

## WIEK RZECZYWISTY GRANIC CHRONOZON WYZNACZONYCH W LATACH RADIOWĘGLOWYCH

ADAM WALANUS, DOROTA NALEPKA

WALANUS A., NALEPKA D. Calendar age of boundaries arbitrarily determined in radiocarbon time scale.

Specific method of smoothing of radiocarbon calibration curve is proposed in order to recalculate (calibrate) boundaries of chronozones accepted by Mangerud et al. (1974). The method is designed for any arbitrarily accepted age horizons, which were originally given in radiocarbon (BP) time scale. Technically, the age of horizon, taken with large  $\pm 200$   $\sigma$ -value is calibrated in a standard way, and then the median is taken as a resulted value. The final value is rounded off because it is obtained from, originally "round" values, 2500 5000, 8000, 9000, and 10000 BP. Such a method ensures, that random samples taken from the surroundings of given time horizon will remain distributed in the same proportion, below and above the horizon, also after calibration. Resulting "calibration" of values given above is: 600, 3800, 6900, 8150, and 9600 BC.

*Adam Walanus, Instytut Archeologii, Uniwersytet Rzeszowski, ul. K. Hoffmanowej 8, 35-016 Rzeszów; e-mail: walanus@univ.rzeszow.pl*

*Dorota Nalepka, Instytut Botaniki, im W. Szafera, Polska Akademia Nauk, ul. Lubicz 46, 31-512 Kraków; e-mail: nalepka@ib-pan.krakow.pl*

### WSTĘP

W 1974 roku ukazała się fundamentalna praca Mangeruda i innych, w której określono granice holocenijskich i późnoglacialnych chronozon, a więc jednostek stratygraficznych zdefiniowanych przez czas. Chronozony nie są, zasadniczo wyznaczone przez, na przykład, zmiany roślinności, czy ogólnie klimatu, a osadzone są tylko w czasie. Charakterystyczne jest, że ich granice i wyrażają się równymi liczbami lat, tzn. łatwymi do zapamiętania liczbami mającymi jedną lub, co najwyżej dwie cyfry znaczące (Tab. 1). Chronozony są umownymi jednostkami czasu.

Oczywiście granice chronozon ustalone zostały tak, by uczynić je jak najbardziej przydatnymi i poręcznymi jednostkami dla paleobotaniki i paleogeografii. Granice postawione zostały tam, gdzie obserwowano wyraźniejsze zmiany warunków przyrodniczych. Jednak zmienność klimatu, i idąca za nim, z opóźnieniem, zmienność szaty roślinnej nie ma charakteru dość gwałtownego, by wystarczająco jednoznacznie umieścić w czasie moment zmiany.

Wyjątkiem jest stosunkowo szybka i radykalna zmiana, której w poniższej tabeli przyporządkowana jest „data” 10000 lat (patrz np. Kuc i in 1998). Przypadkiem jest, że ta najbardziej „równa” liczba odpowiada granicy najwyższego rzędu, między glacialem a interglacialem.

W latach 70. główną skalę czasu dawały datowania radiowęglowe. Kalibracja metody  $^{14}\text{C}$  była dopiero w fazie rozwojowej. Stąd chronozony zdefiniowane zostały wtedy w radiowęglowej skali czasu BP. Tak więc daty 2500 BP, 5000 BP itd. są umownymi, konwencjonalnymi granicami ułatwiającymi wymianę myśli i porównywanie wyników badań.

Tematem niniejszej pracy jest metoda przeliczania wieku arbitralnych granic tego typu jak granice chronozon. Ograniczono się do granic chronozon holocenijskich (tab. 1), gdyż precyzja radiowęglowej krzywej kalibracyjnej wyraźnie psuje się w okolicy 10000 BC.

Dokładność krzywej ma związek z dostępnością w strefie umiarkowanej drzew pozwalających na dendrochronologiczną kalibrację pomiarów  $^{14}\text{C}$ .

Dla obszaru Polski istnieją propozycje bardziej szczegółowych podziałów, nie w pełni zgodne z tabelą Mangeruda, które również wyrażone są w latach  $^{14}\text{C}$  (tab. 2).

