

Tomasz GOSLAR

Laboratorium C-14

Politechnika Śląska, Gliwice

## ZMIANY KONCENTRACJI $^{14}\text{C}$ W ATMOSFERZE W X TYSIĄCLECIU BP NA PODSTAWIE POMIARÓW AKTYWNOŚCI $^{14}\text{C}$ O PODWYŻSZONEJ PRECYZJI

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wyniki pomiarów koncentracji  $^{14}\text{C}$  w słojach pnia dębu z Lublinka. Wyniki wskazują, że w okresie od ok. 10050 do ok. 9750 cal BP koncentracja  $^{14}\text{C}$  w atmosferze zmniejszyła się o ok. 30%. Charakter zmian  $\Delta^{14}\text{C}$  jest bardzo podobny do obserwowanego w kilku innych okresach IX, X i XI tysiąclecia BP. Przeprowadzona kalibracja aparatury umożliwia uzyskiwanie dokładności rzędu 20-40 lat również w rutynowych datowaniach.

### WSTĘP

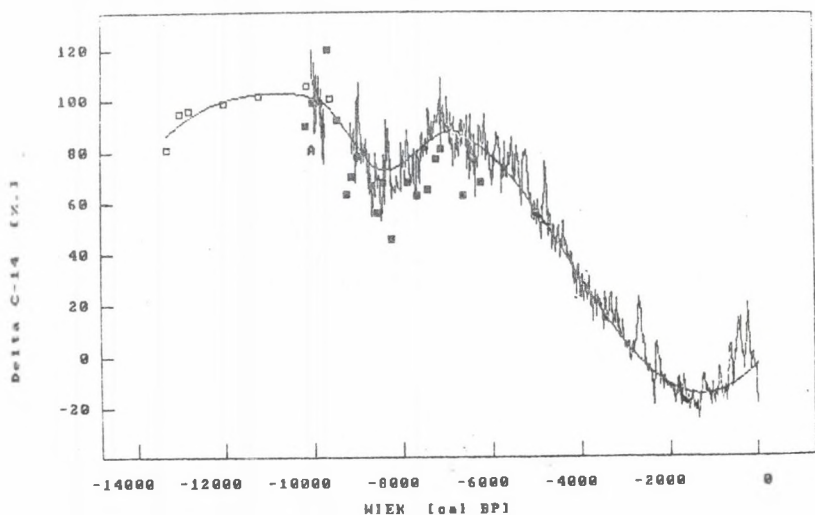
Idea datowania metodą radiowęglową wiąże się z założeniem, że koncentracja izotopu  $^{14}\text{C}$  we wszystkich żyjących organizmach jest taka sama jak w atmosferze, a po śmierci organizmu maleje zgodnie z prawem zaniku promieniotwórczego. Znajomość aktualnej koncentracji  $^{14}\text{C}$  w próbce organicznej ( $A$ ) oraz koncentracji  $^{14}\text{C}$  w organizmie w momencie jego obumarcia ( $A_0$ ) pozwala określić czas, jaki upłynął od chwili obumarcia organizmu. Przy określeniu konwencjonalnego wieku radiowęglowego:

$$T_{\text{conv}} = -8033 \cdot \ln \frac{A}{A_{\text{st}}}$$

zamiast niemożliwej do bezpośredniego zmierzenia koncentracji w chwili obumarcia wykorzystuje się koncentrację  $^{14}\text{C}$  w tzw. standardzie aktywności współczesnej biosfery ( $A_{\text{st}}$ ), zakładając, że koncentracja radiowęglu w atmosferze i żyjącej biosferze nie zmieniała się z upływem czasu. Założenie to nie jest jednak ściśle spełnione. Uwzględnienie w datowaniu radiowęglowym naturalnej zmienności atmosferycznej koncentracji  $^{14}\text{C}$  prowadzi do określenia tzw. wieku kalibrowanego ( $T_{\text{cal}}$ ), będącego przybliżeniem rzeczywistego wieku próbki. Zależność między wiekiem konwencjonalnym a kalibrowanym, tzw. krzywą kalibracyjną można określić wykonując pomiary  $^{14}\text{C}$  w próbkach o znanym skądinąd wieku, np. w dendrochronologicznie datowanych słojach drzew. Znajomość krzywej kalibracyjnej  $T_{\text{conv}} = f(T_{\text{cal}})$  jest równoważna znajomości atmosferycznej koncentracji izotopu  $^{14}\text{C}$  w dowolnej chwili czasu, tj. funkcji  $A_0(t)$ . Koncentrację tą przedstawia się zwykle w formie odchyłki od koncentracji  $^{14}\text{C}$  w standardzie aktywności współczesnej biosfery wyrażonej w promilach.

