

DOI 10.2478/v10116-011-0012-x

## PALEOLIMNOLOGICZNA INTERPRETACJA KRZEMIONKI BIOGENICZNEJ – Dyskusja na przykładzie wybranych jezior niżu polskiego

MICHAŁ WOSZCZYK

Zakład Geologii i Paleogeografii Czwororzędu, Instytut Geologii i Geoinformacji,  
Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych,  
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza, ul. Dziegielowa 27, 61-680 Poznań

**Abstract:** The paper outlines some problems in the interpretation of biogenic silica content in lacustrine sediments in the context of reconstruction of past changes in lake ecosystems throughout the Holocene. The discussion is centered on four lakes located on the Polish Lowland (Lake Sarbsko, Lake Ostrowite, Lake Skrzyńska and Lake Gąsak), which display different lithology and chemical composition of bottom deposits.

From the data collected it emerges that  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  cannot be regarded as an unambiguous indicator of lake trophic state. Instead, paleolimnological interpretations of biogenic silica should include dilution by carbonates,  $\text{SiO}_{2\text{ter}}$  and/or organic matter,  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ -limited diatom productivity and lake water dynamics. The understanding of  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  benefits from supplementation with other geochemical and paleoecological proxies.

**Key words:** paleolimnology, biogenic silica, geochemistry, lacustrine sediments

### WPROWADZENIE

Krzemionka biogeniczna ( $\text{SiO}_{2\text{biog}}$ ) w osadach jeziornych głównie składa się z: okryw okrzemek, cyst złotowiciowców, igieł gąbek oraz fitolitów (Engstrom, Wright 1984). Pod względem ilościowym najważniejszą rolę odgrywają jednak okrzemki (Conley 1998; Krausse i in. 1983) i w większości interpretacji paleolimnologicznych znaczenie  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  zawęża się właśnie do tej grupy glonów (Engstrom i in. 1991; Robinson 1994; Peinerud 2000; Boyle 2001; Lucchini i in. 2003; Bechtel i in. 2007).

Zakładając, że procesy podepozycyjne nie zmieniają znacząco zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w osadach, krzemionkę biogeniczną można uznawać za wskaźnik produkcji biomasy okrzemek w ekosystemach jeziornych. Im większa jest zawartość  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w osadach, tym większy był udział okrzemek w całkowitej masie fitoplanktonu jeziornego w czasie depozycji. Należy przy tym zauważyć, że na ów „większy udział” może składać się zarówno wyższa liczebność osobników o małych okrywach bądź mniejsza liczebność okrzemek o dużych rozmiarach (Peinerud i in. 2001).

Zmiany stosunków ilościowych i jakościowych w fitoplanktonie są warunkowane przez szereg mechanizmów działających w zbiorniku jeziornym, które z kolei są uzależnione od czynników zewnętrznych, takich jak: zmiany klimatyczne, przemiany szaty roślinnej, zmiany natężenia denudacji czy litologia skał budujących zlewnię. Na tej podstawie można sądzić, że wahania zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w długich przedziałach czasowych odzwierciedlają nie tylko procesy działające w samym jeziorze, ale także przemiany zachodzące w skali regionalnej lub subregionalnej, co wykazali między innymi Colman i in. (1995) oraz Xiao i in. (1997) na podstawie badań osadów jezior Bajkał i Biwa.

Paleolimnologiczna interpretacja krzemionki biogenicznej jest jednak często niejednoznaczna. W poniższym artykule na podstawie czterech jezior z Niżu Polskiego pokazano możliwości odczytywania zmian  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w osadach jeziornych. Szczególną uwagę zwrócono na:

- 1) pokazanie różnic między zakresem i przebiegiem czasowej zmienności zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w osadach różnych jezior, co ma znaczenie dla określenia przydatności tego parametru jako narzędzia korelacji profili lub odtwarzania zmian środowiskowych o zasięgu regionalnym,
- 2) dyskusję czynników warunkujących zmienność zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w osadach jezior Niżu Polskiego.

## CZYNNIKI WPŁYWAJĄCE NA PRODUKCJĘ BIOMASY OKRZEMEK WE WSPÓŁCZESNYM ŚRODOWISKU JEZIORNYM

Opal, budujący okrywy okrzemek (*Baccillariophyceae*) powstaje w wyniku dehydratacji i polimeryzacji kwasu ortokrzemowego ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) asymilowanego przez glony z wód jeziornych (Wetzel 1983). Intensywność tego procesu zależy od dostępności światła słonecznego, koncentracji nutrientów (głównie P i N) oraz zawartości  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  w wodzie. Dopływ energii słonecznej oraz zwiększone stężenie  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  (powyżej  $0,5 \text{ mg} \cdot \text{l}^{-1}$  wg Wetzla 1983) stymulują asymilację krzemionki przez glony i tym samym powodują wzrost ich biomasy. Dominację okrzemek w składzie fitoplanktonu obserwuje się w siedliskach mezotroficznym, podczas gdy duża zawartość nutrientów ( $> 30 \mu\text{gTP} \cdot \text{l}^{-1}$ ) jest czynnikiem ograniczającym aktywność okrzemek i ich zdolność do konkurowania z innymi grupami glonów (Kalf 2003). Z tego powodu w jeziorach o wysokim poziomie trofii fitoplankton jest reprezentowany głównie przez zielenice i sinice (Peinerud 2000; Kalf 2003).

W wodach naturalnych czynnikiem limitującym rozwój okrzemek jest bardzo często stężenie kwasu krzemowego, gdyż jego zawartość jest średnio dwa tysiące razy mniejsza od biologicznego zapotrzebowania (Vallentyne 1974).  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  jest dostarczany do jezior przez rzeki (rola diagenetycznego rozpuszczania  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w osadach jeziornych jest niewielka), w których z kolei na koncentrację

tego składnika wpływa litologia skał budujących zlewnię oraz natężenie procesów wietrzenia glinokrzemianów w otoczeniu jeziora. Najmniejsze koncentracje krzemionki stwierdza się w ciekach odwadniających zlewnie zbudowane ze skał węglanowych oraz morskich piaskowców (Wetzel 1983). Widoczne są także różnice pomiędzy strefami klimatycznymi. Zasadniczo najzasobniejsze w rozpuszczoną krzemionkę są wody powierzchniowe w klimatach gorących i wilgotnych, najmniejsze zaś stężenia  $H_4SiO_{4aq}$  obserwuje się w okolicach okołobiegunowych (Wetzel 1983).

