

TOMASZ GOSLAR
DANUTA J. MICHCZYŃSKA,
MIECZYŚLAW F. PAZDUR

DATOWANIE RADIOWĘGŁOWE WYSOKIEJ PRECYZJI I PROBABILISTYCZNA KALIBRACJA DAT RADIOWĘGŁOWYCH¹

W ostatnich kilku latach nastąpił istotny postęp w dziedzinie kalibracji radiowęglowej skali czasu, podsumowany opublikowaniem zbioru opracowań kalibracyjnych w postaci specjalnego zeszytu czasopisma „Radiocarbon” (Calibration issue, vol. 28, Nr 2B, 1986), zawierającego między innymi zestaw trzech precyzyjnych krzywych kalibracyjnych. Równocześnie w Laboratorium C-14 Instytutu Fizyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach podjęte zostały przed kilkoma laty prace zmierzające do uruchomienia stanowiska pomiarowego, umożliwiającego datowanie próbek organicznych z dokładnością kilkakrotnie wyższą niż uzyskiwana dotychczas. Prace te, w poważnym stopniu zakłócone i opóźnione wskutek skażenia radioaktywnego laboratorium (M.F. Pazdur, A. Zastawny 1987) po awarii reaktora jądrowego w Czernobylu, zostały wznowione po usunięciu skażenia i w konsekwencji doprowadziły do zadowalających rezultatów. Te dwa elementy, to znaczy opublikowanie wysokiej precyzji krzywych kalibracyjnych oraz możliwość wykonywania precyzyjnych datowań, stanowiły impuls do rozpoczęcia badań nad opracowaniem odpowiednich metod kalibracji dat radiowęglowych. Rezultatem tych badań jest opracowanie algorytmu i odpowiedniego programu komputerowego realizującego probabilistyczną kalibrację dat radiowęglowych. Systematyczny postęp prac w trzech wymienionych dziedzinach stworzył w konsekwencji warunki zmieniające w zasadniczy sposób możliwości badawcze Laboratorium C-14, zwłaszcza w odniesieniu do archeologicznych zastosowań metody radiowęglowej.

Celem obecnego artykułu jest skrótowne przedstawienie osiągniętych rezultatów i próba sformułowania ich konsekwencji dla datowania obiektów archeologicznych oraz omówienie metodycznych i metodologicznych warunków ich optymalnego wykorzystania.

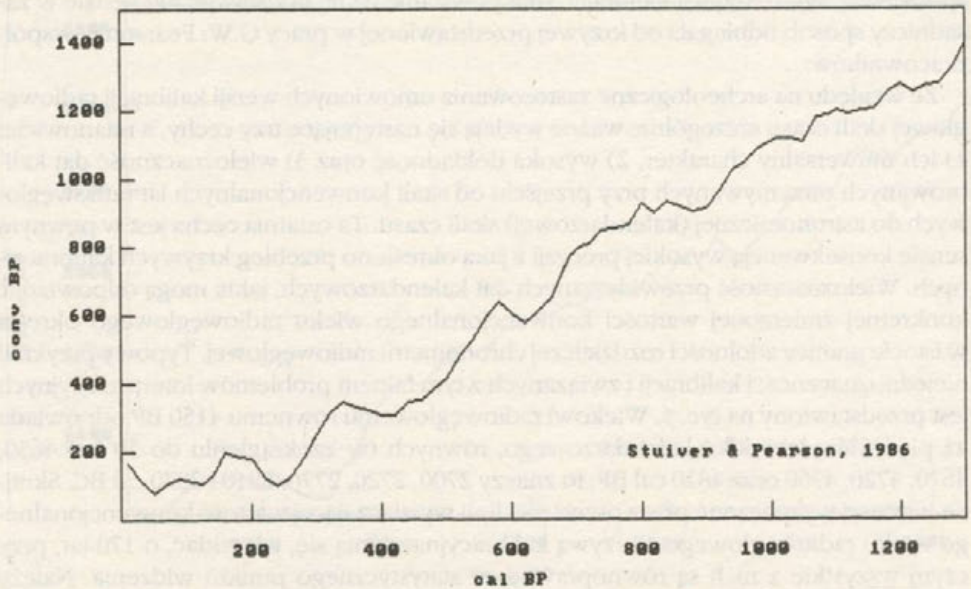
CHARAKTERYSTYKA WSPÓLCZESNYCH WERSJI KALIBRACJI RADIOWĘGŁOWEJ SKALI CZASU

Z opublikowanych we wspomnianym wyżej specjalnym zeszycie czasopisma „Radiocarbon” opracowań poświęconych kalibracji radiowęglowej skali czasu trzy prace zasługują na specjalną uwagę ze względu na ich status formalny oraz znaczenie dla ar-

¹Artykuł niniejszy został przygotowany w ramach badań objętych programem CPBP 08. 14, przy czym budowę stanowiska pomiarowego do datowania o podwyższonej precyzji, jego kalibrację, a także zakup mikrokomputera IBM PC/XT i jego oprogramowanie sfinansowano w latach 1986-1988 z funduszy programu CPBP 01. 06 „Oddziaływanie promieniowania jądrowego z materią”.

cheologicznych zastosowań chronometrii radiowęglowej. Pierwsza praca (M. Stuiver, G.W. Pearson 1986, s. 805-838) zawiera krzywą kalibracyjną przedstawioną w postaci graficznej i tabelarycznej w przedziale czasu od 1850 AD do 500 BC, zaś druga (G.W. Pearson, M. Stuiver 1986, s. 839-862) stanowi jej przedłużenie o dalsze dwa tysiące lat wstecz, obejmując przedział czasu od 500 BC do 2500 BC. Oba opracowania powstały w rezultacie wieloletniej współpracy między laboratoriami radiowęglowymi w Seattle, USA i w Belfaście, kierowanymi przez M. Stuivera i G.W. Pearsona, w czasie której dokonano wszechstronnej weryfikacji wyników uzyskiwanych w obu laboratoriach. Podkreślić przy tym należy, że w laboratoriach tych stosowane są zupełnie różne techniki pomiarowe – laboratorium w Seattle stosuje metodę liczników proporcjonalnych wypełnianych dwutlenkiem węgla, zaś laboratorium w Belfaście – metodę ciekłych scyntylatorów, w której do pomiaru aktywności ^{14}C wykorzystuje się benzen wyprodukowany z dwutlenku węgla otrzymanego ze spalania badanej próbki. Wielokrotnie powtarzane w obu laboratoriach pomiary aktywności ^{14}C tych samych próbek wykazały identyczność wyników, świadcząca o braku błędu systematycznego, który może być trudno uchwytną właściwością stosowanej metody pomiarowej i w takiej sytuacji byłby niewykrywalny na drodze analizy wyników pochodzących tylko z jednego laboratorium. W laboratoriach tych wykorzystano słoje rocznych przyrostów drzew z trzech rejonów, a mianowicie pnie drzew gatunku *Pseudotsuga menziesii* (Douglas fir) i *Sequoiadendron giganteum* z terenu Ameryki Północnej oraz tzw. czarne dęby z terenu Irlandii i Wielkiej Brytanii oraz z obszaru środkowej Europy (głównie z terytorium RFN). Identyczność wyników uzyskanych na drewnie pochodzącym z tak różnorodnych i odległych siedlisk świadczy o tym, że obserwowane zmiany koncentracji izotopu ^{14}C w przeszłości miały charakter globalny, przynajmniej w odniesieniu do obszaru strefy umiarkowanej na półkuli północnej. Wynika stąd, że krzywe kalibracyjne, będące odzwierciedleniem przeszłych zmian koncentracji izotopu ^{14}C w atmosferze i biosferze, mają również charakter uniwersalny dla całej półkuli północnej. Fakt ten jest godny podkreślenia, gdyż krzywe kalibracyjne opracowane na początku lat siedemdziesiątych (H. Suess 1971; E.K. Ralph, H.N. Michael, M.C. Han 1973; P.E. Damon, A. Long, E.I. Wallick 1974) wykorzystywały wyniki pomiarów zmian ^{14}C w słojach długowiecznych drzew *Sequoia gigantea* i *Pinus aristata* rosnących w specyficznych warunkach klimatu górskiego na terenie Ameryki Północnej. Zasadność stosowania tak otrzymanych krzywych kalibracyjnych do wyznaczania wieku kalendarzowego obiektów archeologicznych z zupełnie różnych obszarów klimatycznych, jak np. z rejonu Morza Śródziemnego czy też Niżu Środkowoeuropejskiego, była kwestionowana przez niektórych autorów, i choć późniejsze specjalnie przeprowadzone badania wykluczyły zauważalny wpływ niektórych czynników (jak np. zwiększonego strumienia promieniowania kosmicznego na dużych wysokościach na zawartość izotopu ^{14}C w badanych słojach), to jednak brak było dostatecznie precyzyjnego i przekonującego dowodu uniwersalności tych krzywych kalibracyjnych.

Wyniki współpracy między laboratoriami radiowęglowymi kierowanymi przez M. Stuivera i G.W. Pearsona były przedstawione pod publiczną dyskusję podczas XII Międzynarodowej Konferencji Radiowęglowej w Trondheim w 1985 r. Dyskusja ta zakończyła się formalną decyzją Grupy Roboczej do Spraw Kalibracji Radiowęglowej Skali Czasu, stwierdzającą pełną zgodność wyników uzyskanych w laboratoriach w Seattle i Belfaście oraz prawidłową ocenę błędów przypadkowych i brak zauważalnego błędu systematycznego prezentowanych wyników i zalecającą powszechne stosowanie



Ryc. 1. Krzywa kalibracyjna dla II tysiąclecia n.e. Opracowanie autorów wg danych liczbowych M. Stuivera i G.W. Pearsona 1986, s. 821.

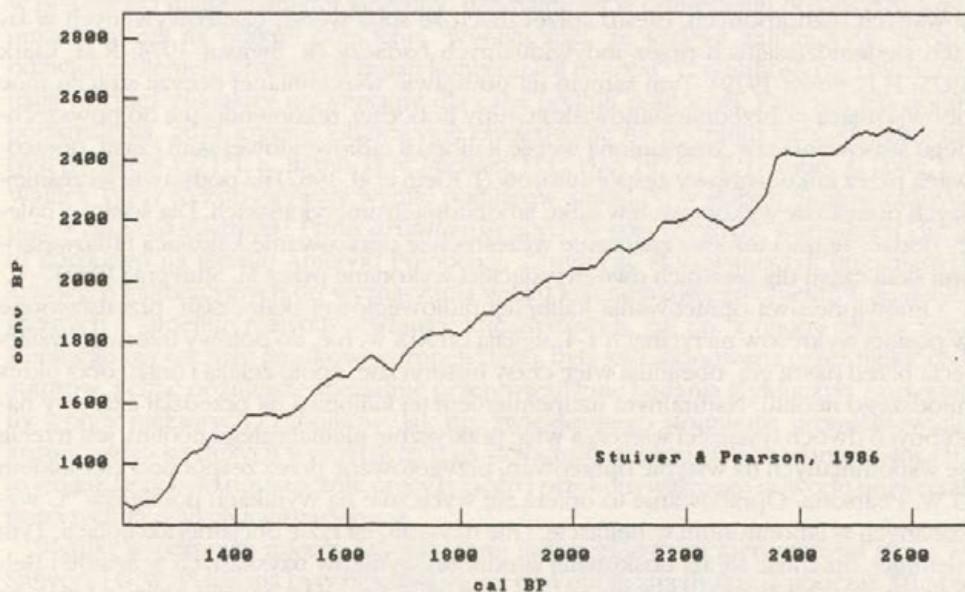
Fig. 1. Calibration curve for II millenium AD. According to data of M. Stuiver and G.W. Pearson 1986, p. 821

przedstawionych wersji kalibracji radiowęglowej skali czasu w miejsce dotychczas stosowanych różnorodnych, często sprzecznych ze sobą wersji, opracowywanych w latach siedemdziesiątych przez indywidualnych badaczy (R. Switsur 1974; R.M. Clark 1975; H.E. Suess 1979). Tym samym na podstawie wspomnianej decyzji straciło moc obowiązującą poprzednie stanowisko Grupy Roboczej, rekomendujące do powszechnego stosowania tzw. uzgodnioną wersję kalibracji radiowęglowej skali czasu, opracowaną przez kilkuosobowy zespół autorów (J. Klein et al. 1982) na podstawie wcześniejszych pomiarów wykonanych w kilku laboratoriach amerykańskich. Dla ścisłości należy dodać, że traci też swe znaczenie wcześniejsze opracowanie kalibracji radiowęglowej skali czasu dla ostatnich dwóch tysięcy lat wykonane przez M. Stuivera (1982).