## KALIBRACJA RADIOWĘGLOWEJ SKALI CZASU I JEJ KONSEKWENCJE

Wyniki wykonanych dotychczas pomiarów kalibracyjnych, zebranych w oddzielnym tomie czasopisma "Radiocarbon" (Calibration Issue, t. 28, Nr 2B, 1986) przedstawiono na rys. 1. Pomiary kalibracyjne w słojach drzew sięgają do ok. 9150 lat wstecz. Objęcie kalibracją okresów wcześniejszych



Ryc. 1. Zmiany atmosferycznej koncentracji  $^{14}\text{C}$  w przeszłości. Dane kalibracyjne pochodzą z prac Pearsona et al (1986), Stuivera et al (1986), Kromera et al (1986) i Linicka et al (1986); kwadraty otwarte przedstawiają dane pochodzące z datowań  $^{14}\text{C}$  szwedzkich chronologii warwowych (Tauber, 1970), kwadraty wypełnione - dane pochodzące z datowania osadów laminowanych jez. Lake of the Clouds (Stuiver, 1970, 1971). Trend długookresowy aproksymowano w okresie 0-6500 cal BP sinusoidą, w okresie 6500-9200 cal BP - wielomianem trzeciego stopnia, a w okresie 9200-13300 cal BP - krzywą sklejaną (Reinsch, 1967). Do trendu długookresowego dopasowano sekwencję otrzymaną w wyniku pomiarów koncentracji  $^{14}\text{C}$  w słojach dębu z Lublinka (fragment A).

Fig. 1. Pattern of natural  $^{14}\text{C}$  variations in the past. Calibration data are quoted after Pearson et al (1986), Stuiver et al (1986), Kromer et al (1986) and Linick et al (1986); open boxes - Stuiver (1970, 1971), filled boxes - Tauber (1970). For the periods 0-6500 cal BP, 6500-9200 cal BP and 9200-13,300 cal BP a sinusoid, 3rd-order polynomial and spline function (Reinsch, 1967) have been fitted, respectively. Approximately matched sequence of  $\Delta^{14}\text{C}$  from Lublink oak is represented by the fragment A.

uwarunkowane jest wydłużeniem istniejących absolutnych skal dendrochronologicznych, co z uwagi na znikomą ilość zachowanych tak starych pni napotyka na ogromne trudności. Przybliżoną informację o wcześniejszym przebiegu zmian  $\Delta^{14}\text{C}$  (rys. 1) dają wyniki pomiarów aktywności  $^{14}\text{C}$  w próbkach pochodzących z osadów laminowanych jeziora Lake

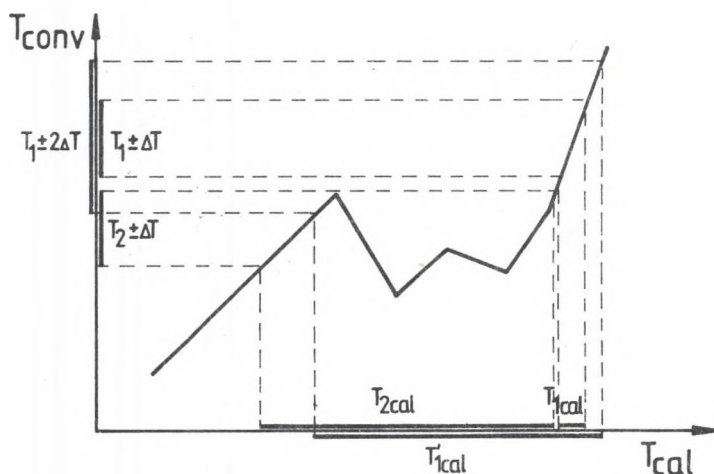
of the Clouds w USA (Stuiver, 1970, 1971) i w próbkach o wieku określonym na podstawie szwedzkich chronologii warwowych (Tauber, 1970), zebrane w publikacji Stuivera et al (1986).

Przyczyną zmian koncentracji  $^{14}\text{C}$  w atmosferze są wahania szybkości produkcji tego izotopu przez promieniowanie kosmiczne oraz wahania w cyklu geochemicznym węgla. Przez długi czas uważano, że wyraźny długookresowy trend zmian  $\Delta^{14}\text{C}$  jest odbiciem powolnych zmian natężenia ziemskiego pola magnetycznego (np. Bucha, 1970; Damon, Linick, 1986). Obecnie istnieją podstawy by sądzić, że może on być również częściowo efektem stopniowego spadku globalnej koncentracji radiowęgla po gwałtownym zmniejszeniu się szybkości produkcji  $^{14}\text{C}$  (np. Siegenthaler, Beer, 1988; Beer et al, 1988). Wahania koncentracji  $^{14}\text{C}$  o okresie 100-200-letnim związane są ze zmianami aktywności słonecznej mającej wpływ na natężenie międzyplanetarnego pola magnetycznego (np. Stuiver, Quay, 1981; Siegenthaler, Beer, 1988; Stuiver, Braziunas, 1988). Amplituda tych wahań jest w okresie od 9 do 5 tys. lat wstecz wyraźnie większa niż w okresie późniejszym, co może być wynikiem modulacji efektów zmian pola międzyplanetarnego przez zmieniające się ziemskie pole magnetyczne (Damon, 1988). Wydaje się, że wpływ zmian w cyklu geochemicznym węgla na koncentrację  $^{14}\text{C}$  w atmosferze może być istotny zwłaszcza w okresie szczególnie drastycznych zmian klimatu, a więc np. na początku holocenu. Najbardziej znaczące byłyby tu możliwe zmiany szybkości dyfuzji węgla w oceanie oraz szybkości wymiany węgla między oceanem a atmosferą, zmiany masy biosfery oceanicznej i lądowej i prawdopodobnie związany z nimi obserwowany na początku holocenu (np. Neftel et al, 1988) wzrost koncentracji  $\text{CO}_2$  w atmosferze (Siegenthaler et al, 1980, 1988; Siegenthaler, Beer, 1988). Wspomniane zależności wskazują, że znajomość zmian atmosferycznej koncentracji  $^{14}\text{C}$  może być pomocna w odtworzeniu zmian środowiska przyrodniczego Ziemi a także może być źródłem informacji o przeszłości Słońca.