### WIEK RADIOWĘGLOWY A WIEK RZECZYWISTY

Trzeba podkreślić, że liczby podane w tabeli 2, podobnie jak i te w tabeli 1, to tzw. wiek radiowęglowy, a nie zwykły wiek (astronomiczny, kalendarzowy). Metoda  $^{14}\text{C}$  pomiaru wieku szczątków organicznych powstała w połowie ubiegłego wieku (Arnold, Libby 1949) i, jak wiele innych metod, używana była zanim osiągnęła stadium dojrzałe. Obecnie ta metoda pomiarowa jest wykalibrowana i pozwala mierzyć wiek na zwykłej skali czasu, po prostu w latach AD/BC. Jednak kalibracja radiowęglowa ma dość złożony charakter i, co za tym idzie, skomplikowaną formę ma końcowy wynik pomiaru wieku. Wynikiem tym jest rozkład gęstości prawdopodobieństwa (wieku), który jednak nie wyraża się żadną elementarną funkcją matematyczną, a ma postać wykresu przypominającego widok pasma górskiego (typu alpejskiego). Otrzymany z kalibracji rozkład prawdopodobieństwa jest podstawą wyznaczenia przedziału zawierającego 95% prawdopodobieństwa (lub 68%). Taki przedział jest często uważany za końcowy wynik oznaczenia wieku próbki. Ze względu na złożoność kalibracji, laboratoria radiowęglowe dostarczają wynik pośredni, wyrażony w latach radiowęglowych BP (*before present*, czyli przed rokiem 1950 AD). Wiek radiowęglowy (BP) może być bezpośrednio porównywany z granicami omawianych chronozon. Tak więc, jeżeli próbka została wydatowana np. na 5100  $^{14}\text{C}$  BP, to należy do schyłku chronozony atlantyckiej. Jednak, ponieważ jest już dziś taka możliwość, odchodzi się od radiowęglowej skali czasu na rzecz jednego czasu, który nazywać można astronomicznym, kalendarzowym, fizycznym, rzeczywistym, czy, po prostu czasem. Podobnie, by nie mnożyć zbędnych bytów, wydaje się, że pozostać można przy definicji zera osi czasu, wyrażającej się w symbolach AD/BC.

### LITERATUROWE PRZYKŁADY TŁUMACZENIA CHRONOZON NA SKALĘ WIEKU RZECZYWISTEGO

W *Encyklopedii historycznej świata* (Kozłowski 1999) znaleźć można, na stronie 26 tabelę zawierającą przełożenie granic chronozon, czyli pojedynczych liczb, na przedziały liczbowe (tab. 3), co wynika z tego, że zależność wieku rzeczywistego od radiowęglowego, w niektórych okresach, jest wieloznaczna (patrz np. Walanus, Goslar 2004). Jednak analogia z kalibracją daty radiowęglowej nie jest tu zbyt odpowiednia, gdyż data konwencjonalna (wynik pomiaru koncentracji  $^{14}\text{C}$  w próbce) ze swej natury jest przedziałem (i to rozmytym, zgodnie z krzywą Gaussa). Tymczasem granice chronozon mają absolutną precyzję, gdyż nie są wynikiem pomiarów, a są przyjęte arbitralnie. Owszem, granice te zostały postawione tak, a nie inaczej po analizie wielu dat radiowęglowych, jednak ich konkretna wartość to nie średnia z wielu dat, a arbitralna wartość uznana na zasadzie konwencji. Tak więc zapisywanie np. wieku 2500 BP jako przedziału: 728-467 BC, jest skutkiem nieuniknionej, nieprzyjemnej cechy krzywej kalibracyjnej  $^{14}\text{C}$ . Jednak, ze względu na konwencjonalny charakter chronozon, można zaproponować inne podejście, pozwalające przetłumaczyć np. 2500 BP również na jedną tylko liczbę lat BC.

W *Wielkiej Historii Polski* (Kaczanowski, Kozłowski 1998) na stronie 44, widnieje osł liczbowa czasu rzeczywistego, wyrażonego w latach AD/BC. Są tam również zaznaczone chronozony. Choć nie jest to tabela, to z wykresu oczywiście można odczytać, jaki wiek AD/BC przypisują autorzy granicom chronozon (tab. 4).

Należy podkreślić, że wartości z prawej kolumny tabeli 4 odczytane zostały z rysunku z maksymalną dokładnością, na jaką pozwala jakość druku. Zapewne nie byłoby intencją autorów rysunku by wartości te podawać liczbowo z tak dużą dokładnością (do 10 lat).

