

Danuta J. MICHCZYŃSKA, Mieczysław F. PAZDUR

Laboratorium C-14

Politechnika Śląska, Gliwice

PROBABILISTYCZNA KALIBRACJA DAT RADIOWĘGLOWYCH

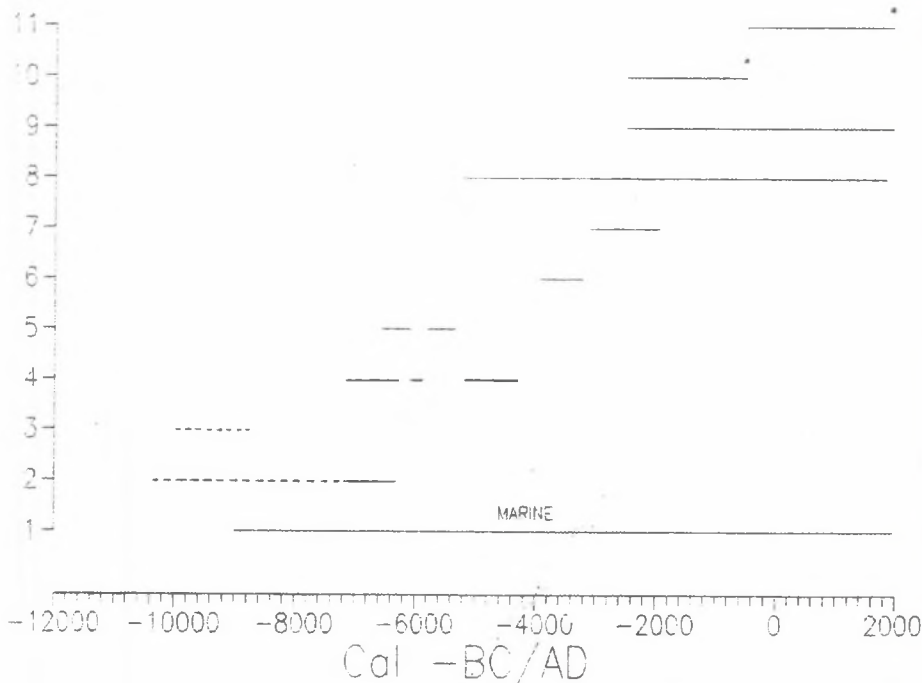
Streszczenie: Probabilistyczna kalibracja dat radiowęglowych polega na przekształceniu rozkładu prawdopodobieństwa konwencjonalnego wieku radiowęglowego w odpowiedni rozkład prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego z uwzględnieniem złożonego kształtu krzywej kalibracyjnej. Program CALIBRATION, opracowany przez autorów, wykorzystuje algorytm oparty na twierdzeniu Bayesa. Program napisany jest w języku Microsoft BASIC na mikrokomputer kompatybilny z IBM PC/XT wyposażony w kartę graficzną Hercules. Program pozwala na wykonywanie obliczeń kalibracyjnych pojedynczych dat radiowęglowych oraz zbiorów dowolnych dat lub zbiorów dat związanych ze sobą, reprezentujących pewien określony obiekt prehistoryczny, kulturę archeologiczną, fazę osadniczą, itp. Wyniki obliczeń kalibracyjnych prezentowane są na ekranie monitora w formie graficznej wykresów funkcji gęstości prawdopodobieństwa i dystrybuanty oraz w postaci danych liczbowych, zawierających najważniejsze charakterystyki rozkładu prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego.

WSTĘP

Chronometria radiowęglowa jest podstawowym narzędziem oznaczania wieku materiałów organicznych i węglanowych. Podstawą metody ^{14}C jest założenie o stałości koncentracji izotopu ^{14}C w biosferze w przeszłości, zweryfikowane wstępnie przez W. F. Libby'ego i współpracowników na podstawie pomiarów próbek o znanym wieku, głównie pochodzących z Egiptu (J. R. Arnold, W. F. Libby, 1949). Dokładne badania de Vriesa, wykonane już w latach pięćdziesiątych, wykazały jednak, że założenie to nie jest spełnione. Występowanie zmian koncentracji izotopu ^{14}C w biosferze powoduje powstanie niezgodności pomiędzy datami radiowęglowymi a kalendarzową skalą czasu. Odstępstwa, sięgające od około 100 lat w przedziale ostatnich dwóch tysiącleci, do około 800 lat w przedziale 50-60 tysięcy lat, są powodem istotnych komplikacji w zastosowaniu chronometrii radiowęglowej do badań archeologicznych. Systematyczne badania zmian koncentracji izotopu ^{14}C w przeszłości doprowadziły do stosunkowo dokładnego określenia charakteru i wielkości tych odstępstw. Wykorzystanie wyników tych badań do oceny rzeczywistego, kalendarzowego wieku konkretnych obiektów archeologicznych datowanych metodą ^{14}C nie jest jednak proste.

PRZEGLĄD OPUBLIKOWANYCH WERSJI KALIBRACJI RADIOWĘGLOWEJ SKALI CZASU

Dla określenia wieku rzeczywistego datowanych zabytków archeologicznych konieczne jest używanie wykresów lub tabel kalibracyjnych. Tworzy się je na podstawie badań sekwencji dendrochronologicznie wydatowanego drewna, w słojach drzew można bowiem bezpośrednio obserwować zmiany koncentracji izotopu ^{14}C w przeszłości. Skale dendrochronologiczne istotne dla datowania radiowęglowego są oparte na długowiecznych drzewach z terenu Ameryki Północnej, głównie *Sequoia gigantea* lub *Pseudotsuga menziesii*, oraz na dębach europejskich.



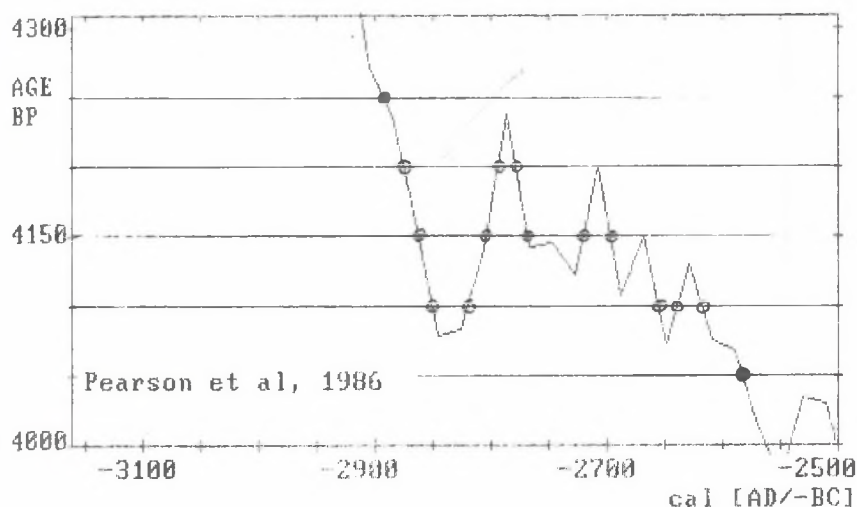
Rys. 1. Zestawienie przedziałów czasu objętych krzywymi i tabelami kalibracyjnymi zawartymi w specjalnym numerze czasopisma "Radiocarbon" (Calibration Issue, vol. 28, No. 2B).

Fig. 1. Time intervals covered by calibration curves and tables included in "Calibration Issue" of "Radiocarbon" (vol. 28, No. 2B)

Pierwsze pełne opracowania kalibracji radiowęglowej skali czasu zostały opublikowane przez M. Stuivera i H. E. Suessa (1966) i H. E. Suessa

(1967). Następne lata przyniosły wiele różnych wersji krzywych kalibracyjnych. Z opracowań tych największe uznanie zdobyły wersje kalibracji H. E. Suessa (1970), P. E. Damona et al (1972), E. K. Ralph et al (1973), R. E. Switsura (1973) i R. M. Clarka (1975). Krótkie omówienie tych wersji kalibracji zawiera przeglądowy artykuł A. Pazdura i M. F. Pazdura (1982). W chwili obecnej mają one w zasadzie znaczenie historyczne jako kolejne etapy rozwoju chronometrii radiowęglowej.

Udoskonalenie technik pomiarowych oraz opracowanie skal dendrochronologicznych dębu doprowadziło do powstania krzywych kalibracyjnych wysokiej precyzji. Pierwsze opracowanie tego typu, obejmujące ostatnie dwa tysiąclecia, zostało opublikowane przez M. Stuivera (1982). Kolejne krzywe kalibracyjne, oparte na pomiarach o wysokiej precyzji, będące rezultatem współpracy laboratoriów w Seattle i w Belfaście, zostały przedstawione na XII Międzynarodowej Konferencji Radiowęglowej w Trondheim przez M. Stuivera i G. W. Pearsona (AD 1950 - 500 BC), G. W. Pearsona i M. Stuivera (500 - 2500 BC) oraz G. W. Pearsona et al (AD 1840 - 5210 BC) i wraz z szeregiem innych opracowań zebrane w specjalnym tomie materiałów konferencyjnych (Radiocarbon, Calibration Issue, vol 28, Nr 2B, 1986; por. Rys. 1). Dwie pierwsze z wymienionych

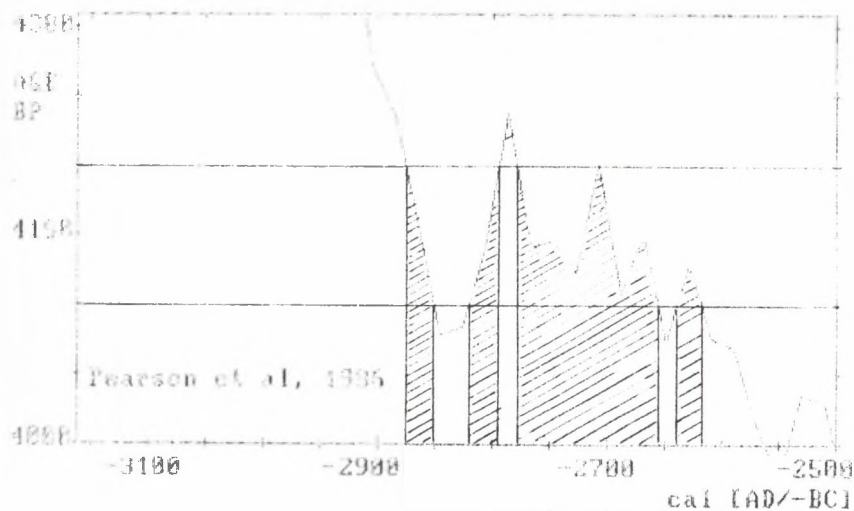


Rys. 2. Ilustracja niejednoznaczności wyznaczenia wieku kalendarzowego przy stosowaniu metody przecięć z krzywą kalibracyjną dla różnych wartości wieku konwencjonalnego. Jednocześnie określone wartości wieku kalendarzowego zaznaczono czarnymi kółkami.