Zmienność koncentracji  $^{14}\text{C}$  w atmosferze i wynikający z niej fakt istnienia krzywej kalibracyjnej mają również konsekwencje dla samego datowania radiowęglowego. Efekty związane ze zmianą rozkładu prawdopodobieństwa przy przejściu od wieku konwencjonalnego do kalibrowanego są przedmiotem oddzielnego artykułu w niniejszym tomie (Michczyńska, Pazdur, 1989). Inną konsekwencją jest fakt, że przy kalibracji dat radiowęglowych szczególnego znaczenia nabiera dokładność określenia wieku konwencjonalnego. W uproszczeniu ilustruje to rys. 2, z którego widać, że zmniejszenie niepewności wieku konwencjonalnego  $T_1$  od wartości  $2\Delta T$  do  $\Delta T$  daje kilkakrotne zmniejszenie błędu wieku kalibrowanego. Z drugiej strony, niewielkie zafałszowanie wieku konwencjonalnego (np. podanie wartości  $T_1$  zamiast poprawnej  $T_2$ ) może spowodować znaczne zafałszowanie wieku kalibrowanego, niebezpieczne zwłaszcza, gdy błąd podany przez laboratorium radiowęglowe jest niewielki. Oprócz potrzeby zmniejszenia błędu wieku konwencjonalnego ważne jest więc realistyczne określenie jego wartości.

## BŁĄD WIEKU KONWENCJONALNEGO I POMIARY RADIOWĘGLOWE O PODWYŻSZONEJ DOKŁADNOŚCI

Błąd w określeniu wieku konwencjonalnego związany jest, ogólnie rzecz biorąc, ze statystycznym charakterem zjawisk badanych w procesie pomiaru, oraz z występowaniem niestabilności pracy aparatury pomiarowej. Laboratoria radiowęglowe przy obliczeniu błędu wieku uwzględniają wyłącznie niepewność związaną ze statystyką zliczeń, lub biorą również pod uwagę niepewności związane z dającymi się kontrolować wahaniami warunków pracy aparatury. Istnienie fluktuacji niekontrolowanych powoduje, że rzeczywisty błąd wieku ( $\Delta T_r$ ) jest z reguły większy od podawanego przez laboratorium błędu  $\Delta T_p$ . Stuiver (1982) wprowadził pojęcie tzw. mnożnika błędów  $K$ , zdefiniowanego wzorem  $K = \Delta T_r / \Delta T_p$ . Rzeczywisty błąd wieku konwencjonalnego można ocenić tylko przez porównanie wyników niezależnych datowań tych samych próbek.



Ryc. 2. Uproszczona procedura kalibracji wieku radiowęglowego.

Fig. 2. A simplified procedure of calibration of radiocarbon age.

Impulsem do podjęcia starań o uzyskanie dokładności datowania rzędu 20–40 lat w Laboratorium  $^{14}\text{C}$  w Gliwicach stało się znalezienie pnia dębu w rejonie miejscowości Lublinek w dolinie Neru, będącego obecnie najstarszym pnem dębu znalezionym na terenie Polski (Goslar, Pazdur, 1985). Pomiar koncentracji  $^{14}\text{C}$  w słojach tego pnia miały pozwolić na odtworzenie przebiegu zmian atmosferycznej koncentracji  $^{14}\text{C}$  w 300-letnim okresie X tysiąclecia BP, a także rozpocząć wykonywanie rutynowych datowań o podwyższonej dokładności.

W pomiarach o podwyższonej dokładności wykorzystywany jest licznik proporcjonalny o objętości ok. 4 l, uruchomiony w obecnym ustawieniu w połowie roku 1983 (Goslar et al, 1989a). Dla pomiarów tych zbudowano

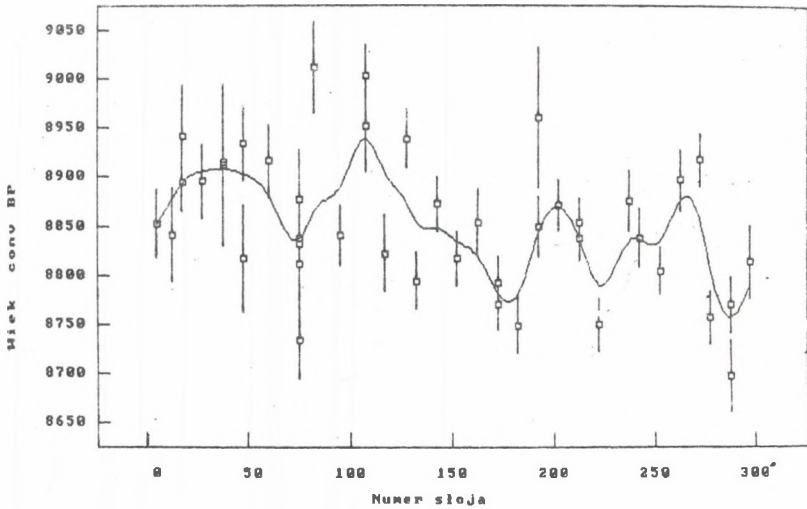
oddzielne linie do spalania próbek, oczyszczania CO<sub>2</sub> i wypełniania licznika. Pozwoliło to na uzyskiwanie powtarzalnej, wysokiej czystości gazu wprowadzanego do licznika, a w konsekwencji na zmniejszenie niestabilności pracy aparatury. Jako próbki wzorcowe używa się, obok międzynarodowego standardu Oxalic Acid NBS, również datowanego dendrochronologicznie drewna z pni dębów kopalnych z doliny Odry.