## STANOWISKA BADAWCZE

Do analizy porównawczej wybrano cztery zbiorniki jeziorne położone w różnych częściach Niziny Polskiego (ryc. 1) oraz wykazujące różnice w litologii i składzie chemicznym osadów dennych.

Jezioro Sarbsko (53°45,9'N, 17°37,6'E, 0,5 m n.p.m.) jest położone we wschodniej części Niziny Gardnieńsko-Łebskiej. Jest to jezioro przybrzeżne o powierzchni około 600 ha, głębokości średniej 1,4 m i głębokości maksymalnej 3,5 m [pomiary własne]. Mimo położenia w strefie brzegowej Bałtyku jest to zbiornik słodkowodny z okresowo zaznaczającymi się wlewami wód morskich. Koncentracje chlorofilu w powierzchniowych wodach jeziora Sarbsko (16–146  $\mu g \cdot l^{-1}$ ) świadczą o silnej eutrofizacji zbiornika. Profil Sa1/2 omawiany



Ryc. 1. Lokalizacja stanowisk badawczych

Fig. 1. Location of the study sites

w tekście został pobrany w północnej części jeziora, przed czołem Bariery Sarbskiej, gdzie stwierdzono największą miąższość osadów (Bechtel i in. 2007).

Jezioro Ostrowite (53°47,9'N, 17°36,1'E, 124 m n.p.m.) znajduje się w obrębie Parku Narodowego Bory Tucholskie. Zajmuje powierzchnię około 280 ha, jego maksymalna głębokość sięga 43 m, głębokość średnia zaś wynosi 10,7 m (Jańczak 1997). Jest to jezioro oligotroficzne. Profil OST 32-2, w którym wykonywane były analizy geochemiczne i paleoekologiczne, został pobrany w głęboczkę usytuowaną w północno-wschodniej części misy jeziornej (Kowalewski i in. 2006).

Jezioro Skrzyńka (53°49,0'N, 17°31,7'E, 120,6 m n.p.m.) jest zbiornikiem o powierzchni 21 ha, leżącym w dolnym odcinku Strugi Siedmiu Jezior, nieco na wschód od Jeziora Charzykowskiego, w obrębie Parku Narodowego Bory Tucholskie. Głębokość jeziora wynosi średnio 2,3 m, a maksymalna osiąga 4,1 m (Jańczak 1997). Jezioro Skrzyńka jest uznawane za zbiornik eutroficzny. Analizę zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  wykonano w profilu pobranym przez Apolinarską i in. [w przyg.] w centralnej części zatoczki stanowiącej zachodnią część jeziora.

Jezioro Gąsak (52°28,0'N, 19°23,0'E, 79,8 m n.p.m.) znajduje się na obszarze Pojezierza Gostynińskiego. Zajmuje ono powierzchnię około 12 ha i jest płytkim zbiornikiem o średniej głębokości 1,5 m i głębokości maksymalnej 3,5 m (Jańczak 1997). Badania paleolimnologiczne zostały wykonane na rdzeniu osadów pobranym z torfowiska przyległego do jeziora od strony miejscowości Teodorowo [A. Wacnik, inf. ustna].

Profile osadów jeziornych, omawiane w tekście, były pobierane i opracowywane w ramach różnych projektów badawczych, w których autor uczestniczył jako kierownik bądź wykonawca części analiz. Rdzeń z jeziora Sarbsko został pobrany przez Bechtela i in. (2007). Profile z jezior Ostrowite i Skrzyńka zostały opracowane w ramach badań prowadzonych przez odpowiednio Kowalewskiego i in. (2006) oraz Apolinarską i in. [w przyg.]. Profil z jeziora Gąsak był opracowywany w ramach projektu M. Ralskiej-Jasiewiczowej, a wyniki dotyczące tego materiału nie były publikowane.

## METODYKA

Analiza zawartości krzemionki biogenicznej w osadach napotyka wiele problemów metodycznych. Zostały one omówione między innymi przez Eggimanna i in. (1979), Conleya (1998) oraz Boylea (2001).

W ramach niniejszego opracowania próbki do analizy zawartości krzemionki biogenicznej suszono w temperaturze 105°C, a następnie mielono i homogenizowano w ucieraku agatowym Pulverizette 2.

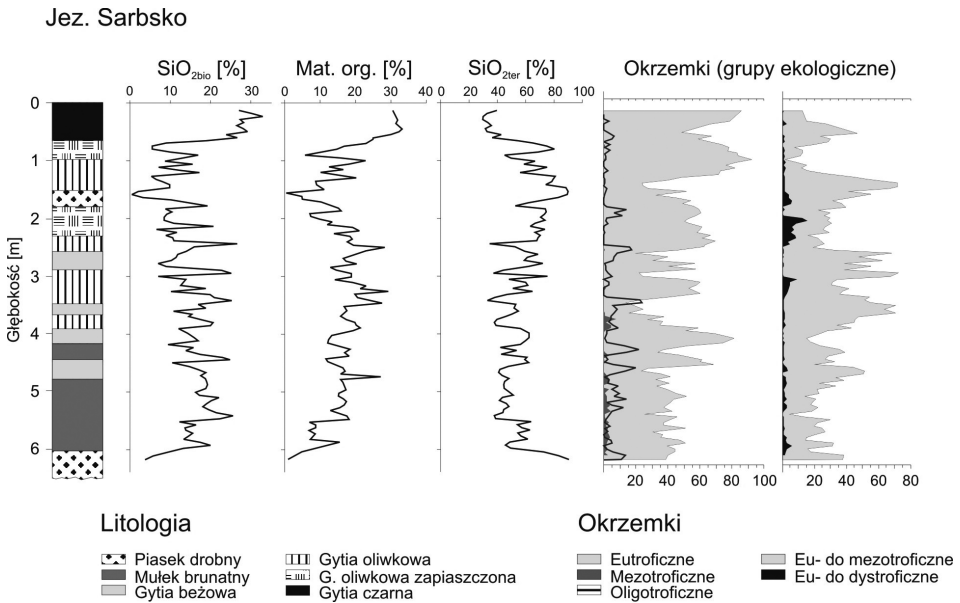
Zawartość krzemionki biogenicznej określano na podstawie kilkuetapowej ekstrakcji składników osadu. Materię organiczną usuwano poprzez prażenie

w temperaturze 550°C przez 4 h (Heiri i in. 2001). Części mineralne niebędące krzemionką rozpuszczano w silnych kwasach ( $H_2SO_4$  albo  $HNO_3 + HCl$  3:1 v/v),  $SiO_{2biog}$  zaś rozpuszczano za pomocą 0,5 n NaOH na łaźni wodnej w temperaturze 100°C przez 2 h (Woszczyk i in. 2009). Zawartość  $SiO_{2biog}$  obliczano na podstawie różnicy masy rezydium po ekstrakcji kwasowej i zasadowej.

