

## ZNACZENIE KALIBRACJI RADIOWĘGLOWEJ SKALI CZASU DLA CHRONOSTRATYGRAFII PÓŹNEGO VISTULIANU

### The importance of radiocarbon timescale calibration for Late Vistulian chronostratigraphy

ADAM MICHCZYŃSKI<sup>1</sup> , DANUTA J. MICHCZYŃSKA<sup>1\*</sup> 

**Zarys treści.** Chronologie tworzone dla stanowisk późnego vistulianu są oparte przede wszystkim na wynikach oznaczeń wieku radiowęglowego. Wynika stąd konieczność, aby użytkownicy dat radiowęglowych zdawali sobie sprawę ze znaczenia krzywych kalibracyjnych wykorzystywanych w procesie kalibracji i potrafili stosować je w sposób prawidłowy. W artykule podano podstawowe informacje dotyczące radiowęglowych krzywych kalibracyjnych oraz danych wykorzystywanych do ich stworzenia. Przedstawione zostały przykłady kalibracji dat z okresu późnego vistulianu z użyciem najnowszej (IntCal20) i poprzedniej (IntCal13) krzywej kalibracyjnej oraz omówione występujące różnice. W sposób jednoznaczny pokazano konieczność weryfikacji wyników w skali lat kalendarzowych uzyskanych z użyciem poprzednich wersji krzywej kalibracyjnej.

**Słowa kluczowe:** datowanie radiowęglowe, probabilistyczna kalibracja dat radiowęglowych, krzywe kalibracyjne, IntCal20

**Abstract.** Chronologies created for Late Vistulian sites are based primarily on the results of radiocarbon age determinations. It follows that users of radiocarbon dates must realize the importance of the calibration curves used in the calibration process and be able to apply them correctly. The article gives basic information about radiocarbon calibration curves and the data used to create them. Examples of calibration of dates from the Late Vistulian period using the latest (IntCal20) and previous (IntCal13) calibration curve are presented and the differences that occur are discussed. The necessity of verifying results on the scale of calendar years obtained using previous versions of the calibration curve is clearly shown.

**Key words:** radiocarbon dating, probabilistic calibration of radiocarbon dates, calibration curves, IntCal20

### Wstęp

Chronologie zmian środowiska późnego vistulianu są tworzone przede wszystkim na podstawie wyników datowania radiowęglowego i luminescencyjnego, przy czym daty radiowęglowe zapewniają wyższą precyzję i stąd ich kluczowe znaczenie dla ostatnich 55 tysięcy lat,

tn. zasięgu metody <sup>14</sup>C. Czytelników zainteresowanych aktualnymi informacjami dotyczącymi metody radiowęglowej odsyłamy do publikacji Hajdas i in. (2021). Z punktu widzenia użytkownika dat radiowęglowych kluczowe znaczenie ma fakt, że koncentracja izotopu <sup>14</sup>C w atmosferze i biosferze w przeszłości nie była stała. Zmiany te, zidentyfikowane po raz pierwszy przez de Vries'a w 1958 roku dla okresu

---

<sup>1</sup> Politechnika Śląska, Instytut Fizyki – Centrum Naukowo-Dydaktyczne, Zakład Geochronologii i Badań Izotopowych Środowiska, ul. S. Konarskiego 22B, 44-100 Gliwice; e-mail: adam.michczyński@polsl.pl, ORCID: 0000-0003-2795-6830; danuta.michczyńska@polsl.pl, ORCID: 0000-0001-5348-5791

\* autor korespondujący

Minimum Maundera (de Vries 1958), są przyczyną tego, że konwencjonalny wiek radiowęglowy jest jedynie specyficznym rodzajem zapisu zmierzonej koncentracji izotopu  $^{14}\text{C}$  w badanej próbce. Dlatego „surowe” daty radiowęglowe nie mogą dostarczać chronologii bezwzględnych, czy informacji o tempie akumulacji osadów i wymagają przekonwertowania na skalę kalendarzową. Służą do tego celu krzywe kalibracyjne, które są opracowywane już od lat 60. XX wieku. Stopniowo wydłużał się przedział czasu, dla którego zostały opracowane i ich precyzja, przy czym pierwsze krzywe kalibracyjne uznane za krzywe wysokiej precyzji zostały opublikowane w 1986 roku (Pearson, Stuiver 1986; Stuiver, Pearson 1986).

Bieżące opracowanie dotyczy tylko półkuli północnej i danych atmosferycznych. Problematyka wyboru krzywej atmosferycznej dla konkretnej lokalizacji na Ziemi została omówiona np. przez Marsha i in. (2018). Z kolei Cook i in. (2015) omówili problem wyboru krzywej kalibracyjnej dla próbek morskich i mieszanych lądowo-morskich.

## Podstawowe informacje o tworzeniu krzywych kalibracyjnych

Do stworzenia krzywej kalibracyjnej potrzebne są pomiary koncentracji izotopu  $^{14}\text{C}$  w próbkach, których wiek kalendarzowy został określony metodą inną niż radiowęglowa. Największą rozdzielczością cechują się sekwencje rocznych przyrostów drzew, datowane bezwzględnie metodą dendrochronologiczną. Do konstrukcji krzywych kalibracyjnych wykorzystuje się również: pływające skały dendrochronologiczne, warwowe osady jeziorne, osady morskie, nacieki i koralce.

Rozwój technik pomiarowych, nowe zbiory danych, nowe podejście statystyczne do łączenia niezależnych zbiorów danych, są przyczyną tego, że co kilka lat jest publikowana nowa wersja krzywej kalibracyjnej. Szczegółowe informacje o ewolucji radiowęglowych krzywych kalibracyjnych można znaleźć w artykule Reimer (2022).

Użytkownicy dat radiowęglowych oczekują jak najdokładniejszych krzywych kalibracyjnych. Pierwsze krzywe kalibracyjne wysokiej precyzji zostały opracowane na podstawie pomiarów  $^{14}\text{C}$  w słojach rocznych przyrostów den-

drochronologicznie datowanego drewna (Pearson, Stuiver 1986; Stuiver, Pearson 1986), wykonanych techniką konwencjonalną, tzn. gazowych liczników proporcjonalnych (angielski skrót *GPC* od *gas proportional counting* lub *gas proportional counter*) w laboratorium w Seattle i ciekłoscyntylacyjną (angielski skrót *LSC* od *liquid scintillation counting* lub *liquid scintillation counter*) w laboratorium w Belfaście. W pomiarach wykorzystano drewno pochodzące z wybrzeża Pacyfiku Ameryki Północnej (daglezja i sekwoja) oraz dębów irlandzkich i niemieckich. Stworzenie krzywej kalibracyjnej wymagało zbadania powtarzalności pomiarów w ramach danego laboratorium, systematycznej różnicy między laboratoriami przy pomiarach tych samych próbek oraz ewentualnych różnic pomiędzy pomiarami dla drewna z Ameryki Północnej i Europy. Próbkami obejmowały 20 lub 10 słoików rocznych przyrostów. Wieki  $^{14}\text{C}$  próbek drewna o tym samym wieku kalendarzowym z Europy (Irlandii i południa Niemiec) oraz północno-zachodniej Ameryki różniły się zaledwie o kilka lat. Również systematyczna różnica w wynikach pomiarów między dwoma laboratoriami badana na podstawie pomiarów zduplikowanych próbek dębów irlandzkich, została określona na co najwyżej kilka lat. Takie rezultaty porównań potwierdziły wcześniejsze badania, z których wynikało, że wyniki pomiarów koncentracji izotopu  $^{14}\text{C}$  w próbkach drewna o tym samym wieku, pochodzącego z różnych lokalizacji na półkuli północnej, są ze sobą zgodne (np. Lerman i in. 1970).

