

Zdolność rozdzielcza metody radiowęglowej

Adam Walanus¹



Zmienność intensywności promieniowania kosmicznego „przerabiającego” ^{14}N na ^{14}C , zmienność parametrów obiegu węgla w przyrodzie, a nawet czynniki antropogeniczne są przyczyną niezwykle skomplikowanego przebiegu krzywej kalibracyjnej metody radiowęglowej (Reimer i in., 2004; Walanus & Goslar, 2009; Walanus, 2009). Niemal każda

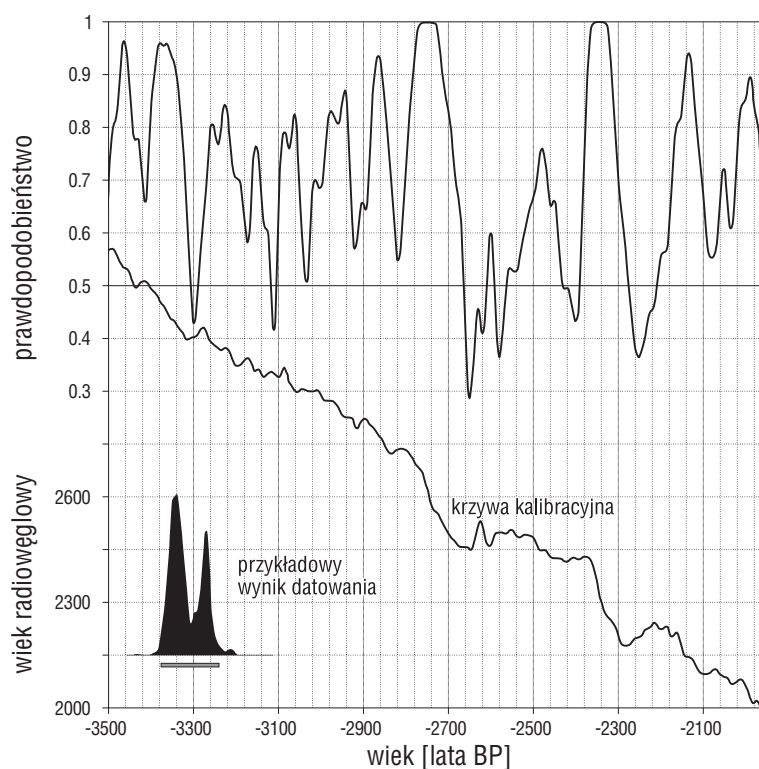
metoda pomiarowa ma swoją kalibrację (patrz np. Wikipedia: *Wzorcowanie, kalibracja*), ale tak skomplikowana jest wyjątkiem. I to właśnie nie fizykom czy technikom, lecz archeologom (Walanus, 2005) oraz geologom, geografom, paleobiologom i innym — niekoniecznie wystarczająco dobrze matematycznie przygotowanym — naukowcom trafił się ten problem.

Standardowo wynik pomiaru opisuje krzywa gęstości prawdopodobieństwa Gaussa, która ma dwa parametry. Wynik pomiaru można więc zapisać za pomocą dwóch liczb, np. 5550 ± 50 . By opisać funkcję gęstości prawdopodobieństwa wieku próbki wyznaczonego w pomiarze ^{14}C , trzeba natomiast całego wykresu, który przypomina grań typu alpejskiego — zaczerniony wykres na ryc. 1 (Michczyńska i in., 1989). Na szczęście dominującą praktyką staje się redukowanie formy zapisu owej daty do dwóch liczb określających po prostu zakres wieku. Ścisłej, jest to przedział ufności, zawierający prawdziwy wiek z prawdopodobieństwem 0,95 (stosuje się też poziom ufności 0,68, czego autor nie zaleca). Wynik zapisuje się w tej sytuacji również za pomocą dwóch liczb, np. 5650–5450, jednak nie należy zamieniać tego zapisu na formę z symbolem \pm , ze względu na to, że środek przedziału na ogół nie ma, a czasem zupełnie nie ma największego prawdopodobieństwa bycia prawdziwym wiekiem.

Pojęcie zdolności rozdzielczej znane jest użytkownikom mikroskopów. Jeśli konieczny jest dokładniejszy opis zagadnienia, stosuje się krzywe MTF (*Modulation Transfer Function*), np. w przypadku obiektywu fotograficznego obrazujące zależność kontrastu od odległości od osi obiektywu. Owa krzywa MTF bywa tak skomplikowana, jak fragmenty odpowiedniej krzywej w metodzie radiowęglowej. Rozdzielczość pomiarów zależy zwykle od pozycji na zakresie pomiarowym. Zbliżanie się do kresu możliwości pomiarowych oznacza pogarszanie się rozdzielczości. W przypadku ^{14}C taki efekt występuje w próbkach o wieku 30–50 tys. lat. Zdolność rozdzielcza metody spada do zera i wynik ma postać „jednostronną”, np. $> 35\ 000$ lat.