Fig. 2. Example of multiple values of calendric age resulting from multiple intercepts with calibration curve. Black circles denote the only values of calendric age which are determined univocally.

krzywych kalibracyjnych uzyskały międzynarodową akceptację i zostały zarekomendowane do powszechnego użytku. Z wysoką precyzją krzywych kalibracyjnych wiąże się ich bardzo nieregularny kształt. Fakt ten znacznie komplikuje konwersję dat radiowęglowych na daty kalendarzowe gdyż jednej wartości konwencjonalnego wieku radiowęglowego może odpowiadać kilka dat kalendarzowych. Jeżeli uwzględnić błąd daty radiowęglowej, to w wyniku kalibracji można otrzymać kilka przedziałów wieku kalendarzowego.

Przykładowe ilustracje tych trudności przedstawione są na rysunkach 2 i 3. Rysunek 2 przedstawia najprostszą metodę kalibracji konwencjonalnych dat radiowęglowych, polegającą na znalezieniu wieku kalendarzowego przez wyznaczenie przecięć linii, reprezentującej zadaną wartość wieku konwencjonalnego z krzywą kalibracyjną. Współrzędna punktu przecięcia, odczytana na osi kalendarzowej skali czasu wyznacza kalibrowaną datę radiowęglową, wyrażoną w latach AD lub BC. Na Rys. 2 pięć linii poziomych reprezentuje pięć różnych wartości konwencjonalnego wieku radiowęglowego, równych: 4050, 4100, 4150, 4200 i 4250 BP. Jak łatwo zauważyć, jedynie pierwsza i ostatnia z wymienionych dat konwencjonalnych posiada swój jednoznaczny odpowiednik w postaci daty kalendarzowej. W pozostałych trzech przypadkach przedstawiona metoda przecięć prowadzi do otrzymania trzech lub pięciu, niekiedy bardzo bliskich, wartości wieku



Rys. 3. Ilustracja niejednoznaczności wyznaczenia przedziałów wieku kalendarzowego odpowiadających przedziałowi pojedynczego błędu standardowego wieku konwencjonalnego $[D-\sigma, D+\sigma]$.

Fig. 3. Example of multiple intervals of calendric age corresponding to the 1σ intervals of conventional radiocarbon date $[D-\sigma, D+\sigma]$.

kalendrzowego. Na rysunku 3, obejmującym ten sam fragment krzywej kalibracyjnej, przedstawiono analogiczne trudności wynikające przy zastosowaniu metody przecięć do wyznaczenia przedziałów wieku kalendrzowego, odpowiadających standardowemu przedziałowi wieku konwencjonalnego, równemu $[D \pm \sigma]$. Przedziałowi 4150 ± 50 BP odpowiadają cztery przedziały wieku kalendrzowego.

Nasuwają się w takim przypadku naturalne pytania, czy którykolwiek z tych przedziałów można traktować jako najbardziej prawdopodobny, jeżeli tak, to który, jak wyznaczyć to prawdopodobieństwo, itd.. Problem ten można rozwiązać przez wprowadzenie pojęcia probabilistycznej kalibracji dat radiowęglowych, to znaczy kalibracji w której odpowiedniej transformacji podlega nie pojedyncza liczba, reprezentująca wynik datowania radiowęglowego, lecz rozkład prawdopodobieństwa wartości otrzymanej w wyniku datowania. Rozkład ten przetwarzany jest na rozkład prawdopodobieństwa w skali lat kalendrzowych stosownie do odpowiedniego odcinka krzywej kalibracyjnej.

ISTNIEJĄCE PROGRAMY KALIBRACYJNE

Metoda probabilistycznej kalibracji jest bardzo pracochłonną procedurą i wymaga używania programów komputerowych. Po raz pierwszy metodę automatycznej kalibracji dat radiowęglowych zaproponowano na XII Międzynarodowej Konferencji Radiowęglowej w Trondheim (S. W. Robinson, 1985). Prezentowany program został przez autora bliżej opisany w kilku późniejszych publikacjach (S. W. Robinson, 1986; 1987) i zastosowany do opracowania serii dat radiowęglowych z Egiptu i obszarów sąsiednich (F. A. Hassan, S. W. Robinson, 1987). Natomiast w zbiorze materiałów konferencyjnych opublikowany został prawie kompletny wydruk programu kalibracyjnego w języku FORTRAN, opracowany w Seattle (M. Stuiver, P. J. Reimer, 1986). W tym samym roku zaprezentował swój program kalibracyjny B. Weninger (1986) w referacie wygłoszonym na konferencji "Modern Dating Methods in Archaeology" w Czechosłowacji. W 1987 roku na II Międzynarodowym Sympozjum "Archeologia i ^{14}C " w Groningen zaprezentowano dwa nowe programy kalibracyjne (J. van der Plicht, W. G. Mook, H. Hasper, 1987; D. J. Michczyńska, M. F. Pazdur, A. Walanus, 1988). Równocześnie R. B. Warner (1987) przedstawił pogląd archeologa na metody opracowania wyników datowań, w tym sformułował pewne wymogi i założenia, mogące stanowić podstawę dla opracowania odpowiednich programów służących do kalibracji serii dat radiowęglowych. Na tym samym sympozjum zaproponowano zebranie wszystkich programów kalibracyjnych i porównanie wyników obliczeń kalibracyjnych uzyskanych przy użyciu takich samych zestawów danych. Celem tego projektu było sprawdzenie poprawności programów i zarekomendowanie jednego z nich do powszechnego użytku. Przygotowania danych do porównania oraz oceny wyników podjął się zespół brytyjski, koordynowany przez B. Ottaway z Uniwersytetu w Bradford oraz E. M. Scott z Uniwersytetu w

Glasgow. Swoje programy zgłosiło 8 grup:

- 1) T. Aitchison, B. Ottaway, E. M. Scott, Wielka Brytania,
- 2) M. Leese, Wielka Brytania,
- 3) B. Otlet, A. J. Walker, Wielka Brytania,
- 4) D. J. Michczyńska, M. F. Pazdur, Polska,
- 5) J. van der Plicht, W. G. Mook, Holandia,
- 6) S. W. Robinson, USA,
- 7) M. Stuiver, P. R. Reimer, USA,
- 8) B. Weninger, RFN.

Prace porównawcze nie są jeszcze zakończone, opublikowano jedynie wstępne podsumowanie (Aitchison et al, 1988), z którego wynika, że:

- Wszystkie programy wykorzystują krzywe kalibracyjne zarekomendowane w 1985 roku w Trondheim i opublikowane w "Radiocarbon" (Calibration Issue, vol. 28, No. 2B, 1986; odpowiednie odcinki są zaznaczone gwiazdkami na Rys. 1). Krzywe te są w programach kalibracyjnych przedstawiane w postaci łamanej (wyjątkowo zespół z Groningen stosuje wygładzanie krzywej kalibracyjnej).

- Sposób traktowania błędu krzywej kalibracyjnej nie jest jednolity. Programy gliwicki i S. W. Robinsona pomijają ten błąd, niektóre programy przyjmują stałą zadaną wartość błędu wynoszącą 15 lub 20 lat, a inne uzależniają go od szerokości pasma krzywej.

- Najczęściej używanym przedziałem ufności, w którym analizowany jest rozkład prawdopodobieństwa daty radiowęglowej jest przedział 2σ . Program gliwicki analizuje daty radiowęglowe z uwzględnieniem prawie całego rozkładu prawdopodobieństwa, to znaczy w przedziale 3 lub 4σ .

- Wyniki kalibracji we wszystkich programach są przedstawiane w formie graficznej. Programy M. Leesa, gliwicki, i S. W. Robinsona podają również pewne wyniki obliczeń w postaci liczbowej.

- Wyniki obliczeń kalibracyjnych, podawane w postaci przedziałów ufności wieku kalendarzowego przez autorów poszczególnych programów, bądź też odczytywane z wykresów dystrybucyjności przez zespół opracowujący wyniki porównania, wskazują, że większość programów kalibracyjnych prowadzi do zbliżonych ocen wieku kalendarzowego. Stwierdzone odstępstwa nie mają w większości przypadków istotnego znaczenia przy interpretacji chronologicznej wyników datowania stanowisk archeologicznych.

