

Tomasz GOSLAR

## LAMINOWANE OSADY JEZIORNE JAKO ŹRÓDŁO INFORMACJI O ZMIANACH ŚRODOWISKA W PRZESZŁOŚCI

**Streszczenie.** W artykule autor dokonał przeglądu zastosowań laminowanych osadów jeziornych w badaniach zmian środowiska przyrodniczego w przeszłości. W rozdziałach wstępnych został skrótowo omówiony mechanizm prowadzący do powstania laminacji, podane podstawowe pojęcia i podsumowane zalety osadów wykazujących laminację w badaniach środowiska. W zasadniczej części opracowania omówione zostały różne dziedziny zastosowań osadów laminowanych. W omówieniu badań geochronologicznych szczególną uwagę poświęcono problematyce kalibracji radiowęglowej skali czasu. W dziedzinie rekonstrukcji paleoklimatycznych przedyskutowano związki między różnymi parametrami osadu i klimatem oraz omówiono przykład zastosowania analizy pyłków i szczątków roślinnych i zwierzęcych w połączeniu z analizą składu izotopowego tlenu do rekonstrukcji zmian klimatycznych na początku holocenu. W omówieniu badań historii rozwoju szaty roślinnej szczególną uwagę zwrócono na znaczenie analizy pyłkowej i analizy węgla drzewnych w określaniu wzajemnych zależności pomiędzy zmianami szaty roślinnej a gospodarką człowieka. W dziedzinie badań współczesnych antropogenicznych zmian środowiska opisano przykłady zastosowania analiz zawartości metali i składu gatunkowego okrzemek w śledzeniu zmian zanieczyszczenia środowiska naturalnego i procesów eutrofizacji jezior.

## ANNUALLY LAMINATED LAKE SEDIMENTS AS A DOCUMENT OF PAST ENVIRONMENTAL CHANGES

**Summary.** In this paper, the applications of annually laminated lake sediments in the studies of past environmental changes has been reviewed. The special attention was focused on the problems of calibration of radiocarbon time scale, and reconstruction of climate changes at the beginning of Holocene. Also the problems of human influence on vegetation, pollution and eutrophication of lakes were extensively discussed.

## 1. Wstęp

Osady tworzone są w jeziorach przez opadające na dno obumarłe organizmy roślinne i zwierzęce (np. sinice, zielenice, zlotowiciowce, okrzemki, wioślarki), szczątki organiczne dostarczone z lądu (pyłki roślin, nasiona, łuski) oraz fragmenty mineralne wytrącane w samym jeziorze (np. węglany) i dostarczane spoza jeziora (np. kwarc). Materiał nanoszony ze zlewni jeziora oraz dostarczany za pomocą wiatru nazywamy allochtonicznym. Materiał wytwarzany w samym jeziorze nazywamy autochtonicznym.

Biologiczna i chemiczna produktywność jeziora oraz dostawa materiału allochtonicznego zmienia się cyklicznie w ciągu roku, tak że w różnych sezonach roku deponowane są laminy o różnym składzie. Parę lub zespół kilku lamin odłożonych w ciągu jednego roku nazywamy warwą (Saarnisto, 1985; O'Sullivan, 1983).

Pomimo że skład materii opadającej na dno zmienia się sezonowo we wszystkich jeziorach strefy umiarkowanej, tylko niektóre z nich mają osad laminowany. Delikatna struktura osadu jest bowiem bardzo łatwo niszczonej przez aktywność fauny przydennej (bioturbacje), prądy wodne czy osuwanie się osadu po pochyłości dna. Dla zachowania laminacji istotny jest więc stały niedobór tlenu w strefie przydennej, mający miejsce w jeziorach, w których wody denne nie mieszają się z wodami powierzchniowymi przez cały rok, lub w jeziorach o wysokiej produktywności biologicznej powodującej całkowite zużywanie tlenu w procesach metabolizmu i rozkładu szczątków organicznych. Ważnym czynnikiem sprzyjającym zachowaniu laminowanej struktury osadu jest głębokość jeziora, duża w porównaniu do jego powierzchni, oraz osłonięcie jeziora od wiatru. Z drugiej strony zbyt pochyłe dno może powodować częste osuwanie się osadu zaburzającego laminację. Laminację stwierdzano dotychczas najczęściej w jeziorach o długości mniejszej niż 1 km i głębokości przekraczającej 15 m. Czasami laminację spotyka się w izolowanych głębiach jezior o powierzchniach sięgających kilkuset km<sup>2</sup>. Korzystne jest, gdy zlewnia jeziora jest mała, a przepływ wody niewielki.

Przeglądowe artykuły dotyczące klasyfikacji laminowanych osadów jeziornych i metodyki pracy dali O'Sullivan (1983) i Saarnisto (1985). W Polsce wyniki niektórych prac przedstawia Więckowski (1991). Goslar (1995, w druku) omówił mechanizmy tworzenia się laminacji rocznej, podstawowe typy laminacji, metodykę pobierania rdzeni, identyfikacji i liczenia warw oraz konstruowania chronologii, a także porównanie wybranych najdłuższych chronologii na świecie.

## 2. Przykładowa struktura warwy

Często występującym typem laminacji osadów jeziornych jest tzw. laminacja wapienna. Charakterystyczną jej cechą jest obecność warstwy kalcytu. Strącanie kalcytu następuje głównie późną wiosną i w lecie w wyniku wzrostu temperatury wody zmniejszającego iloczyn rozpuszczalności węglanu wapnia (np. w Fayetteville Green Lake w USA; Brunskill, 1969), lub wzrostu produktywności fitoplanktonu powodującego w procesie fotosyntezy zmniejszenie koncentracji rozpuszczonego w wodzie gazowego CO<sub>2</sub> (np. w jeziorze Zürichsee w Szwajcarii; Kelts, Hsü, 1978). Z reguły oba mechanizmy występują równocześnie i ich względny udział w tworzeniu kalcytu jest trudny do określenia.

Podstawowa struktura warwy wapiennej w jeziorze Gościąg w pobliżu Włocławka (Ralska-Jasiewiczowa et al., 1987) składa się z szarej lub żółtawej warstwy zawierającej okrzemki i cysty złotowiciowców, pojedynczej lub kilku cienkich jasnokremowych warstewek zawierających prawie wyłącznie ziarna kalcytu o rozmiarach sięgających 10  $\mu\text{m}$ , jasnobrązowej warstwy detrytusu organicznego zmieszanego z bardzo drobnymi ziarnami kalcytu i ciemnobrązowej lub ciemnoszarej warstwy zawierającej prawie wyłącznie materiał organiczny (Goslar, 1993a). W górnej części warstwy okrzemkowej występują często pojedyncze ziarna kalcytu o rozmiarach do 30  $\mu\text{m}$ . Podobna sekwencja występuje w osadach jezior Schleinsee w Niemczech (Geyh et al., 1971), Zürichsee w Szwajcarii (Kelts, Hsü, 1978) i w znacznej części profilu osadów jeziora Soppensee w Szwajcarii (Lotter et al., 1992). W warwie wapiennej może występować gradacja rozmiarów ziarn kalcytu od największych we wczesnej do najmniejszych w późnej części warwy (np. w Zürichsee lub w jeziorze Diss Mere w Anglii; Peglar et al., 1984).