## INTERPRETACJA ZMIENNOŚCI ZAWARTOŚCI $SiO_{2biog}$ W PROFILACH OSADÓW JEZIORNÝCH

### Jezioro Sarbsko

W profilu osadów jeziora Sarbsko procentowa zawartość krzemionki biogenicznej jest znaczna i sięga nieco ponad 30% (ryc. 2). Krzywa  $SiO_{2biog}$ , podobnie jak wykresy materii organicznej i  $SiO_{2ter}$ , jest bardzo nieregularna. Zawartość  $SiO_{2biog}$  zasadniczo zmniejsza się od spągowych mułków ku górze serii osadowej, po czym dość gwałtownie wzrasta w stropowej części profilu utworzonej z gytii czarnej. Jednocześnie zaznacza się bardzo duża zmienność zawartości



Ryc. 2. Litologia i pionowa zmienność składu chemicznego osadów jeziora Sarbsko oraz zmiany udziału grup ekologicznych okrzemek, profil Sa1/2 na podstawie Woszczyka i in. 2008

Fig. 2. Lithology and vertical changes in chemical composition of the sediments of Lake Sarbsko as well as changes in frequency of ecological groups of diatoms, the profile Sa1/2 acc. to Woszczyk et al. 2008

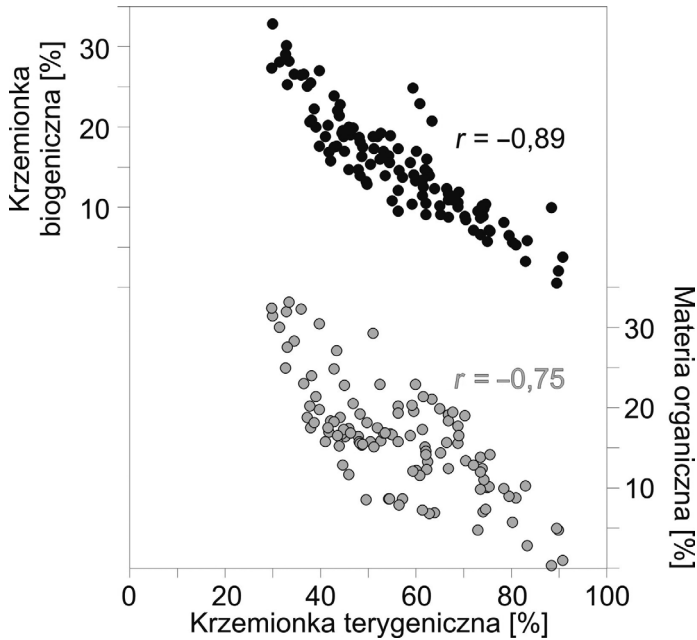
$\text{SiO}_{2\text{biog}}$  pomiędzy sąsiadującymi próbkami, sięgająca nawet do około 20%. Zawartość biogenicznej krzemionki w osadach jeziora Sarbsko jest dodatnio skorelowana z zawartością materii organicznej ( $r = -0,75$ ) i jednocześnie silnie ujemnie skorelowana z udziałem krzemionki terygenicznej ( $r = -0,89$ ). Ta ostatnia obejmuje głównie piasek kwarcowy i należy do tzw. składników allo-genicznych (sensu Boyle 2001). W przypadku północnej części jeziora Sarbsko, gdzie pobrany był omawiany profil (Bechtel i in. 2007), jej dostawa wiązała się z migracją Bariery Sarbskiej w kierunku lądu, czemu towarzyszyła depozycja osadów stożków przelewowych i piasków eolicznych w obrębie zbiornika przybrzeżnego (Woszczyk, Rotnicki 2009). To zjawisko jest przyczyną wysokiej zawartości  $\text{SiO}_{2\text{ter}}$  w osadach jeziora Sarbsko. Z kolei duża dynamika środowiska sedymentacyjnego przedpoła bariery (depozycja piasków następuje głównie w okresach wezbrań sztormowych i w okresach wzrastającego poziomu morza) tłumaczy znaczną zmienność pionową składu osadów jeziora Sarbsko.

Z ujemnej korelacji między  $\text{SiO}_{2\text{ter}}$  i  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  oraz materią organiczną (ryc. 3) wynika, że krzywe  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  i materii organicznej w profilu Sa1/2 nie odzwierciedlają rzeczywistych zmian natężenia procesów biologicznych w jeziorze Sarbsko, a ich przebieg jest uwarunkowany zmienną w czasie dostawą materii terygenicznej do zbiornika przybrzeżnego. Wniosek ten znajduje także potwierdzenie w braku zbieżności krzywej  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  ze zmiennością udziału grup ekologicznych okrzemek w badanym profilu (ryc. 2). Zgodnie z powyższą tezą, zmniejszanie się zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  od brunatnych mułków do oliwkowych gytii można uznać za konsekwencję wzrastającej intensywności depozycji piasków przelewowych przed czołem migrującej Bariery Sarbskiej, natomiast wzrost udziału  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w obrębie gytii czarnej świadczy o sprzyjających warunkach dla rozwoju okrzemek i zachowania okryw w osadach. Jest to konsekwencja stabilizacji bariery i spadku dynamiki środowiska. Najwyższe zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  odpowiadają także kulminacji okrzemek siedlisk eutroficznych (ryc. 2).

## Jezioro Ostrowite

W holocenijskich osadach Jeziora Ostrowitego zawartość  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  wynosi od < 5% do około 20%, przy zawartości materii organicznej rzędu 40–80% (ryc. 4). Pionowa zmienność zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  wykazuje tu bardzo charakterystyczny trend, wzrastając od spągu serii osadowej w kierunku środkowej części profilu, a następnie zmniejszając się ku górze. Oprócz tych długookresowych tendencji widoczne są krótkotrwałe oscylacje, podczas których zawartość  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  zmieniała się o  $\pm 5\%$ .