- Wszystkie programy kalibracyjne są używane do analizy pojedynczych dat radiowęglowych, z wyjątkiem programu gliwickiego, który umożliwia oprócz analizy pojedynczych dat również kilka sposobów analizy grup dat radiowęglowych.

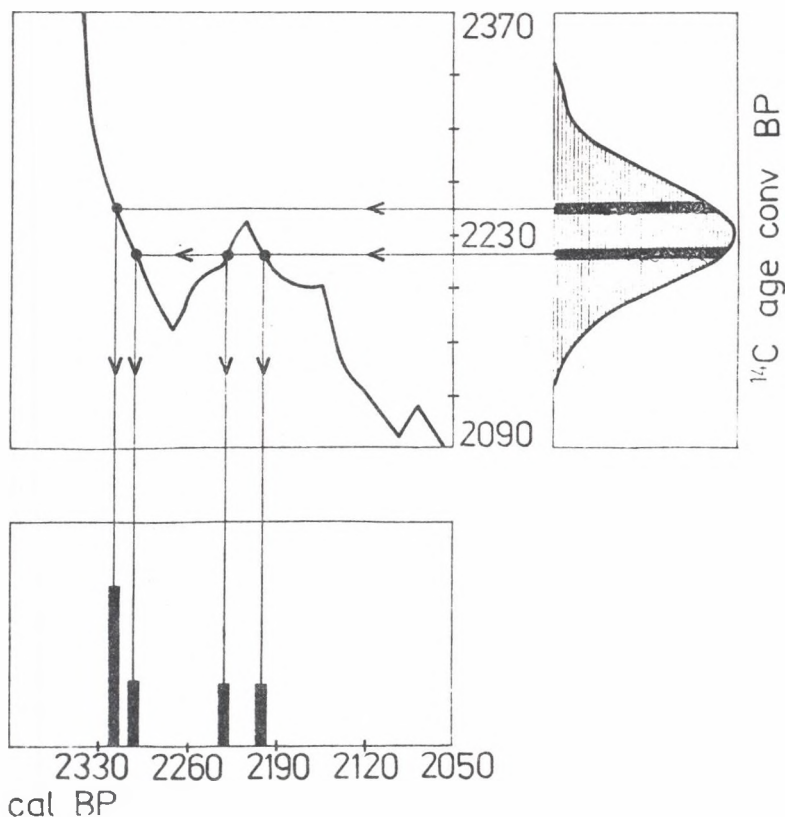
- Brak jest zgodności poglądów autorów poszczególnych programów na temat poprawności strony matematycznej używanych przez nich algorytmów kalibracji. Rozstrzygnięcia tego zagadnienia podjął się zespół organizatorów porównania programów z Wydziału Statystyki Uniwersytetu w Glasgow.

PORÓWNANIE ALGORYTMÓW RÓŻNYCH PROGRAMÓW KALIBRACYJNYCH

Wyniki obliczeń kalibracyjnych, otrzymane przy użyciu poszczególnych programów kalibracyjnych, są w zasadzie zbliżone (T. Aitchison et al, 1989). Nie zmienia to jednak w niczym faktu, że poszczególni autorzy stosują zasadniczo różne podejścia do problemu kalibracji, z czego w konsekwencji wynikają diametralnie różne algorytmy obliczeniowe. W zasadzie wyróżnić można dwie odmienne idee kalibracji.

Pierwsza idea stanowi właściwie adaptację klasycznego podejścia, przedstawionego na rysunkach 2 i 3, i polega na przenoszeniu prawdopodobieństw z osi liczbowej dat konwencjonalnych na oś liczbowa dat kalendarzowych. Jeżeli w rozpatrywanym przedziale przebieg krzywej kalibracyjnej jest dostatecznie regularny i nie występuje problem wielokrotnych przecięć z krzywą kalibracyjną, transformacja rozkładu prawdopodobieństwa wieku konwencjonalnego nie budzi wątpliwości. Jeżeli natomiast wielokrotne przecięcia występują, co jest praktycznie regułą, powstaje niezwykle istotne pytanie, jak przenieść odpowiednie prawdopodobieństwa z jednej osi na drugą. Problem ten był szczegółowo dyskutowany w artykule B. Weninger (1986), który opierając się na intuicyjnym przeświadczeniu doszedł do wniosku, że każdej z wartości wieku kalendarzowego, wyznaczonych przez przecięcia z krzywą kalibracyjną, należy przypisać takie samo prawdopodobieństwo, równe prawdopodobieństwu odpowiedniej wartości wieku konwencjonalnego. Odmienne rozwiązanie przyjmuje S. W. Robinson (1985; 1986), który w swoich programach każdej z równorzędnych wartości wieku kalendarzowego przypisuje prawdopodobieństwo, równe prawdopodobieństwu odpowiedniej wartości wieku konwencjonalnego, podzielonemu przez liczbę równorzędnych dat kalendarzowych (tj. liczbę przecięć z krzywą kalibracyjną). Taki sposób podejścia zilustrowany jest schematycznie na rys. 4, gdzie zaciemnione prostokąty oznaczają wielkości odpowiednich prawdopodobieństw.

Alternatywne podejście, w którym omija się kłopotliwy problem wielokrotnych przecięć z krzywą kalibracyjną, przyjmuje jako fakt pierwotny istnienie pewnego (nieznanego) rzeczywistego wieku kalendarzowego datowanej próbki. Wynik pomiaru, reprezentowany przez pewien rozkład prawdopodobieństwa wieku konwencjonalnego, jest traktowany jako wtórny. Zakładając pewną konkretną wartość wieku kalendarzowego można, posługując się wykresem krzywej kalibracyjnej oraz znanym (po wykonaniu pomiaru wieku) rozkładem prawdopodobieństwa wieku konwencjonalnego, dokonać jednoznacznego przeniesienia prawdopodobieństw, rozmieszczonych wzdłuż osi liczbowej dat konwencjonalnych na oś liczbowa dat kalendarzowych. Metoda postępowania w tym przypadku zilustrowana jest na rys. 5. Stanowi ona poglądową reprezentację twierdzenia Bayesa, i została zaadoptowana w programie kalibracyjnym opracowanym w Laboratorium C-14 w Gliwicach (D. J. Michczyńska et al, 1988, w druku), opisanym szczegółowo w następnym rozdziale. Podejście takie, choć nie sformułowane w jawnej

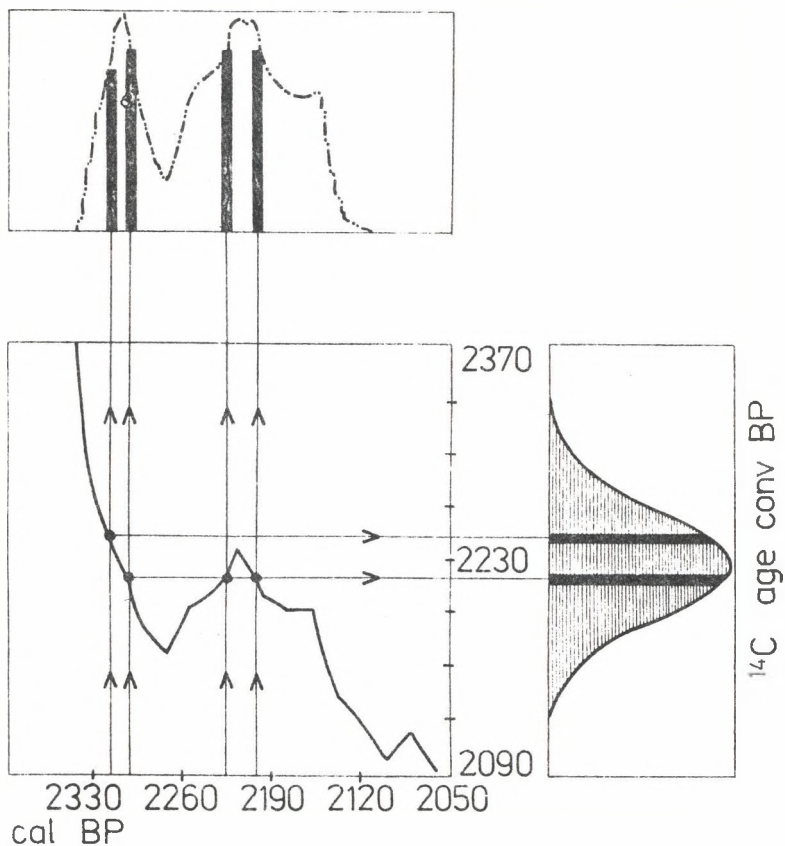


Rys. 4. Adaptacja metody przecięć do transformacji rozkładu prawdopodobieństwa wieku konwencjonalnego z założeniem równomiernego rozdzielenia prawdopodobieństwa pomiędzy kilka wartości wieku kalendarzowego. Pole zakreskowane przedstawia rozkład prawdopodobieństwa otrzymany przy odrzuceniu założenia o rozdzielaniu prawdopodobieństw.

Fig. 4. Application of the method of intercepts to transformation of the probability distribution of conventional radiocarbon date under assumption of dividing of probability among several values of calendric age resulting from multiple intercepts with calibration curve. Dashed area shows shape of probability distribution obtained without this assumption.

postaci, stanowi również podstawę algorytmu wykorzystywanego w programie kalibracyjnym opracowanym przez zespół autorów z Laboratorium C-14 w Groningen (van der Plicht et al, 1987).

Algorytmy pozostałych programów kalibracyjnych nie zostały dotychczas opublikowane; w szczególności trudno odtworzyć algorytm transformacji rozkładu prawdopodobieństwa w programie M. Stuivera i P. R. Reimer (1986),



Rys. 5. Ilustracja graficzna metody przekształcania rozkładu prawdopodobieństwa konwencjonalnego wieku radiowęglowego do skali kalendarzowej czasu, wykorzystującej twierdzenie Bayesa.