Lata 80. XX wieku przyniosły rewolucję w metodzie datowania radiowęglowego poprzez wprowadzenie nowej techniki pomiarowej – akceleratorowej spektrometrii mas (angielski skrót *AMS* od *accelerator mass spectrometry*). Dzięki tej technice wymagane masy próbek zmniejszyły się co najmniej 1000-krotnie, a precyzja pomiarów zwiększyła się. Tym samym, badacze zaangażowani w tworzenie krzywych kalibracyjnych otrzymali doskonałe narzędzie do coraz dokładniejszych pomiarów.

Aby zaznaczyć, że opracowywane krzywe kalibracyjne mają międzynarodowy charakter, tzn. powstają jako wynik współpracy międzynarodowej i są akceptowane międzynarodowo, uzyskały one w 1993 roku przedrostek „IntCal”, po którym podawane są dwie ostatnie cyfry roku, w którym opublikowana została krzywa. Od 2001 roku krzywe kalibracyjne są opracowywane przez międzynarodowy zespół *The Int-*

*Cal Working Group* (IWG) na podstawie różnych, datowanych radiowęglowo, archiwów posiadających niezależną skalę wieku.

## Probabilistyczna kalibracja dat radiowęglowych

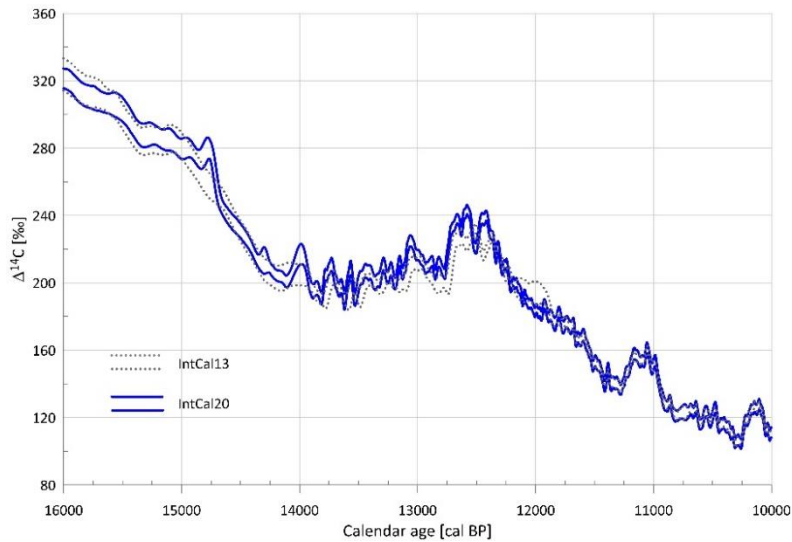
Od końca lat 80. XX wieku do kalibracji dat radiowęglowych wykorzystywane są specjalistyczne programy komputerowe (Aitchison i in. 1989), a sama procedura jest nazywana kalibracją probabilistyczną. Obecnie najpowszechniej używane programy to CALIB (Stuiver, Reimer 1993) oraz OxCal (Bronk Ramsey 2009). Programy te działają na podstawie twierdzenia Bayesa (Pazdur, Michczyńska 1989; Michczyńska i in. 1990). Każdy program kalibracyjny korzysta z krzywych kalibracyjnych, które uzyskały akceptację międzynarodowego środowiska.

## Krzywa kalibracyjna IntCal20

W 2020 roku opublikowane zostały aktualizacje krzywych kalibracyjnych dla północnej i południowej półkuli, jak również dla powierzchniowej warstwy oceanu. Najnowsza wersja krzywej kalibracyjnej dla półkuli północnej – IntCal20 (Reimer i in. 2020) rozciąga się wstecz do 55 000 cal BP. Przy jej tworzeniu wykorzystano wiele nowych danych o rozdzielczości jednego roku, jak również zweryfikowano dane użyte przy opracowywaniu poprzednich wersji krzywej kalibracyjnej (w tym odrzucono część zestawów). Zwiększył się także obszar, z którego pochodzą wykorzystane dane. Do około 13 900 cal BP krzywa kalibracyjna jest w pełni oparta na wynikach pomiarów  $^{14}\text{C}$  próbek pierścieni rocznych przyrostów drzew o znanym bezwzględny wieku dendrochronologicznym. Jeśli chodzi o starsze dane, posiadające niezależną skalę wieku, to mimo wysokiej rozdzielczości osadów warwowych z jeziora Suigetsu, gdzie datowane były makroszczałki roślin lądowych (Bronk Ramsey i in. 2012) zespół IWG uznał, że nie można ich na razie wykorzystać jako samodzielnego zapisu atmosferycznego. Dlatego też krzywa kalibracyjna w swej starszej części jest oparta nie tylko na danych z jeziora Suigetsu, ale również na pływających danych dendrochronologicznych – np. dla okresu ocieplenia bølling–allerød (Adolphi i in. 2017), czy

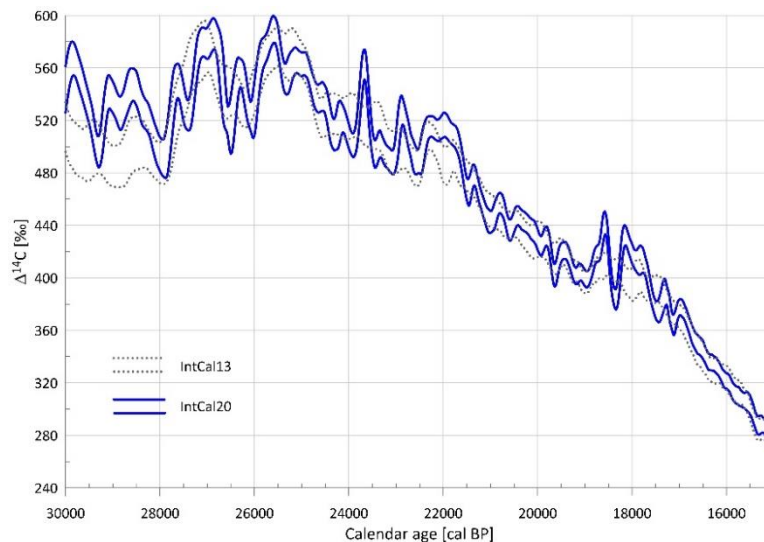
drewna kauri z półkuli południowej (Turney i in. 2010), danych z nacieków – np. z jaskini Hulu (Cheng i in. 2018), koralu – np. z Barbados, Tahiti (Bard i in. 1990), otwornic – np. z Basenu Cariaco (Hughen i in. 2004).