Brak wyraźnych zależności pomiędzy zawartością  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  i pozostałymi komponentami osadów wskazuje, że krzywa  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  oddaje rzeczywiste zmiany w produkcji biomasy okrzemek w Jeziorze Ostrowitym.



Ryc. 3. Zależności korelacyjne między  $\text{SiO}_{2\text{ter}}$  a  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  i materią organiczną w profilu Sa1/2 z jeziora Sarbsko

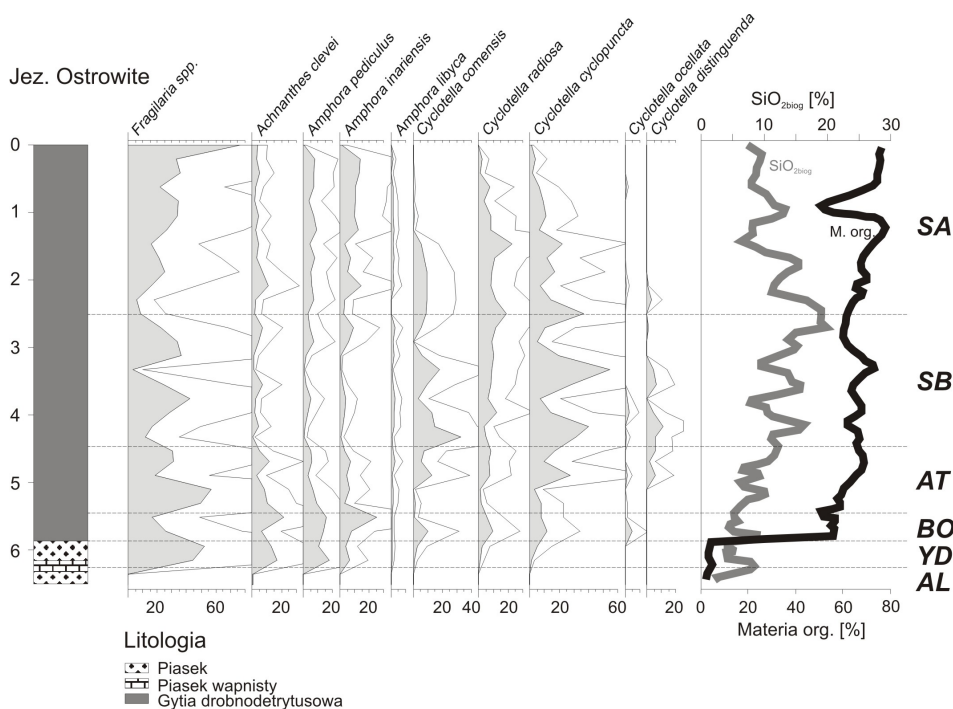
Ujemne współczynniki korelacji przy wysokiej zawartości krzemionki terygenicznej świadczą o rozcieńczającym wpływie  $\text{SiO}_{2\text{ter}}$  na  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  i materię organiczną

Fig. 3. Correlations between  $\text{SiO}_{2\text{ter}}$  and  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  and organic matter in the Sa1/2 profile from Lake Sarbsko

Negative relationships together with high contents of terrigenous silica point to dilution of  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  and organic matter by  $\text{SiO}_{2\text{ter}}$

Zestawienie krzywej  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  z wynikami analizy diatomologicznej pozwala zauważyć interesującą zbieżność zawartości krzemionki biogenicznej z udziałami dominujących taksonów okrzemek (ryc. 4). Zasadniczo zwiększone zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  odpowiadają kulminacjom krzywych *Cyclotella*, fazy spadku  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  zaś korespondują z okresami zwiększonego udziału okrzemek *Fragilaria* spp. Należy jednak zaznaczyć, że maksimum  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  jest nieco opóźnione w stosunku do najwyższych frekwencji form *Cyclotella*, które odnotowano w osadach okresu atlantyckiego. Zgodnie z interpretacją Mileckiej (2005) oraz Kowalewskiego i in. (2006), okrzemki *Cyclotella* preferują siedliska oligotroficzne lub mezotroficzne, *Fragilaria* zaś są wskaźnikami warunków eutroficznych w wodach jeziornych.

Uogólniając, można zatem stwierdzić, że koncentracja krzemionki biogenicznej w osadach Jeziora Ostrowitego odzwierciedla zmiany żyzności wód w zbiorniku. Wzrost zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  od allerødu do późnego subboreału



Ryc. 4. Zawartość  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  i materii organicznej oraz zmienność udziału dominujących taksonów okrzemek w profilu OST 32-2 z Jeziora Ostrowitego, na podstawie Kowalewskiego i in. 2006

Widoczna jest zbieżność między zmiennością  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  oraz udziałem okrzemek z rodzaju *Cyclotella*. Wzrost zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  odpowiada zwiększającej się częstości *Cyclotella*. Długookresowy trend wzrostowy  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  odbywa się równoległe ze zwiększaniem się zawartości *Cyclotella* od późnego gólcjalu do okresu subborealnego. Spadki zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  korespondują ze wzrostami częstości okrzemek *Fragilaria* spp.

Fig. 4. The contents of  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  and organic matter as well as the frequencies of dominating diatom taxa in the OST 32-2 profile, Lake Ostrowite, Kowalewski et al. 2006

Note the correlation between  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  and *Cyclotella* diatom species. Positive excursions in  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  roughly correspond to the culminations of *Cyclotella*. Long term increase in  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  is parallel to growing frequency in *Cyclotella* from Late Glacial to Subboreal. Drops in biogenic silica correspond to elevated frequencies of *Fragilaria* spp.

świadczy o stopniowej oligotrofizacji zbiornika, natomiast spadek zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w okresie subatlantyckim wskazuje na postępującą eutrofizację.