Fig. 5. Explanation of the method of transformation of the initial Gaussian probability distribution of conventional radiocarbon date into the calendric time scale, based on the Bayes theorem.

pomimo opublikowania wydruku części programu. Reasumując, można stwierdzić, że w pełni poprawne i ściśle matematycznie algorytmy są wykorzystywane w programach kalibracyjnych opracowanych w Groningen i w Gliwicach. Pozostałe programy opierają się na algorytmach zawierających rozwiązania intuicyjne, które mogą prowadzić do w przybliżeniu poprawnych wyników, nie mogą być jednak uznane za poprawne.

PROGRAM "CALIBRATION" OPRACOWANY W LABORATORIUM C-14 W GLIWICACH

Podstawy matematyczne

Celem probabilistycznej kalibracji dat radiowęglowych jest znalezienie rozkładu prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego wydatowanej próbki. Rozwiązanie zaadoptowane w programie CALIBRATION (D. J. Michczyńska et al, 1988) wykorzystuje twierdzenie Bayesa dotyczące prawdopodobieństwa warunkowego. Twierdzenie to można sformułować w następujący sposób:

Prawdopodobieństwo tego, że wiek rzeczywisty próbki wynosi T pod warunkiem, że wynik pomiaru wynosi D jest proporcjonalne do iloczynu prawdopodobieństwa tego, że wynik pomiaru wynosi D pod warunkiem, że wiek rzeczywisty wynosi T i prawdopodobieństwa tego, że wiek rzeczywisty próbki wynosi T , co można zapisać matematycznie:

$$P(T|D) \sim P(D|T) \cdot P(T) \quad (1)$$

Zazwyczaj przed pomiarem niewiele wiadomo o wieku próbki i przedział wieku, w którym może się znaleźć wiek rzeczywisty jest bardzo szeroki w porównaniu z dokładnością określenia wieku w pomiarze. Prawdopodobieństwo tego, że wiek rzeczywisty próbki wynosi T można zatem przyjąć za stałe. Zakładając dodatkowo, że rozkład prawdopodobieństwa wyniku pomiaru radiowęglowego ma postać rozkładu normalnego, otrzymuje się

$$P(T|D) = C \cdot \exp \left[- \frac{(k(T) - D)^2}{2 \cdot \sigma^2} \right] \quad (2)$$

gdzie: C - stała normalizacji,

$k(T)$ - zależność między konwencjonalnym wiekiem radiowęglowym a wiekiem kalendarzowym, tzn. funkcja opisująca krzywą kalibracyjną,
 σ - odchylenie standardowe wyniku pomiaru radiowęglowego (D).

Opis programu kalibracyjnego

Program "CALIBRATION" opracowany w Laboratorium C-14 w Gliwicach napisany jest w języku Microsoft BASIC na mikrokomputerze kompatybilnym z IBM PC/XT z kartą grafiki typu Hercules. Wykorzystuje on krzywe kalibracyjne M. Stuivera i G. W. Pearsona, G. W. Pearsona i M. Stuivera oraz G. W. Pearsona et al, przy czym priorytet mają dwie pierwsze krzywe kalibracyjne oficjalnie zalecone przez XII Międzynarodową Konferencję Radiowęglową w Trondheim (W. G. Mook, 1986).

Obliczenia rozkładu prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego są przeprowadzane w przedziale wieku konwencjonalnego $D \pm k \cdot \sigma$, $k \in \{1, 2, 3, 4\}$. Przecięcia wartości $D - k \cdot \sigma$ i $D + k \cdot \sigma$ z krzywą kalibracyjną wyznaczają przedział (lub przedziały) wieku kalendarzowego. Rozkład prawdopodobieństwa w otrzymanym przedziale (przedziałach) jest obliczany według wzoru (2). Obliczenia są przeprowadzane dla kolejnych punktów na

osi lat kalendarzowych oddalonych od siebie o 1 rok, a funkcja $k(T)$ ma postać zależną od odpowiedniego odcinka krzywej kalibracyjnej. Aktualna wersja programu zakłada, że krzywa kalibracyjna ma postać łamanej. Dla odcinka krzywej kalibracyjnej o numerze j

$$k(T) = a_j T + b_j. \quad (3)$$

Stała normalizacji C jest tak dobierana by pole pod rozkładem prawdopodobieństwa konwencjonalnej daty radiowęglowej i pole pod rozkładem prawdopodobieństwa daty kalendarzowej były sobie równe.

PROBLEMY PREZENTACJI I WYKORZYSTANIA WYNIKÓW OBLICZEŃ KALIBRACYJNYCH

Podstawowym zadaniem programu wykonującego probabilistyczną kalibrację dat radiowęglowych jest poprawne wyliczenie rozkładu prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego datowanej próbki. Z prostych intuicyjnych rozważań, odwołujących się do rysunków 2-5 wynika, że w rezultacie skomplikowanego, nieregularnego przebiegu krzywej kalibracyjnej, rozkład wyjściowy o regularnym kształcie krzywej Gaussa, zostanie przetworzony w rozkład o nieregularnym kształcie, z wieloma maksimumami. Rozkład będący wynikiem obliczeń jest do tego często określony w przedziale złożonym z kilku rozłącznych odcinków.

Z drugiej jednak strony, ponieważ program probabilistycznej kalibracji dat radiowęglowych winien być narzędziem użytecznym w interpretacji wyników datowań wykonywanych na potrzeby badań archeologicznych, musi on uwzględniać podstawowe wymogi tychże badań. Wymogi te można sformułować w postaci następującej listy o wzrastającym stopniu złożoności:

- A: określenie wieku kalendarzowego pojedynczej próbki (wraz z odpowiednim przedziałem niepewności),
- B: porównanie dat kalendarzowych pewnej dowolnej serii dat, w tym
- B1: potwierdzenie lub odrzucenie hipotezy równoczesności dwóch lub więcej próbek,
- C: wyznaczenie granic czasowych trwania pewnej określonej kultury, fazy osadniczej, w szczególności,
- C1: określenie czasu trwania jej rozkwitu (ang. floruit),
- C2: odtworzenie intensywności działalności gospodarczej z analizy statystycznej dat ^{14}C ,
- D: wyznaczenie wieku kalendarzowego pewnego określonego zdarzenia prehistorycznego, datowanego na podstawie zbioru równoczesnych próbek,
- E: określenie następstwa chronologicznego faz osadniczych, występujących na pewnym stanowisku archeologicznym, określenie lub wykluczenie równoczesności występowania pewnych kultur archeologicznych na oddalonych terenach i ich uporządkowanie chronologiczne, itp.

Stosownie do tak sformułowanych wymogów właściwie skonstruowany program kalibracyjny powinien umożliwiać, oprócz kalibracji pojedynczej daty

radiowęglowej, również kalibrację pewnych zbiorów dat. Procedura obliczeniowa w każdej wersji w identyczny sposób, jest bowiem w zasadzie wielokrotnym powtórzeniem obliczeń wykonywanych przy transformacji rozkładu prawdopodobieństwa pojedynczej daty konwencjonalnej, inny natomiast jest sposób ostatecznej obróbki uzyskanych wyników liczbowych, i inny musi być sposób prezentacji wyników.

Sposób prezentacji wyników obliczeń kalibracyjnych w każdej z przewidzianych w programie wersji musi być wynikiem rozsądnego kompromisu pomiędzy wymogami niezbędnej unifikacji danych wyjściowych, która ma na celu udostępnienie użytkownikowi programu danych bezpośrednio przydatnych do dalszej interpretacji, a praktycznie niemożliwą do przewidzenia różnorodnością postaci rozkładów prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego. z tego względu w żadnej z opcji programu kalibracyjnego forma prezentacji wyników nie nasuwa ostatecznego, jednoznacznego i z góry zadanego zbioru kilku podstawowych parametrów opisujących wynik kalibracji, lecz zawiera możliwość wybrania parametrów najbardziej odpowiednich dla konkretnego kształtu rozkładu prawdopodobieństwa. W tym celu zadecydowano świadome dublowanie informacji o otrzymanym rozkładzie prawdopodobieństwa, poprzez przedstawienie wyniku obliczeń zarówno w postaci graficznej (funkcji gęstości prawdopodobieństwa i dystrybuanty rozkładu) oraz w postaci zbioru parametrów liczbowych, charakteryzujących zarówno funkcję gęstości (maksima i przedziały określoności) jak i dystrybuanty (w postaci tabel wybranych kwantyli i interkwantyli).

OPIS FUNKCJONALNY PROGRAMU "CALIBRATION"

Program realizuje trzy główne opcje:

- kalibrację pojedynczej daty ^{14}C ,
- kalibrację zbioru dat niezależnych, służącą do przedstawienia rozkładu dat na kalendarzowej skali czasu z prezentacją wyników w trzech wersjach,
- kalibrację zbioru dat zależnych, reprezentujących ten sam poziom kulturowy, wydarzenie prehistoryczne lub próbkę, z możliwością obliczania średniej i jej błędu (w kilku wersjach) i kalibrację tej wartości zgodnie z procedurą kalibracji pojedynczej daty.