Czas pomiaru jednej próbki wynosi od 4 do 8 dni. Niestabilności pracy aparatury są częściowo kontrolowane przez ciągły pomiar napięcia pracy licznika, pomiar natężenia składowej mionowej promieniowania kosmicznego, pomiary ciśnienia CO<sub>2</sub> wypełniającego licznik oraz kontrolę wydajności detekcji mionów, a w przypadku niewielkich odchyłeń od warunków standardowych uwzględniane są odpowiednie poprawki (por. Goslar et al, 1989b).

Obliczany błąd wieku uwzględnia niepewności związane ze statystyką zliczeń oraz z niedokładnością kontroli parametrów fizycznych aparatury i niedokładnością wprowadzonych poprawek. Informację o wielkości błędu rzeczywistego można uzyskać z następujących oszacowań. Porównanie wyników dwu- lub wielokrotnych pomiarów dla dwunastu próbek z dębu z Lublinka wskazuje, że przy błędzie laboratoryjnym zawierającym się w zakresie 25-50 lat mnożnik błędu K wynosi ok. 1.1. Z porównania wyników wielokrotnie powtarzanych pomiarów dla próbek wzorcowych wynika, że przy średnim błędzie laboratoryjnym pojedynczego pomiaru wynoszącym ok. 16 lat, mnożnik K wynosi ok. 1.6. W ramach międzynarodowego programu kontroli międzylaboratoryjnej ICS (Scott et al, 1987) datowane były cztery próbki drewna datowanego dendrochronologicznie przez laboratorium w Belfaście. Porównanie otrzymanych wyników z wiekiem odczytanym z krzywej kalibracyjnej wskazuje, że błąd rzeczywisty zawarty jest w granicach 20-40 lat (por. Awwsiuk et al, 1989).

#### ZMIANY KONCENTRACJI <sup>14</sup>C W X TYSIĄCLECIU BP

Wyniki datowań próbek z pnia dębu z Lublinka przedstawia rys. 3. Próbkę zawierały zwykle po 5 słoje rocznych. Ponieważ wiek dendrochronologiczny pnia nie jest znany, określenie bezwzględnej aktywności początkowej <sup>14</sup>C nie jest możliwe. Przybliżoną informację o rzeczywistym wieku i bezwzględnej aktywności początkowej <sup>14</sup>C można uzyskać przez dopasowanie krzywej przedstawiającej uzyskane wyniki do istniejących danych kalibracyjnych (rys. 1). Najlepsze dopasowanie uzyskuje się, gdy badana sekwencja zawiera się w przedziale od 9750 do 10050 lat kalibrowanych. Zależność atmosferycznej koncentracji <sup>14</sup>C od czasu, określona przy przyjęciu takiego wieku bezwzględnego przedstawia rys. 4. Widoczny jest znaczny spadek atmosferycznej aktywności <sup>14</sup>C, o ok. 30% w ciągu 300 lat, z niewielkimi wahaniami. Trzeba podkreślić, że kształt krzywej przedstawiającej zmiany  $\Delta^{14}\text{C}$  jest niezależny od rzeczywistego wieku pnia. Maksima koncentracji <sup>14</sup>C wydają się odpowiadać minimom szerokości przyrostów rocznych pnia. Podobna ujemna korelacja między szerokością słoje

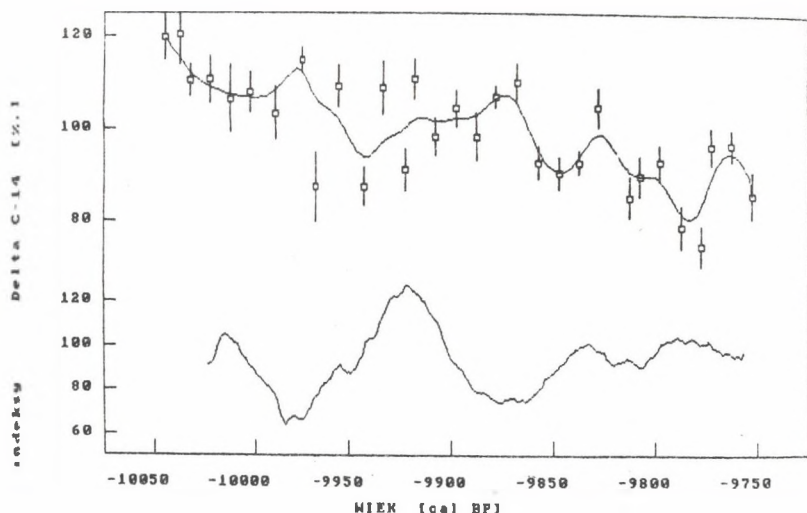


Ryc. 3. Wyniki datowań 31 próbek z pnia dębu z Lublinka. Dla 11 próbek wykonano po dwa pomiary, pomiar jednej próbki wykonano pięciokrotnie. Wygładzona krzywa została wyznaczona według algorytmu przedstawionego przez Reinscha (1967).