## 3. Zastosowania laminowanych osadów jeziornych

Badanie składu osadów jeziornych dostarcza informacji o zmianach środowiska przyrodniczego w przeszłości. Osady laminowane są szczególnie doskonałym materiałem dla wszelkiego rodzaju rekonstrukcji paleoklimatycznych i paleoekologicznych. Laminacja stwarza bowiem możliwość skonstruowania chronologii warwowej osadu, dostarczającej skali czasowej dla zmian obserwowanych w osadzie. Chronologie takie mogą obejmować bardzo długie okresy czasu. Sekwencje ponad 5000 warw znaleziono w osadach kilkunastu jezior na świecie. Ponad dziesięć tysięcy warw zawierają osady jeziora Holzmaar w Niemczech (ok. 12900; Zolitschka et al., 1992), Gościąg (ok. 12500; Ralska-Jasiewiczowa et al., 1987, 1992), Lake Van w Turcji (ok. 10400; Kempe, Degens, 1979) i Elk Lake w USA (ok. 10000; Anderson, 1993). Chronologie warwowe niektórych osadów np. Lovojärvi w Finlandii (Simola, Tolonen, 1980) sięgają do chwili obecnej. W innych jeziorach laminacja w

górną (stropową) części osadu nie występuje. Dla przykładu, w osadzie jeziora Soppensee laminacja przestała się tworzyć w szóstym tysiącleciu BP (before present). Chronologię warwową nie sięgającą współczesności nazywa się pływającą i jej wiek kalendarzowy trzeba określić inną metodą. W pewnym sensie pływająca jest również chronologia osadu Jeziora Gościąż. W osadzie tym, w stropowych 8 m profilu warwy są często niewyraźne, a na krótkich odcinkach zupełnie zanikają. W tym fragmencie policzono  $2900_{-200}^{+500}$  warw, tak więc wiek starszej, liczącej ok. 9600 warw sekwencji jest określony z dość dużym błędem. Trzeba podkreślić, że dokładność chronologii warwowych osadów jeziornych jest ograniczona. W profilu osadów każdego jeziora istnieją bowiem odcinki, w których identyfikacja warw jest niejednoznaczna i odcinki o laminacji zaburzonej. Przykładowo, w chronologii warwowej jeziora Gościąż najlepszą dokładność chronologii uzyskano we fragmencie z 3–5 tysiąclecia BC (before Christ) liczącym  $2636_{-1}^{+2}$  warw. W pierwszej połowie holocenu współczesnego okresu ciepłego, który nastąpił po ostatnim zlodowaceniu — możliwy błąd chronologii jest rzędu 1%, a u schyłku epoki lodowej (w późnym glacjał) — 5%. Znane są również osady laminowane utworzone w jeziorach istniejących w okresach ciepłych — interglacjałach — poprzedzających ostatnie zlodowacenie (Benda, 1974; Müller, 1974).

Istnienie laminacji wyklucza możliwość pionowego wymieszania się osadu dając pewność, że badana warwa o określonym wieku nie zawiera materiału zdeponowanego w innych latach. Daje to możliwość prowadzenia rekonstrukcji środowiska z rozdzielczością czasową nieosiągalną w badaniach osadów nielaminowanych. W szczególnych przypadkach rozdzielczość ta sięgać może jednego dnia (Simola, Tolonen, 1981).

Istnienie laminacji stwarza wreszcie możliwość precyzyjnego określenia bezwzględnej wartości szybkości dostawy materiału do jeziora, potrzebnego w szczególnych analizach.

Zastosowania laminowanych osadów jeziornych można podzielić na kilka kategorii. W badaniach geochronologicznych chronologie warwowe mogą być bezpośrednio zastosowane do określenia długości trwania interglacjałów, do kalibracji innych metod datowania osadów, takich jak metoda  $^{14}\text{C}$  i  $^{210}\text{Pb}$ , w rekonstrukcji tempa przesuwania linii brzegowej oceanów, oraz w precyzyjnym datowaniu erupcji wulkanicznych, pozostawiających w osadach materiał o charakterystycznym składzie.

W rekonstrukcjach paleoklimatycznych wykorzystywana jest znajomość związku między szczególnymi cechami osadu a parametrami klimatu. Cechami osadu mogą być: szerokości warw, zależne często bezpośrednio od temperatury i opadów, koncentracja pyłku roślin i jego skład gatunkowy, pozwalające określić charakter regionalnej szaty roślinnej, wykazujący stopień jej zależności od klimatu, zawartość fragmentów węgla drzewnych, określająca częstotliwość naturalnych pożarów w okolicy jeziora, skład gatunkowy fragmentów flory i fauny jeziornej, zależny często od temperatury wody w jeziorze, oraz skład izotopowy tlenu w osadach węglanowych, zależny od temperatury w rejonie formowania się opadów zasilających jezioro.

W badaniach historii rozwoju szaty roślinnej bezpośrednie zastosowanie ma ana-

liza zmian składu pyłku roślinnego deponowanego w osadzie. Pozwala ona badać tempo zmian szaty roślinnej oraz ich związek z działalnością człowieka i naturalnie występującymi pożarami. W rekonstrukcji występowania pożarów w zlewni jeziora mogą być również wykorzystywane pomiary własności magnetycznych (np. podatności magnetycznej) osadu.

Osady laminowane pozwalają w końcu na badanie **współczesnych antropogenicznych zmian środowiska**, w tym na śledzenie procesów erozji, eutrofizacji (wzrostu aktywności biologicznej w jeziorach, spowodowanego często zwiększonym dopływem składników odżywczych dostarczanych do gleby wskutek nawożenia), oraz zmian zanieczyszczenia środowiska np. metalami ciężkimi. W następnych rozdziałach omówione zostaną przykłady poszczególnych wyżej wymienionych zastosowań.

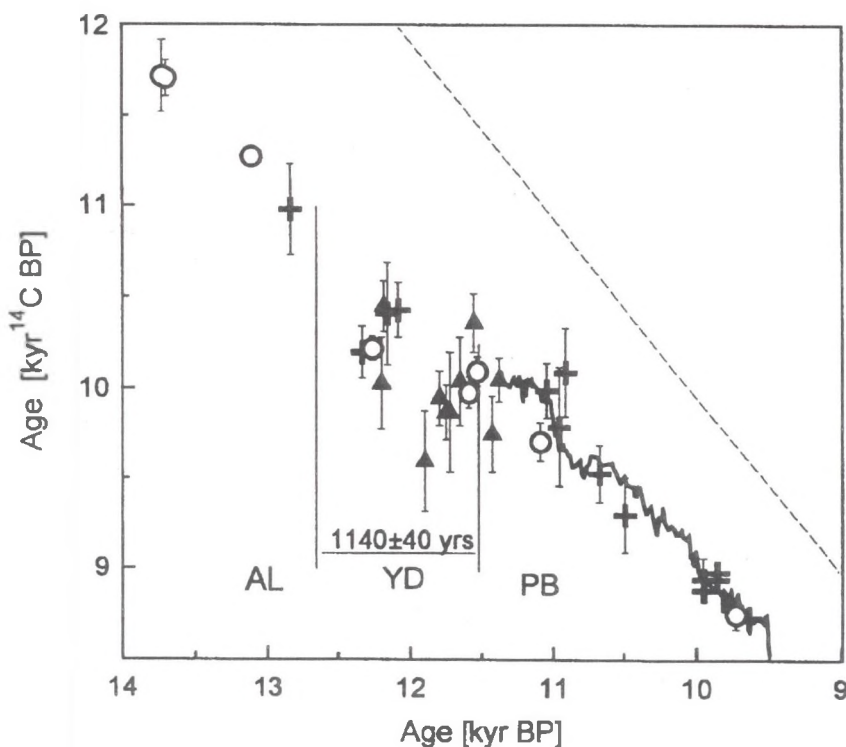
## 4. Badania geochronologiczne

W Europie odkryto osady o laminacji rocznej z trzech interglacjalów poprzedzających holocen. Osady w Bisbingen w Niemczech (Benda, 1974; Müller, 1974) dokumentujące pełną sukcesję szaty roślinnej interglacjalu eemskiego sprzed ostatniego zlodowacenia, pozwoliły określić czas trwania interglacjalu na ok. 11 tys. lat. Czas trwania wcześniejszego interglacjalu Holstein został oszacowany na podstawie liczenia warw w laminowanych fragmentach profilu na 15–16 tys. lat (Meyer, 1974; Müller, 1974). W laminowanych osadach z Bilhausen, utworzonych podczas jednego z wcześniejszych interglacjalów, policzono ok. 25, 500 warw, określając jego czas trwania na 28–36 tys. lat (Müller, 1965).