Wyniki obliczeń w każdej z opcji prezentowane są na ekranie monitora; użycie klawisza funkcyjnego <Prt Sc> umożliwi otrzymanie kopii ekranu na drukarce. Wyniki kalibracji pojedynczej daty prezentowane są w dwóch częściach. Jako zasadę przyjęto, że wyniki przedstawiane są w notacji BP (Before Present, tj. w latach przed rokiem 1950 n.e.), przy czym w każdym przypadku na żądanie możliwe jest przejście do stosowanych w archeologii i historii skal czasowych AD/BC, jak też powrót ze skal AD/BC do skali BP. Opcje kalibracji zbiorów dat zaopatrzone są w możliwość wydrukowania raportu, który ma postać tabeli zawierającej dane wejściowe (konwencjonalne daty radiowęglowe daty radiowęglowe wraz z błędami i numerami laboratoryjnymi). Sterowanie programem i wybór funkcji odbywa się w systemie zagnieżdżonych menu. Dla wygody użytkownika z poziomu głównego

menu dostępny jest zestaw podstawowych informacji o funkcjach poszczególnych opcji programu. Dane do obliczeń kalibracyjnych na zbiorach dat mogą być wprowadzane bądź to bezpośrednio z klawiatury (i ewentualnie zapamiętane w odpowiednich plikach), bądź też z plików przygotowanych wcześniej. Również wyniki obliczeń kalibracyjnych wykonywanych dla zbiorów dat mogą być zapamiętywane w postaci odpowiednich plików, a następnie w razie potrzeby odtwarzane w krótkim czasie na ekranie.

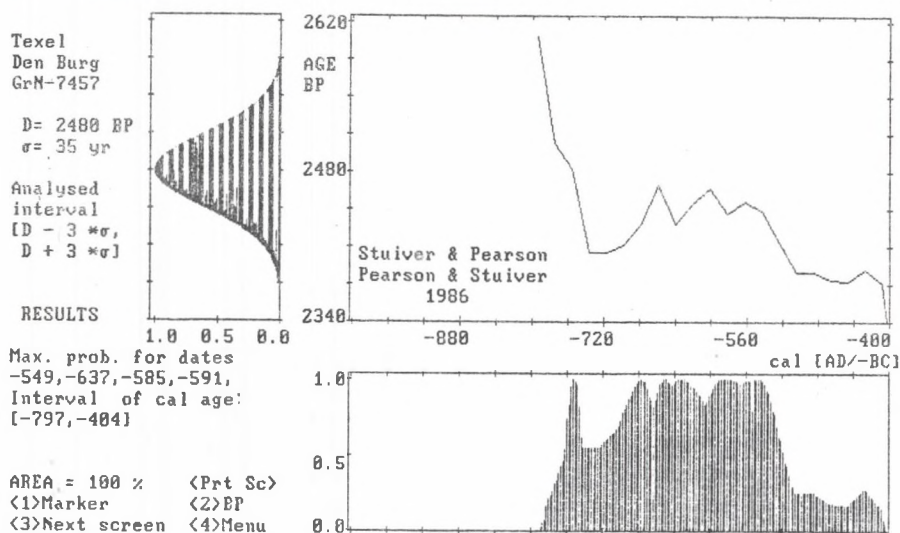
Czas trwania obliczeń przy kalibracji pojedynczej daty wynosi od 2 do 5 minut; obliczenia dla zbiorów dat są odpowiednio dłuższe.

PRZYKŁADY ZASTOSOWAŃ PROGRAMU "CALIBRATION"

Rysunki 6 i 7, będące kopiami ekranu monitora, prezentują przykładowe wyniki kalibracji pojedynczej daty otrzymane dla próbki Texel-Den Burg o wieku radiowęglowym 2480 ± 35 conv BP (GrN-7457). Na rys. 6 w lewym górnym rogu podane są informacje dotyczące próbki i rozkład prawdopodobieństwa daty konwencjonalnej. Po prawej stronie u góry zamieszczony jest odpowiedni fragment krzywej kalibracyjnej, poniżej znajduje się wykres funkcji gęstości prawdopodobieństwa w skali lat kalendarzowych. Po lewej stronie podane są cztery wartości wieku kalendarzowego, dla których rozkład prawdopodobieństwa osiąga maksima oraz przedział lat kalendarzowych. W lewym dolnym rogu znajdują się opcje umożliwiające sterowanie pracą programu. Rysunek 7 podaje dalsze szczegółowe wyniki dotyczące tej samej próbki. Nad wykresem funkcji gęstości prawdopodobieństwa zamieszczony jest wykres dystrybuanty tego rozkładu. Po lewej stronie podane są wartości lat kalendarzowych, dla których dystrybuanta osiąga wartości: 0.01, 0.05, 0.10, 0.25, 0.50, 0.75, 0.90, 0.95, 0.99. Poniżej są podane przedziały, w których wiek kalendarzowy próbki może znaleźć się z prawdopodobieństwem 50%, 95% i 98%. W lewym dolnym rogu znajdują się opcje umożliwiające sterowanie pracą programu.

Wykres funkcji gęstości prawdopodobieństwa pokazuje stopień deformacji wyjściowego rozkładu prawdopodobieństwa, który, przy zastosowaniu obciążenia na poziomie $\pm 4\sigma$, pokrywa przedział czasu 280 lat, podczas gdy rozkład wieku kalendarzowego rozciąga się na odcinku ponad 400 lat, przy czym na odcinku ok. 200 lat może być uważany za zbliżony do rozkładu równomiernego z nałożonymi niezbyt wybitnymi maksimami lokalnymi. Wydaje się, że w przedstawionym przypadku można za miarę punktu centralnego otrzymanego rozkładu prawdopodobieństwa przyjąć jego medianę, równą 2576 BP = 626 BC, zaś za miarę rozmycia przedziały odpowiadające prawdopodobieństwu 0.50 i 0.95. Reasumując, można wiek kalendarzowy przedstawić w postaci 625 ± 65 BC (na poziomie ufności 50%) lub 625_{-190}^{+145} BC (na poziomie ufności 95%).

Opierając się na badaniu funkcjonowania programu można stwierdzić, że przy kalibracji dat o dokładności niezbyt wysokiej (błąd oznaczenia wieku większy niż 50 lat) interpretacja otrzymanego rozkładu prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego nie nastręcza trudności. Jako miarę wartości wieku kalendarzowego przyjmując można medianę rozkładu, zaś w charakterze granic

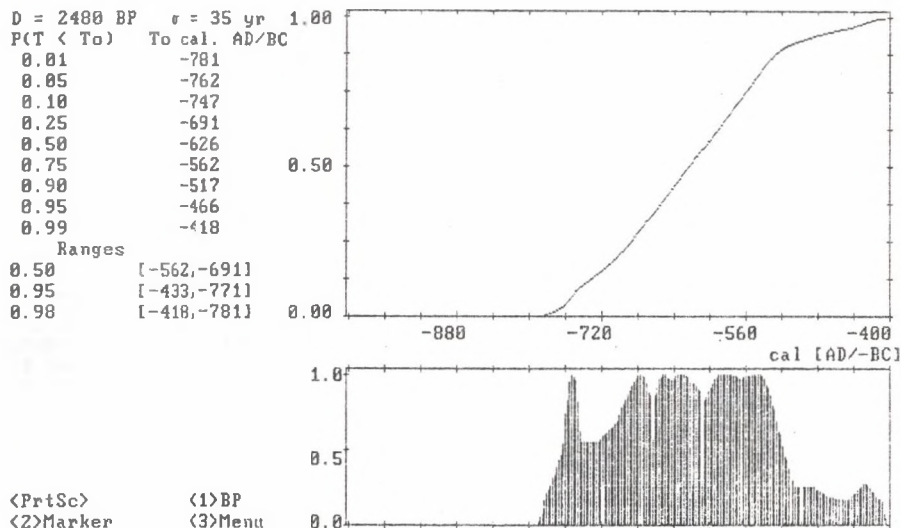


Rys. 6. Wyniki komputerowych obliczeń kalibracyjnych (część I) wykonanych według programu CALIBRATION dla daty radiowęglowej GrN-7457; 2480 ± 35 BP.

Fig. 6. Results of computer made calibration (part I) according to program CALIBRATION for ^{14}C date GrN-7457; 2480 ± 35 BP.

błędu tej wartości przedziały ufności odpowiadające poziomom ufności 50% (interkwartyle) oraz 95%. Pierwszy przedział ufności stanowi w tym przypadku odpowiednik granic pojedynczego błędu standardowego ($\pm 1\sigma$), zaś drugi jest odpowiednikiem granic podwojonego błędu standardowego ($\pm 2\sigma$). Posługiwanie się przedziałem ufności wyznaczonym na poziomie ufności 68%, będącym ścisłym analogiem granic pojedynczego błędu standardowego, stosowane w niektórych opisanych wyżej programach (S. W. Robinson, 1987; J. van der Plicht et al., 1988; B. Weninger, 1986) jest całkowicie nieuzasadnione. Pojęcie przedziału ufności 68% ma swój sens i przejrzystą interpretację jedynie w odniesieniu do rozkładu normalnego, a jak pokazano, rozkłady prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego rzadko przypominają kształt rozkładu normalnego.