Omówione dwa opracowania kalibracji radiowęglowej skali czasu, przedstawione w postaci wykresów na rycinach 1-4, sięgają od XIX w. n.e. do połowy trzeciego tysiąclecia przed naszą erą, obejmują więc czasy historyczne, epoki żelaza i brązu oraz okres młodsze neolitu. Naturalnym uzupełnieniem tej kalibracji na przedział czasowy następnych dwóch tysięcy lat wstecz, a więc praktycznie niemal całego neolitu, jest trzecie ze wspomnianych na wstępie opracowań, przygotowane przez zespół pod kierunkiem G.W. Pearsona. Opracowanie to opiera się wyłącznie na wynikach pomiarów ^{14}C wykonanych w laboratorium w Belfaście, i nie uzyskało na razie oficjalnej akceptacji. Tym niemniej, opierając się na doskonałej zgodności wyników uzyskanych w Seattle i Belfaście w przedziale wcześniejszych ponad czterech tysięcy lat, można przypuszczać, że w miarę postępu pomiarów podjętych w Seattle na próbkach dębów z terenu RFN, tworzących sekwencję dendrochronologiczną opracowaną przez B. Beckera (1986), jak też porównawczych pomiarów na próbkach dębów irlandzkich, dojdzie do opublikowania kolejnego oficjalnie zaakceptowanego odcinka kalibracji. Co więcej, można

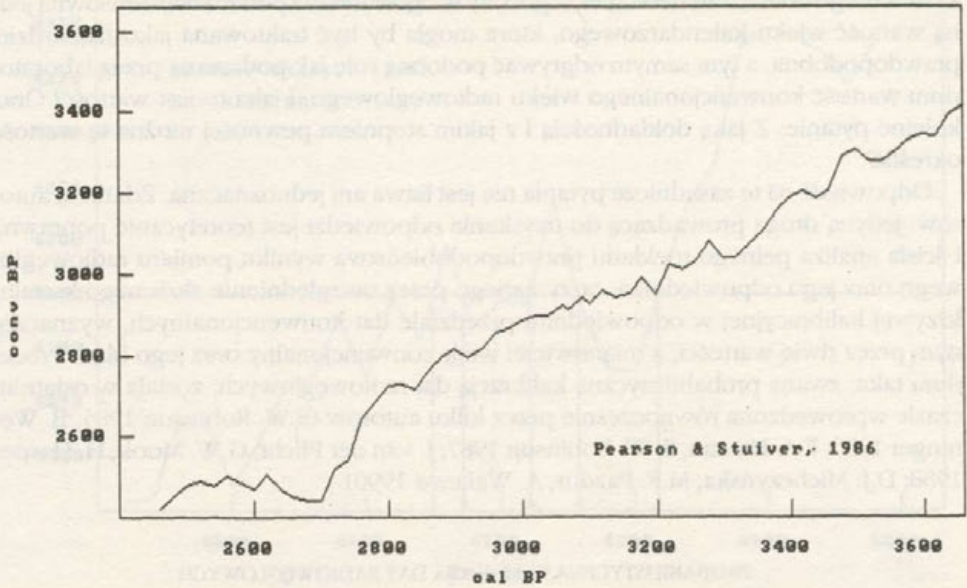
spodziewać się, iż krzywa kalibracji, jaka powstanie na tej podstawie, nie będzie w zasadniczy sposób odbiegała od krzywej przedstawionej w pracy G.W. Pearsona i współpracowników.

Ze względu na archeologiczne zastosowania omówionych wersji kalibracji radiowęglowej skali czasu szczególnie ważne wydają się następujące trzy cechy, a mianowicie: 1) ich uniwersalny charakter, 2) wysoka dokładność oraz 3) wieloznaczność dat kalibrowanych otrzymywanych przy przejściu od skali konwencjonalnych lat radiowęglowych do astronomicznej (kalendarzowej) skali czasu. Ta ostatnia cecha jest w pewnym sensie konsekwencją wysokiej precyzji z jaką określono przebieg krzywych kalibracyjnych. Wieloznaczność przewidywanych dat kalendarzowych, jakie mogą odpowiadać konkretnej zmierzonej wartości konwencjonalnego wieku radiowęglowego określa w istocie granicę zdolności rozdzielczej chronometrii radiowęglowej. Typowy przykład niejednoznaczności kalibracji i związanych z tym faktem problemów interpretacyjnych jest przedstawiony na ryc. 5. Wiekowi radiowęglowemu równemu 4150 BP odpowiada aż pięć wartości wieku kalendarzowego, równych (w zaokrągleniu do 10 lat) 4650, 4670, 4720, 4760 oraz 4820 cal BP, to znaczy 2700, 2720, 2770, 2810 i 2870 cal BC. Skrajne wartości wyznaczone przez przecięcia linii wyznaczającej wartość konwencjonalnego wieku radiowęglowego z krzywą kalibracyjną różnią się, jak widać, o 170 lat, przy czym wszystkie z nich są równoprawne ze statystycznego punktu widzenia. Należy podkreślić, że wynosząca 170 lat różnica skrajnych wartości nie jest absolutnie związana z błędami pomiaru, a jedynie jest skutkiem mających miejsce w przeszłości zmian koncentracji izotopu ^{14}C w przyrodzie. Jeżeli teraz dodatkowo uwzględnić granice błędu pomiarowego (na rysunku przyjęto dla prostoty typową w tym przedziale wieku



Ryc. 2. Krzywa kalibracyjna dla I tysiąclecia n.e. Opracowanie autorów wg danych liczbowych M. Stuivera i G.W. Pearsona 1986, s. 821-822.

Fig. 2. Calibration curve for I millenium AD. According to data of M. Stuiver and G.W. Pearson 1986, p. 821-822.



Ryc. 3. Krzywa kalibracyjna dla I tysiąclecia p.n.e. Opracowanie autorów wg danych liczbowych M. Stuivera i G.W. Pearsona 1986, s. 822 oraz G.W. Pearsona i M. Stuivera 1986, s. 851.

Fig. 3. Calibration curve for 1 millenium BC. According to data of M. Stuiver and G.W. Pearson 1986, p. 822 and G.W. Pearson and M. Stuiver 1986, p. 851.

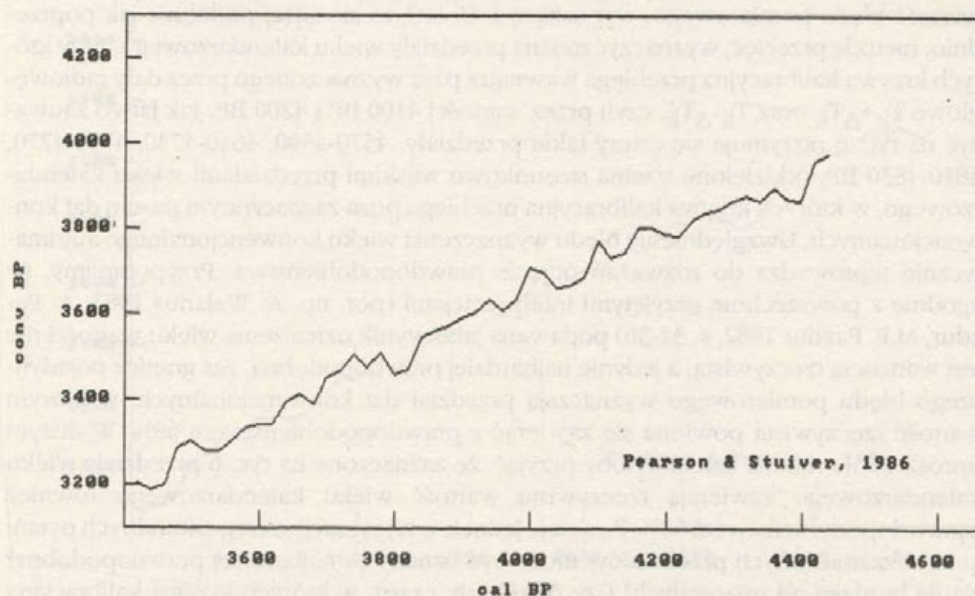
wartość błędu pomiarowego, wynoszącą ± 50 lat), to stosując, podobnie jak poprzednio, metodę przecięć, wyznaczyć można przedziały wieku kalendarzowego, przy których krzywa kalibracyjna przebiega wewnątrz pasa wyznaczonego przez daty radiowęglowe $T_k + \Delta T_k$ oraz $T_k - \Delta T_k$, czyli przez wartości 4100 BP i 4200 BP. Jak łatwo zauważyć na ryc. 6 otrzymuje się cztery takie przedziały: 4570–4590, 4610–4730, 4750–4770, 4810–4830 BP, oddzielone trzema stosunkowo wąskimi przedziałami wieku kalendarzowego, w których krzywa kalibracyjna przebiega poza zaznaczonym pasem dat konwencjonalnych. Uwzględnienie błędu wyznaczenia wieku konwencjonalnego automatycznie wprowadza do rozważań pojęcie prawdopodobieństwa. Przypomnijmy, że zgodnie z powszechnie przyjętymi interpretacjami (por. np. A. Walanus 1983; A. Pazdur, M.F. Pazdur 1982, s. 34–36) podawana jako wynik oznaczenia wieku wartości nie jest wartością rzeczywistą, a jedynie najbardziej prawdopodobną, zaś granice pojedynczego błędu pomiarowego wyznaczają przedział dat konwencjonalnych, w którym wartość rzeczywista powinna się zawierać z prawdopodobieństwem 68%. W dużym uproszczeniu można zatem byłoby przyjąć, że zaznaczone na ryc. 6 przedziały wieku kalendarzowego zawierają rzeczywistą wartość wieku kalendarzowego również z prawdopodobieństwem 68%. Powstaje jednak w tej sytuacji szereg naturalnych pytań: który z zaznaczonych przedziałów może być uznany za najbardziej prawdopodobny? Na ile bardziej od pozostałych? Czy przedziały czasu, w których krzywa kalibracyjna wykracza poza granice błędu pomiarowego mogą być traktowane jako mało prawdopodobne? Czy istotnie jest tak jak stwierdzono w komentarzu do ryc. 5, że wszystkie zaznaczone tam wartości są równo prawdopodobne? I wreszcie kluczowe pytanie dla sensownego wykorzystania całej tej teorii w kontekście oceny wieku kalendarzowego

konkretnego obiektu archeologicznego: Czy w ogóle można podać jakąś sensowną jedną wartość wieku kalendarzowego, która mogła by być traktowana jako najbardziej prawdopodobna, a tym samym odgrywać podobną rolę jak podawana przez laboratorium wartość konwencjonalnego wieku radiowęglowego, i jaka to jest wartość? Oraz kolejne pytanie: Z jaką dokładnością i z jakim stopniem pewności można tę wartość określić?

Odpowiedź na te zasadnicze pytania nie jest łatwa ani jednoznaczna. Zdaniem autorów jedyną drogą prowadzącą do uzyskania odpowiedzi jest teoretycznie poprawna i ścisła analiza pełnego rozkładu prawdopodobieństwa wyniku pomiaru radiowęglowego oraz jego odpowiednika, otrzymanego przez uwzględnienie złożonego kształtu krzywej kalibracyjnej w odpowiednim przedziale dat konwencjonalnych, wyznaczonym przez dwie wartości, a mianowicie: wiek konwencjonalny oraz jego błąd. Procedura taka, zwana probabilistyczną kalibracją dat radiowęglowych, została w ostatnim czasie wprowadzona równocześnie przez kilku autorów (S.W. Robinson 1985; B. Weninger 1986; F.A. Hassan, S. W. Robinson 1987; J. van der Plicht, G.W. Mook, H. Hasper 1988; D.J. Michczyńska, M.F. Pazdur, A. Walanus 1990).