Datowanie metodą  $^{14}\text{C}$  próbek o wicku wyznaczonym niezależną metodą pozwala na określenie związku między wiekiem radiowęglowym a wiekiem kalendarzowym, czyli tzw. kalibrację radiowęglowej skali czasu. Aktualne problemy kalibracji radiowęglowej skali czasu były ostatnio omówione przez Goslara (1994b, w druku). Rocznie laminowane osady jeziorne stanowią trzeci, obok drewna datowanego dendrochronologicznie (np. Stuiver, Pearson, 1993; Kromer, Becker, 1993) i koralu datowanych metodą uranowo-torową (np. Bard et al., 1990), rodzaj materiału używanego do kalibracji metody  $^{14}\text{C}$ . Trzeba podkreślić, że najstarsze datowane dendrochronologicznie drewno pochodzi z przełomu epoki lodowej i holocenu, a jedynymi dostępnymi materiałami z późnego glacialu są koralce i osady jeziorne. Zaletą laminowanych osadów jeziornych jest ich ciągłość pozwalająca na wykonanie systematycznych pomiarów kalibracyjnych pokrywających równomiernie skalę czasu, podczas gdy dane kalibracyjne dla koralu pokrywają skalę czasu w sposób przypadkowy. Wykonane przez Stuivera (1971) datowania próbek frakcji organicznej osadu Lake of the Clouds w Minnesota, USA, dały w okresie 0–5000 BP wyniki w przybliżeniu zgodne z kalibracją wykonaną przy użyciu drewna, natomiast wieki radiowęglowe osadu sprzed

5000 BP były zawyżone w stosunku do wieku drewna. Przyczyną tej rozbieżności mogło być zaniżenie koncentracji  $^{14}\text{C}$  w wodzie w stosunku do koncentracji  $^{14}\text{C}$  w atmosferze w momencie tworzenia się osadu, tzw. efekt rezerwarowy. Efekt taki jest szczególnie silny w osadach o dużej zawartości węglanów, zawierających znaczną domieszkę nieaktywnego węgla pochodzącego z rozpuszczonych skał wapiennych z otoczenia jeziora. W Jeziorze Gościąż, na przykład, postarzenie próbek spowodowane efektem rezerwarowym wynosi w holocenie przeciętnie 1500 lat wykazując wahania rzędu kilkuset lat (Pazdur et al., 1987). Ze względu na efekt rezerwarowy do pomiarów kalibracyjnych używa się obecnie jedynie zidentyfikowanych botanicznie szczątków roślin lądowych, których początkowa koncentracja  $^{14}\text{C}$  była identyczna jak w atmosferze. Z uwagi na niewielką zawartość szczątków w osadzie takie pomiary stały się możliwe dopiero przy zastosowaniu w datowaniach radiowęglowych metody akceleratorowej. Wykonane ostatnio datowania holocenijskich makroskopowych szczątków roślin lądowych z osadu Jeziora Soppensee (Hajdas, 1993) pozostają w dobrej zgodności z pomiarami kalibracyjnymi dla drewna. Wyniki datowań szczątków z późnego glacjału nie zgadzają się natomiast z kalibracyjnymi datowaniami koralii (Bard et al., 1993; Edwards, 1993). Przyczyną rozbieżności może być nieciągłość laminacji w osadzie z Soppensee w tym okresie. Bardzo obiecujący dla kalibracji radiowęglowej skali czasu w późnym glacjału, a zwłaszcza na przełomie okresu ostatniego krótkiego ochłodzenia klimatu – młodszego dryasu – i holocenu, jest osad laminowany Jeziora Gościąż, posiadający dobrze udokumentowaną, wyraźną granicę pomiędzy młodszym dryasem a holocenem i ciągłą, dobrze opracowaną pływającą chronologią warwową obejmującą cały młodszy dryas oraz fragment wcześniejszego okresu ciepłego (allerödu). Wykonane dotąd w Centre des Faibles Radioactivites w Gif-sur-Yvette we Francji datowania szczątków roślinnych z tego osadu (Goslar et al., 1993) potwierdzają istnienie długiego plateau wieku radiowęglowego 10.000  $^{14}\text{C}$  BP wskazując, że granica między późnym glacjałem a holocenem leży w obszarze plateau (rys. 1). Kalibracja radiowęglowej skali czasu ma znaczenie nie tylko dla samego datowania radiowęglowego. Znajomość zmian koncentracji radiowęgla w atmosferze pozwala wnioskować o zmianach w obiegu węgla na Ziemi. Plateaux wieku radiowęglowego są bowiem równoważne szybkim spadkom koncentracji  $^{14}\text{C}$  w atmosferze. Amplituda takiego spadku na przełomie późnego glacjału i holocenu jest znacznie większa od spadków powtarzających się dosyć regularnie w holocenie (np. Edwards et al., 1993). Obliczenia modelowe wskazują (Goslar, nieopubl.), że obserwowane obniżenie atmosferycznej koncentracji radiowęgla daje się wyjaśnić zmianą w reżimie cyrkulacji wód w oceanie. W zmianach cyrkulacji oceanicznej upatruje się również przyczyn szybkich wahań klimatu (por. Broecker, Denton, 1989; Birchfield, Broecker, 1991). Można przypuszczać, że wykonanie większej liczby datowań szczątków roślinnych z Jeziora Gościąż pozwoli na precyzyjne określenie relacji czasowych między zmianą cyrkulacji w oceanie a ociepleniem klimatu na początku holocenu.

Testowanie metody  $^{210}\text{Pb}$  nie ma tak globalnego znaczenia jak kalibracja metody ra-



Rys. 1. Wyniki datowań radiowęglowych makroskopowych szczątków roślin lądowych z osadu laminowanego Jeziora Gościąg (trójkąty) na tle innych pomiarów kalibracyjnych. Wiek radiowęglowy przedstawiono w funkcji wieku kalendarzowego. Krzywa ciągła – sosny i dęby datowane dendrochronologicznie (Kromer, Becker, 1993); krzyżyki – koralce z Papui, Nowa Gwinea (Edwards et al., 1993), kółka – koralce z Barbadosu (Bard et al., 1993). Zaznaczono położenie granic młodszego dryasu określonych w osadzie Jeziora Gościąg

Fig. 1. Plot of radiocarbon age vs. calendar age of terrestrial macrofossils from Lake Gościąg sediments (triangles), in comparison with radiocarbon calibration data. Solid curve – dendrochronologically dated German oaks and pines (Kromer, Becker, 1993); crosses – corals from Papua, New Guinea (Edwards et al., 1993), circles – Barbados corals (Bard et al., 1993). Vertical lines represent the boundaries of Younger Dryas reconstructed in Gościąg sediment

diowęglowej. Podstawową ideą metody jest podział  $^{210}\text{Pb}$  ( $T_{1/2} = 22.26$  roku) zawartego w osadzie na frakcję autogeniczną, związaną z występującym w osadzie  $^{226}\text{Ra}$  i allogeniczną, której źródłem jest promieniotwórczy rozpad  $^{222}\text{Rn}$  poza osadem. Udział frakcji allogenicznej maleje zgodnie z prawem zaniku promieniotwórczego, umożliwiając wyznaczenie wieku osadu. Możliwe są dwa alternatywne modele opisujące dystrybucję  $^{210}\text{Pb}$  w kolum-

nie osadu. W modelu CIC zakłada się stałą koncentrację początkową allochtonicznego  $^{210}\text{Pb}$ , podczas gdy model CRS zakłada stałą szybkość zasilania izotopem  $^{210}\text{Pb}$  (Robbins, 1978). W modelu CRS koncentracja  $^{210}\text{Pb}$  jest więc funkcją wieku osadu i szybkości sedymentacji. Appleby et al. (1979) porównali wiek osadów laminowanych z trzech jezior w Finlandii otrzymany przy zastosowaniu modeli CIC i CRS z chronologią warwową. Zgodność datowania metodą CRS z chronologią warwową w zakresie 0–150 lat była bardzo dobra. Ponadto wahania koncentracji  $^{210}\text{Pb}$  były dobrze skorelowane ze zmianami szybkości sedymentacji, określonymi metodą liczenia warw. Niedawno Benoit i Hemond (1991) zwrócili jednak uwagę, że migracja  $^{210}\text{Pb}$  w osadach w warunkach redukcyjnych może być przyczyną istotnych błędów w datowaniu tą metodą. Wydaje się, że właśnie mobilność  $^{210}\text{Pb}$  w stropowej części osadu Jeziora Gościąg powoduje, że profil koncentracji  $^{210}\text{Pb}$  jest niemonotoniczny, a daty uzyskane tą metodą istotnie różne od dat wynikających z opracowanej przez Goslara (1993b) chronologii warwowej (Wachniew, 1993).