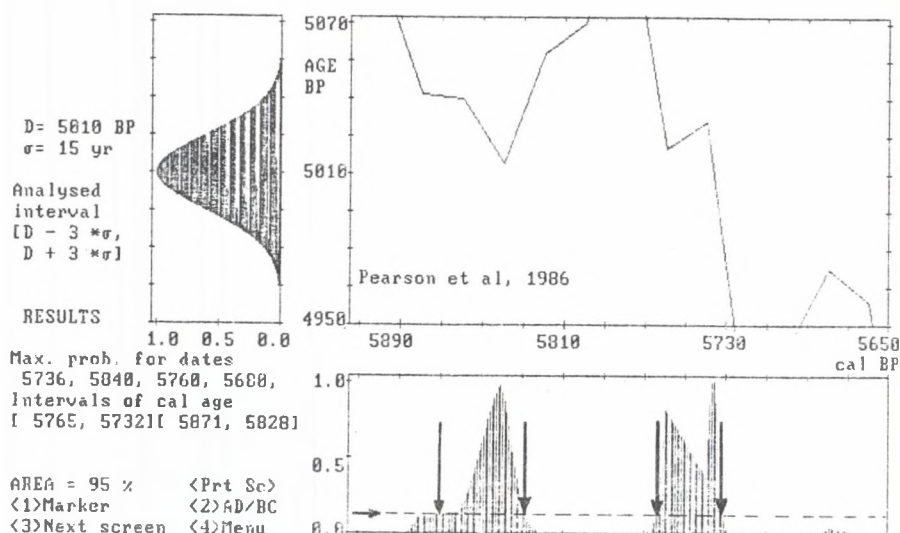
Istotne trudności interpretacyjne pojawiają się przy zastosowaniu programu kalibracyjnego do kalibracji dat radiowęglowych o wysokiej precyzji, tj. dat obarczonych błędami standardowymi wynoszącymi ok. 20 lat lub mniejszymi. Przykład obliczeń kalibracyjnych dla daty radiowęglowej 5010 ± 15 BP przedstawiono na Rys. 8 i 9, analogicznych do Rys. 6 i 7. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego określona jest w trzech rozłącznych przedziałach: [5670 BP, 5684 BP], [5729 BP, 5767 BP], [5822 BP, 5885 BP], przy czym na pierwszy z wymienionych przedziałów



Rys. 7. Wyniki komputerowych obliczeń kalibracyjnych (część II) wykonanych według programu CALIBRATION dla daty radiowęglowej GrN-7457; 2480 ±35 BP.

Fig. 7. Results of computer made calibration (part II) according to program CALIBRATION for ¹⁴C date GrN-7457; 2480 ± 35 BP.

przypadu niewielka część prawdopodobieństwa. Istotne znaczenie mają dwa pozostałe przedziały, o praktycznie równym rozdziale prawdopodobieństw, po ok. 50%, rozdzielone interwałem o długości 55 lat (a więc równym prawie czterokrotnej wartości błędu daty konwencjonalnej). Na rysunku 9 zaznaczono położenie mediany (pogrubiona linia pionowa) i interkwartyli (linie przerywane). Widoczny w dolnej części rysunku 8 kształt funkcji gęstości prawdopodobieństwa wyklucza opis wyniku obliczeń kalibracyjnych poprzez użycie estymatorów punktowych takich jak mediana i mody rozkładu. Wartość mediany (5825 BP), przypadająca w punkcie o^o prawie zerowym prawdopodobieństwie, jest nie do przyjęcia jako miara wieku kalobrowanego. Podobnie nie do przyjęcia są mody rozkładu podane na Rys.8, ze względu na to, że jedna z dwóch równoprawdopodobnych części funkcji gęstości prawdopodobieństwa jest dwumodalna. Również nie do przyjęcia jest estymacja przedziałowa w postaci przedziałów ufności 50% (interkwartyli) lub 95%. Przedział ufności 50% (wyznaczony położeniami interkwartyli, Rys. 9) o długości 94 lat, obejmuje wspomniany wyżej interwał o zerowym prawdopodobieństwie, liczący 55 lat (a więc blisko 60%). Najwłaściwszym wyjściem w tej sytuacji wydaje się przyjęcie do oceny wieku kalendarzowego estymacji przedziałowej, wynikającej z odrzucenia mało prawdopodobnych końcówek rozkładu prawdopodobieństwa. Program CALIBRATION umożliwia takie rozwiązanie przez wykorzystanie opcji <1> Marker. Wciśnięcie klawisza <1>

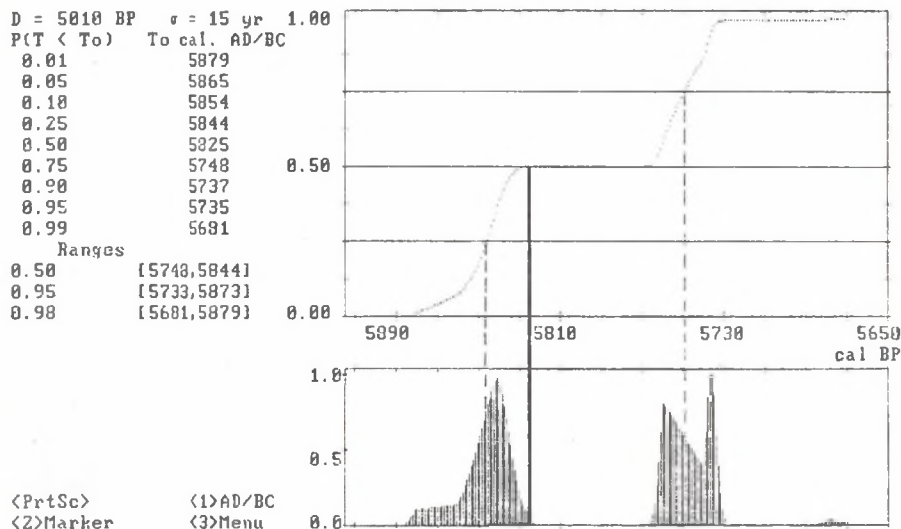


Rys. 8. Przykład wyników obliczeń przy kalibracji daty o wysokiej dokładności (Część I). Strzałka pozioma i linia przerywana wskazują poziom odcięcia mało znaczących części rozkładu prawdopodobieństwa. Strzałki pionowe wskazują granice otrzymanego obciętego rozkładu prawdopodobieństwa.

Fig. 8. Example of calibration of high-accuracy date (Part I). Horizontal arrow and dashed line show position of marker used to cut out the low-probability tails of the probability distribution of calendric age. Vertical arrows show limiting points of obtained truncated distribution.

powoduje pojawienie się znacznika w formie strzałki, który może poruszać się po osi pionowej wykresu funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Położenie znacznika wskazuje poziom obcięcia ogonów funkcji gęstości prawdopodobieństwa, zaś parametr AREA wskazuje pole pod pozostałą po ich odrzuceniu częścią wykresu. Na Rys. 8 linią przerywaną zaznaczono poziom odcięcia. Obcięty rozkład prawdopodobieństwa zawiera 95% całego prawdopodobieństwa i zawiera się w dwóch przedziałach podanych również na rysunku. Punkty obcięcia wskazano pionowymi strzałkami. Reasumując, wynik obliczeń kalibracyjnych w tym przypadku może być sformułowany jedynie w formie podania alternatywnej estymaty przedziałowej: z prawdopodobieństwem 95% wiek kalendarzowy datowanej próbki zawiera się w przedziale od 5870 BP do 5830 BP lub w przedziale od 5765 BP do 5730 BP.

Opcja kalibracji zbioru dat niezależnych może być realizowana w trzech różnych wersjach. Przykłady wyników, uzyskane dla grupy dat

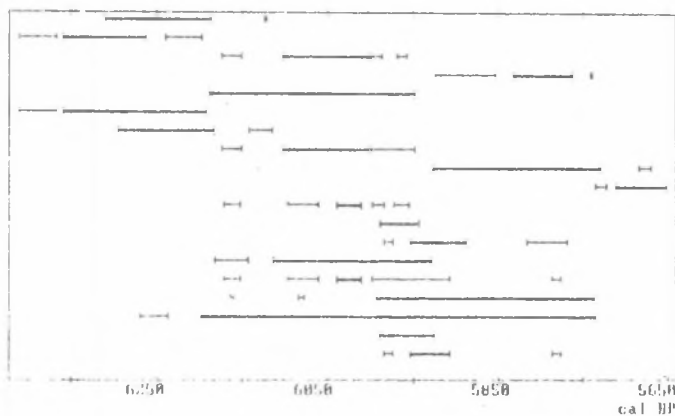


Rys. 9. Przykład wyników obliczeń przy kalibracji daty o wysokiej dokładności (Część II). Linie przerywane wskazują położenia kwartyli, linia pogrubiona wyznacza medianę rozkładu prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego.

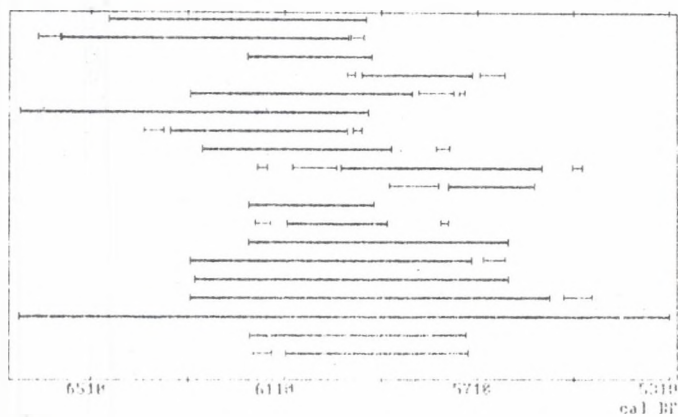
Fig. 9. Example of calibration of high-accuracy date (Part II). Dashed lines show locations of quartiles; bold line indicates location of median of the probability distribution of calendric age.