Różnice pomiędzy aktualną krzywą kalibracyjną IntCal20 (Reimer i in. 2020) a poprzednią wersją krzywej IntCal13 (Reimer i in. 2013) najlepiej jest przedstawić za pomocą zależności wielkości  $\Delta^{14}\text{C}$  (Stuiver, Polach 1977; Reimer i in. 2020) od danego wieku kalendarzowego (rys. 1A, B). Przy takiej formie prezentacji różnice te są bowiem wyraźniej widoczne niż w przypadku wykresu zależności wieku radiowęglowego od wieku kalendarzowego. Tym, co najbardziej rzuca się w oczy na Rysunku 1 jest fakt, że przebieg krzywej kalibracyjnej IntCal20 cechuje się większą liczbą wahań (wzrostów i spadków) niż krzywa IntCal13, która była dla wieków kalendarzowych starszych niż 12 550 BP bardziej gładka niż IntCal20. Jest to konsekwencja zwiększenia ilości i precyzji danych wykorzystanych do konstrukcji krzywej oraz wydłużenia przedziału czasowego, dla którego krzywa oparta jest na danych dendrochronologicznych. Powoduje to znaczące konsekwencje dla wyników kalibracji dat radiowęglowych, gdyż zamiast jednodmodalnych, gaussowskich rozkładów prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego uzyskujemy rozkłady wielomodalne, które zgodnie z interpretacją statystyczną mówią o kilku alternatywach rzeczywistego wieku kalendarzowego próbki, różniących się nieco od siebie (Michczyński 2011). Może to oznaczać konieczność ponownego przeanalizowania chronologii radiowęglowych opartych na wynikach skalibrowanych z wykorzystaniem poprzednich wersji krzywej kalibracyjnych. Problem ten został zasygnalizowany w pracy Antczak-Orlewskiej i in. (2021) dotyczącej okresu allerød–młodszy dryas na stanowisku Rozprza. Dotyczy on w szczególności tych przedziałów czasowych, dla których przebieg krzywej IntCal20 ma nie tylko więcej wahań, ale jest również w mniejszym lub większym stopniu przesunięty w porównaniu z krzywą IntCal13. Wymienić tu należy okresy 12 200–11 800 cal BP (młodszy dryas), 14 000–12 500 cal BP, 15 000–14 500 cal BP, 19 000–17 800 cal BP, 22 500–21 500 cal BP oraz 30 000–28 000 cal BP. Także dla lat kalendarzowych starszych niż 32 000 cal BP przebieg krzywej IntCal20 jest znacząco przesunięty w porównaniu do IntCal13.



Rys. 1A. Zmiany koncentracji izotopu  $^{14}\text{C}$  w przedziale 16 000–10 000 cal BP wyrażone jako  $\Delta^{14}\text{C}$  (źródło danych: IntCal 2022)

Changes in  $^{14}\text{C}$  isotope concentration between 16 000–10 000 cal BP expressed as  $\Delta^{14}\text{C}$  (data source: IntCal 2022)



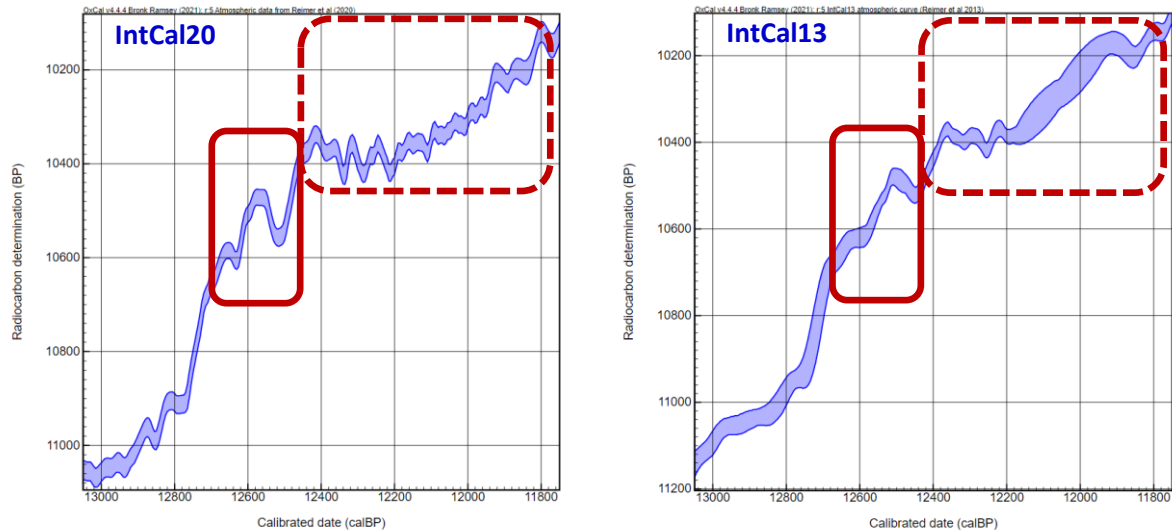
Rys. 1B. Zmiany koncentracji izotopu  $^{14}\text{C}$  w przedziale 30 000–15 000 cal BP wyrażone jako  $\Delta^{14}\text{C}$  (źródło danych: IntCal 2022)

Changes in  $^{14}\text{C}$  isotope concentration between 30 000–15 000 cal BP expressed as  $\Delta^{14}\text{C}$  (data source: IntCal 2022)

## Wpływ nowej krzywej kalibracyjnej na chronostratygrafię późnego vistulianu – wybrane przykłady

Dla przedziału czasu ostatnich 12 tysięcy lat zmiany w przebiegu krzywej kalibracyjnej IntCal20 w stosunku do krzywej IntCal13 nie są tak znaczące jak dla późnego vistulianu i okresów wcześniejszych. Rysunek 2 przedstawia

fragment krzywych kalibracyjnych IntCal20 oraz IntCal13 dla okresu obejmującego młodszy dryas (stadium izotopowe GS-1) z zaznaczeniem dwóch obszarów z najbardziej znaczącymi różnicami. W obszarze otoczonym linią przerywaną, obejmującym środkową część młodszy dryas, widzimy wyraźne przesunięcie się przebiegu krzywej IntCal20 w porównaniu do IntCal13 w kierunku niższych wartości wieku radiowęglowego oraz znacznie bar-



Rys. 2. Porównanie przebiegu radiowęglowej krzywej kalibracyjnej IntCal13 (wykres po prawej) oraz IntCal20 (wykres po lewej) dla przedziału 13 000–11 800 cal BP. Odcinki krzywej, dla których są widoczne największe różnice zaznaczono prostokątami o linii ciągłej oraz o linii przerywanej. Wpływ tych różnic na wyniki kalibracji przedstawiono na Rysunkach 3 i 4

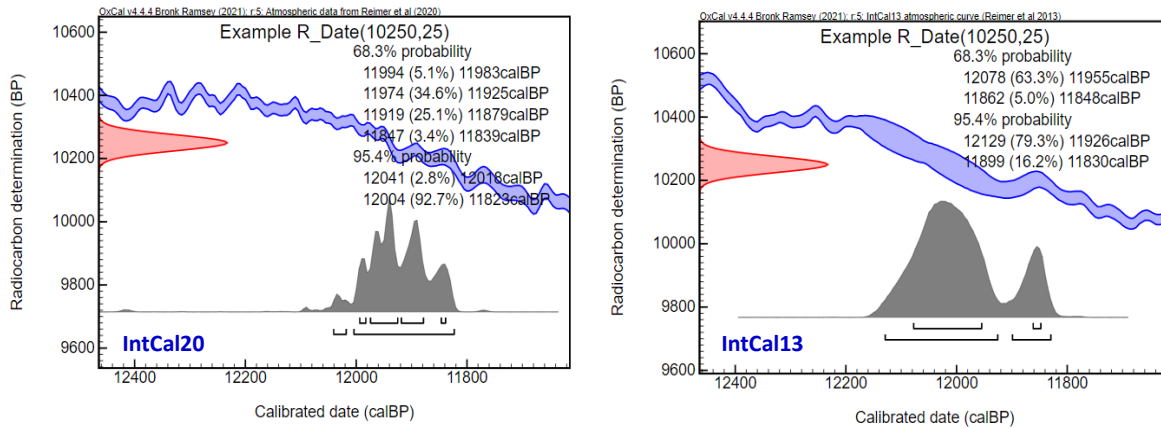
Comparison of the IntCal13 radiocarbon calibration curve (graph on right) and IntCal20 (graph on left) for the 13 000–11 800 cal BP interval. The sections of the curve for which the greatest differences are visible are marked with solid-line and dashed-line rectangles. The impact of these differences on the calibration results is shown in Figures 3 and 4

dziej zygzakowaty przebieg tej pierwszej. Natomiast dla obszaru otoczonego na Rysunku 2 linią ciągłą, wahania krzywej IntCal20 są znacznie większe niż dla IntCal13, co w efekcie prowadzi także do wyraźnych zmian przebiegu krzywej kalibracyjnej.

