extraction of metals from samples was carried out in microwave oven using concentrated HNO₃ and H₂O₂ and their concentrations were determined by AAS (Ca, Fe, Mg, Mn, Zn) and ICP-MS (Cd, Cr, Cu) method. Obtained data were statistically calculated and visualized on diagrams (Figs 2–8). The concentrations of metals depends on the lithological type of the sediment (lacustrine chalk, calcareous gyttja, detritous gyttja, clastic sediments) and environmental of sedimentation (Tabs 1, 2). The highest concentrations of metals were found in detritous gyttja from Hańczańska Bay, the most polluted part of Wigry Lake and the lowest were found in lacustrine chalk. Distribution of CaCO₃ and metal contents in chosen vertical profiles were presented (Tab. 6). The studies showed for calcareous gyttja moderate correlation of Mn with Fe, Zn and Zn, of Fe and Zn with depth of the lake; strong correlation of Zn with Fe, of Mn with depth of the

lake (Tab. 5). Concentration of metals in bottom sediments samples situated along the cross section in Szyja Basin showed correlation of Fe and Mn with depth of the lake (Fig. 9). Most of presented metals in recent sediments of Wigry Lake occur bellow maximum allowable levels determined for unpolluted sediments (Tab. 8). Concentrations of many elements in the recent sediments of Wigry Lake are much lower compared to those in many lakes in Poland and in the world (Tabs 3, 4, 7).