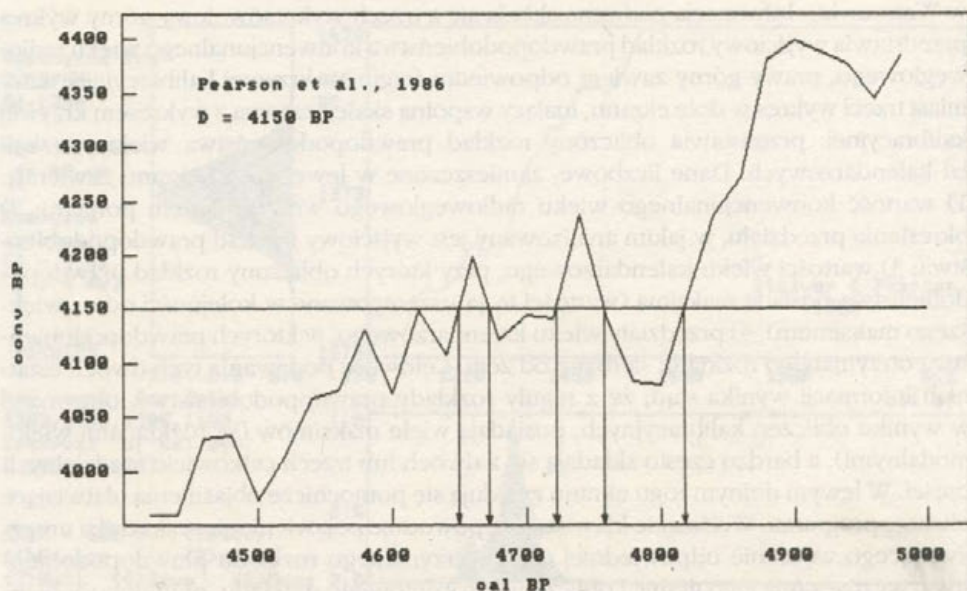
PROBABILISTYCZNA KALIBRACJA DAT RADIOWĘGLOWYCH

Nie wnikając w szczegóły matematyczne, ani też w rozważanie różnic w podejściach zastosowanych przez wymienionych autorów ograniczymy się do przedstawienia wyników procedury opracowanej w Laboratorium C-14 w Gliwicach. Probabilistyczna ka-



Ryc. 4. Krzywa kalibracyjna dla II tysiąclecia p.n.e. Opracowanie autorów wg danych liczbowych G.W. Pearsona i M. Stuivera 1986, s. 851-852.

Fig. 4. Calibration curve for II millenium BC. According to data of G.W. Pearson and M. Stuiver 1986, p. 851-852.



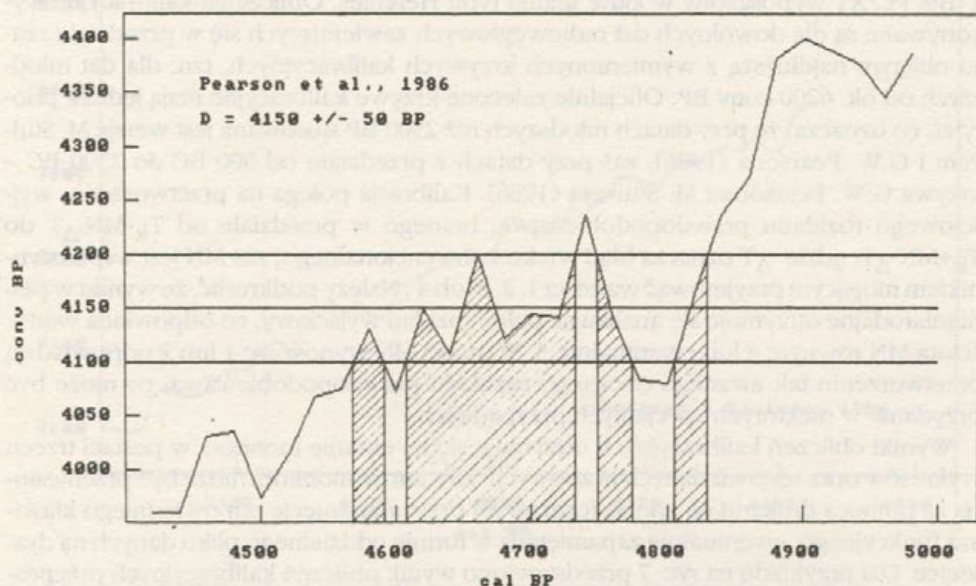
Ryc. 5. Niejednoznaczne wartości dat kalibrowanych odpowiadające konwencjonalnemu wiekowi radiowęglowemu 4150 BP. Wg. autorów.

Fig. 5. Multiple values of calibrated age corresponding to conventional ^{14}C date 4150 BP. After authors.

libracja konwencjonalnych dat radiowęglowych jest wykonywana przez program CALIBRATION napisany w języku Microsoft BASIC na mikrokomputer kompatybilny z IBM PC/XT wyposażony w kartę grafiki typu Hercules. Obliczenia kalibracyjne wykonywane są dla dowolnych dat radiowęglowych zawierających się w przedziale czasu objętym najdłuższą z wymienionych krzywych kalibracyjnych, tzn. dla dat młodszych od ok. 6200 conv BP. Oficjalnie zalecone krzywe kalibracyjne mają jednak priorytet, co oznacza, że przy datach młodszych niż 2500 BP stosowana jest wersja M. Stuivera i G.W. Pearsona (1986), zaś przy datach z przedziału od 500 BC do 2500 BC – krzywa G.W. Pearsona i M. Stuivera (1986). Kalibracja polega na przetworzeniu wyjściowego rozkładu prawdopodobieństwa, branego w przedziale od $T_k - MN \cdot \Delta T$ do $T_k + MN \cdot \Delta T$, gdzie ΔT oznacza błąd wieku konwencjonalnego, zaś MN jest współczynnikiem mogącym przyjmować wartości 1, 2, 3 lub 4. Należy podkreślić, że wyniki w pełni miarodajne otrzymuje się analizując pełny rozkład wyjściowy, co odpowiada wartościom MN równym 4 lub ewentualnie 3. Wartości MN wynoszące 1 lub 2 odpowiadają przetworzeniu tak zwanego obciętego rozkładu prawdopodobieństwa, co może być przydatne w niektórych specjalnych przypadkach.

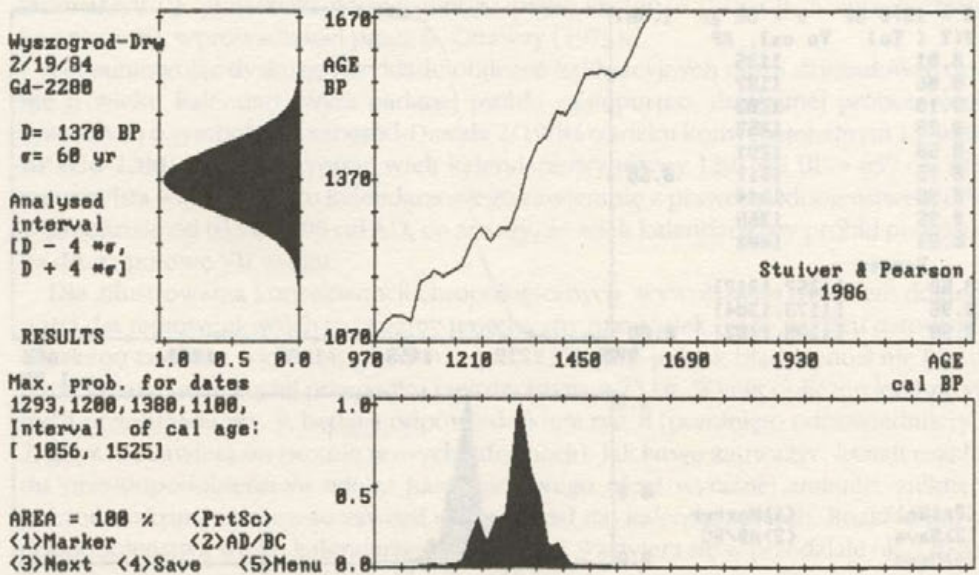
Wyniki obliczeń kalibracyjnych otrzymuje się na ekranie monitora w postaci trzech wykresów oraz zestawu danych liczbowych. Zawartość monitora może być przeniesiona za pomocą drukarki na arkusz formatu A4 przez naciśnięcie odpowiedniego klawisza funkcyjnego, ewentualnie zapamiętana w formie oddzielnego pliku danych na dyskietce. Dla przykładu na ryc. 7 przedstawiono wynik obliczeń kalibracyjnych przeprowadzonych dla daty $1370 \pm 60 \text{BP}$ (Gd-2280), uzyskanej na próbce węgla drzewnych ze stanowiska Wyszogród-Drwały (próbka o sygnaturze 2/19/84, przekazana do oznaczenia wieku w 1984 roku przez W. Moszczyńskiego z Zakładu Epoki Metali IHKM PAN

w Warszawie). Informacja graficzna składa się z trzech wykresów: lewy górny wykres przedstawia wyjściowy rozkład prawdopodobieństwa konwencjonalnego wieku radiowęglowego, prawy górny zawiera odpowiedni fragment krzywej kalibracyjnej, natomiast trzeci wykres w dole ekranu, mający wspólną skalę czasową z wykresem krzywej kalibracyjnej, przedstawia obliczony rozkład prawdopodobieństwa wieku w skali lat kalendarzowych. Dane liczbowe, zamieszczone w lewej części ekranu zawierają: 1) wartość konwencjonalnego wieku radiowęglowego wraz z błędem pomiaru; 2) określenie przedziału, w jakim analizowany jest wyjściowy rozkład prawdopodobieństwa; 3) wartości wieku kalendarzowego, przy których obliczony rozkład prawdopodobieństwa posiada maksima (wartości te są uszeregowane w kolejności od największego maksimum); 4) przedziały wieku kalendarzowego, w których prawdopodobieństwa otrzymanego rozkładu są różne od zera. Celowość podawania tych dwóch ostatnich informacji wynika stąd, że z reguły rozkłady prawdopodobieństwa, otrzymane w wyniku obliczeń kalibracyjnych, posiadają wiele maksimumów (są rozkładami wielomodalnymi), a bardzo często składają się z dwóch lub trzech całkowicie rozdzielnych części. W lewym dolnym rogu ekranu znajdują się pomocnicze objaśnienia ułatwiające obsługę programu. Wciśnięcie klawisza (1) powoduje pojawienie się wskaźnika umożliwiającego wybranie odpowiedniej części otrzymanego rozkładu prawdopodobieństwa, wyznaczanie jego granic i obliczanie procentowego rozkładu prawdopodobieństwa znalezienia wieku kalendarzowego w jego granicach. Użycie klawisza (2) powoduje przejście do notacji w skali BP (Before Present) w przypadku gdy dane na ekranie są przedstawione w notacji AD/BC, i odwrotnie, przejście ze skali AD/BC do skali BP (daty kalendarzowe AD są przedstawione jako dodatnie, daty BC opatrywane są znakiem minus). Klawisz (3) powoduje skasowanie części informacji na ekranie i wyświet-



Ryc. 6. Kalibracja daty radiowęglowej z uwzględnieniem błędu pomiaru. Wg. autorów.

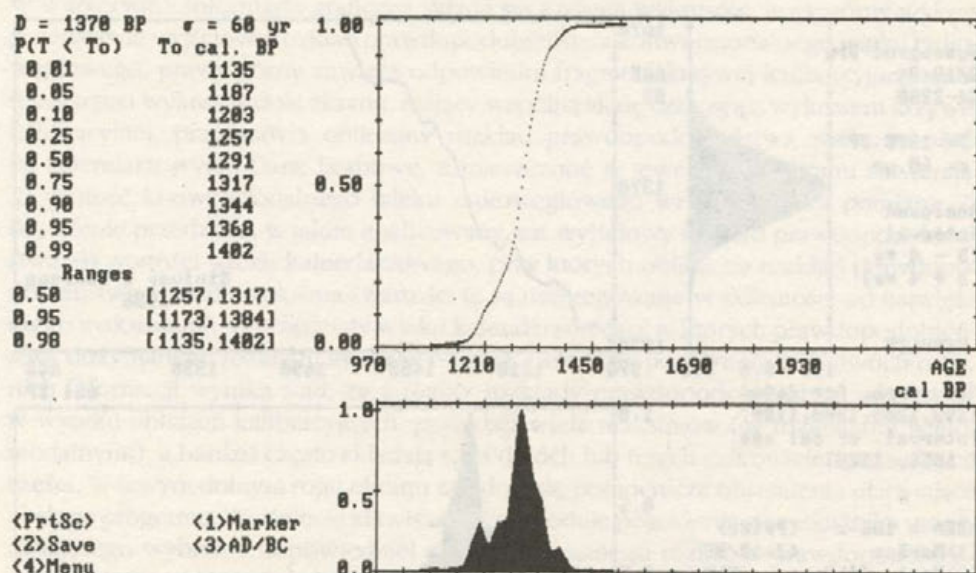
Fig. 6. Calibration of ^{14}C date accounting for error of dating. After authors.