Wpływ tych zmian na wyniki kalibracji, a tym samym na tworzenie chronologii można prześledzić na przedstawionych poniżej przykładach. Rysunek 3 przedstawia porównanie wyników kalibracji daty radiowęglowej  $10\,250 \pm 25$  BP z użyciem krzywej kalibracyjnej IntCal20 (obrazek po lewej stronie) oraz IntCal13 (obrazek po prawej stronie). Wyraźnie widać, że rozkład prawdopodobieństwa daty kalibrowanej dla IntCal20 jest przesunięty o około 100 lat w kierunku niższych wartości wieku kalendarzowego, a ponadto posiada kilka maksimum, co wskazuje na kilka możliwych alternatyw rzeczywistego wieku kalendarzowego. Mamy zatem do czynienia z przesunięciem wyników kalibracji w kierunku młodszego wieku kalendarzowego spowodowanym wspomnianym powyżej innym przebiegiem krzywej kalibracyjnej w przedziale 12 200–11 800 cal BP. Natomiast różnice przebiegu krzywych Int-

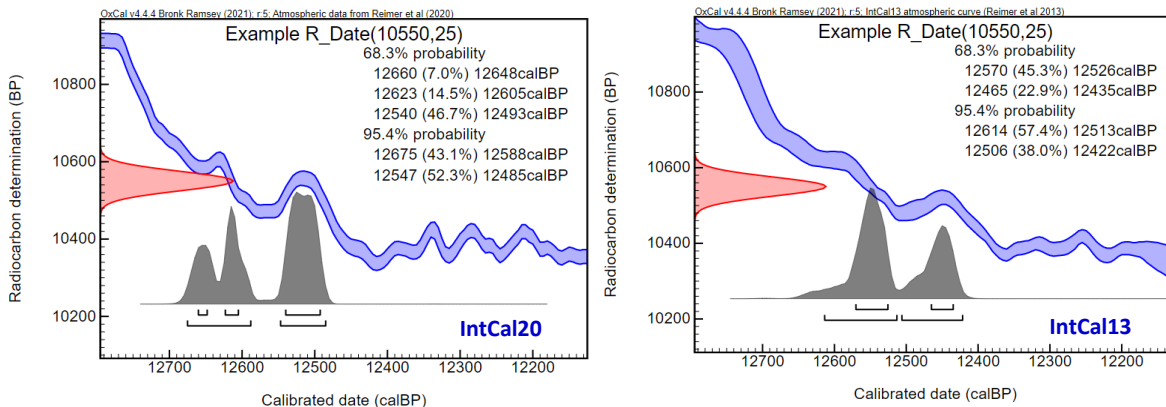
Cal20 i IntCal13 dla obszaru otoczonego na Rysunku 2 linią ciągłą, prowadzić mogą do uzyskania w wyniku kalibracji z użyciem IntCal20 wieku starszego niż w przypadku IntCal13. Efekt taki przedstawiony został na Rysunku 4, który pokazuje porównanie wyników kalibracji daty radiowęglowej  $10\,550 \pm 25$  BP za pomocą obu omawianych krzywych. Wynikiem kalibracji z wykorzystaniem IntCal13 jest dwumodalny rozkład prawdopodobieństwa (rys. 4, wykres po prawej) z maksimumami w okolicach 12 550 cal BP oraz 12 450 cal BP. Przy kalibracji z wykorzystaniem IntCal20 uzyskujemy rozkład trójmodalny (rys. 4, wykres po lewej) z maksimumami w okolicach 12 655, 12 615 oraz 12 520 cal BP. Chociaż w obu przypadkach najwyższe maksimum i najbardziej prawdopodobna moda rozkładu przypada w zbliżonym miejscu (około 12 520–12 550 cal BP), to całość rozkładu prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego przy kalibracji za pomocą IntCal20 jest zdecydowanie przesunięta w stronę starszych wieków kalendarzowych. Różnica wyznaczonego wieku kalendarzowego może w tym przypadku wynosić nawet 200 lat.

Porównanie przebiegu krzywych kalibra-



Rys. 3. Wynik kalibracji precyzyjnej daty radiowęglowej 10 250±25 BP z użyciem krzywej kalibracyjnej IntCal13 (wykres po prawej) oraz IntCal20 (wykres po lewej)

Calibration result of an example precise radiocarbon date of 10 250±25 BP using the IntCal13 calibration curve (graph on the right) and IntCal20 (graph on the left)



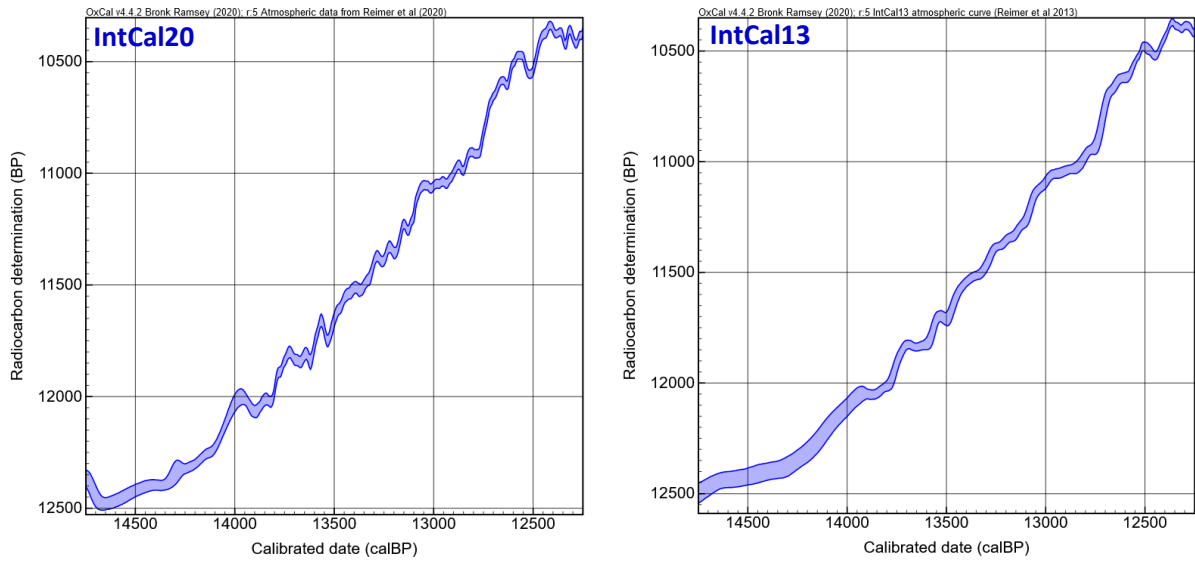
Rys. 4. Wynik kalibracji precyzyjnej daty radiowęglowej 10 550±25 BP z użyciem krzywej kalibracyjnej IntCal13 (wykres po prawej) oraz IntCal20 (wykres po lewej)

Calibration result of an example precise radiocarbon date of 10 550±25 BP using the IntCal13 calibration curve (graph on the right) and IntCal20 (graph on the left)

cyjnych IntCal20 oraz IntCal13 dla przedziału czasowego 14 500–12 500 cal BP (późny glacja) przedstawione na Rysunku 5 nie pokazują tak drastycznych różnic jak dla okresu 11 500–12 500 cal BP. Trzeba jednak pamiętać, że na prawie całym tym odcinku występuje systematyczne przesunięcie w przebiegu krzywych, a krzywa IntCal20 ma przebieg z większą liczbą wahań niż IntCal13. Oznacza to, że efekty przedstawione na Rysunkach 3 i 4 będą występowały również tutaj, chociaż nie będą one już tak znaczące jak opisane powyżej.