Fig. 3. Results of radiocarbon measurements for 31 samples from Lublinek oak. 12 replicated measurements have been done. Smoothed curve represents spline function calculated after Reinsch (1967).

a koncentracja  $^{14}\text{C}$  jest obserwowana w wielu okresach dla średnich przyrostów dębów tworzących skonstruowane w RFN długie skale dendrochronologiczne (Schmidt, Gruhle, 1988), istnieją również hipotezy dotyczące przyczyn występowania ujemnej korelacji między wahaniami klimatu a zmianami szybkości produkcji  $^{14}\text{C}$  (Roedel, 1980). Dopatrując się ewentualnych analogii trzeba jednak pamiętać, że w przypadku pojedynczego pnia dębu z Lublinka zmiany szerokości przyrostów mogą być spowodowane bardzo wieloma czynnikami.

Interesujące jest, czy przebieg zmian atmosferycznej koncentracji  $^{14}\text{C}$  zrekonstruowany na podstawie prezentowanych pomiarów powtórzył się kiedykolwiek w późniejszym okresie. Dla zbadania tego problemu, 300-letni odcinek zrekonstruowanej krzywej przesuwano co 20 lat wzdłuż skali wieku kalibrowanego i dla każdego położenia obliczano wartość parametru S, będącego miarą podobieństwa przebiegu przesuwanego odcinka i odpowiedniego



Ryc. 4. A - zmiany koncentracji  $^{14}\text{C}$  w atmosferze w 300-letnim okresie X tysiąclecia BP, wyznaczone na podstawie pomiarów  $^{14}\text{C}$  w słojach dębu z Lublinka po dopasowaniu do istniejących, przybliżonych danych kalibracyjnych (por. rys. 1). B - zredukowane szerokości (tzw. indeksy) przyrostów rocznych pnia dębu z Lublinka, obliczone po wyeliminowaniu wykładniczego trendu wiekowego (por. Schweingruber, 1988).

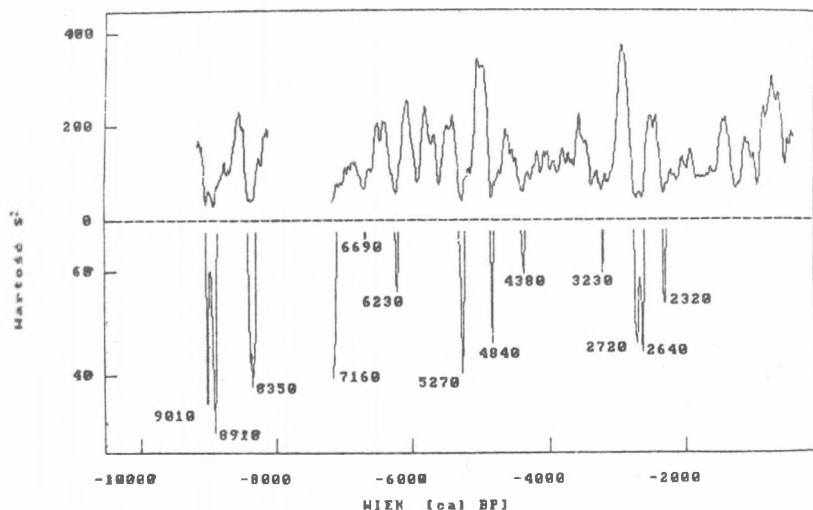
Fig. 4. A - natural  $^{14}\text{C}$  variations for the 300-yr period in the X-th millenium BP, derived from radiocarbon measurements for Lublinek oak, calculated after matching to approximate calibration data (cf fig. 1). B - tree-ring indices, calculated after fitting negative exponential function to tree-ring width sequence (cf Schweingruber, 1988).

fragmentu krzywej kalibracyjnej. Wartość S zdefiniowana jest wzorem:

$$S = \sum_{i=1}^{21} \frac{|l_i - c_i - a|}{\sqrt{(\Delta l_i)^2 + (\Delta c_i)^2}}$$

gdzie  $l_i$  i  $c_i$  oznaczają składowe  $\Delta^{14}\text{C}$  dla punktów przesuwanej sekwencji i odpowiadających im punktów z krzywej przedstawiającej dane kalibracyjne, otrzymane po odjęciu trendu długookresowego (por. rys. 1). Wartość parametru  $a$  była dla każdej pozycji dopasowania dobierana w celu zminimalizowania sumy S, tak więc w rzeczywistości porównywany był tylko kształt krzywych. Na rys. 5A wartość sumy S przedstawiono w funkcji

pozycji starszego końca dopasowywanej sekwencji. Najniższe minima powiększono w dolnej części rysunku (5B). Istnienie minimum dla wieku kalibrowanego 4800 lat oznacza przykładowo, że w przedziale od 4500 do 4800 lat kalibrowanych przebieg zmian atmosferycznej koncentracji  $^{14}\text{C}$  był bardzo podobny jak w 300-letnim okresie przebadanym w prezentowanych