Chronologie warwowe osadów laminowanych jezior powstałych w miejscu zatok morskich podczas wynoszenia izostaticznego lądów pozwalają na wydatowanie momentu odcięcia zatoki od kontaktu z morzem. Tego typu datowanie szeregu jezior z północnej Szwecji, położonych na różnych wysokościach na poziomie morza, pozwoliło na określenie tempa wynoszenia lądu w ciągu ostatnich 9 tys. lat i doprowadziło do zrewidowania wcześniejszych oszacowań (Segerström, Renberg, 1982).

Spośród erupcji wulkanicznych w późnoglacialnej i holocenijskiej historii Europy jedną z najlepiej zapisanych w osadach jest erupcja wulkanu Laacher See (van den Boggard, Schmincke, 1985). Popioły pochodzące z tej erupcji znaleziono w osadach laminowanych Jeziora Holzmaar ok. 240 lat poniżej dolnej granicy młodszego dryasu (Zolitschka et al., 1992) i Soppensee ok. 225 lat poniżej tej granicy (Lotter, 1992). Zgodność obu przedziałów czasu jest bardzo dobra, potwierdzając synchroniczność chronologii warwowych obu jezior w tym okresie. Bez względu na datowanie pływającej chronologii warwowej Soppensee (Hajdas et al., 1993) określiło wiek tej erupcji na  $12350 \pm 135$  lat BP, lecz trzeba podkreślić, że datowania późnoglacialnych szczątków roślin lądowych w tym osadzie nie zgadzają się z pomiarami kalibracyjnymi  $^{14}\text{C}$  dla koralii.

## 5. Rekonstrukcje paleoklimatyczne

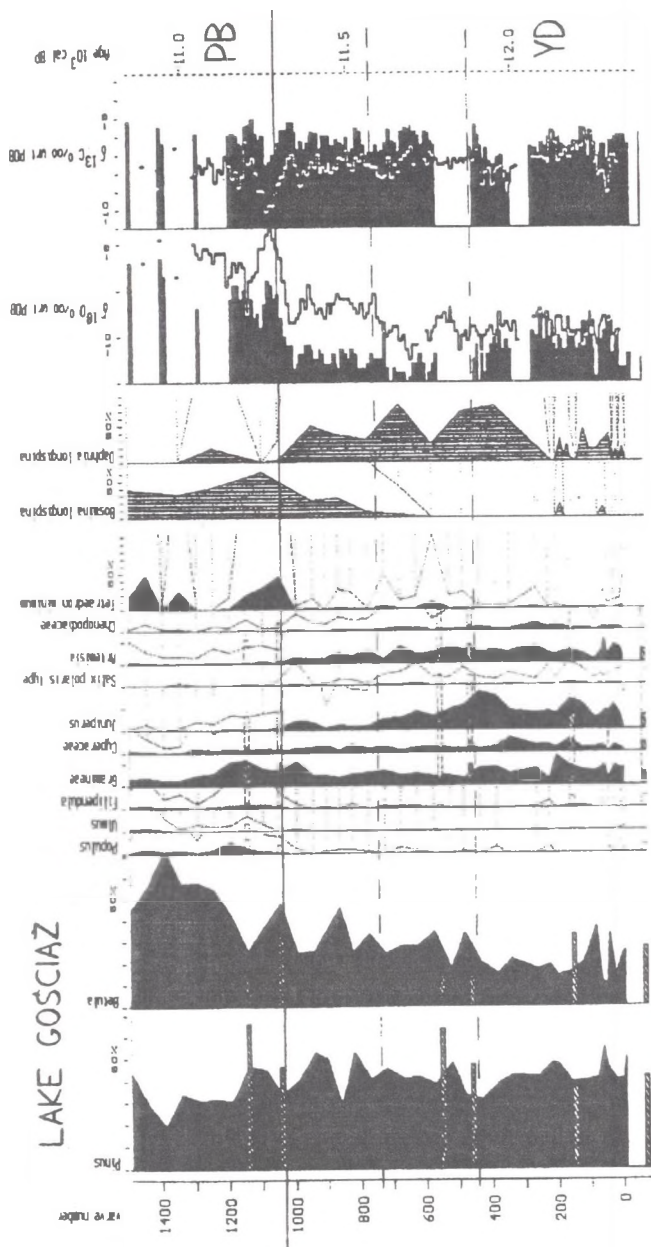
Najłatwiejsza do zmierzenia cecha osadu – szerokość warwy lub szerokość tworzących ją pojedynczych lamin – często w sposób istotny zależy od klimatu. Obejmująca dzieśięć tysięcy lat sekwencja grubości warw w osadzie jeziora Van w Turcji (Kempe, Degens, 1978), o dużym udziale materiału allochtonicznego, jest bezpośrednio interpretowana jako zapis zmian wielkości rocznego dopływu wody ze zlewni jeziora. W pewnych przypadkach



również szerokości warw autogenicznych związane są z wielkością opadów. Seibold (1958) wykazał, że szerokość lamin wapiennych w osadzie jeziora Malo Jezero na wybrzeżu Adriatyku jest ujemnie skorelowana z opadami rejestrowanymi w pobliskich stacjach meteorologicznych. Najprawdopodobniej większe nasłonecznienie w suchych latach powoduje wzrost fotosyntezy planktonu, a przez to zwiększenie intensywności wytrącania kalcytu.

Zmiany składu pyłku roślin znajdowanego w osadzie są zwykle wiarygodnym wskaźnikiem zmian klimatu. Zmiany szaty roślinnej, i związanych z tym spektrów pyłkowych, wykazują jednak pewne opóźnienie w stosunku do zmian klimatu, spowodowane m. in. różną szybkością migracji gatunków. Ponieważ istotną zaletą osadów laminowanych jest możliwość rekonstrukcji z dużą rozdzielczością czasową, w przypadku osadów o dużej zawartości węglanów korzystne jest połączenie analizy pyłkowej z analizą składu izotopowego tlenu w węglanie. Stosunek zawartości izotopów tlenu  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  w węglanie zależy bowiem między innymi od składu izotopowego tlenu w opadzie, kontrolowanego przez temperaturę powietrza w rejonie formowania opadu (Eicher, Siegenthaler, 1986; Róžański et al., 1994). Przykładem jednoczesnego zastosowania obu analiz może być rekonstrukcja ocieplenia klimatu na początku holocenu w osadzie laminowanym Jeziora Gościąż (rys. 2, por. Ralska-Jasiewiczowa et al., 1992; Goslar et al., 1993). Stopniowy wzrost koncentracji pyłku brzozy *Betula* i towarzyszący mu spadek udziału pyłku jałowca *Juniperus*, wierzb *Salix polaris* type, komosowatych *Chenopodiaceae* i bylicy *Artemisia* przed granicą młodszy dryas/holocen świadczy o stopniowym wypieraniu znoszącej chłody, lecz wymagającej dostępu światła roślinności zielnej i krzewiastej przez zagajniki brzożowe. Szczególne znaczenie ma tu zanikanie jałowca, wskazujące w uproszczeniu na stopniowe zwiększanie wilgotności. Na początku holocenu pojawia się topola (*Populus*), wiązówka (*Filipendula*) i zdecydowanie ciepłolubny wiąz (*Ulmus*). Zmiany szaty roślinnej odbywały się stopniowo, podczas gdy szybki wzrost wartości  $\delta^{18}\text{O}$  wskazuje, że zasadnicze ocieplenie dokonało się na przestrzeni 70 lat. Wskaźnikiem jednoczesnego ocieplenia wody w jeziorze jest pojawienie się ciepłolubnego gatunku glonu *Tetraedron minimum*.