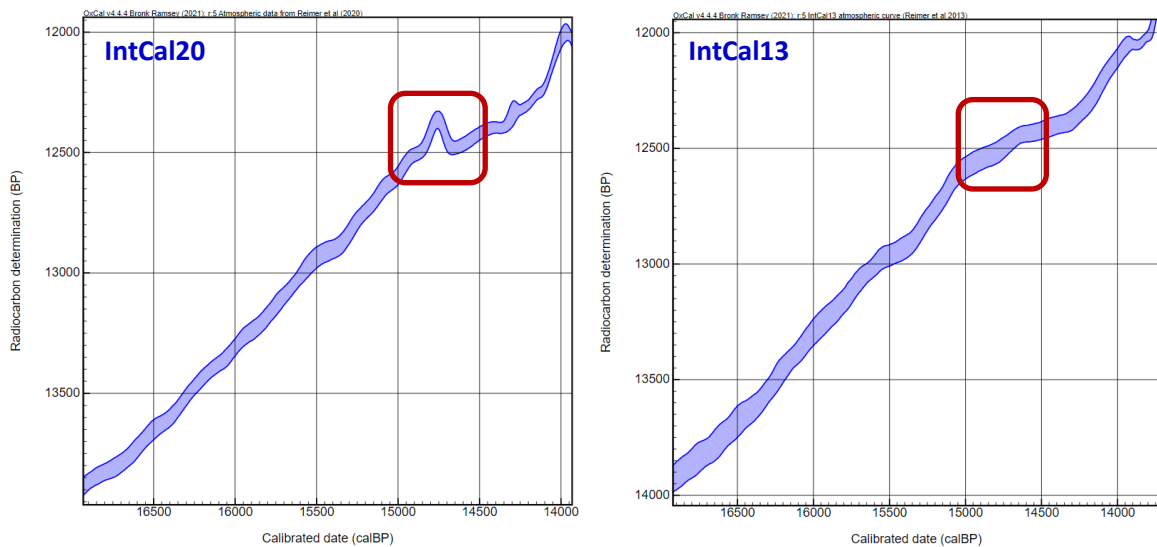
Dla przedziału czasowego 16 500–14 500 cal BP (rys. 6) przebiegi krzywych kalibracyjnych IntCal20 oraz IntCal13 są ze sobą zgodne, przy czym krzywa IntCal20 ma

większą precyzję (jest węższa). Jediną znaczącą różnicą przebiegów obu krzywych jest wyraźne wahnięcie przebiegu IntCal20 w okolicy 14 800–14 700 cal BP (rys. 6, obszar otoczony linią ciągłą), które nie występuje na krzywej IntCal13. Możliwe konsekwencje takiej różnicy dla wyniku kalibracji przykładowej daty radiowęglowej 12 400±30 BP z zakresu zaznaczanego prostokątem na Rysunku 6 przedstawia Rysunek 7. Podobnie jak w przypadkach zilustrowanych na Rysunkach 3 i 4, rozkład prawdopodobieństwa wieku kalendarzowego otrzymany w wyniku kalibracji z wykorzystaniem krzywej IntCal20 ma więcej maksimumów, niż rozkład otrzymany w wyniku kalibracji z wykorzystaniem krzywej



Rys. 5. Porównanie przebiegu radiowęglowej krzywej kalibracyjnej IntCal13 (wykres po prawej) oraz IntCal20 (wykres po lewej) dla przedziału 14 500–12 500 cal BP

Comparison of the IntCal13 radiocarbon calibration curve (graph on right) and IntCal20 (graph on left) for the 14 500–12 500 cal BP interval



Rys. 6. Porównanie przebiegu radiowęglowej krzywej kalibracyjnej IntCal13 (wykres po prawej) oraz IntCal20 (wykres po lewej) dla przedziału 16 500–14 000 cal BP. Odcinki krzywej, dla których są widoczne największe różnice zaznaczono prostokątami o linii ciągłej. Wpływ tych różnic na wyniki kalibracji przedstawiono na Rysunku 7

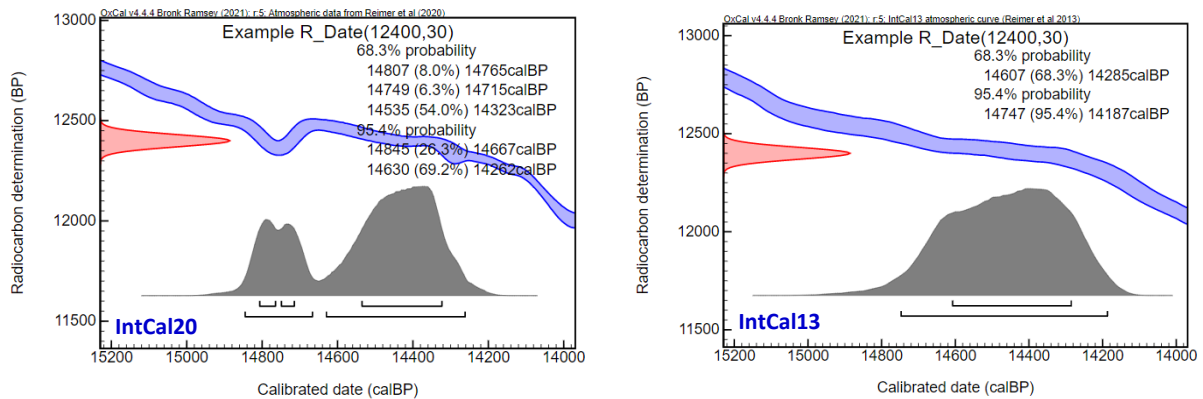
Comparison of the IntCal13 radiocarbon calibration curve (graph on right) and IntCal20 (graph on left) for the 14 000–16 500 cal BP interval. The sections of the curve for which the greatest differences are visible are marked with solid-line rectangles. The impact of these differences on the calibration results is shown in Figure 7

IntCal13. W tym przypadku zamiast szerszego rozkładu jednododalnego otrzymujemy rozkład o trzech maksimach, rozdzielony wyraźnie na dwie części. Wyraźnie widać, że jedna z tych części (14 845–14 667 cal BP) wypada poza zakresem przedziału 95,4% dla

daty kalibrowanej z wykorzystaniem IntCal13 (14 747–14 187 cal BP), wskazując na alternatywny wiek starszy niż wynikający z kalibracji poprzednią wersją krzywej. W wyniku kalibracji krzywą IntCal20 mamy tu zatem do czynienia nie tylko z pojawieniem się dwóch