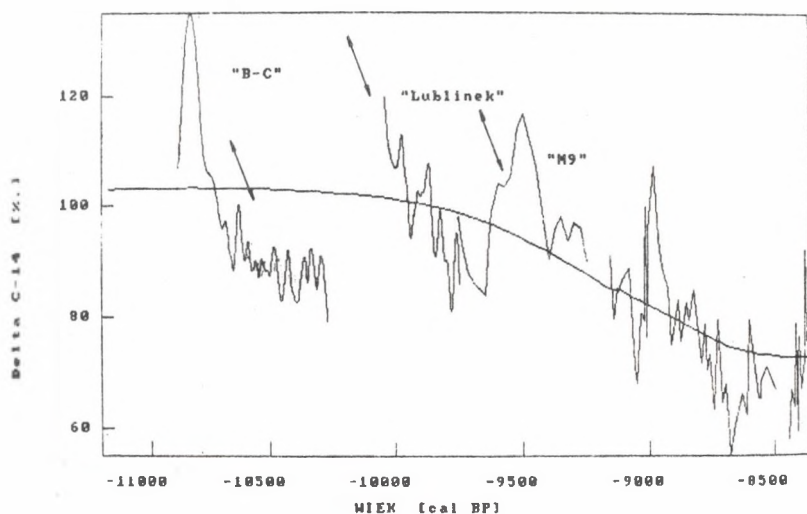
Ryc. 5. A - suma odchyłek S, wyznaczona w procedurze dopasowania sekwencji  $\Delta^{14}\text{C}$  zrekonstruowanej na podstawie pomiarów  $^{14}\text{C}$  w słojach dębu z Lublinka do odpowiedniego fragmentu krzywej kalibracyjnej, przedstawiona w funkcji pozycji dopasowania. B - powiększenie najniższych minimów funkcji S. Oznaczone zostały pozycje odpowiadające największemu podobieństwu kształtów.

Fig. 5. A - sum of residuals from wiggle-matching of  $\Delta^{14}\text{C}$  sequence from Lublinek oak to available  $^{14}\text{C}$  calibration data, plotted vs matching position. B - enlarged fragment of fig 5A for the lowest minima. Positions corresponding to best similarities are denoted.

pomiarach. Można zauważyć istnienie trzech grup zawierających po trzy minima, odpowiadające wiekom wynoszącym 2270, 2580/2670 i 3180 lat, 4320, 4800 i 5220 lat oraz 6180, 6640 i 7010 lat. Odstępy między minimami w poszczególnych grupach są w przybliżeniu takie same; podobne są również odstępy czasu pomiędzy grupami. Czwarta grupa, 8350 i 8910/9010 lat, może być niekompletna ze względu na brak danych kalibracyjnych dla wcześniejszego okresu. Taka forma prezentacji jest innym sposobem pokazania okresowości występujących w zapisie zmian atmosferycznej koncentracji  $^{14}\text{C}$  w przeszłości. Można zauważyć również, że minima są tym



niższe, a więc podobieństwo przebiegów jest tym lepsze, im mniejszy jest odstęp czasu między zrekonstruowaną sekwencją a porównywanym fragmentem krzywej kalibracyjnej. Wiąże się to ze wspomnianym na wstępie wzrostem amplitudy wahań  $\Delta^{14}\text{C}$  w starszych okresach czasu. Ostatnie minima odpowiadają przedziałom czasu, w których przebieg zmian koncentracji  $^{14}\text{C}$



Ryc. 6. Zmiany atmosferycznej koncentracji  $^{14}\text{C}$  w X i XI tysiącleciu BP, zrekonstruowane na podstawie pomiarów  $^{14}\text{C}$  w słojach drzew z chronologii pływających M9 (Kromer et al, 1986), B-C (Becker, Kromer, 1986) oraz dębu z Lublinka. Dane bezwzględne sięgają do ok. 9150 cal BP. Ze względu na nieznaną wiek dendrochronologiczny krzywe odpowiadające poszczególnym chronologiom mogą ulec przesunięciu w kierunkach zaznaczonych strzałkami.

Fig. 6. Natural  $^{14}\text{C}$  variation in X and XI millenium BP, derived from  $^{14}\text{C}$  measurements for floating series M9 (Kromer et al, 1986), B-C (Becker, Kromer, 1986), and for Lublinek oak. Absolute calibration data reach 9150 cal BP. Since dendrochronological age of all series is not known, corresponding curves may be shifted to the direction denoted by arrows.

jest praktycznie nieodróżnialny od zrekonstruowanego w prezentowanych pomiarach (por. rys. 6).