Precyzyjne chronologie osadów laminowanych, w których znaleziono wskaźniki zmian klimatycznych, mogą potencjalnie pozwolić na ustalenie relacji czasowych między zmianami zachodzącymi w różnych miejscach na Ziemi. Szczegółowe porównanie zmian  $\delta^{18}\text{O}$  obserwowanych w późnoglacialnej i wczesnoholocenijskiej części osadu Jeziora Gościąż i stwierdzonych w rdzeniach lodowych z centralnej Grenlandii (Johnsen et al., 1992; Taylor et al., 1993) pozwala twierdzić z bardzo dużym prawdopodobieństwem, że ochłodzenie klimatu na początku i ocieplenie na końcu młodszy dryasu były w obu rejonach jednocześnie (Goslar et al., w przygotowaniu). Wskazuje to na synchroniczny charakter głównych zmian klimatu w całym rejonie północnego Atlantyku. Z drugiej strony, badania osadu laminowanego Soppensee i innych nielaminowanych jezior w Szwajcarii (Hajdas et al., 1993; Lotter et al., 1993) sugerują opóźnienie holocenijskiego ocieplenia w stosunku do Grenlandii o blisko 500 lat. Rozbieżność wymaga z pewnością dalszych badań.



Rys. 2. Uproszczony diagram pyłkowy oraz zmian koncentracji wybranych gatunków wioślarek Cladocera, glonów i składu izotopowego tlenu i węgla w osadzie Jeziora Gościąż w strefie granicy młodszego dryasu/holocen. Objasnienia łacińskich nazw gatunków roślin: *Pinus* – sosna; *Betula* – topola; *Ulmus* – wierzba; *Gramineae* – trawy; *Cyperaceae* – turzycy; *Juniperus* – jałowiec; *Salix* – wierzb; *Artemisia* – bylica; *Chenopodiaceae* – komosowate. Rysunek pochodzi z publikacji Goslarski et al. (1993)

Fig. 2. Simplified diagram of pollen, Cladocera, algae and isotopic composition of oxygen and carbon in the sediments of Lake Gościąż, around the Younger Dryas/Holocene boundary (reprinted from Goslar et al., 1993)

Wskaźnikiem klimatu w osadzie jeziornym może być również zawartość fragmentów węgla drzewnych. Swain (1978) stwierdził, że stosunek koncentracji węgla drzewnych do pyłków w osadzie laminowanych jeziora Hell's Kitchen Lake w stanie Wisconsin, USA odzwierciedla zwiększoną częstość występowania naturalnych pożarów, wskazując obniżenie wilgotności klimatu. Na tej podstawie autor zidentyfikował okresy pomiędzy 2200–1700, 1200–850 i 600–100 BP jako bardziej wilgotne, a 1700–1200 i 850–600 BP jako bardziej suche.

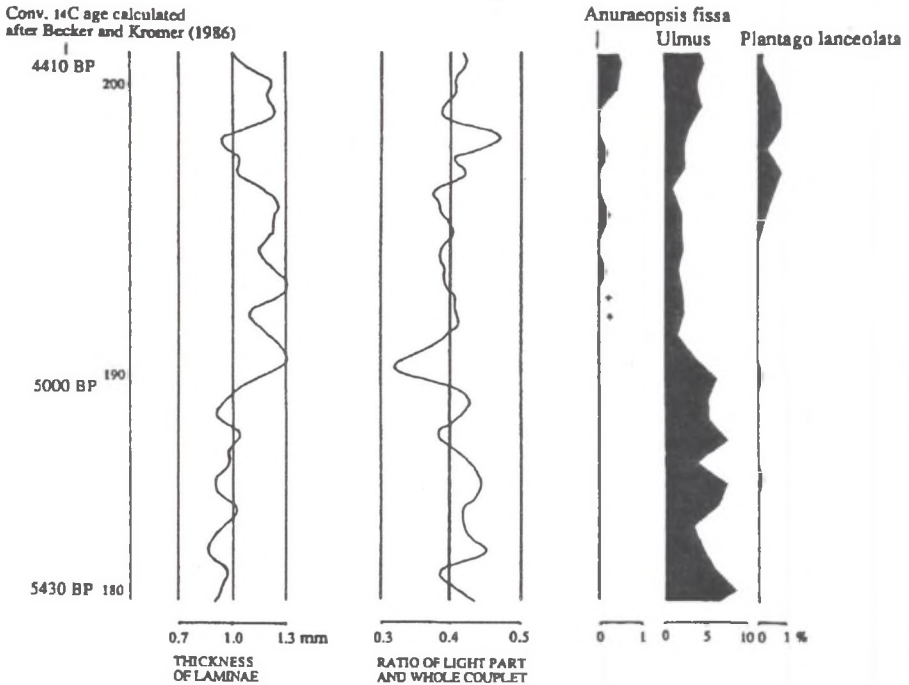
Wskaźnikiem występowania pożarów mogą być również własności magnetyczne osadu. Rummary (1983) zauważył, że zmiany stosunku pozostałości magnetycznej nasycenia ( $IRM_{sat}$ ) do podatności magnetycznej ( $\chi$ ) osadu jeziora Laukanlampi w Finlandii wykazują dobrą zgodność z wahaniami stosunku koncentracji węgla drzewnych do pyłków. Użycie pomiarów własności magnetycznych osadu w rekonstrukcji zmian częstości pożarów jest znacznie mniej pracochłonne niż zliczanie węgla drzewnych i pyłków.

## 6. Historia rozwoju szaty roślinnej

Osady laminowane są doskonałym materiałem do badań zmian szaty roślinnej w przeszłości, gdyż umożliwiają śledzenie ich tempa i wzajemnych zależności czasowych z dużą rozdzielczością. Ponadto, dzięki laminacji możliwe jest określenie bezwzględnej koncentracji pyłku opadającego w jednostce czasu na określoną powierzchnię osadu, a nie tylko względnej koncentracji różnych gatunków. Liczba opublikowanych wyników analiz pyłkowych laminowanych osadów jeziornych jest bardzo duża. Przykładem może być rekonstrukcja zmian roślinności w okresie tzw. „*Ulmus fall*” — nagłego zaniku wiązków, obserwowanego nieomal synchronicznie (5100–5000 14C BP) w całej środkowej i północnej Europie (zob. Latałowa, 1992). Przyczyny masowego wyginienia wiązków nie są do dziś jednoznacznie określone: sugerowane są czynniki antropogeniczne, np. masowe używanie świeżych gałązek wiązkowych do karmienia zwierząt domowych (Troels-Smith, 1960), zmiany klimatyczne (Göransson, 1991) lub naturalna choroba (Molloy, O'Connell, 1991).

W analizie pyłkowej osadu Jeziora Gościąg z tego okresu (Ralska-Jasiewiczowa, van Geel, 1992) zwrócono szczególną uwagę na relację czasową pomiędzy zanikiem wiązku a zaburzeniem szaty roślinnej w wyniku działalności człowieka, oraz na porównanie zmian względnych koncentracji i bezwzględnych strumieni pyłku różnych taksonów. Rysunek 3 ilustruje opóźnienie wzrostu koncentracji babki (*Plantago lanceolata*) w stosunku do zaniku wiązku. Szczegółowa analiza zestawu wielu różnych taksonów roślin pozwoliła autorom (Ralska-Jasiewiczowa, van Geel, 1992) wnioskować, że przyczyna zaniku wiązków nie była związana z działalnością człowieka, któremu raczej naturalne rozrzedzenie lasu ułatwiło zagospodarowanie terenu. Wzrost bezwzględnej ilości opadającego pyłku drzew

(w tym również wiązu) został prawdopodobnie spowodowany rozrzedzeniem lasu i w konsekwencji większego dostępu światła intensywniejszym kwitnieniem drzew. Rozrzedzenie lasu spowodowało zwiększenie erozji gleby, mające swoje odzwierciedlenie w zwiększeniu grubości lamin (rys. 3).