#### **METODA PRZELICZANIA GRANIC CHRONOZON LUB INNYCH ARBITRALNYCH GRANIC WYRAŻONYCH W LATACH RADIOWĘGLOWYCH (BP) NA WIEK RZECZYWISTY (AD/BC)**

Rysunek 1 przypomina typowy, graficzny zapis procedury kalibracji daty radiowęglowej. Jednak podkreślić trzeba, iż zgodnie z tematem tej pracy nie chodzi tu o kalibrowanie wyników pomiarów wieku, a granic arbitralnych. Wynik pomiaru radiowęglowego, np.  $2340 \pm 50$  BP charakteryzuje się nieodłączną, większą lub mniejszą niedokładnością. Niedokładność ta wyraża się poprzez błąd pomiarowy (np.  $\pm 50$  lat). Patrząc na krzywą Gaussa (ryc. 1), umieszczoną na osi wieku  $^{14}\text{C}$ , zorientować się można, że data 5000 BP ma duży błąd; wynosi on  $\pm 200$  lat. Jednak sens szerokości krzywej, wyrażającej się tu liczbą 200 lat jest inny, niż w przypadku standardowej daty radiowęglowej, co wymaga podkreślenia i dalszego wyjaśnienia, gdyż zawarte jest tu metodyczne uzasadnienie proponowanej metody.

Błąd pomiarowy daty radiowęglowej (niekalibrowanej) ma sens probabilistyczny. Zgodnie z rozkładem normalnym (Gaussa) prawdopodobieństwo, że prawdziwa wartość wieku radiowęglowego próbki leży w przedziale  $\pm 50$  (dla przykładowej daty  $2340 \pm 50$  BP) wokół wartości 2340 BP, wynosi 68%. Jeżeli podwoić szerokość przedziału, to prawdopodobieństwo wzrośnie do 95%. Sens liczby  $\pm 200$  lat ( $\sigma$ ), z wykresu na ryc. 1 jest inny. Otóż chodzi tu o zakres uśrednienia krzywej kalibracyjnej. Nierówności krzywej kalibracyjnej wygładzić można rysując wzdłuż niej prostą (patrz rysunek). Procedurę taką nazywa się aproksymacją i jest wiele sposobów na jej przeprowadzenie. Najprostszy, niezbyt obiektywny, polega na przyłożeniu do wykresu linijki i narysowaniu kreski leżącej jak najbliżej krzywej. Linia aproksymująca krzywą kalibracyjną na powyższym rysunku została narysowana w taki właśnie sposób (linijką wirtualną). Linia ta nie ma znaczenia obliczeniowego, a jedynie ilustracyjne. Ponieważ mowa tu o chronozonach, a czas trwania rozpatrywanych chronozon wynosi co najmniej 1000 lat, to przedział 200 lat zajmuje co najwyżej 1/5 chronozony. Tak więc zapis  $5000 \pm 200$  BP oznacza tu, że krzywa kalibracyjna uśredniana ma być w zakresie ok. 200 lat, po obu stronach granicy chronozon. Nie ma więc obawy, że zakres uśredniania obejmie następną chronozonę, nawet biorąc pod uwagę, że krzywa Gaussa nie kończy się na  $\pm \sigma$  (choć przekroczenie następnej granicy nie byłoby żadną nieprawidłowością). Z drugiej strony, 200 lat wystarcza do uśrednienia załamań (tzw. *wiggles*, patrz np. Walanus, Goslar 2004) krzywej kalibracyjnej. Przyjęta wartość 200 lat jest dość dowolna, jednak końcowy wynik nie zależy za bardzo od tego czy wziąć 100, 200, czy 300 lat, co widać w tabeli 5. Proponowana zasada przeliczania umownych granic chronozon, z lat radiowęglowych BP, na wiek rzeczywisty AD/BC, jest następująca. Rozkład prawdopodobieństwa wieku radiowęglowego  $5000 \pm 200$  BP (krzywa Gaussa na ryc. 1) podzielony jest datą 5000 BP na połowy, tak więc, analogicznie należy znaleźć miejsce podziału na połowy rozkładu prawdopodobieństwa wieku rzeczywistego. Ten wiek będzie wartością wyrażoną w latach BC, wieku granicy, którą zdefiniowano jako 5000 BP. Wartość (wieku), która dzieli rozkład prawdopodobieństwa na połowy nazywa się medianą. Z prawdopodobieństwem 1/2 wiek może być młodszy od mediany i z takim samym prawdopodobieństwem może być starszy. W tym wypadku mediana wynosi ok. 3800 BC. Proponowana zasada przeliczania zapewnia następującą własność nowych granic (np. granicy 3800 BC). Jeżeli wziąć większą liczbę dat radiowęglowych z okolicy 5000 BP, to po klasycznym ich przekalibrowaniu proporcje „masy” prawdopodobieństwa, powyżej i poniżej granicy nie zmieniają się. Jeżeli na przykład szereg dat z hipotetycznej osady, po nałożeniu krzywych Gaussa na siebie, dał krzywą, której mediana przypada akurat na 5000 BP, to po