Wyjaśnienie przesunięcia czasowego maksimum  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w stosunku do najwyższych udziałów okrzemek *Cyclotella*, które wydają się determinować zawartość krzemionki w profilu z Jeziora Ostrowitego, nie jest jednoznaczne. Możliwe są następujące hipotezy:



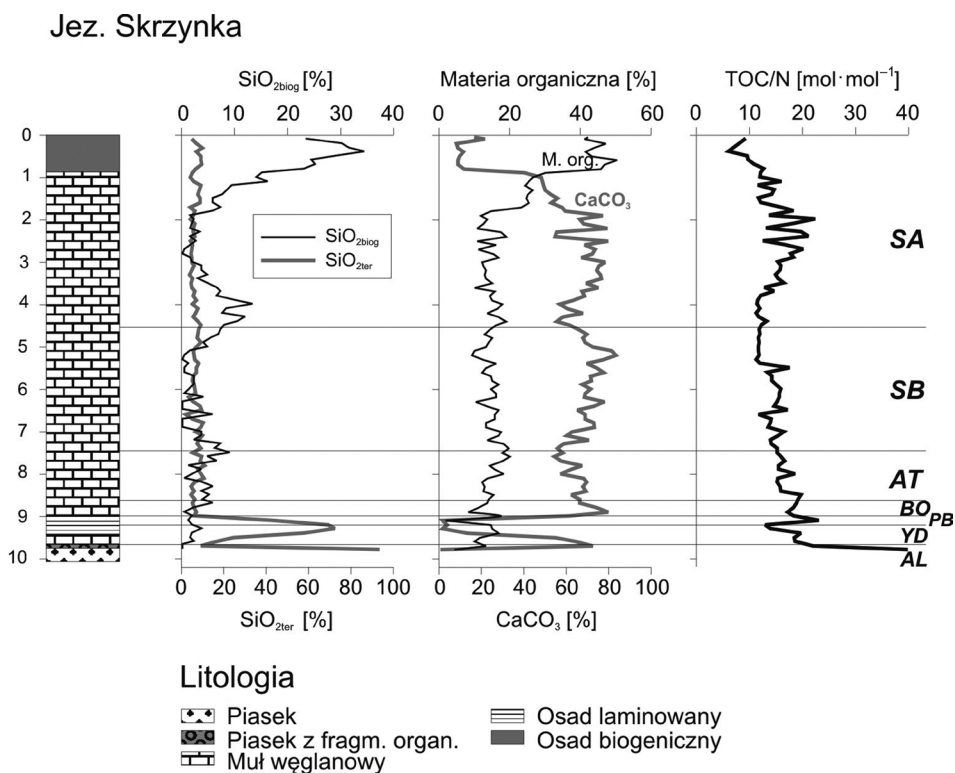
- 1) Engstrom i Wright (1984) zwracają uwagę na istnienie pozytywnej korelacji  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  z liczebnością okrzemek. W świetle tej tezy maksimum zawartości krzemionki biogenicznej może korespondować z najwyższą frekwencją okryw, która nie jest uwzględniana na diagramach diatomologicznych i nie musi mieć odzwierciedlenia w udziałach procentowych poszczególnych taksonów.
- 2) We wczesnej fazie subatlantyckiej eutrofizacji Jeziora Ostrowitego, gdy koncentracja biogenów była nieznacznie podwyższona w stosunku do wcześniejszych etapów, nastąpił bujny rozwój populacji okrzemek, stopniowo wypieranych przez inne składniki fitoplanktonu (np. przez zielenice), co widoczne jest na diagramach pyłkowych Mileckiej (2005). Obecnie podobne zjawisko obserwuje się w cyklu rocznym, gdy kulminacja rozwoju okrzemek następuje w fazie zwiększonej dostawy nutrientów wiosną, po czym ich biomasa szybko maleje w wyniku wyczerpywania zasobów  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  (Wetzel 1983; Kalff 2003).
- 3) Nieznaczny wzrost żyzności siedliska powoduje zmiany w strukturze wielkości osobników w populacjach. W warunkach wyższej trofii obserwuje się wzrost znaczenia mikrofitoplanktonu (średnica okryw  $< 70\mu\text{m}$ ) kosztem nano- i pikoplanktonu ( $\sim 0,5\text{--}2\mu\text{m}$ ) (Kalff 2003). Zatem, wzrost koncentracji  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  we wczesnym subatlantyku może być wynikiem zwiększenia udziału osobników o większych rozmiarach (i masie) okryw.

## Jeziro Skrzyńka

Osady jeziora Skrzyńka są głównie reprezentowane przez muł węglanowy ku górze przechodzący w osad biogeniczny (wg nomenklatury Schnurrenbergera i in. 2003) (ryc. 5). Zawartość  $\text{CaCO}_3$  wynosi od 55% do 82% w osadach reprezentujących wczesny i środkowy holocen, natomiast w schyłku okresu subatlantyckiego zmniejsza się do około 10%. Jednocześnie w serii węglanowej, począwszy od boreału, obserwuje się bardzo niskie zawartości pozostałych składników, w tym  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$ .

Krzemionka biogeniczna w osadach jeziora Skrzyńka wykazuje trzy kulminacje (ryc. 5). W dolnej części sekwencji osadowej (między 9,0 a 7,0 m) maksymalna koncentracja  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  wynosi około 9%. W środkowej części profilu (między 5,0 a 3,5 m) zawartość krzemionki dochodzi do 13%, a w części stropowej zaznacza się wzrost udziału  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  do około 35%. Kulminacje  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  korespondują ze spadkami zawartości węglanów i wzbogaceniami w materię organiczną. Brak natomiast korelacji z zawartością  $\text{SiO}_{2\text{ter}}$ . Ponadto podwyższone zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w osadach odpowiadają wyraźnie niższym wartościom stosunku TOC/N w materii organicznej.

Wysoka zawartość  $\text{CaCO}_3$  w osadach jeziora Skrzyńka świadczy o długotrwałym utrzymywaniu się w zbiorniku stanu wysokiego przesylenia wód względem



Ryc. 5. Litologia i skład chemiczny osadów jeziora Skrzyńka, na podstawie Apolinarskiej i in. [w przyg.]

Fig. 5. Lithology and chemical composition of the sediments of Lake Skrzyńka, acc. to Apolinarska et al. [currently edited]

kalcytu. Duże koncentracje  $\text{CaCO}_3$  są także niewątpliwie czynnikiem rozcieńczającym dla  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  i materii organicznej, których udział w osadach węglanowych nie przekracza kilkunastu procent. Zmiany intensywności strącania  $\text{CaCO}_3$  w różnych okresach rozwoju jeziora Skrzyńka mogły zatem wpływać na różny stopień rozcieńczenia pozostałych składników osadów, co tłumaczy zależności korelacyjne między węglanami a materią organiczną ( $r = -0,96$  obliczone dla facji mułów węglanowych) i biogeniczną krzemionką ( $r = -0,92$ ).