Ryc. 7. Wyniki komputerowych obliczeń kalibracyjnych (część I) wykonanych według programu CALIBRATION dla daty radiowęglowej Gd-2280:1370±60 BP.

Fig. 7. Results of computer made calibration (part I) according to programme CALIBRATION for ^{14}C date Gd-2280:1370±60 BP.

tlenie w to miejsce wyników dalszych obliczeń (por. ryc. 8). Naciśnięcie klawisza (4) powoduje zapisanie zawartości ekranu w formie pliku na dyskietce, zaś wciśnięcie klawisza (5) powoduje powrót programu do stanu początkowego i umożliwia rozpoczęcie następnych obliczeń. Informacja pojawiająca się po naciśnięciu klawisza (3) przedstawiona jest na ryc. 8, będącej również kopią ekranu monitora dla tej samej daty radiowęglowej. W porównaniu z poprzednią ryciną niezmienną pozostaje postać rozkładu prawdopodobieństwa w dolnej części ekranu, natomiast w miejscu wykresu krzywej kalibracyjnej pojawia się wykres dystrybuanty tego rozkładu, to jest funkcji powstałej z sumowania prawdopodobieństw przedstawionych na dolnym wykresie. Wartość dystrybuanty określa, jakie jest prawdopodobieństwo tego, że rzeczywista wartość wieku kalendarzowego jest większa od zadanej wartości wieku. W lewej części ekranu występują dwa zbiory liczb: górny zbiór przedstawia tabelę wybranych kwantyli rozkładu prawdopodobieństwa zaś dolny tabelę interkwantyli. W prawej kolumnie kwantyle występują po prostu wartości T_0 wieku kalendarzowego (wyznaczone na podstawie analizy zamieszczonego obok wykresu dystrybuanty rozkładu) takie, że prawdopodobieństwo P , iż rzeczywista wartość T wieku kalendarzowego jest większa od tej wartości (czyli $T > T_0$), jest równe liczbie podanej w lewej kolumnie. Tabelę tę należy odczytywać w następujący sposób: prawdopodobieństwo, że rzeczywista wartość wieku kalendarzowego jest większa od 815 cal AD wynosi 0.01 (1%); że jest większa od 763 cal AD wynosi 0.05 (5%); że jest większa od 747 wynosi 0.10, ..., że jest większa od 548 cal AD wynosi 0.99 (99%). W tym zbiorze liczb szczególne miejsce zajmuje wartość odpowiadająca prawdopodobieństwu 0.50. Jest to, jak łatwo zauważyć, taka wartość wieku



Ryc. 8. Wyniki komputerowych obliczeń kalibracyjnych (część II) wykonanych według programu CALIBRATION dla daty radiowęglowej Gd-2280:1370±60 BP.

Fig. 8. Results of computer made calibration (part II) according to programme CALIBRATION for ^{14}C date Gd-2280:1370±60 BP.

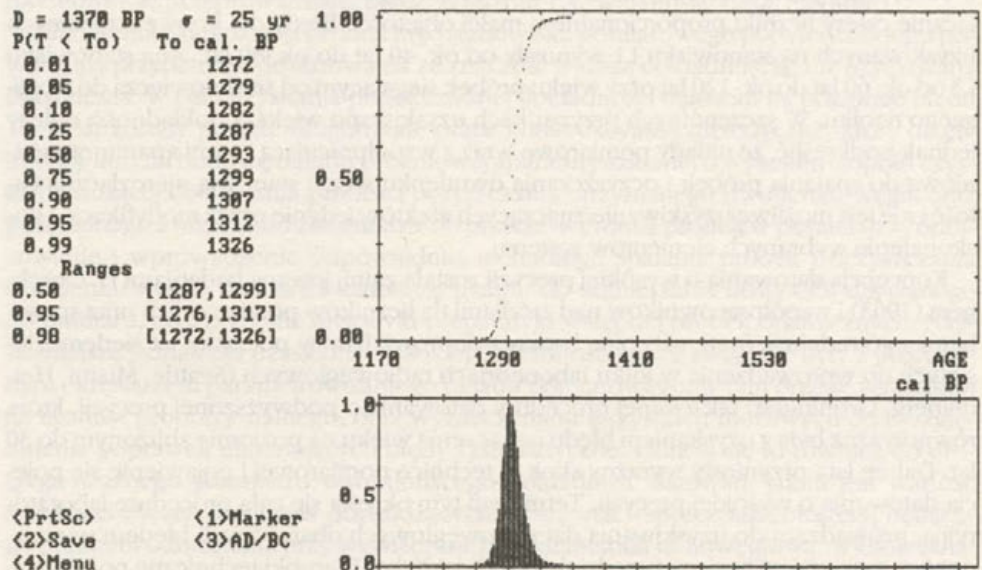
kalendaryzowego, że prawdopodobieństwo uzyskania wartości mniejszej jest równe 0.5, i tyle samo też wynosi prawdopodobieństwo tego, że rzeczywista wartość wieku kalendarzowego będzie większa od podanej. Liczba ta, zwana medianą rozkładu (w konkretnym analizowanym przypadku wynosząca 1291 cal BP = 659 cal AD) określa więc środek rozkładu prawdopodobieństwa, i w pewnym sensie zastępuje pojęcie wartości średniej. Z tego powodu można przyjąć tę wartość za najodpowiedniejszą miarę liczbową wieku kalendarzowego odpowiadającego zadanej wartości wieku konwencjonalnego. Wartość ta, to znaczy mediana rozkładu prawdopodobieństwa, niestety nie pokrywa się z wartością najbardziej prawdopodobną, aczkolwiek w wielu spotykanych w praktyce sytuacjach może być do niej zbliżona.

Dolny zbiór liczb określa tabelę interkwantyli, to znaczy przedziałów wieku kalendarzowego tak wyznaczonych, że prawdopodobieństwo, iż wartość rzeczywista jest zawarta w danym przedziale wynosi 0.5. lub 0.95 lub 0.98. Wartości prawdopodobieństw w tym zbiorze danych dobrano w taki sposób, aby wyznaczone trzy przedziały wiekowe w przybliżeniu odpowiadały powszechnie stosowanemu przy interpretacji wyników pomiarów schematowi przedziałów pojedynczego, podwójnego i potrójnego błędu pomiarowego (por. cytowaną pracę A. Walanusa 1983). Warto przypomnieć, że granice potrójnego błędu pomiarowego odpowiadają prawdopodobieństwu 0.99, a granice podwójnego błędu – prawdopodobieństwu 0.95. Znaczna różnica występuje jedynie przy porównaniu pierwszego z przedziałów z przedziałem określonym przez granice pojedynczego błędu pomiarowego. Granice te, jak wiadomo, odpowiadają prawdopodobieństwu 0.68; przyjęta w programie wartość 0.50 nawiązuje do koncepcji in-

terkwantyle (tj. przedziału wyznaczonego przez kwantyle 0.25 i 0.75 zwane często kwantylami), wprowadzonej przez B. Ottaway (1973).

Podsumowując dyskusję przykładu obliczeń kalibracyjnych można sformułować opinię o wieku kalendarzowym badanej próbki następująco: datowanej próbce węgla drzewnych o symbolu Wyszogród-Drwały 2/19/84 o wieku konwencjonalnym 1370 ± 60 BP (Gd-2280) można przypisać wiek kalendarzowy równy 1291 cal BP = 659 cal AD; rzeczywista wartość wieku kalendarzowego zawiera się z prawdopodobieństwem 0.50 w przedziale od 633 do 693 cal AD, co znaczy, że wiek kalendarzowy próbki przypada na drugą połowę VII wieku.

Dla zilustrowania konsekwencji chronologicznych wywołanych wzrostem dokładności dat radiowęglowych rozważmy teoretyczny przypadek, że w wyniku datowania uzyskano taki sam wiek konwencjonalny (tj. 1370 BP), jednak błąd wynosi nie 60 lat, jak w omawianym wyżej przypadku rzeczywistym, a 25 lat. Wynik obliczeń kalibracyjnych przedstawia ryc. 9, będąca odpowiednikiem ryc. 8 (pominięto odpowiednik ryc. 7, gdyż nie zawiera on istotnie nowych informacji). Jak łatwo zauważyć, kształt rozkładu prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego uległ wyraźnej zmianie: zniknęły boczne maksima i znacznie zawęził się przedział dat kalendarzowych. Rozkład prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego na ryc. 9 zawiera się w przedziale ok. 120 lat, podczas gdy poprzedni pokrywał blisko 450 lat (por. dane na ryc. 7), a jego centralna część (z pominięciem rozległych bocznych odcinków o bardzo małym prawdopodobieństwie) zajmowała ok. 250 lat. Ścisłe dane liczbowe, zawarte w lewej części ryciny prowadzą do zaskakującej konkluzji: wiekowi konwencjonalnemu 1370 ± 25 BP można



Ryc. 9. Wyniki komputerowych obliczeń kalibracyjnych (część II) wykonanych według programu CALIBRATION dla daty radiowęglowej Gd-2280: 1370 ± 25 BP.

Fig. 9. Results of computer made calibration (part II) according to programme CALIBRATION for ^{14}C date Gd-2280: 1370 ± 25 BP.

przypisać wiek kalendarzowy 1293 cal BP = 657 cal AD, przy czym rzeczywista wartość wieku kalendarzowego jest zawarta (z prawdopodobieństwem 0.50) w granicach od 1287 cal BP do 1299 cal BP, tzn. od 651 cal AD do 663 cal AD. Przedział nieokreśloności wieku kalendarzowego wynosi więc tylko 12 lat, czyli jest dwukrotnie mniejszy niż błąd wieku konwencjonalnego wynoszący 25 lat i pięciokrotnie mniejszy niż przedział odpowiadający realnie otrzymanej dacie radiowęglowej, wyznaczonej z błędem 60 lat. Otrzymanie w rezultacie datowania wyniku w postaci 1370 ± 25 BP pozwoliłoby w istocie zawęzić granice czasowe badanego obiektu praktycznie do jednego dziesięciolecia.

DATOWANIE WYSOKIEJ PRECYZJI

Jak wykazano na podstawie porównania wyników obliczeń kalibracyjnych, przeprowadzonych dla dwóch identycznych dat radiowęglowych, różniących się dokładnością – 1370 ± 60 BP (Gd-2280) oraz fikcyjny wynik 1370 ± 25 BP – zwiększenie dokładności oznaczeń wieku ma bardzo istotny wpływ na ostateczny, interesujący użytkownika wynik całego procesu datowania, jakim jest wiek próbki wyrażony w skali kalendarzowej czasu. Dokładność oznaczeń wieku wykonywanych w ostatnim dziesięcioleciu w Laboratorium C-14 Instytutu Fizyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach odpowiadała przeciętnej dokładności uzyskiwanej w innych laboratoriach. W zależności od ilości materiału organicznego dostarczonego do datowania oznaczenia wieku wykonywane były na jednym z dwóch stanowisk pomiarowych (L1, L2) z licznikami proporcjonalnymi o dużej objętości lub na jednym z dwóch obecnie używanych stanowisk zawierających łącznie cztery liczniki proporcjonalne o małej objętości. Błędy dat konwencjonalnych uzyskiwanych na stanowisku L1 wynosiły od ok. 40 lat do ok. 80 lat, a na stanowisku L3 od ok. 60 lat do ok. 120 lat przy wieku próbek sięgającym od średniowiecza do wczesnego neolitu. W szczególnych przypadkach uzyskiwano większą dokładność; należy jednak podkreślić, że układy pomiarowe wraz z współpracującą z nimi aparaturą próżniową do spalania próbek i oczyszczania dwutlenku węgla stanowią nierozłączną całość i nie jest możliwe uzyskiwanie znaczących efektów jedynie przez modyfikację i doskonalenie wybranych elementów systemu.