Rys. 3. Diagram zmian szerokości warw, stosunku szerokości laminy jasnej do ciemnej i procentowej zawartości pyłku i mikrofosyliów zwierzęcych w osadzie Jeziora Gościąg w okresie zaniku wiązów (próbka 190). Objaśnienie łacińskich nazw rodzajów pyłku: *Ulmus* – wiąz; *Plantago lanceolata* – babka wąskolistna. Rysunek pochodzi z publikacji Ralskiej-Jasiewiczowej i van Geela (1992)

Fig. 3. Diagram showing the change of varve thickness, and percentage of selected pollen and Rotatoria eggs in the Lake Gościąg sediments, in the period of *Ulmus* fall (sample 190; reprinted from Ralska-Jasiewiczowa, van Geel, 1992)

Analiza składu gatunkowego pyłku pozwala często wskazać obecność człowieka prehistorycznego w pobliżu jeziora. Istotna jest wówczas obecność w osadzie tzw. wskaźnikowych gatunków roślin, których preferowanym siedliskiem jest pobliże gospodarstw ludzkich. Do takich należą m.in. gatunki babki (*lantago*), szczawiu (*Rumex*) czy pokrzywy (*Urtica*). Szczególne znaczenie mają rośliny typowo użytkowe, celowo uprawiane przez człowieka jak np. zboża, konopie (*Cannabis*), chmiel (*Humulus*) czy słonecznik (*Helian-*

thus). Dla przykładu, odnalezienie ziarn pyłku kukurydzy (*Zea*) i słonecznika we fragmencie osadu Crawford Lake w stanie Ontario, Kanada, obejmującym okres 1360–1659 AD było dowodem działalności rolniczej Indian w okolicy jeziora przyczyniając się do podjęcia badań archeologicznych i odkrycia śladów wioski indiańskiej w pobliżu jeziora (Byrne, McAndrews, 1975). Podobnie, znajduwane w trakcie analizy pyłkowej ślady działalności gospodarczej człowieka w pobliżu Jeziora Gościąg (Ralska-Jasiewiczowa, nieopubl.) znajdują potwierdzenie w badaniach archeologicznych w pobliżu jeziora.

Połączenie analizy pyłkowej z analizą zmian koncentracji fragmentów węgla drzewnych w osadzie laminowanym pozwala śledzić zależności czasowe między występowaniem naturalnych pożarów i zmianami szaty roślinnej, a także zmiany roślinności związane z wypalaniem lasu pod uprawy rolne. Koncentracja węgla drzewnych w osadzie zależy jednak nie tylko od zmian natężenia lokalnych pożarów, ale także od zmian w natężeniu wiatrów transportujących fragmenty węgla z dalszej odległości i od zmian stopnia redepozycji osadu z przybrzeżnych rejonów jeziora. Z tych powodów jako miary natężenia lokalnych pożarów używa się stosunku koncentracji węgla drzewnych do pyłku roślin. Swain (1973) w badaniach osadu jeziora Lake of the Clouds, USA, analizował zmiany stosunku koncentracji pyłku drzew iglastych do liściastych po pożarach leśnych odzwierciedlonych w osadzie maksimami koncentracji węgla drzewnych. We fragmencie profilu z ostatniego tysiąclecia obserwowano przejściowe zmniejszenie stosunku liczby drzew iglastych do liściastych po większych pożarach, trwające zwykle 20–30 lat. Uzasadnieniem takiego zachowania się drzew są różne możliwości reprodukcji drzew. Drzewa liściaste, jak np. osika (*Populus tremula*) czy brzoza reprodukują się wegetatywnie, podczas gdy drzewa iglaste mogą rozmnażać się wyłącznie za pomocą nasion. Tak więc po pożarze odnawianie się lasu liściastego odbywało się szybciej niż iglastego. Przykładem rekonstrukcji historii wypalania lasów pod uprawy rolne może być analiza zawartości węgla drzewnych oraz pyłku drzew i zbóż w osadach jezior Ahvenainen (Tolonen, 1978) i Taka-Killo (Huttunen, 1980) w Finlandii. Obie prace wskazują, że częstotliwość wypaleń, zwiększona w późnym średniowieczu, przekroczyła granice możliwości odnawiania się drzewostanów świerkowych, powodując stopniowe zanikanie lasów. Obserwowane jednoczesne zdecydowane zwiększenie szybkości sedymentacji zostało wytłumaczone wzrostem erozji ze zlewni jeziora pozbawionej pokrywy leśnej oraz wzrostem produktywności biologicznej jezior dzięki zwiększonemu dopływowi substancji odżywczych z gleb użytkowanych rolniczo.

## 7. Badania współczesnych antropogenicznych zmian środowiska

Osady laminowane pozwalają na monitorowanie zmian środowiska na skutek działalności gospodarczej człowieka w niedalekiej przeszłości z dużą rozdzielczością czasową. Można tu wyróżnić dwa kierunki badań: analizę zmian zanieczyszczenia środowiska metalami i metalami ciężkimi oraz analizę wpływu gospodarki rolnej na proces eutrofizacji jezior.

Michler (1980) badał zmiany zawartości metali w osadzie jeziora Ammersee (Bawaria, RFN), w którego zlewni stopniowa industrializacja postępowała od czasów średniowiecznych. Stwierdzono wzrost dopływu miedzi i sodu do jeziora w trzynastym stuleciu, kiedy niższe rejony zlewni jeziora uległy wylesieniu. W czternastym stuleciu w osadzie zaznaczył się również wzrost koncentracji magnezu, spowodowany odlesieniem położonych wyżej obszarów o podłożu kredowym i wapiennym. W osiemnastym wieku rozwój górnictwa węglowego stał się przyczyną wzrostu koncentracji cynku i kadmu w jeziorze. Wiek dwudziesty w końcu zaznacza się wzrostem koncentracji kadmu, chromu, ołowiu i cynku w efekcie uprzemysłowienia i rozwoju motoryzacji. Najmłodsze fragmenty osadu wykazują zwiększoną koncentrację sodu i potasu, prawdopodobnie wskutek stosowania tych pierwiastków w nawożeniu mineralnym, jak i w odśnieżaniu dróg.

Innymi przykładami są badania jezior położonych w pobliżu zakładów przemysłowych będących źródłem szczególnego rodzaju zanieczyszczenia. Renberg i Segerström (1981), badali zmiany koncentracji ołowiu w osadzie jeziora Granastjärn w Finlandii, stwierdzając powolny wzrost zanieczyszczenia ołowiem począwszy od roku 1800 AD. Główny, kilkukrotny wzrost koncentracji ołowiu w osadzie miał jednak miejsce pomiędzy rokiem 1920 a 1940, kiedy zaczęła pracę huta ołowiu w Rönnskär, miejscowości położonej o 20 km od jeziora. Począwszy od roku 1970, emisja ołowiu i zanieczyszczenie osadu zaczęły wyraźnie maleć.

Proces eutrofizacji jeziora – wzrostu produktywności biologicznej – jest bardzo często efektem wzmocnionej gospodarki rolnej w pobliżu jeziora, powodującej zwiększony dopływ niezbędnych składników odżywczych, głównie fosforu i azotu. Może to nastąpić z powodu zwiększonego wymywania składników odżywczych z gleby po jej odlesieniu lub zaoraniu albo wskutek często praktykowanego moczenia w jeziorze roślin włóknistych w celu ich zmiękczenia (tzw. „roszenia”). Na przykład, eutrofizacja jeziora Ahvenainen w Finlandii (Tolonen, 1978) związana ze zwiększoną erozją wskutek zaorywania pól w zlewni jeziora odzwierciedliła się po roku 1430 AD wzrostem w osadzie koncentracji okrzemek z rodzajów *Asterionella*, *Synedra* i *Stephanodiscus*, zawartości substancji organicznej i pierwiastków takich jak K, Mg, Zn, C, N i P. W pobliskim jeziorze Lovojärvi eutrofizacja spowodowana „roszeniem” rozpoczęła się ok. roku 300 AD (Huttunen, Tolonen, 1980), powodując stały

niedobór tlenu w dennej części jeziora wskutek jego zwiększonego zużycia w procesach rozkładu materii organicznej. Umożliwiło to powstanie warunków sprzyjających zachowaniu laminacji. W ostatnich kilkunastu latach odstąpienie od roszczenia powoduje zanikanie laminacji. Podobna sekwencja wydarzeń ma miejsce w pobliskim jeziorze Hannisenlampi (Vuorinen, 1978) i Laukanlampi (Battarbee, 1981), gdzie eutrofizacja jest odzwierciedlona w zmianie stosunku koncentracji złotowiciowców rodzaju *Mallomonas* do okrzemek rodzaju *Asterionella*.