Z drugiej strony, przyczyną nieznacznej zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w osadach jeziora Skrzyńka można upatrywać w niskiej produktywności biologicznej jezior o dużej alkalicyzacji wód. Dzieje się tak, gdyż strącanie  $\text{CaCO}_3$  w tych jeziorach powoduje odprowadzanie z wody biogenicznego fosforu i wiązanie go w osadach dennych (Wetzel 1983; Dittrich, Koschel 2002; de Vincente i in. 2006). Zgodnie z tą interpretacją poziomy wzbogacone w  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  reprezentują okresy o zmniejszonej alkalicyzacji wód jeziornych, ograniczonej precypitacji  $\text{CaCO}_3$

i słabszym wiązaniu P w osadach. W ich wyniku w jeziorze Skrzyńka pojawiały się warunki sprzyjające rozwojowi populacji okrzemek. Zwiększona produktywność okrzemkowa w tych okresach wiązała się także z większym udziałem autochtonicznej materii organicznej (charakteryzującej się obniżonymi wartościami TOC/N) w osadach.

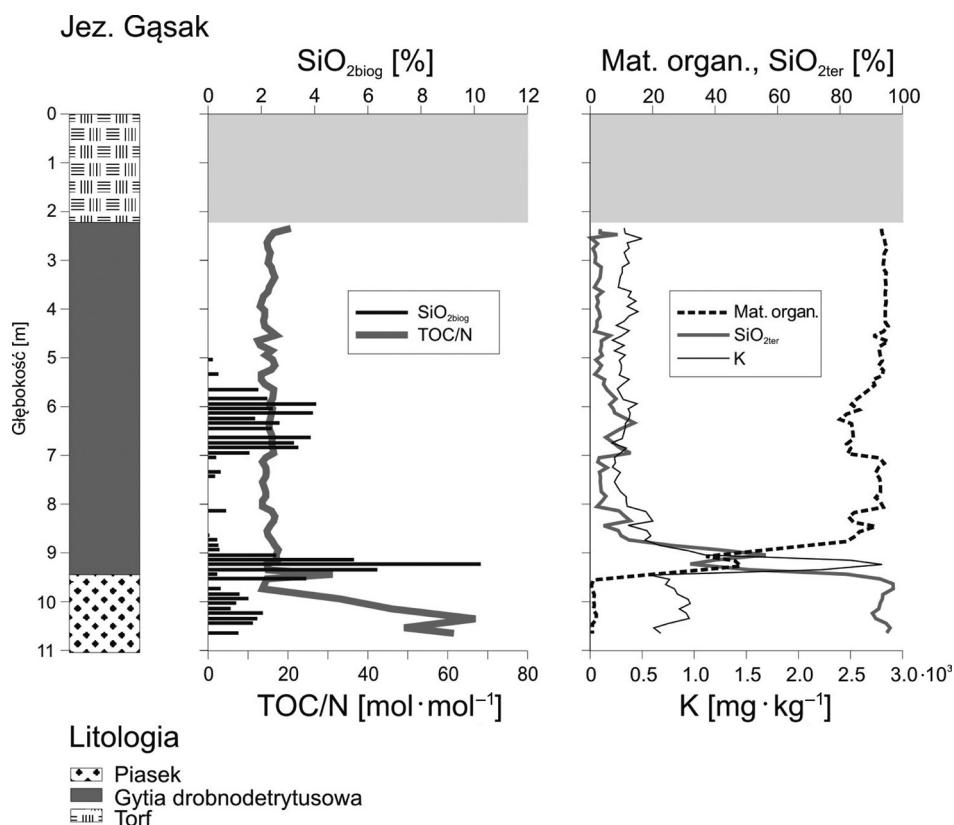
### Jezioro Gąsak

Osady jeziora Gąsak charakteryzują się bardzo wysoką zawartością materii organicznej – od 50% na granicy z osadami mineralnymi do 95% w górnej części serii. Stosunek TOC/N w materii organicznej (ok. 15) dowodzi, że materia organiczna w osadach jeziora Gąsak w równym stopniu składa się ze związków wytwarzanych przez fitoplankton jeziorny, jak i z materii pochodzącej z roślin naczyniowych lub że autochtoniczna materia organiczna podlega częściowej dekompozycji w kolumnie wodnej oraz osadach powierzchniowych (Meyers, Teranes 2001). Z kolei wysoka zawartość autochtonicznej materii organicznej świadczy o utrzymującym się w całej historii jeziora znacznym poziomie produktywności biologicznej lub o występowaniu warunków beztlenowych w przydennej części kolumny wodnej, co ogranicza mineralizację związków organicznych opadających z epilimnionu.

Jednocześnie zawartość  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w osadach jeziora Gąsak jest niewielka, a w dużej części sekwencji osadowej mieści się poniżej granicy detekcji. Taka sytuacja pozwala wnioskować o:

- 1) dużym rozcieńczeniu krzemionki biogenicznej przez materię organiczną,
- 2) dominacji zielenic lub sinic w strukturze fitoplanktonu jeziornego, co jest możliwe w sytuacji utrzymującego się wysokiego stężenia substancji biogennych w wodach jeziora (Peinerud 2000; Kalff 2003).

Najwyższe koncentracje  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  rzędu 3–10% wystąpiły w osadach spągowej i środkowej części sekwencji (między 10,5 a 9 m oraz 7 a 5,5 m), gdzie kulminacje krzywej  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  korespondują ze zwiększonymi zawartościami krzemionki terygenicznej lub potasu. Zarówno  $\text{SiO}_{2\text{ter}}$ , jak i K są dostarczane do jezior w sposób bierny w strukturach krystalicznych kwarcu i glinokrzemianów bądź jako jony zasorbowane przez minerały ilaste (Dean 1993). Składniki te są uznawane za wskaźniki natężenia procesów denudacyjnych w zlewni (Engstrom, Wright 1984; Dean 1993; Goslar i in. 1999; Eusterhues i in. 2005; Tylmann 2005; Valgamaa, Korhola 2007), przy czym  $\text{SiO}_{2\text{ter}}$  jest głównie wynikiem denudacji mechanicznej, K zaś jest produktem wietrzenia chemicznego glinokrzemianów. W tym drugim przypadku do obiegu chemicznego wprowadzana jest także rozpuszczona krzemionka w postaci  $\text{H}_4\text{SiO}_{4\text{aq}}$ . Im większe natężenie erozji, tym większa dostawa  $\text{SiO}_{2\text{ter}}$  oraz K do wód powierzchniowych i tym większy dopływ do jezior  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ .



Ryc. 6. Litologia i skład chemiczny osadów jeziora Gąsak

Kulminacje  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  towarzyszą wyższym zawartościom  $\text{SiO}_{2\text{ter}}$  i K. Świadczy to o rozwoju okrzemek w czasie zwiększonego nasilenia procesów denudacyjnych w zlewni. Wysokie zawartości materii organicznej dowodzą dużej dostępności biogenów (związków N i P) w jeziorze i sugerują, że produktywność okrzemkowa była limitowana przez dostępność  $\text{H}_4\text{SiO}_4$

Fig. 6. Lithology and chemical composition of the sediments of Lake Gąsak

Note that culminations of  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  correspond to the enrichments in  $\text{SiO}_{2\text{ter}}$  and K. This attests to higher diatom productivity in the periods of enhanced denudation in the watershed. Considerably high contents of organic matter indicate availability of biogenic N and P in the lake and suggest that diatom productivity was  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ -limited

Zwiększanie się zawartości biogenicznej krzemionki w osadach jeziora Gąsak w okresach nasilenia denudacji zlewni wskazuje na limitującą rolę  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  w rozwoju populacji okrzemek w tym zbiorniku jeziornym. Podobna sytuacja miała miejsce w jeziorze Lago di Monticchio (Robinson 1994). Jednocześnie stały wysoki udział autochtonicznej materii organicznej w osadach pozwala wykluczyć istotną rolę dostępności biogenów (związków N i P) dla rozwoju okrzemek w jeziorze Gąsak.

## WNIOSKI

Opracowane profile osadów jeziornych pozwalają na sformułowanie następujących uogólnień:

- 1) Analizowane zbiorniki jeziorne wykazują wiele cech indywidualnych dotyczących przebiegu czasowej zmienności zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w osadach, jak i jej koncentracji. Fakt ten utrudnia wykorzystywanie  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w korelacjach geologicznych oraz jako wskaźnika zmian środowiskowych w skali regionalnej.
- 2) Kulminacje krzemionki biogenicznej odpowiadające zwiększonym zawartościom składników mineralnych pochodzenia terygenicznego (np.  $\text{SiO}_{2\text{ter}}$ , K) mogą świadczyć o tym, że rozwój okrzemek w zbiorniku jeziornym był limitowany przez dostępność  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  lub biogenów (N lub P). W sytuacji gdy powyższe zależności występują w osadach zasobnych w materię organiczną, czynnikiem limitującym produktywność okrzemek jest najprawdopodobniej krzemionka.
- 3) Mała zawartość  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w osadach jezior o wysokiej alkaliczności wód jest wynikiem rozcieńczania składników biogenicznych przez  $\text{CaCO}_3$  lub wiąże się z ubóstwem biogenów w wodach spowodowanym sekwestracją P w osadach dennych, co nie sprzyja rozwojowi fitoplanktonu.
- 4) Istotna statystycznie ujemna korelacja między  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  a  $\text{SiO}_{2\text{ter}}$  lub węglanami przy jednoczesnych dużych koncentracjach dwóch ostatnich składników może świadczyć o uzależnieniu czasowej zmienności zawartości krzemionki biogenicznej w osadach od tempa dostawy  $\text{SiO}_{2\text{ter}}$  do jeziora lub strącania  $\text{CaCO}_3$ , co uniemożliwia interpretację krzywej  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w kontekście zmian produkcji biomasy okrzemek.
- 5) Zmiany zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w osadach nie mogą być uznawane za jednoznaczny wskaźnik zmian trofii wód jeziornych. W osadach Jeziora Ostrowitego zaobserwowano wzrost zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  w wyniku oligotrofizacji jeziora, lecz maksimum koncentracji  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  wystąpiło podczas wczesnej fazy eutrofizacji. Dalszy wzrost trofii powodował zmniejszanie zawartości krzemionki biogenicznej. Z kolei w jeziorze Sarbsko wzrost zawartości  $\text{SiO}_{2\text{biog}}$  następuje ze zwiększaniem się frekwencji okrzemek siedlisk eutroficznych.
- 6) Wysokie zawartości krzemionki biogenicznej w osadach można uznawać za wskaźnik warunków sprzyjających bujnemu rozwojowi populacji okrzemek.

\*

Badania były wykonywane w ramach następujących projektów badawczych: P04E 004 27 (K. Rotnicki, M. Woszczyk), P04E 036 25 (G. Kowalewski), NN 307 2504 33 (K. Apolinarska), MEN 30401332/0935 (M. Ralska-Jasiewiczowa).

Wyrażam podziękowania dr K. Apolinarskiej, dr. G. Kowalewskiemu oraz dr A. Wacnik za życzliwe udzielenie zgody na wykorzystanie Ich materiałów.

Doktorowi W. Tylmannowi dziękuję za uwagi i sugestie dotyczące pierwszej wersji manuskryptu. Doktorowi hab. M. Makohonieniec dziękuję za wnikliwą i konstruktywną recenzję artykułu.