reprezentujących kultury okresu neolitu zachodnioeuropejskiego, określane nazwami Michelsberg II i Michelsberg III, przedstawia Rys. 10. Rysunki 10a i 10b przedstawiają wyniki obliczeń kalibracyjnych w wersji tzw. kalibracji odcinkowej, będącej analogią do prostej metody wyznaczania przedziałów wieku kalendarzowego na podstawie rzutowania odcinka $[D - k\sigma, D + k\sigma]$ z osi konwencjonalnych lat radiowęglowych na oś lat kalendarzowych, czyli wycinania odpowiednich fragmentów krzywej kalibracyjnej (por. Rys. 3). Obliczanie rozkładu prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego jest wykonywane dla każdej z analizowanych dat i jest wykorzystywane w formie oznaczenia najbardziej prawdopodobnego przedziału linia pogrubiona. Wersja ta ma ograniczone zastosowanie; uzyskiwany obraz w obu przedstawianych przypadkach (wycinanie przedziałów pojedynczego i potrójonego błędu) jest stosunkowo mało czytelny. Rysunek 10c przedstawia inną, bardziej złożoną matematycznie, a równocześnie prostszą do interpretacji, wersję prezentacji wyników obliczeń kalibracyjnych dla tego samego zestawu dat. Podawana na ekranie monitora informacja dla każdej z dat zawiera w istocie

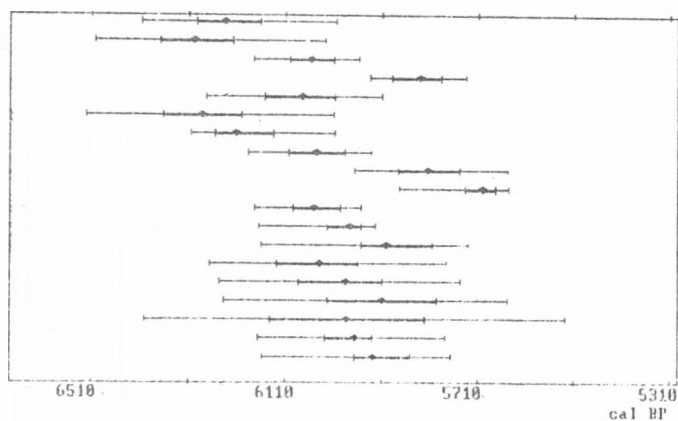
KNI-663
 KNI-664
 KNI-418
 KNI-419
 KNI-773
 KNI-574
 KNI-720
 KNI-722
 KNI-724
 GrN-6345
 KNI-306
 KNI-311
 BIn-54
 BIn-70
 BIn-71
 H-61/149
 H-125/107
 KNI-304
 KNI-305



KNI-663
 KNI-664
 KNI-418
 KNI-419
 KNI-773
 KNI-574
 KNI-720
 KNI-722
 KNI-724
 GrN-6345
 KNI-306
 KNI-311
 BIn-54
 BIn-70
 BIn-71
 H-61/149
 H-125/107
 KNI-304
 KNI-305



KNI-663
 KNI-664
 KNI-418
 KNI-419
 KNI-773
 KNI-574
 KNI-720
 KNI-722
 KNI-724
 GrN-6345
 KNI-306
 KNI-311
 BIn-54
 BIn-70
 BIn-71
 H-61/149
 H-125/107
 KNI-304
 KNI-305



bardzo uproszczony opis rozkładu prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego, przedstawiając położenie mediany (kropka) oraz przedziały ufności 50% (linia pogrubiona) i 95% (linia cienka). Dla celów szczegółowej analizy można uzyskać dokładne dane numeryczne w postaci tabelarycznej (po naciśnięciu klawisza 1 - opcja <1> Print report) wraz z wartościami wyjściowych dat konwencjonalnych. Przykład wydruku, po nieznacznej modyfikacji przedstawia Tabela 1. Możliwa jest również prezentacja wyników z podaniem na ekranie (i w tabeli raportu) tylko przedziałów ufności na poziomie 50%, tzn. interkwartyli.

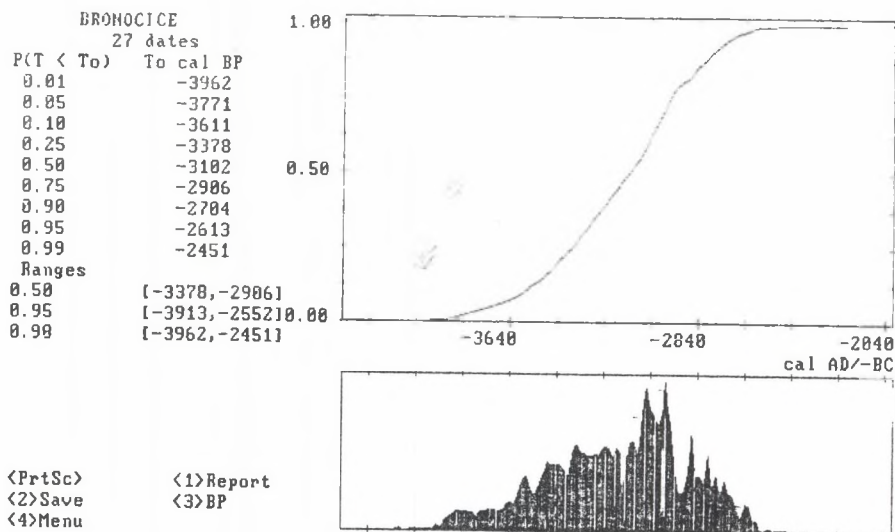
Tabela 1

Przykład wyników obliczeń kalibracyjnych dla zestawu dat radiowęglowych uzyskanych dla kultur neolitycznych Michelsberg II i III

| Nr | Symbol i nr lab. | Wiek ¹⁴ C Conv BP | Mediana Cal BC | Przedziały ufności Cal BC | |
|----|------------------|---------------------------------|-------------------|------------------------------|---------------|
| | | | | 50% | 95% |
| 1 | KNI-663 | 5440 ± 85 | -4283 | [-4341,-4211] | [-4455,-4054] |
| 2 | KNI-664 | 5490 ± 95 | -4345 | [-4417,-4266] | [-4549,-4076] |
| 3 | KNI-418 | 5270 ± 40 | -4106 | [-4148,-4058] | [-4223,-4005] |
| 4 | KNI-419 | 5080 ± 50 | -3878 | [-3938,-3836] | [-3983,-3784] |
| 5 | KNI-773 | 5280 ± 85 | -4123 | [-4202,-4055] | [-4321,-3958] |
| 6 | KNI-574 | 5480 ± 105 | -4331 | [-4410,-4249] | [-4567,-4057] |
| 7 | KNI-720 | 5400 ± 60 | -4260 | [-4304,-4183] | [-4352,-4056] |
| 8 | KNI-722 | 5250 ± 60 | -4095 | [-4151,-4035] | [-4235,-3981] |
| 9 | KNI-724 | 5050 ± 85 | -3863 | [-3925,-3797] | [-4015,-3697] |
| 10 | GrN-6345 | 4965 ± 40 | -3750 | [-3787,-3723] | [-3922,-3696] |
| 11 | KNI-306 | 5260 ± 40 | -4099 | [-4142,-4044] | [-4221,-4001] |
| 12 | KNI-311 | 5210 ± 40 | -4024 | [-4071,-4002] | [-4212,-3973] |
| 13 | Bln-54 | 5140 ± 80 | -3950 | [-4002,-3854] | [-4207,-3779] |
| 14 | Bln-70 | 5240 ± 100 | -4088 | [-4177,-4009] | [-4315,-3825] |
| 15 | Bln-71 | 5200 ± 100 | -4033 | [-4131,-3958] | [-4293,-3796] |
| 16 | H-61/149 | 5140 ± 130 | -3958 | [-4071,-3846] | [-4285,-3698] |
| 17 | H-125/107 | 5200 ± 200 | -4032 | [-4190,-3869] | [-4448,-3577] |
| 18 | KNI-304 | 5190 ± 60 | -4014 | [-4076,-3978] | [-4214,-3827] |
| 19 | KNI-305 | 5160 ± 60 | -3976 | [-4015,-3900] | [-4205,-3816] |

Rys. 10. Różne wersje prezentacji wyników obliczeń kalibracyjnych przy kalibracji zbioru dat niezależnych na przykładzie kultur neolitycznych Michelsberg II (część górna) i Michelsberg III (część dolna). A - kalibracja wycinkowa na poziomie ±1σ; B - kalibracja wycinkowa na poziomie ±3σ; C - uproszczony obraz rozkładów prawdopodobieństwa poszczególnych dat, pokazujący położenia median (kropki), interkwartyli (odcinki pogrubione), oraz przedziałów ufności 95% (odcinki cienkie).

Fig. 10. Available versions of presentation of a set of arbitrary dates. Figures show results obtained on set of dates of Neolithic cultures Michelsberg II (upper part) and Michelsberg III (lower part). A - results of cut-out calibration at level ±1σ; B - results of cut-out calibration at level ±3σ; C - simplified picture of probability distributions of individual dates, showing locations of median (dots), interquartiles (bold lines) and 95% confidence intervals (normal lines).



Rys. 11. Wyniki obliczeń kalibracyjnych w wersji kalibracji zbioru dat zależnych na przykładzie zestawu 27 dat ze stanowiska w Bronocicach.

Fig. 11. Calibration output in option of calibration of a set of related dates obtained with series of 27 dates from Bronocice site.