Koncepcja datowania o wysokiej precyzji została zainicjowana badaniami H. Oeschgera (1963) i współpracowników nad źródłami tła liczników pomiarowych oraz sposobami jego redukcji. Systematyczne badania doprowadziły w początku lat siedemdziesiątych do wprowadzenia w kilku laboratoriach radiowęglowych (Seattle, Miami, Heidelberg, Groningen) tak zwanej procedury datowania o podwyższonej precyzji, która równoważna była z uzyskaniem błędu oznaczenia wieku na poziomie zbliżonym do 30 lat. Dalsze lata przyniosły wyraźny skok w technice pomiarowej i pojawienie się pojęcia datowania o wysokiej precyzji. Terminem tym określa się całą procedurę laboratoryjną, prowadzącą do uzyskiwania dat radiowęglowych obarczonych błędem standardowym zawierającym się w przedziale od 12 do 20 lat. Warunki techniczne pozwalające na uzyskanie tak ogromnej dokładności zostały stworzone jedynie w kilku laboratoriach na świecie, a mianowicie w Seattle (M. Stuiver, S.W. Robinson, I.C. Yang 1979); Belfaście (G.W. Pearson 1979, 1980); Groningen (P.P. Tans, W.G. Mook 1979); Heidelbergu (H. Schoch i in. 1980). Należy tu dodać, że wypracowane w tych laboratoriach przy ogromnym nakładzie kosztów i czasu środki techniczne zostały prawie wyłącznie

skierowane na badania podstawowe dla rozwoju chronometrii radiowęglowej, tzn. do badań nad kalibracją radiowęglowej skali czasu. Jedyne znane autorom laboratorium, w którym stanowiska pomiarowe odpowiadające standardowi podwyższonej precyzji są wykorzystywane do datowań użytkowych na potrzeby badań archeologicznych, znajduje się w Groningen.

Podjęcie systematycznych prac nad uzyskaniem standardu datowania podwyższonej precyzji, a w dalszej perspektywie w miarę możliwości również wysokiej precyzji, było poprzedzone istotną rozbudową i modernizacją laboratorium gliwickiego pod koniec lat siedemdziesiątych i na początku osiemdziesiątych. Prace te objęły m.in. przebudowę zestawów liczników L2 i L3 (W. Mościcki, A. Zastawny 1977), modernizację aparatury próżniowej (A. Pazdur et al. 1986) i elektronicznej (A. Bluszcz, A. Walanus 1986) oraz wprowadzenie rejestracji wyników z użyciem mikrokomputera (A. Walanus 1986), udoskonalenie metod wstępnej obróbki próbek (M.F. Pazdur et al. 1986), oraz opanowanie ważnej dla zastosowań archeologicznych metodyki datowania kości przy użyciu wydzielonego z nich kolagenu (E. Goslar, T. Goslar, M.F. Pazdur 1986), budowę i uruchomienie nowego zestawu pomiarowego zawierającego trzy oddzielne liczniki pomiarowe (A. Pazdur, A. Walanus 1986), jak też retrospektywną analizę teoretyczną skutków kolejnych modernizacji i długookresowej stabilności parametrów fizycznych aparatury pomiarowej (A. Pazdur, M.F. Pazdur 1986; W. Lubczyński, M.F. Pazdur, A. Walanus 1986).

Materiałne podstawy do uzyskania standardu podwyższonej precyzji zostały stworzone dzięki zaprojektowaniu i skonstruowaniu przez A. Zastawnego (1978, niepubl.) zestawu dużego licznika proporcjonalnego o pojemności 5 litrów, przystosowanego do pracy przy ciśnieniu wewnętrznym dwutlenku węgla przekraczającym 2 atm, oraz jego modernizację przeprowadzoną przez A. Pazdura i A. Walanusa (1982, niepubl.).

Kilkuletnia eksploatacja próbna tego stanowiska pomiarowego potwierdziła jego potencjalną przydatność do datowania ze znacznie wyższą dokładnością, niż uzyskiwana dotychczas. W celu uzyskania projektowanej dokładności datowań na poziomie błędu 20-30 lat zostały podjęte długotrwałe prace konstrukcyjne i metodyczne, które objęły między innymi budowę układu próżniowej aparatury szklanej o wysokim stopniu czystości, służącej do spalania próbek i oczyszczania otrzymanego dwutlenku węgla oraz połączonego z nią układu zbiorników do przechowywania próbek w postaci CO₂, opracowanie i wprowadzenie odpowiedniej technologii spalania próbek i oczyszczania dwutlenku węgla, budowę i kalibrację układu do odmierzenia ilości CO₂ używanego do pomiaru, doskonalenie metodyki preparatyki wstępnej próbek organicznych. Najistotniejsze jednak dla uzyskania wysokiej dokładności prace związane były z precyzyjnym określaniem parametrów samego układu pomiarowego, w tym przede wszystkim tła licznika proporcjonalnego, oraz wyznaczeniem wszystkich możliwych do uwzględnienia poprawek eliminujących błędy systematyczne. Odnosi się to również do drugiego ważnego parametru warunkującego dokładność datowań, jakim jest wartość szybkości zliczeń impulsów pochodzących od wzorca współczesnej biosfery, będącego punktem odniesienia przy wyznaczaniu wieku metodą radiowęglową. Wielokrotnie powtarzane pomiary szybkości zliczeń tła i ich szczegółowa analiza doprowadziły do wniosku o konieczności uwzględniania następujących czynników (będących dodatkowymi źródłami błędów obok nieuniknionych fluktuacji związanych ze statystyką zliczenia impulsów): 1) wydajność detekcji w liczniku proporcjonalnym, zależna od stopnia czystości dwutlenku węgla używanego do pomiarów; 2) zależność tła od ciśnienia CO₂

w liczniku, powodowana wzrostem wydajności rejestracji promieniowania gamma pochodzącego od zanieczyszczeń radioaktywnych samego układu pomiarowego, jak i otoczenia; 3) zależność tła od natężenia składowej przenikliwej promieniowania kosmicznego, związana z nieuniknioną niewydolnością systemu antykoincydencji; 4) zmiany czasowe tła, powodowane zanikiem resztkowego skażenia radioaktywnego po wybuchu reaktora jądrowego w Czernobylu w kwietniu 1986 r. Przy wyznaczeniu szybkości zliczeń wzorca aktywności współczesnej biosfery uwzględnia się automatycznie wszystkie poprawki; dodatkowo wprowadza się poprawkę uwzględniającą fakt inne- go niż przy pomiarach tła wpływu stopnia czystości gazu na wydajność detekcji. Wyniki pomiarów szybkości zliczeń wzorca i datowanych próbek koryguje się dodatkowo

Tabela 1. Główne składniki błędu i stosowane poprawki przy wyznaczeniu wieku radiowęglowego metodą o podwyższonej dokładności*)

Tabele 1. Main components of error and used corrections in the improved precision radiocarbon dating

Główne składniki błędu		Błąd Δt
Długookresowa niestabilność tła		± 10 lat
Długookresowa niestabilność standardu		± 13 lat
· Statystyka zliczeń od próbki **)		± 16 lat
Błąd odmierzania ilości próbki		± 4 lata
Eliminowane źródła błędu	Maksymalny błąd bez stosowania poprawki Δt	Błąd resztkowy, po zastosowaniu poprawki Δt
Zależność standardu od wydajności detekcji	± 85 lat	± 10 lat
Zależność tła od wydajności detekcji	± 15 lat	± 2 lata
Zależność tła od natężenia składowej przenikliwej promieniowania kosmicznego (niewydajność osłon)	± 20 lat	$\pm <1$ rok
Zależność tła od czasu (skażenie promieniotwórcze)	± 35 lat	$\pm <1$ rok
Zależność tła od ciśnienia gazu w liczniku	± 3 lata	$\pm <1$ rok
Fracjonowanie izotopowe	± 80 lat	± 3 lata

*) Wszystkie wartości dotyczą czasu pomiaru 5000 minut (≈ 4 dni) i wieku próbki ≈ 1000 lat,

**) Dla porównania, błąd pochodzący od statystyki zliczeń w przypadku jednodniowego pomiaru licznikiem L1 wynosi ± 42 lata.

dla uwzględnienia procesów frakcjonowania izotopowego węgla które występują we wszystkich etapach obiegu węgla w przyrodzie, prowadząc do zwykle niewielkich, ale istotnych przy precyzyjnym datowaniu, różnic w zawartości izotopu ^{14}C .

¹Do wyznaczenia szybkości zliczeń tła licznika proporcjonalnego używa się CO_2 otrzymywanego ze spalania węgla kamiennego; jako wzorce aktywności ^{14}C współczesnej biosfery używa się międzynarodowego wzorca NBS Oxalic Acid, produkowanego i rozpowszechnianego przez National Bureau of Standards, USA.

Uwarunkowana (z uwzględnieniem wszystkich poprawek) wartość szybkości zliczeń tła² wynosi 6.530 ± 0.019 impulsów na minutę; odpowiadająca jej wartość szybkości zliczeń wzorca aktywności ¹⁴C wynosi 49.015 ± 0.107 imp/minutę. Opracowana standardowa procedura wyznaczania wieku zakłada wykonanie dwóch oddzielnych pomiarów szybkości zliczeń datowanej próbki, trwających po 3-5 dni, w odstępie 2-3 tygodni w celu stwierdzenia powtarzalności wyników. Przed pomiarem aktywności próbki i po jego zakończeniu precyzyjnie odmierza się ilości CO₂ użytego do pomiaru; wyniki pomiarów szybkości zliczeń są rejestrowane automatycznie co 20 min. przez mikrokomputer ZX Spektrum +, który ponadto rejestruje szereg innych parametrów pomiaru oraz oblicza wskaźnik stabilności warunków pomiaru. Wartości średnie z każdego całodobowego pomiaru są korygowane dla uwzględnienia zmian parametrów zewnętrznych (zmiany wydajności detekcji w czasie trwania pomiaru). Po zakończeniu kilkudobowej serii pomiarowej skorygowane wyniki są średniowane i wyznaczana jest przybliżona wartość aktywności ¹⁴C próbki. Ostateczna wartość aktywności oraz wiek datowanej próbki i błąd oznaczenia wieku wyliczane są po zakończeniu drugiej serii pomiarowej (pod warunkiem stwierdzenia zadowalającej zgodności wyników z obu serii) oraz wykonaniu pomiaru współczynnika frakcjonowania izotopowego δ¹³C.

Zestawienie uwzględnianych poprawek oraz oszacowanie wielkości wkładu poszczególnych źródeł błędu do całkowitego błędu pomiaru wieku przedstawia Tabela 1. Dane zawarte w tabeli jednoznacznie wskazują, że głównymi źródłami błędów są niestabilności występujące przy pomiarach wzorca aktywności ¹⁴C współczesnej biosfery (dwa składniki, równoważne odpowiednio ± 13 i ± 10 lat) oraz nieuniknione statystyczne fluktuacje podczas pomiaru aktywności ¹⁴C datowanej próbki (równoważne błędowi ± 16 lat przy czasie pomiaru 4 dni). Ten ostatni składnik błędu można nieco zredukować przez wydłużanie czasu trwania pomiaru, a właściwie, bardziej skutecznie, przez wykonanie dwóch pomiarów o czasie trwania 3-4 dni w pełnym odstępie czasu, jednakże redukcja ta jest stosunkowo niewielka. Dla ilustracji – wydłużenie czasu trwania pomiaru z 5000 minut do 10000 minut, tzn. z 5 do 8 dni spowoduje – w najlepszym przypadku – zmniejszenie błędu związanego ze statystyką zliczeń z podanej wartości ± 16 lat do ok. ± 11 lat a więc o ok. 30%. Dalsze zmniejszenie błędu poprzez redukcję wkładu związanego z określeniem aktywności ¹⁴C wzorca współczesnej biosfery wymagać będzie subtelnych analiz wielokrotnie powtarzanych precyzyjnych pomiarów wzorca w perspektywie czasowej 2-3 lat.

Całkowity błąd określenia konwencjonalnego wieku radiowęglowego oszacowany na podstawie zamieszczonych danych liczbowych, wynosi ± 25 lat przy datowaniu próbek z okresu średniowiecza (o wieku ok. 1000 BP), a przy próbkach o wieku zbliżonym do 5000 BP wynosi ± 30 lat.