## 8. Podsumowanie

Zakres zastosowań laminowanych osadów jeziornych w badaniach zmian środowiska przyrodniczego w przeszłości jest bardzo szeroki. Niektóre z tych badań mają znaczenie lokalne, jak np. rekonstruowanie historii działalności gospodarczej człowieka czy procesów eutrofizacji. Można jednak mieć nadzieję, że zgromadzenie odpowiednio dużej liczby rekonstrukcji lokalnych umożliwi odtworzenie historii w skali regionalnej. Bardzo pomocne będzie z pewnością istnienie precyzyjnych, bezpośrednio porównywalnych skal czasowych opartych na chronologii warwowej. Wydaje się, że regionalne znaczenie można już teraz przypisać rekonstrukcjom zmian klimatycznych na przełomie późnego glacjału i holocenu. Jedynym zastosowaniem o bez wątpienia globalnym znaczeniu jest obecnie wykorzystanie osadów laminowanych w kalibracji radiowęglowej skali czasu. Trzeba podkreślić, że wyniki badania zależności czasowych między zmianami klimatu i zmianami w reżimie obiegu węgla na Ziemi mogą się okazać bardzo istotne dla modelowania i przewidywania przyszłych wahań klimatycznych, mających żywotne znaczenie dla całej ludzkości.

Artykuł został napisany w trakcie realizacji projektu badawczego „Kalibracja radiowęglowej skali czasu na przełomie późnego glacjału i holocenu (rozprawa habilitacyjna)” sponsorowanego przez Komitet Badań Naukowych grantem 6 6410 91 02, oraz projektu „Zapis holocenijskich zmian klimatu w osadach warwowych” finansowanego grantem 6 0252 91 01.

## Literatura

Anderson R. Y. 1993. The varve chronometer in Elk Lake: Record of climatic variability and evidence for solar-geomagnetic-C14-climate connection. W: Bradbury J. P., Dean W. E. [eds.]: Elk Lake, Minnesota: evidence for rapid climate change in the North-Central United States, Geological Society of America Special Paper, 276, 25-67.

- Appleby P. G., Oldfield F., Thompson R., Huttunen P., Tolonen K. 1979.  $^{210}\text{Pb}$  dating of annually-laminated lake sediments from Finland. *Nature*, v. 280, 53–55.
- Bard E., Arnold M., Fairbanks R. G., Hamelin B., 1993.  $^{230}\text{Th}$ - $^{234}\text{U}$  and  $^{14}\text{C}$  ages obtained by mass spectrometry on corals, *Radiocarbon*, v. 35, 191–200.
- Battarbee R. W., 1981. Diatom and chrysophyceae microstratigraphy of the annually laminated sediments of a small meromictic lake. *Striae*, v. 14, 105–109.
- Behre K. -E., 1981. The interpretation of anthropogenic indicators in pollen diagrams. *Pollen et Spores*, v. 23, 225–245.
- Benda L., 1974. Die diatomeen der niedersächsischen Kieselgur-Vorkommen palökologische Befunde und Nachweis einer Jahresschichtung. *Geologisches Jahrbuch v. A21*, 171–197.
- Benoit G., Hemond H. F., 1990.  $^{210}\text{Po}$  and  $^{210}\text{Pb}$  mobilization from sediments in relation to iron and manganese cycling. *Environmental Science and Technology*, v. 24, 1224–1234.
- Birchfield G. E., Broecker W. S., 1990. A salt oscillator in the glacial Atlantic? 2. a „scale analysis” model. *Paleoceanography*, v. 5, 835–843.
- Bogaard Van den, P., Schmincke, U. 1985. Laacher See tephra: A wide spread isochronous late Quaternary tephra layer in central and northern Europe. *Geological Society of America Bull.*, 96, 1554–1571.
- Broecker W. S., Denton G. H., 1989. The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 53, 2465–2501.
- Brunskill, G. J. 1969. Fayetteville Green Lake, New York. III: Precipitation and sedimentation of calcite in a meromictic lake with laminated sediments. *Limnology and Oceanography*, 14, 830–847.
- Byrne R., McAndrews J. H., 1975. Pre-Columbian purslane *Portulaca oleracea* L. in the New World. *Nature*, v. 253, 726–727.
- Edwards R. L., Beck J. W., Burr G. S., Donahue D. J., Chappell J. M. A., Bloom A. L., Druffel E. R. M., Taylor F. W., 1993. A large drop in atmospheric  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  and reduced melting in the Younger Dryas, documented with  $^{230}\text{Th}$  ages of corals. *Science*, v. 260, 962–968.
- Eicher U., Siegenthaler U., 1976. Palynological and oxygen isotope investigations on Late Glacial sediment cores from Swiss lakes. *Boreal*, v. 5, 109–117.



- Geyh, M. A., Merkt, J., Muller, H. 1971. Sediment-, Pollen- und Isotopenanalysen an jahreszeitlich geschichteten Ablagerungen im zentralen Teil des Schleinsees. *Archiv. Hydrobiol.*, 69, 366–399.
- Göransson H., 1991. Vegetation and man around Lake Bjärsjöholmssjön during prehistoric time. *Lundqua Report*, v. 31, 1–44.
- Goslar, T. 1993a. Sezonowe zmiany składu osadu laminowanego Jeziora Gościąż w najmłodszej części profilu. *Polish Botanical Studies, Guidebook Series*, v. 8, 189–202.
- Goslar, T. 1993b. Chronologia warwowa osadów laminowanych Jeziora Gościąż. *Polish Botanical Studies, Guidebook Series*, v. 8, 105–120.
- Goslar T., Kuc T., Ralska-Jasiewiczowa M., Rózański K., Arnold M., Bard E., van Geel B., Pazdur M. F., Szeroczyńska K., Wicik B., Więckowski K., Walanus A., 1993. High-resolution lacustrine record of the Late Glacial/Holocene transition in central Europe. *Quaternary Science Reviews*, v. 12, 287–294.
- Goslar T., 1995. Rocznie laminowane osady jeziorne. W: Mycielska-Dowgiałło E., Rutkowski J., [red.], *Badania osadów czwartorzędowych. Wybrane metody i interpretacja wyników*. Wydawnictwo Wydziału Geografii i Studiów Regionalnych UW, Warszawa, w druku.
- Goslar T., 1994b. Problemy kalibracji radiowęglowej skali czasu na przełomie późnego glacjału i holocenu. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Ser. Mat.-Fiz.*, z. 71, *Geochronometria* Nr 10, 25–46.
- Hajdas, I., Ivy S. D., Beer J., Bonani G., Imboden D., Lotter A. F., Sturm M., Suter M., 1993. AMS radiocarbon dating and varve chronology of Lake Soppensee: 6000 to 12000 <sup>14</sup>C years BP. *Climate Dynamics*, v. 9, 107–116.
- Huttunen P., 1980. Early land-use, especially the slash and burn cultivation in the commune of Lammi, Southern Finland, interpreted mainly using pollen and charcoal analysis. *Acta Botanica Fennica*, v. 113, 1–45.
- Johnsen S. J., Clausen H. B., Dansgaard W., Fuhrer K., Gundestrup N., Hammer C. U., Iversen P., Jouzel J., Stauffer B., Steffensen J. P. 1992. Irregular glacial interstadials recorded in a new Greenland ice core. *Nature*, v. 359, 311–313.
- Kelts, K., Hsu, K. J. 1978. Freshwater carbonate sedimentation. W: Lerman A. [ed.] *Lakes: Geology, Chemistry, Physics*. Springer Verlag, New York, 295–323.
- Kempe, S., Degens, E. G. 1979. Varves in the Black Sea and Lake Van (Turkey). W: Schluchter, C. [ed.], *Moraines and Varves*, Balkema, Rotterdam, 309–318.