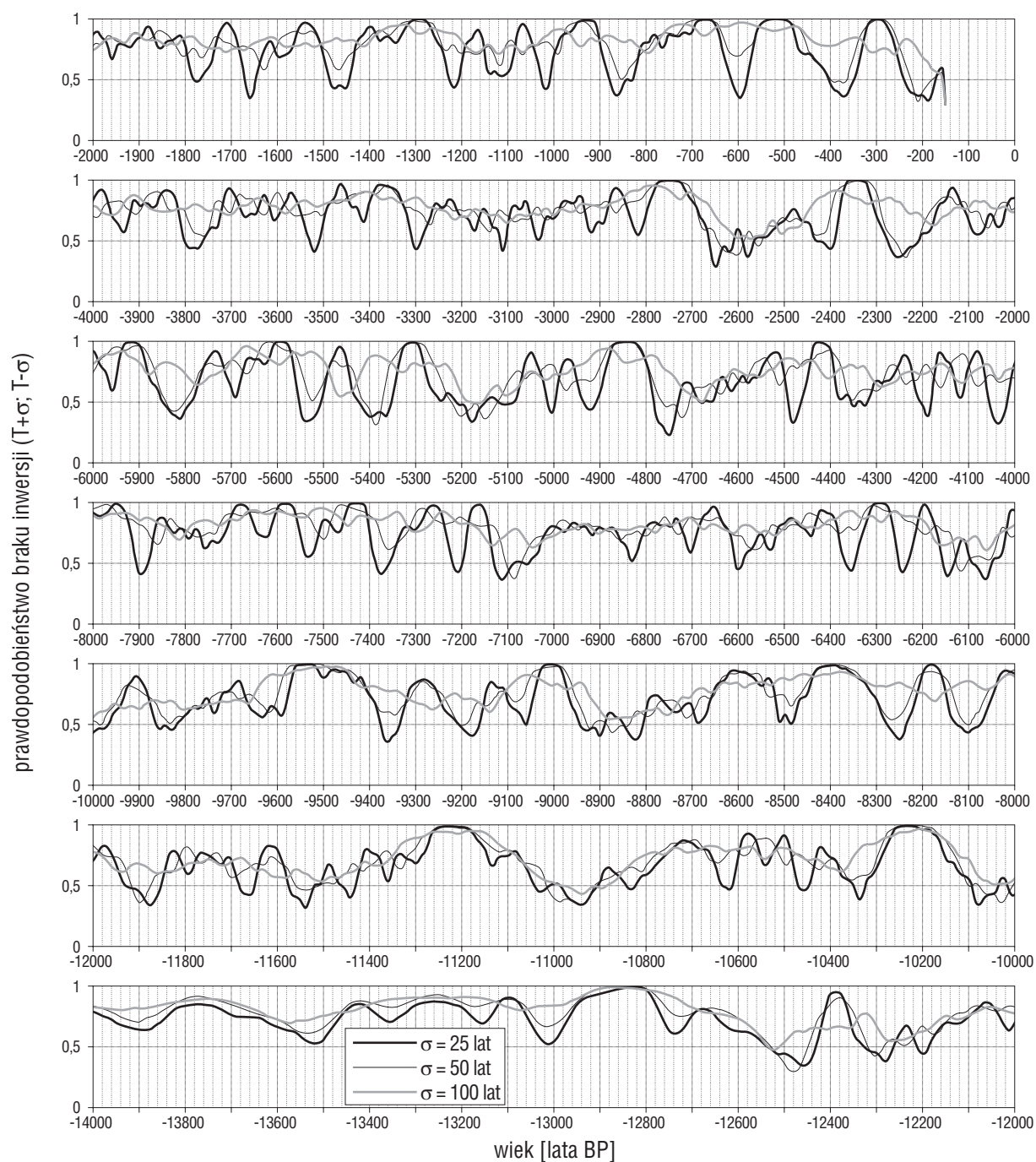
Podobnie jest w pomiarach geochemicznych przy zbyt niskiej koncentracji mierzonego składnika.