Optymalne wykorzystanie możliwości, jakie stwarza dla badań archeologicznych opracowana technika datowania o standardzie podwyższonej precyzji, wymaga szczegółowego rozważenia warunków o charakterze techniczno-materiałowym, jakie stawia ona w zakresie doboru materiału do badań, a także, co wydaje się ważniejszym i trudniejszym zadaniem, podjęcia próby sformułowania strategii jej stosowania. Próba taka winna uwzględniać – w kilkuletniej perspektywie czasowej – potrzeby krajowe w zakresie precyzyjnego datowania, możliwe do uzyskania efekty oraz koszty przedsięwzięcia.

Stosunkowo najłatwiejsze jest określenie wymogów stawianych datowanym materiałom pod względem rodzaju substancji, ilości i jakości. W zasadzie do datowania

w standardzie podwyższonej precyzji nadają się te rodzaje substancji organicznych, które charakteryzują się wysoką zawartością węgla i mogą być uważane za stosunkowo jednorodne pod względem czasowym (co oznacza, że zawarta w próbce substancja organiczna pochodzi z co najwyżej 10-20 okresów wegetacyjnych), a ponadto są odporne na wpływ zanieczyszczeń węglem obcego pochodzenia. Wymogi takie spełniają przede wszystkim pnie drzew (w tym również zwęglone), ziarna zbóż (zweglone lub nie), zidentyfikowane botanicznie szczątki roślin (np. słoma, orzechy, szyszki), węgle drzewne występujące w postaci dobrze zachowanych okruchów, wyroby z lnu i konopi (np. fragmenty powrozów), skóra, itp. Do wykonania precyzyjnego pomiaru aktywności izotopu ^{14}C oraz niezależnego wyznaczenia współczynnika frakcjonowania izotopowego niezbędne jest spalenie spreparowanej próbki o zawartości ok. 7 gramów węgla. Doświadczenia dotychczas zebrane prowadzą do wniosku, że straty substancji organicznej występujące w trakcie intensywnej ekstrakcji zanieczyszczeń wynoszą od 50% do 75% suchej masy przy preparatyce drewna i od 20% do 50% przy preparatyce węgla drzewnych. W procesie zwęglania próbek, będącym kolejnym etapem ich obróbki laboratoryjnej występują dalsze straty, szacowane również na 50-70% w przypadku drewna i znacznie mniejsze, wynoszące 10-25% w przypadku węgla drzewnych i zwęglonych fragmentów drewna. Oznacza to, że minimalna masa próbki i drewna wynosić powinna ok. 100-120 gramów, zaś węgla drzewnych – ok. 20-30 gramów. Dodać należy, że celem intensywnej ekstrakcji zanieczyszczeń jest uzyskanie tej części substancji organicznej, która nie jest dotknięta wpływem procesów gnilnych. Wizualne oceny stopnia rozłożenia próbek uzyskanych w trakcie prac terenowych są niekiedy zawodne i w praktyce laboratoryjnej niejednokrotnie obserwowano przypadki całkowitego rozpuszczenia próbki nawet przy znacznie mniej intensywnym traktowaniu odczynnikami chemicznymi stosowanymi jako standardowa wersja preparatyki drewna i węgla drzewnych. Przypadek taki miał miejsce na przykład przy próbie datowania próbek stosunkowo dobrze zachowanych fragmentów zwęglonych kłód ze średniowiecznego stanowiska związanego z klasztorem Cystersów w Łeknie (badania Instytutu Historii UAM w Poznaniu pod kierunkiem A.M. Wyrwy). Należy tu dodać, że w praktyce datowania radiowęglowego na zwykłym poziomie dokładności stosuje się powszechnie zasadę modyfikowania procedury wstępnej chemicznej obróbki próbek, wprowadzając niekiedy „ulgowe” traktowanie uwzględniając między innymi takie przypadki, jak wymieniony wyżej. Wprowadzenie jakichkolwiek modyfikacji dla uniknięcia strat materiału w trakcie ekstrakcji zanieczyszczeń musi być uznane za niedopuszczalne przy datowaniu w standardzie podwyższonej precyzji.

Kontrowersyjnym, i wymagającym dalszych studiów problemem, jest możliwość datowania kości w standardzie podwyższonej precyzji. Dotychczasowe doświadczenia laboratoryjne potwierdzają opinię o poprawności dat uzyskiwanych na kolagenie wydzielanym z datowanych kości według procedury R. Longina (1971). Główne przyczyny uniemożliwiające w chwili obecnej sprecyzowanie warunków datowania kości związane są z przebiegiem spalania kolagenu i trudnościami technicznymi w oczyszczeniu otrzymanego dwutlenku węgla, wzrastającymi w bardzo szybkim stopniu ze wzrostem ilości spalanego kolagenu. Oczekiwać można, że wykorzystanie wyników badań nałoczyszczaniem CO_2 pochodzącego ze spalania kolagenu, ogłoszonych niedawno przez J.C. Freundlicha i P. Velicky'ego (1990) pozwoli na opracowanie skutecznej technologii wytwarzania czystego CO_2 w ilościach wymaganych przy datowaniu w standardzie podwyższonej precyzji. Zrealizowanie propozycji naszkicowanej przez

wymienionych autorów wymaga jednak wprowadzenia znacznych zmian konstrukcyjnych do obecnie stosowanych układów próżniowych, a być może zbudowania oddzielnej linii próżniowej służącej wyłącznie do spalania kolagenu, a przede wszystkim sprawdzenia, czy proponowana metoda nie wprowadza błędu systematycznego. Dodatkową trudnością występującą przy datowaniu kości jest ogromna zmienność zawartości kolagenu w kościach kopalnych, co przy ogólnie niskiej jego zawartości prowadzi do wniosku, że w sprzyjających warunkach należy liczyć się z koniecznością przerobienia próbki o masie od 1/2 do 1 kg.

Jako nie nadające się do datowania w standardzie podwyższonej precyzji należy zaliczyć wszystkie materiały o niskiej zawartości węgla lub o znacznie zmienionej strukturze substancji organicznej (np. pył węglowy z warstwy spalenizny, antropologiczny humus z detrytusem roślinnym z wypełnienia jamy), o wysokim stopniu rozłożenia (zbutwiałe drewno, torfy), jak również wszystkie typy próbek, w których węgiel występuje pod postacią węglanów. Należą tu muszle ślimaków używanych w niektórych kręgach kulturowych jako pożywienie, oraz próbki nacieków (stalagmity, polewy naciekowe) stosowane niekiedy do datowania stanowisk jaskiniowych.

Przy doborze próbek do datowania o podwyższonej dokładności szczególnie istotne wydają się rozważania H.T. Waterbolka (1971; 1983) na temat archeologicznych zastosowań chronometrii radiowęglowej, a zwłaszcza zaproponowana przez niego czterostopniowa skala chronologicznej wiarygodności próbek organicznych (H.T. Waterbolk 1983, s. 58). Pod pojęciem wiarygodności chronologicznej rozumie się stopień pewności z jakim można określić związek próbki organicznej z kontekstem archeologicznym, który zamierzamy na podstawie tej próbki datować. H.T. Waterbolk wyróżnia następujące cztery kategorie pewności:

- A. Całkowita pewność – badana próbka stanowi część datowanego obiektu archeologicznego (np. drewno z pnia dębówki, kość z kompletu szkieletu).
- B. Wysokie prawdopodobieństwo – zachodzi prosty funkcjonalny związek między badanym materiałem organicznym a diagnostycznymi zabytkami archeologicznymi (np. węgle drzewne w urnie, ognisko na podłodze domu, zwęglone ziarna w jamie odpadkowej zawierającej fragmenty naczyń glinianych).
- C. Prawdopodobieństwo – nie zachodzi jawny związek funkcjonalny między badaną próbką a zabytkami archeologicznymi, ale ilość i jakość materiału organicznego świadczą o istnieniu związku (np. skupisko węgli drzewnych w obrębie jamy lub warstwy kulturowej).
- D. Możliwość – sytuacja jak w C, a ponadto pojedyncze fragmenty substancji organicznej są drobne i rozproszone (np. drobne węgielki drzewne rozproszone w obrębie warstwy mechanicznej, humus antropogeniczny z warstwy kulturowej).

Do datowania o podwyższonej dokładności mogą być kierowane jedynie te próbki, które w rozsądny sposób zaliczyć można do pierwszych dwóch kategorii.

Podsumowując rozważania, dotyczące doboru materiałów do datowania w standardzie podwyższonej precyzji, należy podkreślić podstawowe znaczenie prac terenowych, w trakcie których pozyskuje się materiał organiczny do badań laboratoryjnych. Decydujące znaczenie dla wartości uzyskanej w laboratorium daty ma prawidłowa ocena kontekstu kulturowego przeznaczonej do datowania próbki. Z wymogów technicznych na etapie prac terenowych należy przypomnieć konieczność ścisłego przestrzegania zaleceń sformułowanych w artykule opisującym metodykę pobierania, przechowywania i opisu próbek (M.F. Pazdur 1980). Przy próbkach nadających się potencjal-

nie do datowania o podwyższonej precyzji konieczne jest zachowanie szczególnej ostrożności w celu uniknięcia jakichkolwiek domieszek obcych substancji organicznych, przede wszystkim pochodzenia współczesnego. Absolutnie niedopuszczalne jest przechowywanie próbek w kopertach papierowych czy kartonach; jako jedyne godne zalecenia pojemniki należy uznać szczelnie zamknięte pojemniki szklane lub pojemniki metalowe z umieszczoną na zewnątrz etykietą. Generalnie proces kwalifikowania próbek do datowania w standardzie podwyższonej precyzji można w świetle powyższych rozważań sformułować jako koniunkcję decyzji podjętych przez badacza odpowiedzialnego za przebieg prac wykopaliskowych i pracownika laboratorium. Pierwszym kryterium doboru próbki musi być jej kontekst kulturowy i prowizoryczna ocena ilości i jakości materiału organicznego; kryterium ostatecznym jest ilość substancji organicznej uzyskana po zakończeniu procesu preparatyki wstępnej w laboratorium radiowęglowym.

Biórac pod uwagę sformułowane wyżej warunki techniczne pomiarów o podwyższonej precyzji (dwukrotny pomiar każdej próbki o łącznym czasie trwania 6-10 dni, konieczność precyzyjnej kontroli stabilności pracy układu pomiarowego), można ocenić liczbę datowań na 25-30 rocznie. Porównanie tej liczby z wydajnością stanowiska pomiarowego stosowanego przy datowaniu o zwykłej dokładności (ok. 100 próbek rocznie), prowadzi do wniosku, że koszt pomiaru o podwyższonej dokładności powinien być w przybliżeniu trzykrotnie wyższy. Jest to ocena zaniżona, opierająca się jedynie na porównaniu czasu pracy stanowiska pomiarowego; dodać jeszcze należy znacznie wyższe, niż przy normalnym datowaniu, koszty przygotowania próbek, obsługi i konserwacji precyzyjnej aparatury próżniowej służącej do spalania próbek i oczyszczania CO₂ używanego do pomiaru, a także koszty wykonania pomiaru współczynnika frakcjonowania izotopowego $\delta^{13}\text{C}$ dla każdej datowanej próbki. Pomiar $\delta^{13}\text{C}$ przy datowaniu o zwykłej dokładności wykonuje się jedynie w niektórych specjalnych przypadkach, gdy wiadomo, że mogą one wprowadzić istotne poprawki do wieku radiowęglowego (np. przy datowaniu nasion i owoców, muszli i innych nietypowych substancji organicznych; por. M. Stuiver, H.A. Polach 1977; R. Awwsiuk et al. 1986).

Przechodząc do zapowiedzianej wyżej próby sformułowania strategii wykorzystania techniki datowania o podwyższonej precyzji zakładamy, że istnieje rzeczywista potrzeba takich datowań. Za przyjęciem tego założenia przemawia po pierwsze proces dążenia do coraz większej precyzji chronologicznej, łatwy do zaobserwowania w literaturze światowej, zarówno w fachowej literaturze radiowęglowej, jak też w publikowanych wypowiedziach archeologów na temat chronometrii radiowęglowej (por. np. E. Neustupný 1986; H.T. Waterbolk 1983), a po drugie fakt względnego zaspokojenia najpilniejszych potrzeb krajowych w zakresie datowań. Dodać tu wypada, że w laboratorium gliwickim wykonanych zostało blisko 600 datowań próbek pochodzących z badań archeologicznych na terenie Polski, przy sięgającej 200 liczbie próbek pochodzących z badań zagranicznych prowadzonych przez krajowe zespoły. Znaczna liczba datowań, stanowiących podstawy chronologiczne dla periodyzacji prehistorii obszaru Polski pochodzi z laboratoriów zagranicznych – np. laboratorium w Groningen wykonało do końca 1987 roku oznaczenia wieku 165 próbek (w większości archeologicznych) – oraz z laboratorium łódzkiego (A. Kanwiszer, P. Trzeciak 1985).