Przedstawione pomiary aktywności  $^{14}\text{C}$  w słojach drzewa o wieku wykraczającym poza obecny zasięg absolutnych skal dendrochronologicznych,

nie są jedynymi tego typu badaniami na świecie. Opublikowane zostały wyniki pomiarów wykonanych w laboratorium radiowęglowym w Heidelbergu dla dwóch pływających skal dendrochronologicznych, dębowej (tzw. M9) i sosnowej (tzw. B-C), skonstruowanych przez B. Beckera (Kromer et al, 1986; Becker, Kromer, 1986). Odcinki krzywych przedstawiających zmiany  $\Delta^{14}\text{C}$ , zrekonstruowane na podstawie tych chronologii i pnia dębu z Lublinka przedstawiono na rys. 6. Dopasowanie krzywej odpowiadającej chronologii M-9 do długookresowego trendu zmian koncentracji  $^{14}\text{C}$  dokonane zostało przez B. Kromera et al (1986). Ze względu na nieznaną wiek dendrochronologicznego krzywe odpowiadające wszystkim trzem chronologiom mogą ulec pewnemu przesunięciu w kierunkach oznaczonych strzałkami. Można jednak mieć nadzieję, że zgodność przebiegów zachodzących na siebie fragmentów krzywej M-9 i krzywej odpowiadającej dębowi z Lublinka nie jest przypadkowa. Amplitudy zmian koncentracji  $^{14}\text{C}$ , są dla wszystkich trzech fragmentów podobne.

Trzeba podkreślić, że obserwowane duże spadki koncentracji  $^{14}\text{C}$  w okresie X i XI tysiąclecia BP oznaczają istnienie długich przedziałów czasu, dla których wiek radiowęglowy się niemal nie zmienia. Stwarzać to więc będzie znaczną barierę zmniejszającą dokładność określenia wieku bezwzględnego metodą radiowęglową w tym okresie.

#### PODZIĘKOWANIE

Praca wykonana została w ramach programu badawczego CPBP 01.06.

#### LITERATURA

- Awsiuk R., Goslar T., Pazdur A., Pazdur M. F., Walanus A., Zastawny A., 1989, Międzylaboratoryjna weryfikacja dokładności datowań radiowęglowych; Zesz. Nauk. Pol. Śląskiej, Seria Mat.-Fiz., Z. 61, Geochronometria Nr 6, s.
- Becker B., Kromer B., 1986, Extension of the Holocene dendrochronology by the Preboreal pine series, 8800 to 10,100 BP; Radiocarbon, t. 28, s. 964-968.
- Beer J., Siegenthaler U., Blinov A., 1988a, Temporal  $^{10}\text{Be}$  variations in ice: information on solar activity and geomagnetic field intensity; [w:] Stephenson F. R., Wolfendale A. W., (Eds), Secular Solar and Geomagnetic Variations in the Last 10,000 Years. Proc. NATO Adv. Res. Workshop, Kluwer Acad. Publ., s. 297-313.
- Bucha V., 1970, Influence of the earth's magnetic field on radiocarbon dating; [w:] Olsson I. U. (Ed.), Radiocarbon variations and absolute chronology, Proc. 12th Nobel Symposium, New York, John Wiley and Sons, s. 501-510.
- Damon P. E., 1988, Production and decay of radiocarbon and its modulation by geomagnetic field-solar activity changes with possible implications for global environment; [w:] Stephenson F. R.,

- Wolfendale A. W., (Eds), Secular Solar and Geomagnetic Variations in the Last 10,000 Years, Proc. NATO Adv. Res. Workshop, Kluwer Acad. Publ., s. 267-285.
- Damon P. E., Linick T. W., 1986, Geomagnetic-heliomagnetic modulation of atmospheric radiocarbon production; Radiocarbon, t. 28, s. 266-278.
- Goslar T., Michczyńska D. J., Pazdur M. F., 1989, Datowanie radiowęglowe wysokiej precyzji i probabilistyczna kalibracja dat radiowęglowych; Archeologia Polski (w druku).
- Goslar T., Pazdur A., Pazdur M. F., Walanus A., Zastawny A., 1989, Stanowisko licznika L2, używane w pomiarach  $^{14}\text{C}$  o podwyższonej dokładności; Zesz. Nauk. Pol. Śl., Seria Mat.-Fiz., Z. 61, Geochronometria Nr 6, s. 83-89.
- Goslar T., Pazdur M. F., 1985, "Czarny dąb" z Lublinka - najstarszy dąb kopalny z terenu Polski; Wszechświat, t. 86, s. 203-204.
- Kromer B., Rhein M., Bruns M., Schoch-Fischer H., Münnich K. O., Stuiver M., Becker B., 1986, Radiocarbon calibration data for the 6th to the 8th millenia BC; Radiocarbon, t. 28, s. 954-960.
- Linick T. W., Long A., Damon P. E., Ferguson C. W., 1986, High-precision radiocarbon dating of bristlecone pine from 6554 to 5350 BC; Radiocarbon, t. 28, s. 943-953.
- Michczyńska D. J., Pazdur M. F., Walanus A., 1988, Bayesian approach to probabilistic calibration of radiocarbon dates; PACT (w druku).
- Neftel A., Oeschger H., Staffelbach T., Stauffer B., 1988,  $\text{CO}_2$  record in the Byrd ice core 50,000 - 5,000 years BP; Nature, t. 295, s. 222-223.
- Pearson G. W., Pilcher J. R., Baillie M. G. L., Corbett D. M., Qua F., 1986, High-precision  $^{14}\text{C}$  measurements of Irish oaks to show the natural  $^{14}\text{C}$  variation from AD 840-5210 BC; Radiocarbon, t. 28, s. 911-934.
- Reinsch C. H., 1967, Smoothing by spline functions; Numerische Mathematik, t. 10, s. 177-183.
- Roedel W., 1980, On the climate-radiocarbon relationship: nitric oxide and ozone as connecting links between radiation and Earth's surface temperature; Radiocarbon, t. 22, s. 250-259.
- Schmidt B., Gruhle W., 1988, Klima, Radiokohlenstoffgehalt und Dendrochronologie; Naturwiss. Rundschau, t. 41, s. 177-182.
- Schweingruber F. H., 1988, Tree-rings; basics and applications of dendrochronology; D. Reidel Publ. Coms., Dordrecht, Boston, Lancaster, Tokyo, 276s.
- Scott E. M., Baxter M. S., Harkness D. D., Aitchison T. C., Cook G. T., 1987, Recent progress in the international calibration of radiocarbon laboratories; Proc. 2nd  $^{14}\text{C}$  and Archaeology Conf., Groningen, Sept. 1987 (preprint).
- Siegenthaler U., Beer J., 1988, Model comparison of  $^{14}\text{C}$  and  $^{10}\text{Be}$  isotope records; [w:] Stephenson F. R., Wolfendale A. W., (Eds), Secular