wykalibrowaniu tych dat i nałożeniu na siebie rozkładów z kalibracji, również ten sumaryczny rozkład wskazywał będzie, że osada istniała „dokładnie” na przełomie chronozon. Chronozony (Mangerud i in. 1974) zostały zdefiniowane za pomocą równych, „okrągłych” liczb, typu 5000, 8000, a nie np. 5678. Po przeliczeniu takich granic za pomocą zaproponowanej metody nie otrzymuje się oczywiście, analogicznie równych liczb. Jest to pewna wada metody. Ponieważ granice chronozon traktować trzeba jako dokładne, tak i dokładnie (z dokładnością do roku) odczytać należałoby medianę rozkładu po kalibracji „daty”  $5000 \pm 200$  BP. Jest to możliwe, jednak nie ma sensu, co najmniej z powodu dowolności przyjęcia „błędu”  $\pm 200$ . Jak już wspomniano wartość ta nie ma wielkiego wpływu na wynik, ale otrzymywane wartości nie będą identyczne z dokładnością do lat. Poza tym krzywa kalibracyjna ma ograniczoną dokładność, rzędu 10-20 lat. Tak więc otrzymane, przeliczone wartości granic należy zaokrąglić. Stopień zaokrąglenia pozostaje subiektywny. W tabeli,5 być może liczbę 8150 BC należałoby silniej zaokrąglić, do 8200 BC.

Program kalibracyjny *OxCal* nie oblicza mediany. Nie jest to przypadkowy brak w programie. Dat  $^{14}\text{C}$  nie należy przeliczać, kalibrować na jedną wartość, gdyż byłoby to mylące, jako że rozkład prawdopodobieństwa wieku po kalibracji bynajmniej nie jest już symetryczny jak krzywa Gaussa. Ponadto, zapominanie o zawsze istniejącym w pomiarach błędzie pomiarowym, owocującym w koniecznym rozrzucie możliwych rzeczywistych wartości wieku jest błędem, do którego nie należy nakłaniać. Wynik pomiaru wieku metodą  $^{14}\text{C}$  (końcowy wynik, po kalibracji) należy widzieć jako przedział, najlepiej odpowiadający prawdopodobieństwu 95% zawierania prawdziwego wieku.

Tabela 2 zawiera również inne, mniej lub bardziej arbitralne granice podane w latach radiowęglowych BP. Oczywiście można by je przeliczyć na wiek rzeczywisty za pomocą zaproponowanej metody. Powstać jednak mogłoby wtedy pytanie, czy nie należy przeliczyć wszystkich wieków  $^{14}\text{C}$ , na przykład z krokiem co 100 lat, gdyż taka jest dokładność liczb we wspomnianej tabeli. Sprowadzałoby się to do pewnego rodzaju „wygładzenia” krzywej kalibracyjnej, co nie byłoby w pełni poprawne. Procedura dotycząca tylko pięciu, konkretnych wieków może być wykonana indywidualnie, pod kontrolą.

Przeliczenie granic chronozon wyrażonych w latach radiowęglowych BP, na wiek rzeczywisty, w latach BC, podane w dwóch pierwszych kolumnach tabeli 5 jest pewną propozycją. Propozycja ta zapewnia minimum fałszywych klasyfikacji przypadkowych próbek o wieku z okolicy granic chronozon. Oznacza to, że próbka przed kalibracją należąca do danej chronozony, pozostanie w niej po kalibracji (po kalibracji wieku próbki i po użyciu jako granicy chronozony liczby z drugiej kolumny proponowanej tabeli). Oczywiście granice chronozon wartość swą zawdzięczają dość powszechnej akceptacji, która staje się obowiązującą konwencją. Przeliczone w powyższej tabeli wartości nie są rewolucyjne, dobrym przykładem może być przeliczenie granicy okresów Atlantycki/Subborealny 5000 BP na 3800 BC, co doskonale zgadza się z cytowanym (za Olsson 1972) w pracy Mangeruda i in. (1974), ocenianym, możliwym zakresem 3600 - 4000 BC. Istotą niniejszej pracy jest raczej próba obiektywizacji metody przeliczania wieku arbitralnych granic niż same liczbowe wartości ich wieku.