Liczba datowań wykonywanych aktualnie w laboratorium gliwickim przekracza 300 próbek rocznie, w ostatnich latach na potrzeby badań archeologicznych wykonywanych było po ok. 80 datowań rocznie. Uwzględniając wyniki innych laboratoriów moż-

na ocenić, że w najbliższych latach przyrost liczby datowań próbek archeologicznych wynosił będzie ponad 100 próbek rocznie wykonywanych w standardzie zwykłej dokładności i ok. 20-25 w standardzie o podwyższonej dokładności. Liczby te są istotne dla właściwej oceny roli jaką mogą – i powinny – spełniać datowania o podwyższonej dokładności w systemie tworzenia podstaw chronologii pradziejowej.

WNIOSKI

Opublikowanie zbioru precyzyjnych krzywych kalibracyjnych do korekty dat radiowęglowych należy uznać za istotny krok w kierunku znormalizowania i ujednoczenia niezwykle złożonej sytuacji w zakresie chronologii pradziejów. Obecnie, zarówno w piśmiennictwie krajowym, jak i zagranicznym, łatwo można zaobserwować zamęt spowodowany stosowaniem różnych skal czasowych. Powszechnie stosowana jest więc konwencjonalna skala radiowęglowa, często przy równoczesnym wprowadzaniu skal czasowych wynikających z przeliczeń konwencjonalnych dat ^{14}C na lata kalendarzowe przy wykorzystaniu różnych wersji kalibracji (M.F. Pazdur 1983; M. Godłowska, E. Rook, B. Drobniewicz 1985; M. Godłowska i in. 1987). W badaniach okresu średniowiecza i czasów nowożytnych, w badaniach okresu rzymskiego, w egiptologii powszechnie stosowane są daty kalendarzowe. Jeżeli autorzy opracowań wyraźnie definiują stosowane skale czasowe i konsekwentnie się nimi posługują (jak to ma miejsce w przykładowo wymienionych trzech publikacjach) to fakt określania tego samego zdarzenia poprzez kilka różnych liczb, z których każda jest „datą”, nie powinien prowadzić do błędnych konkluzji, aczkolwiek jest ewidentnie niewygodny. Można jednak znaleźć w piśmiennictwie przykłady bądź to nieprecyzyjnego cytowania dat radiowęglowych, bądź też zupełnie błędnego porównywania chronologii opartej na skali kalendarzowej z datami radiowęglowymi. Można przypuszczać, że przejściowy okres różnorodności kalibracji został zamknięty opublikowaniem omawianych wyżej krzywych kalibracyjnych m.in. M. Stuivera i G.W. Pearsona, przedstawionych na rycinach 1-4. Sądząc z postępu w zakresie badań dendrochronologicznych, jak również z przebiegu prac pomiarowych w laboratoriach radiowęglowych w Seattle, Belfaście, Groningen i w Heidelbergu, można mieć nadzieję, że przedział czasowy objęty kalibracją o wysokiej dokładności będzie się systematycznie wydłużał.

Korzystanie z precyzyjnych krzywych kalibracyjnych jest znacznie utrudnione w porównaniu z niektórymi wcześniejszymi wersjami kalibracji. Opisana w tym artykule metoda probabilistycznej kalibracji dat radiowęglowych, realizowana przy pomocy mikrokomputera, zapewnia poprawne przeliczanie rozkładu prawdopodobieństwa wyniku datowania ze skali konwencjonalnych lat radiowęglowych do kalendarzowej skali czasu. Należy jednak podkreślić, że wynik tych przeliczeń nie zawsze posiada jednoznaczną i prostą interpretację. Badania porównawcze różnych wersji komputerowej kalibracji dat radiowęglowych, przedstawione podczas XIII Międzynarodowej Konferencji Radiowęglowej w Dubrowniku (T. Aitchison et al. 1988) wykazały zgodność wyników liczbowych, jednak mimo długotrwałej dyskusji w gronie autorów różnych programów kalibracyjnych nie udało się sformułować żadnych ogólnych zasad określających sposoby prezentacji wyników obliczeń kalibracyjnych, a tym bardziej ich interpretacji. Tym niemniej należy dążyć do tego, aby wszelkie opracowania dotyczące chronologii opierały się na współczesnych, aktualnie najdokładniejszych wersjach kalibracji i wykorzy-

stywały obliczenia kalibracyjne wykonywane metodą analizy rozkładu prawdopodobieństwa. W artykule niniejszym opisano jedną z kilku wersji wykorzystania programu CALIBRATION, polegającą na analizie wyniku datowania pojedynczej próbki. Program ten może być jednak wykorzystywany także przy opracowywaniu zbiorów dat radiowęglowych, a więc do porównywania dat kalibrowanych dowolnych próbek, do analizy zbiorów dat otrzymanych z pewnego ściśle określonego horyzontu kulturowego lub odnoszących się do pewnego jednoznacznie określonego zdarzenia prahistorycznego, do porównywania przedziałów czasowych trwania pewnych wyodrębnionych faz kulturowych (o ile tylko posiadają one dostateczną reprezentację w postaci odpowiedniej liczby datowanych próbek organicznych). Analiza tych zagadnień wykracza jednak poza ramy niniejszego artykułu. Czytelników zainteresowanych szczegółami odsyłamy do oryginalnych publikacji w materiałach konferencyjnych z Groningen i Dubrownika (D.J. Michczyńska, M.F. Pazdur, A. Walanus 1990; M.F. Pazdur, D.J. Michczyńska 1989) i zapraszamy do nawiązania bezpośredniego kontaktu. Podsumowując wszystkie analizowane wyżej elementy techniki datowania o podwyższonej dokładności można stwierdzić, że: 1) do datowania o podwyższonej precyzji nadają się przede wszystkim próbki drewna, węgli drzewnych i zwęglonych nasion o odpowiednio dużej masie, które mogą być zaliczone do kategorii A lub B wg systematyki H.T. Waterbolka (1983); 2) dokładność określenia bezwzględnego wieku radiowęglowego wynosi ok. ± 25 lat przy datowaniu próbek o wieku zbliżonym do 1000 lat BP i ok. ± 30 lat przy wieku ok. 5000 lat BP; 3) roczna wydajność uruchomionego stanowiska pomiarowego wynosi ok. 25-30 datowań; 4) orientacyjny koszt oznaczenia wieku jednej próbki przekracza ponad trzykrotnie koszt datowania o standardowej dokładności.

Zwiększenie dokładności oznaczenia konwencjonalnego wieku radiowęglowego do poziomu 25-30 lat w oczywisty sposób wpływa na zawężenie dopuszczalnych granic wieku kalendarzowego, wyznaczonych opisaną wyżej metodą. Ze względu na złożony kształt krzywych kalibracyjnych jednoznaczne określenie uzyskiwanej dokładności dat kalibrowanych nie jest możliwe, przy tej samej wartości błędu wieku konwencjonalnego otrzymać można różne granice błędu wieku kalendarzowego. Istnieją jednak takie odcinki krzywych kalibracyjnych (por. ryc. 9), że wykonanie przeliczeń dla dat konwencjonalnych obarczonych błędem ok. ± 25 lat prowadzi do określenia wieku kalendarzowego z dokładnością do dwóch, a nawet jednego dziesięciolecia.

LITERATURA

- Aitchison T., Leese M., Otlet B., Ottawa B.S., Pazdur M.F., van der Plicht J., Reimer P.R., Scott M.S., Stuiver M., Warner R., Weniger B.
1988 *A comparison of methods used for the calibration of radiocarbon dates*, [w:] *13th International Radiocarbon Conference, June 20-25, 1988, Abstracts*, s. 27-28.
- Awsiuk R., Filipowiak W., Goslar T., Pazdur A., Pazdur M.F.
1986 *Early Slavonic settlements and navigation at the mouth of Odra River*, „*Radiocarbon*”, t. 28, Nr 2A, s. 726-731.
- Becker B., Kromer B.
1986 *Extension of the holocene dendrochronology by the preboreal pine series, 8800 to 10000 BP*, „*Radiocarbon*”, t. 28, Nr 2B, s. 961-967.
- Clark R.M.
1975 *A calibration curve for radiocarbon dates*, „*Antiquity*”, t. 47, s. 251-266.

- Damon P.E., Long A., Wallick E.I.
1972 *Dendrochronologic calibration of the C-14 time scale*, [w:] *Proceedings of the Eighth International Conference on Radiocarbon Dating, Lower Hutt, New Zealand*, Wellington, Royal Society of New Zealand. T.A. Rafter, T. Grant-Taylor (ed.) s. 44-59.
- Freundlich J.C., Velicky P.
1990 *Radiocarbon dating by carbon dioxide method II: Chlorine as a contaminant in dating bones*, PACT s. 239-242.
- Godłowska M., Kozłowski J.K., Starkel L., Wasylikowa K.
1987 *Neolithic settlement at Pleszów and changes in the natural environment in the Vistula valley*, „Przegląd Archeologiczny”, t. 34, s. 133-159.
- Godłowska M., Rook E., Drobniewicz B.
1985 *A settlement of the Linear Pottery Culture at Pleszów*, „Przegląd Archeologiczny”, t. 33, s. 57-103.
- Goslar E., Goslar T., Pazdur M.F.
1986 *Datowanie metodą ¹⁴C kości i muszli – problemy metodyki i interpretacji wyników*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, ser. Mat.-Fiz., z.47, Geochronometria Nr 1, s. 71-82.
- Hassan F.A., Robinson S.W.
1987 *High-precision radiocarbon chronometry of ancient Egypt, and comparisons with Nubia, Palestine and Mesopotamia*, „Antiquity”, t. 61, s. 119-135.
- Kanwiszer A., Trzeciak P.
1984 *Łódz radiocarbon dates*, „Radiocarbon”, t. 26, Nr 1, s. 111-126.
- Klein J., Leman J.C., Damon P.E., Ralph E.K.
1982 *Calibration of radiocarbon dates: table based on the consensus data of the Workshop on Calibrating the Radiocarbon Time Scale*, „Radiocarbon”, t. 24, s. 103-150.
- Longin R.
1971 *New method of collagen extraction for radiocarbon dating*, „Nature”, t. 230, s. 241-242.
- Lubczyński W., Pazdur M.F., Walanus A.
1986 *Analiza fluktuacji i źródeł tła liczników proporcjonalnych w Laboratorium ¹⁴C w Gliwicach*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, ser. Mat.-Fiz., z. 47, Geochronometria Nr 2, s. 117-131.
- Michczyńska D.J., Pazdur M.F., Walanus A.
1988 *Bayesian approach to probabilistic calibration radiocarbon dates*, PACT s.69-80.
- Mościcki W., Zastawny A.
1977 *New proportional counter assembly in Gliwice ¹⁴C laboratory*, [w:] *Proceedings of the International Conference, the High Tatras, CSSR. Low-radioactivity measurement and applications*, P. Povinec, S. Usacev (ed.), Bratislava, s. 91-92.
- Neustupný E.
1990 *Some thoughts on absolute chronology*, „Acta Interdisciplinaria Archaeologica”, Nitra, t. IV, s. 7-10.
- Oeschger H.
1983 *Low-level counting methods*, [w:] *Radioactive Dating*, IAEA, Vienna, s. 13-34.
- Ottaway B.
1973 *Dispersion diagrams: A new approach to the display of carbon 14 dates*, „Archaeometry”, t. 15, s. 5-12.
- Pazdur A., Awiuk R., Goslar T., Pazdur M.F.
1986 *Spalanie próbek organicznych i oczyszczanie CO₂ przeznaczonego do pomiarów radiowęglowych*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, ser. Mat.-Fiz., z. 47, Geochronometria Nr 2, s. 109-115.
- Pazdur A., Pazdur M.F.
1982 *Chronometria radiowęglowa jako metoda badawcza w archeologii (możliwości, ograniczenia, perspektywy)*, „Przegląd Archeologiczny”, t. 30, s. 5-45.
1986 *Aparatura pomiarowa Laboratorium ¹⁴C w Gliwicach, doświadczenia konstrukcyjne i eksploatacyjne*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej” ser. Mat.-Fiz., z. 46, Geochronometria Nr 1, s. 55-69.
- Pazdur A., Walanus A.
1986 *Trójlicznikowy zestaw pomiarowy w Laboratorium C-14 w Gliwicach*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, ser. Mat.-Fiz., z. 47, Geochronometria Nr 2, s. 133-148.
- Pazdur M.F.
1980 *Pobieranie, przygotowanie i opis próbek organicznych przeznaczonych do datowania metodą ¹⁴C*, „Archeologia Polski”, t. 24, s. 317-333.