- Solar and Geomagnetic Variations in the Last 10,000 Years, Proc. NATO Adv. Res. Workshop, Kluwer Acad. Publ., s. 315-328.
- Siegenthaler U., Heimann M., Oeschger H., 1980,  $^{14}\text{C}$  variations caused by changes in the global carbon cycle; Radiocarbon, t. 22, s. 177-191.
- Stuiver M., 1970, Long-term  $^{14}\text{C}$  variations; [w:] Olsson I. U. (Ed.), Radiocarbon variations and absolute chronology, Proc. 12th Nobel Symposium, New York, John Wiley and Sons, s. 197-213.
- Stuiver M., 1971, Evidence for the variation of atmospheric  $^{14}\text{C}$  content in the Late Quaternary; [w:] Turekian K. K., (Ed.), The Late Cenozoic glacial ages: New Haven, Yale Univ Press, s. 57-70.
- Stuiver M., 1982, A high-precision calibration of the AD radiocarbon timescale; Radiocarbon, t. 24, s. 1-26.
- Stuiver M., Braziunas T. F., 1988, The solar component of the atmospheric  $^{14}\text{C}$  record; [w:] Stephenson F. R., Wolfendale A. W., (Eds), Secular Solar and Geomagnetic Variations in the Last 10,000 Years, Proc. NATO Adv. Res. Workshop, Kluwer Acad. Publ., s. 245-266.
- Stuiver M., Kromer B., Becker B., Ferguson C. W., 1986, Radiocarbon age calibration back to 13,300 years BP and the  $^{14}\text{C}$  age matching of the german oak and US bristlecone pine chronologies; Radiocarbon, t. 28, s. 969-979.
- Stuiver M., Quay P. D., 1981, Atmospheric  $^{14}\text{C}$  changes resulting from fossil fuel  $\text{CO}_2$  release and cosmic ray flux variability; Earth Planet. Sci. Lett., t. 53, s. 349-362.
- Tauber H., 1970, The scandinavian varve chronology and  $^{14}\text{C}$  dating; [w:] Olsson I. U. Ed., Radiocarbon variations and absolute chronology, Proc. 12th Nobel Symposium, New York, John Wiley and Sons, s. 173-196.

Wpłynęło do Redakcji: 21 marca 1989 r.

#### CHANGES OF $^{14}\text{C}$ CONCENTRATION IN ATMOSPHERIC $\text{CO}_2$ IN X MILLENIUM BP EVALUATED FROM IMPROVED PRECISION $^{14}\text{C}$ MEASUREMENTS

##### Summary

The paper presents results of  $^{14}\text{C}$  measurements in tree-rings of the fossil oak trunk from Lublinek, performed with improved precision using carbon dioxide-filled proportional counter. The results indicate that in the time interval from 10050 to ca 9750 cal BP the  $^{14}\text{C}$  concentration in atmospheric carbon dioxide decreased by ca 30 %. It was also proved that the patterns of  $\Delta^{14}\text{C}$  changes observed in measured tree-ring record is very similar to these observed in other data from several periods in IX, X and XI millennia BP. The calibration of the measuring equipment during this study enables application of the counting set-up routine dating of archaeological samples with improved accuracy, i.e. with standard error of  $\pm 20 - \pm 40$  years.

ИЗМЕНЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ИЗОТОПА  $^{14}\text{C}$  В АТМОСФЕРЕ X ТЫС ЛЕТ ТОМУ НАЗАД

## Резюме

В статье приводят результаты измерений концентрации радиоуглерода в годовых кольцах дуба найденного в аллювиальных отложениях реки Нер вблизи местности Лублинек. Измерения были проведены при использовании пропорционального счётчика выполненного чистой двуокисью углерода с повышенной точностью. Полученные результаты показывают, что между 10050 и 9750 лет тому назад концентрация радиоуглерода в атмосферной двуокиси углерода уменьшилась в 30%. Доказано тоже что изменения  $\Delta^{14}\text{C}$  в исследуемом промежутке времени очень похожи изменениям, которые по результатам измерений других авторов были найдены в соответствующих промежутках времени в IX, X и XI тысячелетии ВР. Проведена автором калибровка измерительной системы позволяет на датирование археологических образцов с повышенной точностью, что означает что стандартная ошибка измерения возраста равна приблизительно  $\pm 20 - \pm 40$  лет.