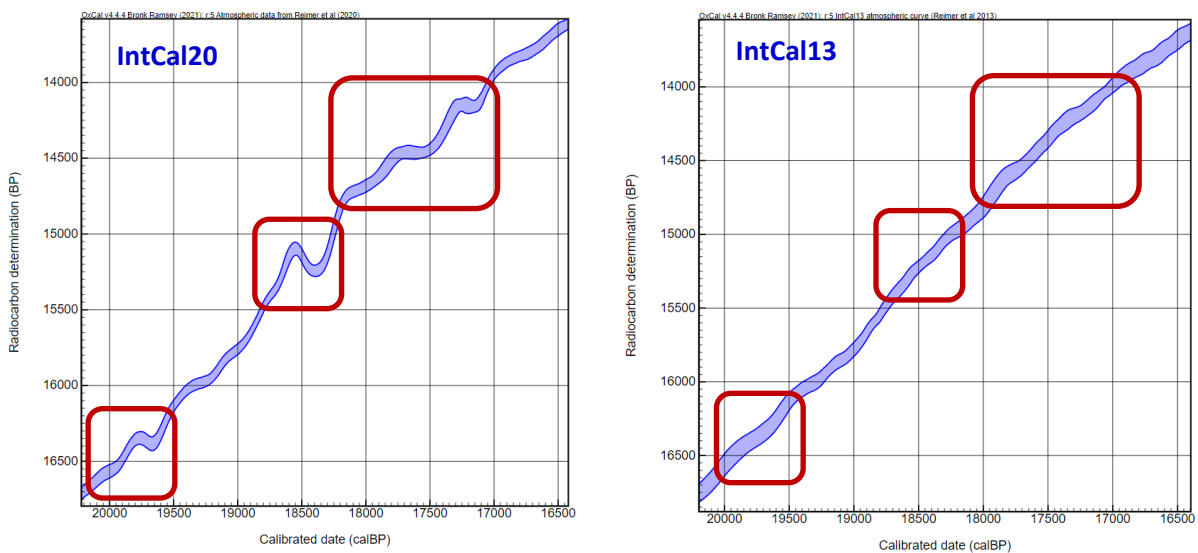
alternatywnych wieków kalendarzowych, ale także z przesunięciem przynajmniej jednej z tych alternatyw na skali czasu w porównaniu

z wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem IntCal13.



Rys. 7. Wynik kalibracji precyzyjnej daty radiowęglowej 12 400±30 BP z użyciem krzywej kalibracyjnej IntCal13 (wykres po prawej) oraz IntCal20 (wykres po lewej)

Calibration result of an example precise radiocarbon date of 12 400±30 BP using the IntCal13 calibration curve (graph on the right) and IntCal20 (graph on the left)



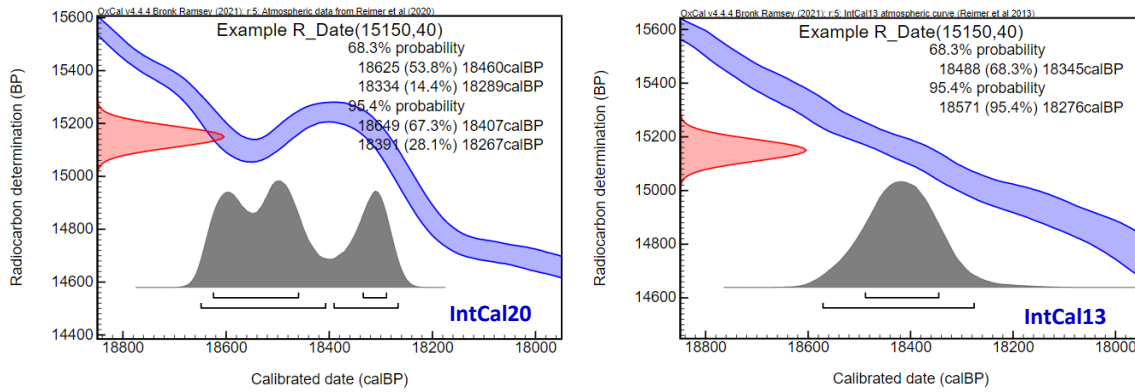
Rys.8. Porównanie przebiegu radiowęglowej krzywej kalibracyjnej IntCal13 (wykres po prawej) oraz IntCal20 (wykres po lewej) dla przedziału 20 000–16 500 cal BP. Odcinki krzywej, dla których są widoczne największe różnice zaznaczono prostokątami o linii ciągłej. Wpływ tych różnic na wyniki kalibracji przedstawiono na Rysunku 9

Comparison of the IntCal13 radiocarbon calibration curve (graph on right) and IntCal20 (graph on left) for the 20 000–16 500 cal BP interval. The sections of the curve for which the greatest differences are visible are marked with solid-line rectangles. The impact of these differences on the calibration results is shown in Figure 9

Przedstawione na Rysunku 8 zestawienie przebiegu krzywych kalibracyjnych IntCal20 oraz IntCal13 dla przedziału czasowego 20 000–16 500 cal BP pokazuje ponownie więcej różnic pomiędzy przebiegiem obu tych krzywych. Różnice te, szczególnie wyraźne dla ob-

szarów otoczonych na Rysunku 8 liniami ciągłymi, polegają na występowaniu wahań przebiegu krzywej kalibracyjnej IntCal20 wokół przebiegu krzywej IntCal13 (jest to widoczne także na rys. 1B). Oznacza to, że wyniki kalibracji dat radiowęglowych z wykorzystaniem krzywej IntCal20 i IntCal13 będą się różniły od





Rys. 9. Wynik kalibracji precyzyjnej daty radiowęglowej 15 150±40 BP z użyciem krzywej kalibracyjnej IntCal13 (wykres po prawej) oraz IntCal20 (wykres po lewej)

Calibration result of an example precise radiocarbon date of 15 150±40 BP using the IntCal13 calibration curve (graph on the right) and IntCal20 (graph on the left)

siebie w analogiczny sposób, jak to przedstawiono na Rysunkach 4 i 7. W rezultacie kalibracji z wykorzystaniem IntCal20 będą tu się zatem pojawiały wielomodalne rozkłady wieku kalendarzowego, informujące o kilku możliwych alternatywach rzeczywistego wieku kalendarzowego, a niektóre z tych alternatyw będą się znacząco różniły od przedziałów wieku kalendarzowego otrzymanych w rezultacie kalibracji z wykorzystaniem IntCal13. Różnice te mogą prowadzić zarówno do uzyskania starszego, jak i młodszego wieku kalendarzowego od wyniku uzyskanego przy kalibracji IntCal13, a nawet do jednoczesnego otrzymania alternatywy starszej i młodszej (jak to ma miejsce w przykładzie zaprezentowanym na rys. 9).

Z Rysunku 1B wynika, że różnice pomiędzy krzywą kalibracyjną IntCal20 oraz IntCal-13 dla starszych przedziałów czasowych od 28 000–20 000 cal BP mają taki sam charakter jak w omówionym powyżej przedziale 20 000–16 500 cal BP. Zatem do tegoż odcinka mają także zastosowanie przedstawione powyżej wnioski.