- Kromer B., Becker B., 1993. German oak and pine  $^{14}\text{C}$  calibration, 7200–9400 BC. *Radiocarbon*, v. 35, 125–136.
- Latalowa M., 1992. Man and vegetation in the pollen diagrams from Wolin Island (NW Poland). *Acta Palaeobotanica*, v. 32, 123–249.
- Lotter, A. F., Ammann B., Beer J., Hajdas I., Sturm M., 1992, A step towards an absolute time-scale for the Late-Glacial: annually laminated sediments from Soppensee (Switzerland); W: Bard E., Broecker W., [eds.], *The last deglaciation: absolute and radiocarbon chronologies*, NATO advanced research workshop, Erice, 1990. Proc. Springer Verlag Publishers, 45–68.
- Meyer K. J., 1974. Pollen analytische Untersuchungen und Jahresschichtenzählungen an der holstein-zeitlichen Kieselgur von Hetendorf. *Geologisches Jahrbuch.*, v. A21, 87–105.
- Michler G., Simon K., Wilhelm F., Steinberg C. 1980. Vertikale Verteilung von Metallen im Sediment eines Alpenvorlandsees als Zivilisationsindikatoren. *Archiv für Hydrobiologie*, v. 88, 24–44.
- Molloy K., O'Connell M., 1991. Palaeoecological investigations towards the reconstruction of woodland and land-use history at Lough Sheeanus, Connemara, Western Ireland. *Review of Palaeobotany and Palynology*, v. 67, 75–113.
- Müller H., 1965. Eine pollen analytische Neuarbeitung des Interglacial-Profiles von Bilshausen (Unter-Eichsfeld). *Geologisches Jahrbuch.*, v. 83, 327–352.
- Müller H., 1974. Pollen analytische Untersuchungen und Jahresschichtenzählungen an der holstein-zeitlichen Kieselgur von Munster – Breloh. *Geologisches Jahrbuch*, v. A21, 107–140.
- O'Sullivan P. E. 1983. Annually-laminated lake sediments and the study of Quaternary environmental changes – a review. *Quaternary Science Reviews*. v.1, 245–313.
- Pazdur A., Pazdur M. F., Wicik B., Więckowski K., 1987. Radiocarbon chronology of annually laminated sediments from the Gościąż Lake. *Bulletin of Polish Academy of Sciences, Earth Science*, v. 35, 139–145.
- Peglar S., Fritz S., Alapieti T., Saarnisto M., Birks J. 1984. Composition and formation of laminated sediments in Diss Mere, Norfolk, England. *Boreas*, v. 13, 13–28.
- Ralska-Jasiewiczowa, M., Wicik, B., Wieckowski, K. 1987. Lake Gościąż – a site of annually laminated sediments covering 12 000 years. *Bulletin of the Pol. Acad. of Sci., Earth Sci.*, v. 35, 127–137.

Ralska-Jasiewiczowa M., vanGeel B. 1992. Early human disturbance of the natural environment recorded in annually laminated sediments of Lake Gosciarz, central Poland. *Vegetation History and Archaeobotany*, v.1, 33–42.

Ralska-Jasiewiczowa M., van Geel B., Goslar T., Kuc T. 1992. The record of the Late Glacial/Holocene transition from the varved sediments of Lake Gościąg (central Poland). W: Robertsson A. M., Ringberg B., Miller U., Brunnberg L. [eds.], *Quaternary Stratigraphy, Glacial Morphology and Environmental Changes*, Sverige Geologiska Undersökning., Ca 81, 257–268.

Renberg I., Segerström U., 1981. Application of varved lake sediments in paleoenvironmental studies. *Wahlenbergia*, v. 7, 125–133.

Robbins J. A., 1978. Geochemical and geochemical applications of radioactive lead. W: Nriagu J. O. [ed.]: *The biogeochemistry of lead in the environment*. Elsevier, North Holland, 285–393.

Rózański K., Araguas-Araguas L., Gonfiantini R., 1992. Relation between long-term trends of oxygen-18 isotope composition of precipitation and climate. *Science*, v. 258, 981–985.

Rummery T., 1983. The use of magnetic measurements in interpreting the fire histories in lake drainage basins. *Hydrobiologia*, v. 103, 53–58.

Saarnisto M. 1986. Annually laminated lake sediments. W: Berglund B. E., Ralska-Jasiewiczowa M. [eds.], *Handbook of Holocene Palaeoecology*, John Wiley & Sons, 343–370.

Segerström U., Renberg I., 1982. Varviga sjösediment avslöjar den forntida landhöjningens forlopp. W: Landhöjning och Kustbygdsföräring Nordiskt Symposium, Lulea Sweden (Symposium publikation volym 1), 17–24.

Seibold E., 1985. Jahreslagen in sedimenten der mittleren Adria. *Geologisches Rundschau*, v. 47, 100–117.

Simola H., Tolonen K. 1980. Diurnal laminations in the varved sediments of Lake Lovojärvi, south Finland. *Boreas*, v. 10, 19–26.

Stuiver M., 1971. Evidence for the variation of atmospheric  $^{14}\text{C}$  content in the Late Quaternary. W: Turekian, K. K. [ed.], *The late kenozoic glacial ages*, Yale University Press, 57–70.

Stuiver M., Pearson G. W., 1993. High-precision bidecadal calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950–500 BC and 2500–6000 BC. *Radiocarbon*, v. 35, 1–24.

- Swain A., 1973. A history of fire and vegetation as recorded in lake sediments. *Quaternary research*, v. 3, 383–396.
- Swain A., 1978. Environmental changes during the past 2000 years in N-Central Wisconsin: analysis of pollen, charcoal and seeds from varved lake sediments. *Quaternary Research*, v. 10, 55–68.
- Taylor K. C., Lamorey G. W., Doyle G. A., Alley R. B., Grootes P. M., Mayewski P. A., White J. W. C., Barlow L. K. 1993. The 'flickering switch' of late Pleistocene climate change. *Nature*, v. 361, 432–436.
- Tolonen M., 1978. Paleoecology of annually-laminated sediments of Lake Ahvenainen, South Finland. *Annales Botanici Fennici*, v. 15, 177–240.
- Troels-Smith J., 1960. Ivy, mistletoe and elm: climatic indicators – fodder plants. *Danm. Geol. Unders.*, Ser. IV, v. 4, 1–32.
- Vuorinen J., 1978. The influence of prior land-use on the sediments of the small lake. *Polskie Archiwum Hydrobiologii*, v. 25, 443–451.
- Wachniew P. 1993. Szybkość sedymentacji w Jeziorze Gościąż na podstawie pomiarów koncentracji  $^{210}\text{Pb}$ . *Polish Botanical Studies, Guidebook Series*, v. 8, 203–212.
- Wicik B., 1993. Chemizm wód i osadów jezior „Na Jazach” w Kotlinie Płockiej. *Polish Botanical Studies, Guidebook Series*, v. 8, 93–104.
- Więckowski K., 1991. Rola laminowanych osadów jeziornych w badaniach paleolimnologicznych. *Przegląd Geograficzny*, 63, 325–342.
- Zolitschka B., Haverkamp B., Negendank J. F. W. 1992. Younger Dryas oscillation – varve dated palynological, paleomagnetic and microstratigraphic records from Lake Holzmaar, Germany; W: Bard E., Broecker W., [eds.], *The last deglaciation: absolute and radiocarbon chronologies*, NATO advanced research workshop, Erice, 1990. *Proc. Springer Verlag Publishers*, 81–102.

## Abstract

This paper reviews the applications of annually laminated lake sediments in the studies of past environmental changes. The first chapters discuss briefly the mechanisms of laminae formation and summarizes the advance of laminated sediments in environmental research. In the main part of paper several aspects of application of laminated sediments

were discussed. The review of geochronological study was mainly focused on the problems of calibration of radiocarbon time scale. In the field of paleoclimatic study, the associations between several sediment parameters and climate were discussed, together with an example of palynological, other microfossil and stable isotope analyses to reconstruct the climatic changes at the beginning of Holocene. In the discussion of vegetation development history, the special attention was put on the meaning of pollen and charcoal analyses to reconstruct the human influence on vegetation. In the research of recent anthropogenic changes, the examples of application of heavy metal and diatom analyses for monitoring of contamination and eutrophication of lakes were described.