#### LITERATURA

- ARNOLD J.R., LIBBY W.F. 1949. Age determinations by radiocarbon content: Checks with samples of known age. *Science* 110.
- BRONK RAMSEY C. 2001. Development of the radiocarbon program OxCal. *Radiocarbon* 43(2A): 355-363.
- KOZŁOWSKI J. K., KACZANOWSKI P. 1998. Najdawniejsze dzieje ziem polskich (do VII w.) Wielka Historia Polski. t. 1. Fogra Oficyna Wydawnicza, Kraków.

- KOZŁOWSKI J.K. 1999. Encyklopedia historyczna świata. 1. Prahistoria. Agencja Publicystyczno-Wydawnicza Opres. Kraków.
- KUC T., RÓŻAŃSKI K., DULIŃSKI M. 1998. Isotopic indicators of the Late-Glacial/Holocene transition recorded in the sediment of Lake Gościąg. W: Ralska-Jasiewiczowa M., Goslar T., Madeyska T., Starlek L. (red.). Lake Gościąg, Central Poland. A monographic study. Part 1, W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków, ss 158-162.
- MANGERUD J., ANDERSEN S.T., BERGLUND B.E., DONNER J. 1974. Quaternary stratigraphy of Norden, a proposal for terminology and classification. *Boreas* **3**: 109-126.
- OLSSON I. U. 1972. The pretreatment of samples and the interpretation of the results of  $^{14}\text{C}$  determinations. *Acta Univ. Oulu* **A3**: 9-37.
- RALSKA-JASIEWICZOWA M., GOSLAR T., MADEYSKA T., STARKEL L. (red.). 1998. Lake Gościąg, Central Poland. A monographic study. Part 1. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków.
- STARKEL L. (red.) 1991. Geografia Polski. Środowisko przyrodnicze. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- STUIVER M., REIMER P. J., BARD E., BECK J. W., BURR G. S., HUGHEN K. A., KROMER B., MCCORMAC F. G., V. D. PLICHT J., SPURK M. 1998. INTCAL98 Radiocarbon Age Calibration, 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon* **40**: 1041-1083.
- WALANUS A., GOSLAR T. 2004. Wyznaczanie wieku metodą  $^{14}\text{C}$  dla archeologów. Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego, Rzeszów.
- Walanus A., Nalepka D.

#### Spis Tabel

**Tabela 1.** Wiek granic holocenijskich chronozon, zaproponowany przez Mangeruda i in. (1974).

**Table 1.** The age of the limits of holocene chronozones, according to Mangerud et al. (1974).

**Tabela 2.** Wiek granic holocenijskich chronozon w ujęciu Starkla (1977).

**Table 2.** The holocene subdivision, according to Starkel (1977).

**Tabela 3.** Wiek rzeczywisty odpowiednich granic chronozon odczytany z tabeli na rycinie 11 w „Ewolucja klimatu u schyłku epoki lodowej i w holocenie” (Kozłowski 1999).

**Table 3.** Calendar age of chronozone boundaries, according to the table in the figure 11 in “Ewolucja klimatu u schyłku epoki lodowej i w holocenie” (Kozłowski 1999).

**Tabela 4.** Wiek rzeczywisty odpowiednich granic chronozon odczytany z wykresu w tablicy III, „Chronologia epoki brązu” (Kaczanowski, Kozłowski 1998).

**Table 4.** Calendar age of chronozones boundaries, according to the plot in table III, in “Chronologia epoki brązu” (Kaczanowski, Kozłowski 1998).

**Tabela 5.** Przeliczenie granic chronozon wyrażonych w latach radiowęglowych (BP) na wiek rzeczywisty (AD/BC). W kolumnie oznaczonej BC podano wartość zaokrągloną – proponowaną jako nowa konwencja. Podano też dokładne wartości median dla różnych wartości  $\sigma$ . Kalibrację wykonano za pomocą programu *OxCal*, wg krzywej kalibracyjnej *INTCAL98* (Stuiver i in. 1998).

**Table 5.** Results of recalculation of chronozone boundaries (given in BP) to the calendar age (BC). The final values (BC) are rounded off in similar way, but not so deeply, as in case of original, BP values. Precise ages for medians obtained for different  $\sigma$ 's are given, to indicate that the result does not depend strongly on  $\sigma$  value.