- 1983 *Radiocarbon dating of organic samples, [w:] Quasar el-Sagha 1980. Contributions to the Holocene geology, the Predynastic and Dynastic settlements in the northern Fayum Desert*, Zeszyty Naukowe UJ, Prace Archeologiczne, z. 35, s. 114-117.
- Pazdur M.F., Michczyńska D.J.
- 1989 *Improvements of the procedure for probabilistic calibration of radiocarbon dates*, „Radiocarbon”, t. 31, s. 824-832.
- Pazdur M.F., Pazdur A., Awsiuik R., Goslar T.
- 1986 *Metody preparatyki ustępniej próbek przeznaczonych do pomiarów radiowęglu*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, ser. Mat.-Fiz., z. 47, Geochronometria Nr 2, s. 101-107.
- Pazdur M.F., Zastawny A.
- 1987 *Drastic increase of background in the Gliwice Radiocarbon Laboratory in late April 1986, and its time changes*, „Radiocarbon”, t. 29, Nr 1, s. 156-158.
- Pearson G.W.
- 1979 *Precise ^{14}C measurement by liquid scintillation counting*, „Radiocarbon” t. 21, s. 1-21.
- 1980 *High precision radiocarbon dating by liquid scintillation counting applied to radiocarbon time scale calibration*, „Radiocarbon”, t. 22, s. 337-345.
- Pearson G.W., Pilcher J.R., Baillie M.G.L., Corbett D.M., Qua F.
- 1986 *High-precision ^{14}C measurement of Irish oaks to show the natural ^{14}C variations from AD 1840 to 5210 BC*, „Radiocarbon”, t. 28, Nr 2B, s. 911-934.
- Pearson G.W., Stuiver M.
- 1986 *High-precision calibration of the radiocarbon time scale, 500-2500 BC*, „Radiocarbon”, t. 28, Nr 2B, s. 839-862.
- Plicht van der J., Mook W.G., Hasper H.
- 1987 *An automatic calibration program for radiocarbon dating, [w:] Second International Symposium on Archeology and ^{14}C* , Programme and Abstracts, s. 38.
- Ralph E.K., Michael H.N., Han M.C.
- 1973 *Radiocarbon dates and reality*, „MASCA Newsletter”, Groningen t. 9, s. 1-20.
- Robinson S.W.
- 1985 *A computational algorithm for calibration of radiocarbon dates. The 12th International Radiocarbon Conference, Trondheim, Norway*. Abstracts, s. 43.
- Schoch H., Bruns M., Münnich K.O., Münnich M.
- 1980 *A multiscanner system for high precision carbon-14 measurements*, „Radiocarbon”, t. 22, s. 442-447.
- Stuiver M.
- 1982 *A high-precision calibration of the AD radiocarbon time scale*, „Radiocarbon”, t. 24, s. 1-26.
- Stuiver M., Pearson G.W.
- 1986 *High-precision calibration of the radiocarbon time scale, AD1850-500 BC*, „Radiocarbon”, t. 28, Nr. 2B, s. 805-838.
- Stuiver M., Polach H.A.
- 1977 *Discussion. Reporting of ^{14}C data*, „Radiocarbon”, t. 19, s. 355-363.
- Stuiver M., Robinson S.W., Yang I.C.
- 1979 *^{14}C dating to 60,000 years BP with proportional counters, [w:] Proceedings of the Ninth International Conference, Los Angeles and La Jolla 1976. Radiocarbon Dating*, R. Berger, H.E. Suess (ed.), Berkeley – Los Angeles – London, s. 202-215.
- Suess H.E.
- 1970 *Bristlecone pine calibration of the radiocarbon time scale 5200 BC to the present, [w:] Proceedings of the XII Nobel Symposium, Uppsala 1970. Radiocarbon Variations and Absolute Chronology*, I.U. Olsson (ed.), Stockholm, s. 303-311.
- 1979 *A calibration table for conventional radiocarbon dates, [w:] Proceedings of the Ninth International Conference, Los Angeles and La Jolla 1976. Radiocarbon Dating*, R. Berger, H.E. Suess (ed.), Berkeley – Los Angeles – London, s. 777-784.
- Switsur V.R.
- 1973 *The radiocarbon calendar recalibrated*, „Antiquity”, t. 47, s. 131-137.
- Tans P.P., Mook W.G.
- 1979 *Design, construction and calibration of a high-accuracy carbon-14 counting set up*, „Radiocarbon”, t. 21, s. 22-40.

Walanus A.

1983 *Zagadnienia podstawowe interpretacji wyników pomiarów fizycznych na przykładzie datowań metodą ^{14}C* , „Archeologia Polski”, t. 28, s. 7-17.

1986 *^{14}C electronic measurement system with small microcomputer*, „Radiocarbon”, t. 28, Nr 2A, s. 569-570.

Walanus A., Bluszcz A.

1985 *Rejestracja pomiaru w Laboratorium C-14 w Gliwicach*, „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, ser. Mat.-Fiz., z. 47, s. 149-154.

Waterbolk H.T.

1971 *Working with radiocarbon dates*, „Proceedings of the Prehistoric Society”, t. 37, s. 15-33.

1983 *Ten guidelines for the archeological interpretation of radiocarbon dates*, PACT, t. 8, s. 57-70.

Weniger B.

1986 *High-precision calibration of archeological radiocarbon dates*, „Acta Interdisciplinaria Archeologica”, t. IV, s. 11-53.

TOMASZ GOSLAR, DANUTA J. MICHCZYŃSKA, MIECZYŚLAW F. PAZDUR

HIGH PRECISION RADIOCARBON DATING AND PROBABILISTIC CALIBRATION OF ^{14}C DATES

Summary

The differences between the astronomic time scale and the radiocarbon scale have been one of the principal facts limiting the accuracy of ^{14}C dating. The studies published in the early 1970s allowed to make relevant corrections of the conventional ^{14}C dates. However, the accuracy of the corrections was not satisfactory and the studies of different authors contained different correction (H.E. Suess 1971; P.E. Damon, A. Long, E.I. Wallick 1974; E.K. Ralph, H.N. Michael, M.C. Han 1973; R. Switsur 1974; R.M. Clark 1975). A turning point in the application of the radiocarbon method in archaeology was a collection of the precise versions of radiocarbon calibration of time scale published in 1986 as a special issue of the „Radiocarbon” (Calibration Issue, vol. 28, No. 2). The issue contains particularly important studies of time intervals from 500 BC (Fig. 1 and 2; M. Stuiver, G.W. Pearson 1986) and from 2500 BC to 500 BC (Fig. 3 and 4; G.W. Pearson, M. Stuiver 1986). Both studies were a result of many-year collaboration between the radiocarbon laboratories in Seattle (USA) and Belfast during which the results obtained by the two laboratories were comprehensively verified. The repeated measurements of ^{14}C activity in the same samples brought the identical results, which testifies to the absence of systematical error. In the studies on changes of ^{14}C concentrations in the past, annual-tree-rings in the plants from remote regions were analyzed (North America, the British Isles, Ireland, Central Europe). The calibration curves elaborated by M. Stuiver and G.W. Pearson (1986) and G.W. Pearson and M. Stuiver (1986) have been recognized by virtue of the decisions taken at the 12th International Radiocarbon Conference in Trondheim in 1985 as official versions of radiocarbon calibration of time scale from 2500 BC to 1850 AD. A natural prolongation of these calibration curves is an elaboration of the changes of ^{14}C concentrations for the period of the last six millennia (G.W. Pearson et al. 1986). However, so far it has not been officially recognized. A high accuracy of the mentioned calibration curves presented in four segments in Figs 1-4 results in an unfavourable property – a multi-value calibration. It means that one value of the conventional radiocarbon age corresponds to a few (from 2 to 5) values of calendaric age (Fig. 5). This is a typical situation. Only for very few age intervals calibration is univocal. This means that one precisely defined value of calendar age can be read from a calibration curve, corresponding to a given value of conventional radiocarbon age. When a dating error is taken into consideration, further interpretation complications follow (Fig. 6).

The difficulties connected with multiple values of calibration curves can be removed when probabilistic calibration of radiocarbon dates is applied (D.J. Michczyńska, M.F. Pazdur, A. Walanus 1990). This method has been introduced by several authors simultaneously (S.W. Robinson 1985; B. Weniger 1986; J. van der Plicht, W.G. Mool, H. Hasper 1988). It consists in a transformation of probability distribution of conventional radiocarbon date into a relevant calendar time scale. By the same token all complex problems resulting from the complicated shape of calibration curve are taken into consideration. Probabilistic calibration of radiocarbon dates can be obtained by means of Calibration Programme for IBM PC/XT compatible computer.

The calibration output is presented on screen of monitor in two stages. The information available in stage one consists of a fragment of calibration curve and a graph of probability distribution on calendar time scale (Fig. 7) and a set of numerical data. The screen content can be copied on an A4 sheet by the printer. In the second stage of calibration an additional graph of cumulative probability of calibrated age is obtained and numerical tables as well (Fig. 8). The latter give the values of selected quantiles and interquantiles. As a value of calendar age of a dated sample taken is median of probability distribution while the limits of calibrated age error are determined by interquantile table.

The accuracy of dating samples on the calendar time scale is determined by two factors: the accuracy of dating of conventional age and the shape of calibration curve. In most radiocarbon laboratories all over the world the average accuracy of dating of sample not older than the Early Neolithic is within ± 40 – ± 80 years. In the 1970s in radiocarbon chronometry a concept was developed of improved precision dating. This term has been used for the dating with an error of circa ± 25 years. In some radiocarbon laboratories in the world a further improvement of the measurement techniques has resulted in the development of methodics of dating termed high precision dating. It means that the accuracy of dating of conventional age is within circa ± 15 years. The technical conditions for high precision dating have been created in the laboratories in Seattle, USA (M. Stuiver, S.W. Robinson, I.C. Yang 1979), Belfast (G.W. Pearson 1979; 1980), Groningen (P.P. Tans, W.G. Mook 1979) and Heidelberg (H. Schoch, M. Bruns, K.O. Münnich, M. Münnich 1980).

In the Radiocarbon Institute of Physics at the Silesian Technical University in Gliwice, after many-years efforts, the technical conditions have been created enabling the improved precision measurements corresponding to the world standards. A counting system has been built consisting of a five-liter volume proportional counter working with carbon dioxide pressure of two atmospheres, a separate vacuum line for sample combustion and precise purification of carbon dioxide, linked to a system of containers to keep samples. After many-year employment of the counting system has led to an elaboration of a complete laboratory procedure of dating with an error of circa ± 25 years. To perform the improved precision dating only those organic samples can be used which store high carbon content and can be recognized as relatively short living. Moreover, they must be resistant to contamination with carbon of another origin. These requirements are met by, primarily, tree-trunks, grain, seeds and fruits (nuts, cones) and charcoals occurring in a form of the well-preserved crumbles. To measure the ^{14}C activity and to find the isotopic fractionation coefficient it is necessary to burn a selected sample containing at least 7 g of carbon. Samples with a low carbon content or with a changed organic structure (carbon dust, humus) cannot be used for improved precision dating neither can be used those highly decomposed (rotten wood, peat) nor with carbon preserved in the form of carbonates (mollusc shells, speleothems, etc.). The difficulties of purely technical nature connected with purification of carbon dioxide obtained from collagen combustion render the precise dating of bone samples impossible. A correct estimation of the cultural context of the sample to be dated is of crucial importance for the value of improved precision dating. An improved precision dating is possible for no more than 30 samples annually and the average cost of a single dating is approximately three times higher than the cost of dating with normal accuracy.

Authors' address:

Dr Tomasz Goslar, mgr Danuta J. Michczyńska
Doc. dr hab. Mieczysław F. Pazdur
Instytut Fizyki Politechniki Śląskiej
ul. Bolesława Krzywoustego 2
44-101 Gliwice