## Podsumowanie

1. Przy tworzeniu chronostratygrafii dla danego stanowiska czy regionu opartej na wynikach oznaczeń wieku radiowęglowego konieczne jest korzystanie z dat kalibrowanych.
2. Różnice pomiędzy krzywą kalibracyjną IntCal20 i IntCal13 występują niemal na

całym obszarze przedziału czasowego starszego niż 11 800 cal BP. Różnice te, wynikające z doprecyzowania i skorygowania przebiegu krzywej IntCal20, prowadzą do występowania w wynikach kalibracji dat radiowęglowych kilku możliwych alternatyw rzeczywistego wieku kalendarzowego. Ponadto, niektóre z tych alternatywnych przedziałów wieku kalendarzowego znacząco różnią się od przedziałów wieku kalendarzowego otrzymywanych w wyniku kalibracji z wykorzystaniem IntCal13. Rodzi to konieczność przeprowadzenia weryfikacji modeli chronologicznych dla późnego vistulianu opracowanych z wykorzystaniem krzywej IntCal13.

3. Ze względu na fakt, że przy aktualizacji krzywej kalibracyjnej dodawane są nowe, coraz wyższej precyzji dane lub usuwane mniej precyzyjne dane, to wszystkie wykorzystywane w danym opracowaniu daty radiowęglowe powinny być skalibrowane przy użyciu tej samej, najlepiej najnowszej, wersji krzywej kalibracyjnej.
4. Przy publikacji wyników datowania należy zawsze podawać tzw. „surowe dane”, tzn.: nazwę próbki, datowany materiał, informacje o stanowisku (w tym np. zakres głębokości reprezentowany przez próbkę), kod laboratoryjny, konwencjonalną datę <sup>14</sup>C wraz z niepewnością, tak, aby:
  - przy ponownym opracowywaniu danych móc dokonać kalibracji daty z użyciem nowszej krzywej kalibracyjnej,
  - przy tworzeniu nowej wersji modelu wiek-głębokość dla danego stanowiska

móc w pełni wykorzystać informację o: litologii, stratygrafii, zakresie lat reprezentowanych przez poszczególne próbki,  
- móc wyjaśnić bezpośrednio w laboratorium radiowęglowym ewentualne wątpliwości co do cytowanych dat (np. sposób wstępnej preparatyki chemicznej, datowana frakcja).

## Literatura

- Adolphi F., Muscheler R., Friedrich M., Gütler D., Wacker L., Talamo S., Kromer B. 2017. Radiocarbon calibration uncertainties during the last deglaciation: Insights from new floating tree-ring chronologies. *Quaternary Science Reviews* 170: 98-108, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2017.06.026>
- Aitchison T.C., Leese M., Michczyńska D.J., Mook W.G., Otlet R. L., Ottaway B.S., Pazdur M.F., van der Plicht J., Reimer P.J., Robinson S.W., Scott E.M., Stuiver M., Weninger B. 1989. A comparison of methods used for the calibration of radiocarbon dates. *Radiocarbon* 31(3): 846-864, DOI: 10.1017/S0033822200012479.
- Antczak-Orlewska O., Okupny D., Pawłowski D., Kotrys B., Krapiec M., Luoto T.P., Peyron O., Płóciennik M., Stachowicz-Rybka R., Wacnik A., Szmańda J.B., Szychowska-Krapiec E., Kittell P. 2021. The environmental history of the oxbow in the Luciaża River valley – Study on the specific microclimate during Allerød and Younger Dryas in central Poland. *Quaternary International*: artykuł w druku, <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.08.011>
- Bard E., Hamelin B., Fairbanks R.G., Zindler A. 1990. Calibration of the  $^{14}\text{C}$  timescale over the past 30 000 years using mass spectrometry U-Th ages from Barbados corals. *Nature* 345(6274): 405-410, DOI: 10.1038/345405a0
- Bronk Ramsey C. 2009. Bayesian analysis of radiocarbon dates. *Radiocarbon* 51(1): 337-360, <https://doi.org/10.1017/S0033822200033865>
- Bronk Ramsey C., Staff R., Bryant C., Brock F., Kitagawa H., van der Plicht J., Schlögl G., Marshall M., Brauer A., Lamb H., Payne R., Tarasov P., Haraguchi T., Gotanda K., Yonenobu H., Yokoyama Y., Tada R., Nakagawa T. 2012. A complete terrestrial radiocarbon record for 11.2 to 52.8 kyr BP. *Science* 338: 370-374.
- Cheng H., Edwards R., Southon J., Matsumoto K., Feinberg J., Sinha A., Zhou W., Li H., Li X., Xu Y. 2018. Atmospheric  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  changes during the last glacial period from Hulu Cave. *Science* 362(6420): 1293-1297, DOI: 10.1126/science.aau0747.
- Cook G.T., Ascough P.L., Bonsall C., Hamilton W.D., Russell N., Sayle K.L., Scott E.M., Bownes J. M. 2015. Best practice methodology for  $^{14}\text{C}$  calibration of marine and mixed terrestrial/marine samples. *Quaternary Geochronology* 27: 164-171, <https://doi.org/10.1016/j.quageo.2015.02.024>
- de Vries H. 1958. Variation in concentration of radiocarbon with time and location on Earth. *Proceedings van de Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen* 61(2): 94-102.
- Hajdas I., Ascough P., Garnett M.H., Fallon S.J., Pearson C.L., Quarta G., Spalding K.L., Yamaguchi H., Yoneda M. 2021. Radiocarbon dating. *Nature Reviews Methods Primers* 1(62), <https://doi.org/10.1038/s43586-021-00058-7>
- Hughen K., Southon J., Bertrand C., Frantz B., Zermeno P. 2004. Cariaco Basin calibration update: revisions to calendar and  $^{14}\text{C}$  chronologies for Core PL07-58PC. *Radiocarbon* 46: 1161-1188.
- IntCal. 2022. *Koncentracja izotopu  $^{14}\text{C}$  w przedziale 16 000–10 000 cal BP oraz 30 000–15 000 cal BP wyrażone jako  $\Delta^{14}\text{C}$* . IntCal Working Group (IWG). Online: <https://www.intcal.org/> (data ostatniego dostępu: 30.09.2022).
- Lerman J.C., Mook W.G., Vogel J.C. 1970.  $^{14}\text{C}$  in tree rings from different localities. W: I.U. Olsson (red.) *Radiocarbon variations and absolute chronology*. John Wiley and Sons, New York: 257-299.