## LITERATURA

- Apolinarska K., Woszczyk M., Obremska M., [w przyg.]: *Late Weichselian and Holocene multiproxy sedimentary record of paleohydrological changes in Lake Skrzyńka in Bory Tucholskie National Park, northern Poland*.
- Bechtel A., Woszczyk M., Reischenbacher D., Sachsenhoffer R., Gratzner R., Püttmann W., Spychalski W., 2007: *Biomarkers and geochemical indicators of Holocene environmental changes in Lake Sarbsko (Poland)*. *Org. Geoch.*, 38, 1112–1131.
- Boyle J.F., 2001: *Inorganic geochemical methods in palaeolimnology*. [W:] W.M. Last, J.P. Smol (red.), *Tracking environmental change using lake sediments*. Vol. 2: *Physical and geochemical methods*. Kluwer Acad. Publishers, Dordrecht, 83–141.
- Colman S.M., Peck J.A., Karabanov E.B., Carter S.J., Bradbury J.P., King J.W., Williams D.F. 1995: *Continental climatic response to orbital forcing from biogenic silica records in Lake Baikal*. *Nature*, 379, 769–771.
- Conley D.J., 1998: *An interlaboratory comparison for the measurement of biogenic silica in sediments*. *Mar. Chem.*, 63, 39–48.
- Dean W., 1993: *Physical properties, mineralogy, and geochemistry of Holocene varved sediments from Elk Lake, Minnesota*. *Geol. Soc. Am. Sp. Papers* 276, 135–157.
- Dittrich M., Koschel R., 2002: *Interactions between calcite precipitation (natural and artificial) and phosphorus cycle in the hardwater lake*. *Hydrobiol.*, 468, 49–57.
- Eggemann D.W., Manheim F.T., Betzer P.R., 1980: *Dissolution and analysis of amorphous silica in marine sediments*. *Journ. Sed. Petrol.*, 50, 1, 215–225.
- Engstrom D.R., Whitlock C., Fritz S.C., Wright Jr. H.E., 1991: *Recent environmental changes inferred from the sediments of small lakes in Yellowstone's northern range*. *Journ. of Paleolim.*, 5, 139–174.
- Engstrom D.R., Wright Jr. H.E., 1984: *Chemical stratigraphy of lake sediments as a record of environmental change*. [W:] E.Y. Haworth, J.W.G. Lund (red.), *Lake sediments and environmental history*, Leicester Univ. Press, Leicester, 11–67.
- Eusterhues K., Heinrichs H., Schneider J., 2005: *Geochemical response on redox fluctuations in Holocene lake sediments, Lake Steisslingen, southern Germany*, *Chem. Geol.* 222, 1–22.
- Goslar T., Bałaga K., Arnold M., Tisnerat N., Starnawska E., Kuźniarski M., Chróst L., Walanus A., Więckowski K., 1999: *Climate-related variations in the composition of the lateglacial and early holocene sediments of Lake Perespilno (eastern Poland)*. *Quatern. Sci. Rev.*, 18, 899–911.
- Heiri O., Lotter A.F., Lemcke G., 2001: *Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results*. *Journ. of Paleolim.*, 25, 101–110.
- Jańczak J. (red.), 1997: *Atlas jezior Polski. T. 2: Jeziora zlewni rzek Przymorza i dorzecza dolnej Wisły*. Bogucki Wyd. Nauk., Poznań, 256 ss.
- Kalff J., 2003: *Limnology Inland water ecosystems*. Prentice Hall, 592 ss.
- Kowalewski G., Woszczyk M., Milecka K., Bubak I., 2006: *Osady denne jeziora Ostrowite*. [W:] G. Kowalewski, K. Milecka (red.), *Przewodnik terenowy Jeziora i torfowiska Parku Narodowego Bory Tucholskie*. Park Narodowy Bory Tucholskie, 87–100.

- Krausse G.L., Schelske C.L., Davis C.O., 1983: *Comparison of three wet-alkaline methods of digestion of biogenic silica in water*. *Fresh. Biol.*, 13, 73–81.
- Lucchini F., Dinelli E., Calanchi N., 2003: *Chemostratigraphy of Lago Albano sediments (central Italy): geochemical evidence of palaeoenvironmental changes in late Quaternary*. *Journ. of Paleolim.*, 29, 109–122.
- Meyers P.A., Teranes J.L., 2001: *Sediment organic matter*. [W:] W.M. Last, J.P. Smol (red.), *Tracking environmental change using lake sediments*. Vol. 2: *Physical and geochemical methods*. Kluwer Acad. Publishers, Dordrecht 239–269.
- Milecka K., 2005: *Historia jezior lobeliowych zachodniej części Borów Tucholskich na tle postglacjalnego rozwoju szaty leśnej*. Wyd. Nauk. UAM, Poznań, 249 ss.
- Peinerud E.K., 2000: *Interpretation of Si concentrations in lake sediments three case studies*. *Env. Geol.*, 40(1-2), 64–72.
- Peinerud E.K., Ingri J., Pontér C., 2001: *Non-detrital Si concentrations as an estimate of diatom concentrations in lake sediments and suspended material*. *Chem. Geol.*, 177, 229–239.
- Robinson C., 1994: *Lagon Grande di Monticchio, southern Italy: a long record of environmental change illustrated by sediment geochemistry*. *Chem. Geol.*, 118, 235–254.
- Schnurrenberger D., Russell J., Kelts K., 2003: *Classification of lacustrine sediments based on sedimentary components*. *Journ. of Paleolim.*, 29, 141–154.
- Tylmann W., 2005: *Lithological and geochemical record of anthropogenic changes in recent sediments of a small and shallow lake (Lake Pusty Staw, northern Poland)*. *Journ. of Paleolim.*, 33, 313–325.
- Vaalgamaa S., Korhola A., 2007: *Geochemical signatures of two different coastal depositional environments within the same catchment*. *Journ. of Paleolim.*, 38, 241–260.
- Vallentyne J.R., 1974: *The algal bowl: lakes and man*. Environment Canada, Department of the Environment, Fisheries and Marine Service, Ottawa, 185 ss.
- Vincente I. de, Cattaneo K., Cruz-Pizarro L., Brauer A., Guilizzoni P., 2006: *Sedimentary phosphate fractions related to calcite precipitation in an eutrophic hardwater lake (Lake Albano, northern Italy)*. *Journ. of Paleolim.*, 35, 55–64.
- Wetzel R.G., 1983: *Limnology*. Saunders College Publishing, 2nd Edition, Saunders College Publishing, Philadelphia, 767 ss.
- Woszczyk M., Cieślinski R., Spsychalski W., 2009: *Geochemistry of surface sediments of a coastal Lake Sarbsko (northern Poland)*. *Stud. Quatern.*, 26, 41–53.
- Woszczyk M., Lutyńska M., Spsychalski W., 2008: *Zmiany środowiskowe w jeziorze Sarbsko na podstawie badań geochemicznych i diatomologicznych profilu Sa1/2*. [W:] K. Rotnicki, J. Jasiowicz, M. Woszczyk (red.), *Holoceńskie przemiany wybrzeży i wód południowego Bałtyku – przyczyny, uwarunkowania i skutki*. Wyd. Tekst sp. z o.o., 145–154.
- Woszczyk M., Rotnicki K., 2009: *Lithological changes in a coastal lagoon as a response to isolation from the sea and sand barrier migration – Lake Sarbsko (Northern Poland) case study*. *Quaest. Geogr.*, 28A/1.
- Xiao J., Inouchi Y., Kumai H., Yoshikawa S., Kondo Y., Liu T., An Z., 1997: *Biogenic silica record*