Możliwości interpretacyjne, uzyskiwane przy wykorzystaniu opcji kalibracji zbioru dat zależnych przedstawione są na przykładzie zbioru dat z wielofazowego stanowiska w Bronocicach. Wynik obliczeń w postaci złożonego rozkładu prawdopodobieństwa 27 dat radiowęglowych w skali kalendarzowej czasu przedstawia Rys. 11. Forma prezentacji wyników jest taka sama jak w przypadku drugiego ekranu przedstawiającego wyniki obliczeń kalibracyjnych pojedynczej daty (por. rysunki 7 i 9). Z zamieszczonego w dolnej części wykresu funkcji gęstości prawdopodobieństwa można odczytać, że przyjmuje ona istotnie różne od zera wartości od ok. 3950 BC, i spada do wartości bliskich zeru ok. 2550 BC. Posługując się bardziej miarodajnymi wartościami z tabeli interkwantyli, wyznaczającymi 95% przedział ufności dat kalendarzowych, można w zaokrągleniu ocenić czas użytkowania badanego stanowiska na okres od 3900 BC do 2550 BC, to znaczy 1350 lat. Wykres ten wykazuje również pewne charakterystyczne regularności, którym można przypisać interpretację wykraczającą poza ramy zagadnień kalibracyjnych. Zakładając, że próbki do datowań są odbiciem ilości węgla drzewnych o odpowiednim wieku, zaś z kolei ilość węgla pozostawianych na stanowisku jest funkcją aktywności gospodarczej zajmującej to stanowisko populacji, można dojść do sformułowania hipotezy, że wykres funkcji gęstości prawdopodobieństwa jest do pewnego stopnia odbiciem gęstości lub wielkości tej populacji. Opierając się wyłącznie na

kształcie funkcji gęstości prawdopodobieństwa z Rys. 11 wyróżnić można pięć faz (epizodów osadniczych) w rozwoju chronologicznym populacji zajmującej stanowisko w Bronocicach (M. F. Pazdur, D. J. Michczyńska, 1989, w druku): początkowy okres stabilnej populacji na niezbyt wysokim poziomie trwający ok. 300 lat (od 3950 do 3650 BC), okres systematycznego wzrostu populacji, trwający ok. 250 lat (od 3650 do 3400 BC), drugi okres stabilizacji na znacznie wyższym poziomie, trwający ok. 350 lat (od 3400 do 3050 BC), okres wybitnego wzrostu populacji od 3050 do 2900 BC, gwałtowne załamanie się populacji (między 2900 a 2850 BC) i następujący po nim stopniowy upadek osady (od 2850 do ok. 2550 BC).

PODSUMOWANIE

Opisany program kalibracji probabilistycznej dat radiowęglowych można uznać narzędzie umożliwiające wszechstronną obróbkę wyników datowań archeologicznych. W swej obecnej postaci umożliwia on realizację kilku podstawowych zadań, dostosowanych do wymogów badań archeologicznych. Mimo znacznego stopnia złożoności program wymaga dalszych uzupełnień i pewnych zmian, przy czym niektóre z nich muszą być poprzedzone szczegółowymi rozważaniami statystycznymi. Do podstawowych modyfikacji przewidywanych w przyszłej wersji programu kalibracyjnego zaliczyć należy:

- 1) uwzględnienie możliwości stosowania wygładzonej krzywej kalibracyjnej, o różnym stopniu wygładzenia, dobranym stosownie do rodzaju datowanego materiału (por. rozważania W. G. Mooka, 1983),
- 2) włączenie błędu krzywej kalibracyjnej do obliczeń rozkładu prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego,
- 3) uzupełnienie zbioru krzywych kalibracyjnych wykorzystywanych przez program o prowizoryczne na razie dane, wykraczające poza najdłuższą ze stosowanych obecnie krzywych (por. Rys. 1),
- 4) automatyczne wykonywanie obliczeń kalibracyjnych dla serii zbiorów dat zależnych i graficzną prezentację syntetycznych wyników, co powinno umożliwić zastosowanie programu do analiz wyników datowań radiowęglowych w skali regionalnej.

Obecnie trwają prace nad nową wersją programu "CALIBRATION" w języku TURBO PASCAL. Pozwoli to zwiększenie szybkości obliczeń oraz umożliwi wykonywanie obliczeń na komputerach typu IBM z różnymi kartami graficznymi.

PODZIĘKOWANIA

Pracę wykonano w programie CPBP 01.06.

LITERATURA

Aitchison T., Leese M., Michczyńska D. J., Otlet B., Ottaway B. S., Pazdur M. F., van der Plicht J., Reimer P. R., Scott M. S., Stuiver M., Warner R., Weninger B, 1988, A comparison of methods used for the calibration of radiocarbon dates; Radiocarbon, t. 31 (w druku).

- Arnold J. R., Libby W. F., 1949, Age determinations by radiocarbon content: checks with samples of known age; *Science*, t. 110, s. 678-680
- 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 Eight International Conference on Radiocarbon Dating*, Lower Hutt, New Zealand, Wellington, Royal Society of New Zealand. T. A. Rafter, T. Grant-Taylor (eds) s. 44-59.
- 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.
- Michczyńska D. J., Pazdur M. F., Walanus A., 1988, Bayesian approach to probabilistic calibration of radiocarbon dates; *PACT (w druku)*.
- Mook W. G., 1983, ^{14}C calibration and the time-width of ^{14}C samples; *PACT*, t. 8, s. 517-525.
- Mook W. G., 1986, Business Meeting. Recommendations/resolutions adopted by the Twelfth International Radiocarbon Conference; *Radiocarbon*, t. 28, Nr 2A, s. 799.
- Pazdur A., Pazdur M. F., 1982, Chronometria radiowęglowa jako metoda badawcza w archeologii; *Przegląd Archeologiczny*, t. 30, s. 5-45.
- Pazdur M. F., Michczyńska D. J., 1989, Improvements of the procedure for probabilistic calibration of radiocarbon dates; *Radiocarbon*, t. 31 (w druku).
- 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.
- Ralph E. K., Michael H. N., Han M. C., 1973, Radiocarbon dates and reality; *MASCA Newsletter*, t. 9, Nr 1, s. 1-20.
- Robinson S. W., 1985, A computational algorithm for calibration of radiocarbon dates; [w:] *The 12th International Radiocarbon Conference. Abstracts* (Gulliksen S., Nydal R., Eds), Tapir, Trondheim, s. 43.
- Robinson S. W., 1986, A computational procedure for utilization of high-precision radiocarbon curves. Open-File Report, USGS, Menlo Park.
- 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, AD 1950-500 BC, "Radiocarbon", t. 28, Nr 2B, s. 805-838.
- Stuiver M., Reimer P. J., 1986, A computer program for radiocarbon age calibration; *Radiocarbon*, t. 28, s. 1022-1030.

- Stuiver M., Suess H. E., 1966 On the relationship between radiocarbon dates and true ages; *Radiocarbon*, t. 8, s. 534-540.
- Suess H. E., 1967, Bristlecone pine calibration of the radiocarbon time scale from 4100 B.C. to 1500 B. C., [w:] IAEA Symp., s. 143-151.
- Suess H. E., 1970, Bristlecone pine calibration of the radiocarbon time scale 5200 BC to the present, [w:] Proceedings of the XII Nobel Symposium, Upsala 1970. Radiocarbon Variations and Absolute Chronology, I. U. Olsson (ed.), Stockholm, s. 303-311.
- Suess H. E., 1979, A calibration table for conventional radiocarbon dates, [w:] Radiocarbon Dating, Proc. 9th International Radiocarbon Conference, (Berger R., Suess H. E., eds), University of California Press, Berkeley/Los Angeles, s. 777-785.
- Switsur V. R., 1973, The radiocarbon calendar recalibrated; *Antiquity*, t. 47, s. 131-137.
- van der Plicht J., Mook W. G., Hasper H., 1987, An automatic calibration program for radiocarbon dating; [w:] Second International Symposium on Archaeology and ^{14}C , Groningen Sept 7-11, 1987. Programme and Abstracts, s. 38.
- Warner R. B., 1987, The cumulative probability curve: a tool of great potential; [w:] Second International Symposium on Archaeology and ^{14}C , Groningen Sept 7-11, 1987. Programme and Abstracts, s. 49.
- Weninger B., 1986, High-precision calibration of archeological radiocarbon dates; *Acta Interdisciplinaria Archeologica*, t. IV,

Wpłynęło do Redakcji: 28 kwietnia 1989 r.

PROBABILISTIC CALIBRATION OF RADIOCARBON DATES

Summary

Probabilistic calibration of radiocarbon dates consists of transformation of initial probability distribution of conventional radiocarbon date into calendric time scale according to specific shape of the calibration curve. Algorithm of the program CALIBRATION, developed by the authors, is based on the Bayes theorem. The program is written in Microsoft BASIC for IBM PC compatible microcomputer with Hercules graphic card. The program enables calibration of single dates and can be also applied to calibration of sets of arbitrary or related dates. The results are presented on screen of monitor in form of graphs including plots of probability density function and cumulative probability, and numerical data, including selected fundamental characteristics of the probability distribution of calendric age.

ВЕРОЯТНОСТНАЯ КАЛИБРОВКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАДИОУГЛЕРОДИНОГО ДАТИРОВАНИЯ

Резюме

Вероятностная калибровка результатов измерения радиоуглеродного возраста заключается в трансформации исходного распределения вероятностей

конвенционального радиоуглеродного возраста в соответствующее распределение вероятностей астрономического возраста с учётом сложной формы зависимости между конвенциональным радиоуглеродным возрастом и возрастом измеряемым в единицах астрономического времени. Программа CALIBRATION разработана авторами подготовлена на микрокомпьютер типа IBM PC с графической картой Геркулес. Алгоритм программы, написанной на языке BASIC использует теорему Баеса об условной вероятности. Программа пригодна для калибровки довольных составов радиоуглеродных датировок, связанных с собой или нет. Результаты вычислений представляют в графической форме и при помощи нумерических параметров, включающих самые важные характеристики полученного распределения вероятностей