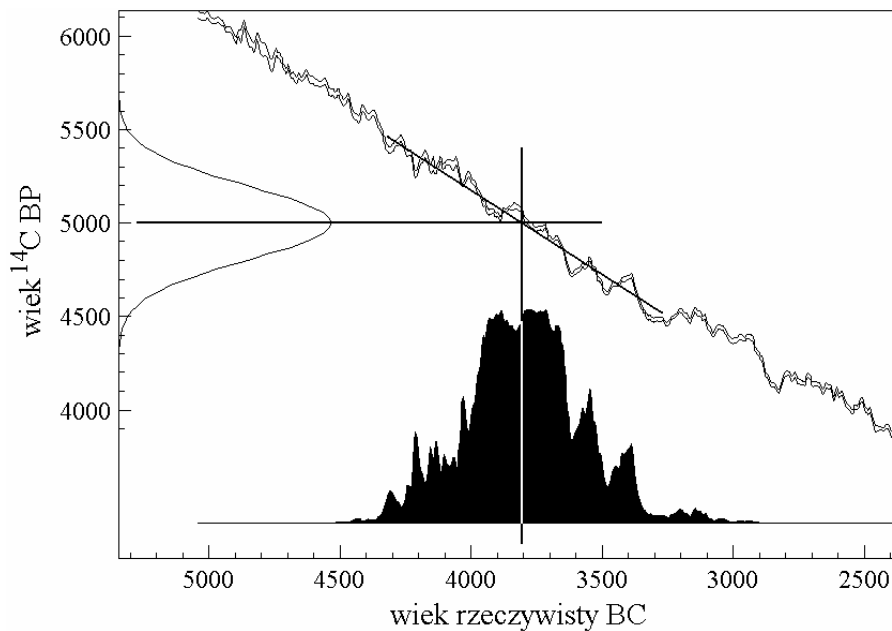
## Spis Rycin

**Ryc. 1.** Schemat postępowania przy przeliczaniu arbitralnej granicy 5000 BP na wiek rzeczywisty. Wykres pochodzi z programu *OxCal* (Bronk Ramsey 2001), otrzymany jest tak, jak gdyby kalibrowano datę  $5000 \pm 200$  BP. Wynikiem jest mediana, która wypada w punkcie 3800 BC.

**Fig. 1.** Graphical illustration of recalculation of arbitrarily determined boundary 5000 BP to the calendar age. The graph is obtained in program *OxCal* (), by typical calibration procedure, applied to the “date”  $5000 \pm 200$  BP. The final result (3800 BC) is obtained as a median of resulting probability distribution.

Walanus A., Nalepka D.

**Ryc. 1.**



**Tabela 1.**

| Chronozony<br>Chronozones | Granice w latach $^{14}\text{C}$ BP<br>Boundries in conv. radiocarbon years BP |
|---------------------------|--|
| Subatlantycka             | 2500   |
| Subborealna               | 5000   |
| Atlantycka                | 8000   |
| Borealna                  | 9000   |
| Preborealna               | 10000  |
| Młodszy Dryas             |  |



**Table 4.**

| Wiek <sup>14</sup> C BP chronozon wg Mangerud i in. (1974)<br>Age <sup>14</sup> C BP for chronozones (Mangerud et al. 1974) | Wiek BC wg Kozłowski, Kaczanowski (1998)<br>Cal. Age BC (Kozłowski, Kaczanowski 1998) |
|---|---|
| 2500  | 500   |
| 5000  | 3900  |
| 8000  | 7070  |
| 9000  | 8030  |
| 10000   | 9330  |

**Tabela 5.**

| Chronozony<br>Chronozones | Wiek <sup>14</sup> C BP<br>Age <sup>14</sup> C BP | Wiek rzeczywisty BC<br>Calendar years BC | BC<br>$\sigma=200$ | BC<br>$\sigma=300$ | BC<br>$\sigma=100$ |
|---------------------------|---|--|--------------------|--------------------|--------------------|
| Subatlantyk               | <b>2500</b>                                       | <b>600</b>                               | 603                | 603                | 612                |
| Subboreał                 | <b>5000</b>                                       | <b>3800</b>                              | 3795               | 3984               | 3796               |
| Atlantyk                  | <b>8000</b>                                       | <b>6900</b>                              | 6928               | 6940               | 6906               |
| Boreał                    | <b>9000</b>                                       | <b>8150</b>                              | 8137               | 8160               | 8150               |
| Preboreał                 | <b>10000</b>                                      | <b>9600</b>                              | 9633               | 9667               | 9545               |
| Młodszy Dryas             |   |  |                    |                    |                    |