- Marsh E.J., Bruno M.C., Fritz S.C., Baker P., Capriles J.M., Hastorf C.A. 2018. IntCal, SHCal or a Mixed Curve? Choosing a  $^{14}\text{C}$  Calibration Curve for Archaeological and Paleoenvironmental Records from Tropical South America. *Radiocarbon* 60(3): 925-940, <https://doi.org/10.1017/RDC.2018.16>
- Micheczyńska D.J., Pazdur M.F., Walanus A. 1990. Bayesian Approach to Probabilistic Calibration of Radiocarbon Ages. *PACT* 29: 69-79.
- Micheczyński A. 2011. Tworzenie chronologii bezwzględnych na podstawie datowania metodą radiowęglową. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- Pazdur M.F., Micheczyńska D.J. 1989. Improvement of the procedure for probabilistic calibration of radiocarbon dates. *Radiocarbon* 31(3): 824-832, <https://doi.org/10.1017/S0033822200012443>
- Pearson G.W., Stuiver M. 1986. High-precision calibration of the radiocarbon time scale, 500–2500 BC. *Radiocarbon* 28(2B): 839-862, <https://doi.org/10.1017/S0033822200060173>
- Reimer P.J. 2022. Evolution of Radiocarbon Calibration. *Radiocarbon* 64(3): 523–539, <https://doi.org/10.1017/RDC.2021.62>
- Reimer P.J., Bard E., Bayliss A., Beck J.W., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Grootes P.M., Guilderson T.P., Haflidason H., Hajdas I., Hate C., Heaton T.J., Hoffmann D.L., Hogg A.G., Hughen K. A., Kaiser K.F., Kromer B., Manning S.W., Niu M., Reimer R.W., Richards D.A., Scott E. M., Southon J.R., Staff R. A., Turney C.S.M., van der Plicht J. 2013. IntCal13 and Marine13 Radiocarbon Age Calibration Curves 0–50 000 Years Cal BP. *Radiocarbon* 55(4): 1869-1887, [https://doi.org/10.2458/azu\\_j\\_s\\_rc.55.16947](https://doi.org/10.2458/azu_j_s_rc.55.16947)
- Reimer P.J., Austin W.E.N., Bard E., Bayliss A., Blackwell P.G., Bronk Ramsey C., Butzin M., Cheng H., Edwards R.L., Friedrich M., Grootes P.M., Guilderson T.P., Muscheler R., Palmer J.G., Pearson C., Scott E.M., Southon J.R., Turney C.S.M., Hajdas I., Heaton T.J., Hogg A.G., Hughen K.A., Kromer B., Manning S.W., Van Der Plicht J., Reimer R.W., Richards D.A., Wacker L., Adolphi F., Büntgen U., Capano M., Fahrni S.M., Fogtmann-Schulz A., Friedrich R., Köhler P., Kudsk S., Miyake F., Olsen J., Reinig F., Sakamoto M., Sookdeo A., Talamo S. 2020. The IntCal20 Northern Hemisphere Radiocarbon Age Calibration Curve (0–55 cal BP). *Radiocarbon* 62(4): 725-757, <https://doi.org/10.1017/RDC.2020.41>
- Stuiver M., Pearson G.W. 1986. High-precision calibration of the radiocarbon time scale, AD 1950–500 BC. *Radiocarbon* 28(2B): 805-838, <http://dx.doi.org/10.1017/S0033822200060161>
- Stuiver M., Polach H.A. 1977. Reporting of  $^{14}\text{C}$  data. *Radiocarbon* 19(3): 355-363.
- Stuiver M., Reimer P.J. 1993. Extended  $^{14}\text{C}$  data base and revised CALIB 3.0  $^{14}\text{C}$  age calibration program. *Radiocarbon* 35(1): 215-230, <https://doi.org/10.1017/S0033822200013904>
- Turney C., Fifield L., Hogg A., Palmer J., Hughen K., Baillie M., Galbraith R., O'Gden J., Lorrey A., Tims S., Jones R. 2010. The potential of New Zealand kauri (*Agathis australis*) for testing the synchronicity of abrupt climate change during the Last Glacial Interval (60 000–11 700 years ago). *Quaternary Science Reviews* 29: 3677-3682, <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2010.08.017>

## Summary

Chronologies of environmental change in the Late Vistulian are created primarily based on the results of radiocarbon and luminescence

dating, with radiocarbon dates providing higher precision – hence their crucial importance for the last 55 000 years, i.e. the range of the  $^{14}\text{C}$  method. From the point of view of the user of radiocarbon dates, it is of key importance that

the concentration of the  $^{14}\text{C}$  isotope in the atmosphere and biosphere has not been constant in the past. These variations, first identified by de Vries in 1958 for the Maunder Minimum period (de Vries 1958), are the reason why a conventional radiocarbon age is only a specific type of record of the measured  $^{14}\text{C}$  isotope concentration in the sample under study. Therefore, radiocarbon dates cannot provide absolute chronologies or information on sediment accumulation rates and need to be converted to a calendar scale. Calibration curves, which have been developed since the 1960s, are used for this purpose.

To create a calibration curve, measurements of  $^{14}\text{C}$  isotope concentrations are needed in samples whose calendar age has been determined by an independent method other than radiocarbon. Tree rings with an absolute dendrochronological scale are characterised by the highest resolution. Floating dendrochronological scales, varved lake sediments, marine sediments, speleothems and corals are also used to construct calibration curves.

The development of measurement techniques, new datasets and a new statistical approach to combining independent datasets are the reasons why a new version of the calibration curve is published every few years. Detailed information on the evolution of radiocarbon calibration curves can be found in a 2022 article in the journal *Radiocarbon* (Reimer 2022). In 2020, updates to the calibration curves were published for the northern and southern hemispheres, as well as for the ocean surface layer. The latest version of the Northern Hemisphere calibration curve IntCal20 (Reimer *et al.* 2020) extends back to 55 000 cal. BP. A lot of new data with a resolution of one year were used in its creation, as well as the data used to prepare previous versions of the calibration curve having been revised (including the discarding of some sets). The area from which the used data comes from has also increased. Up to ~13900 cal. BP IntCal20 is fully based on the results of  $^{14}\text{C}$  measurements of trees rings with known absolute dendrochronological age. In its older part, it is based on floating dendrochronological chronologies, data from Lake Suigetsu, speleothems, corals and foraminifera.

The differences between the current IntCal20 calibration curve (Reimer *et al.* 2020) and the previous version of the IntCal13 curve

(Reimer *et al.* 2013) are best illustrated using the  $\Delta^{14}\text{C}$  value (Stuiver, Polach 1977; Reimer *et al.* 2020) determined for a given calendar age (Fig. 1A, B). What is most striking in Figure 1 is that the course of the IntCal20 calibration curve is characterised by more fluctuations (ups and downs) than the IntCal13 curve, which for calendar ages older than 12 550 cal. BP was smoother than IntCal20. This is a consequence of the increase in the number and precision of the data used to construct the curve and the extension of the time interval for which the curve is based on dendrochronological data. This has significant consequences for the calibration results of the radiocarbon dates. These consequences are discussed using examples of dates calibration for a few selected time intervals:

- 13 000–11 800 cal BP (see Fig. 2–4),
- 14 500–12 500 cal BP (see Fig. 5),
- 16 500–14 500 cal BP (see Fig. 6–7),
- 20 000–16 500 cal BP (see Fig. 8–9).

The information and examples presented in the article can be summarised as follows:

1. The use of calibrated dates is necessary when developing chronostratigraphy for a site or region based on radiocarbon age determinations.
2. Differences between the IntCal20 and IntCal13 calibration curve are found almost throughout the time interval older than 11 800 cal. BP. These differences, resulting from the refinement and correction of the IntCal20 curve, lead to the presence of several possible alternatives of actual calendar age in the calibration results of radiocarbon dates. Furthermore, some of these alternative calendar age ranges differ significantly from the calendar age ranges obtained from calibration using IntCal13. This raises the need for a revision of the chronological models for the Late Vistulian developed using the IntCal13 curve.
3. Due to the fact that, when updating the calibration curve, new and ever more precise data are added or less precise data are deleted, all radiocarbon dates used in a given study should be calibrated using the same (preferably the latest) version of the calibration curve.
4. When publishing the results of dating, the so-called "Raw data", i.e. sample name, dated material, site information (including, e.g., depth range represented by the sam-

ple), laboratory code, conventional  $^{14}\text{C}$  date with uncertainty, so that:

- when reworking data, the date can be calibrated using a newer calibration curve,
- when creating a new version of the age–depth model for a site, full use can be made of the information on lithology, stra-

tigraphy and range of years represented by each sample,

- any doubts about the cited dates (e.g. method of chemical pre-treatment, dated fraction) can be clarified directly in the radiocarbon laboratory.