Definicja zdolności rozdzielczej metody pomiarowej jest specyficzna dla metody lub grupy metod. Również w przypadku datowań radiowęglowych trzeba się zdecydować na jakąś konkretną definicję. Należy też podkreślić, że będzie chodziło, jak to już było powiedziane na wstępie, o uchwycenie tego, jaki wpływ na wynik datowania ma krzywa kalibracyjna. Dlatego w proponowanym podejściu w pewnym sensie abstrahuje się od błędu pomiarowego koncentracji ^{14}C (chodzi o odchylenie standardowe, czyli σ w tzw. dacie radiowęglowej). Błąd pomiaru koncentracji bywa zależny od typu materiału próbki, ilości dostępnego materiału, oczywiście od zakresu wieku (stare próbki mają koncentrację ^{14}C bliską zeru), ale zależy też od finansowego uzgodnienia z datującym laboratorium. Dlatego w dalszym ujęciu rozdzielczość metody będzie rozpatrywana dla trzech typowych wartości σ .



Ryc. 1. Rozdzielczość metody radiowęglowej (zdefiniowana jako prawdopodobieństwo poprawnej kolejności w czasie dat radiowęglowych próbek o rzeczywistych wiekach różniących się o 2σ , tu $\sigma = 25$ lat) — górny wykres, w porównaniu z krzywą kalibracyjną — dolny wykres. Plateau na krzywej kalibracyjnej skutkują prawdopodobieństwem inwersji dat równym 0,5 — jak w rzucie monetą. Pokazany jest też przykładowy, względnie prosty wynik datowania w postaci funkcji gęstości prawdopodobieństwa i przedziału ufności 95% — 3380–3250 BP (wiek „radiowęglowy” wynosi tu 3100 ± 25). Jak widać z porównania wykresów, zaproponowana krzywa rozdzielczości jest czymś w rodzaju pochodnej krzywej kalibracyjnej

¹Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; walanus@geol.agh.edu.pl



Ryc. 2. Rozdzielczość metody radiowęglowej w funkcji wieku rzeczywistego próbek (prawdopodobieństwo poprawnej kolejności dat próbek o rzeczywistych wiekach różniących się o 2σ). Trzy krzywe odpowiadają trzem wartościom σ — 25, 50 i 100 lat. Na przykład w okolicy wieku 10 200 BP krzywa kalibracyjna poprawia rozdzielczość metody, ale przy 11 000 BP prawdopodobieństwo inwersji czasowej kolejności dat wynosi $\frac{1}{2}$ i jest tak losowe jak rzut monetą

Przed zdefiniowaniem zdolności rozdzielczej warto przypomnieć, że w naukach przyrodniczych, również w geologii, standardowym poziomem istotności jest liczba 0,05 (poziom ufności $1 - 0,05 = 0,95$). Przypadek (?) chce, że odpowiada to niemal dokładnie zakresowi $\pm 2\sigma$ w rozkładzie normalnym (Gaussa). Otóż w metodzie ^{14}C , w czasach przedkalibracyjnych wynik podawano standardowo z błędem $\pm \sigma$ (a niekiedy nadal tak czynią). Dlatego dziś, gdy z gęstości prawdopodobieństwa odczytuje się przedział ufności, istnieje tendencja, by pozostać przy poziomie ufności 0,68, odpowiadającym $\pm 1\sigma$. Jednak taka praktyka, w momencie gdy wynik jest przedziałem ufno-

ści, pozostaje w sprzeczności z ogólnym standardem. Przy tym nie chodzi tu wyłącznie o ideę normalizacji znaczeń, ale również o zdroworozsądkowy sens. Jeżeli pisze się, że wiek próbki mieści się w przedziale 5650–5450, to sformułowanie to można zaakceptować, o ile prawdopodobieństwo, że istotnie tak jest, wynosi 0,95, ale nie, gdy wynosi ono tylko $\frac{2}{3}$.

Przed kalibracją w zwykłych pomiarach technicznych, fizycznych, chemicznych i radiowęglowych (Walanus, 2006) dwie próbki, których rzeczywiste wartości (mierzono parametru) różnią się o 2σ , mogą spowodować inwersję wyników, czyli wynik dla próbki o mniejszej wartości

będzie większy niż wynik pomiaru drugiej próbki. Prawdopodobieństwo inwersji, w takim „normalnym” wypadku wynosi 0,08 ($P(z > 2^{1/2}) = 0,0787$). Innymi słowy, właściwą kolejność, przy dwusigmowej „odległości”, otrzymuje się z prawdopodobieństwem 0,92.

Zapytać można, jak będzie się kształtowało owo prawdopodobieństwo braku inwersji w przypadku datowania dwóch próbek, których rzeczywiste wieki różnią się właśnie o 2σ . Chodzi oczywiście o datowanie metodą radiowęglową, które nie odbywa się dziś inaczej (poza pewnymi, szczególnymi sytuacjami), jak z wykorzystaniem krzywej kalibracyjnej. Załóżmy więc, że dla dowolnego wieku T z przedziału od 15 tysięcy lat do współczesności rzeczywisty wiek pierwszej próbki wynosi $T + \sigma$, a drugiej $T - \sigma$. Sytuacja będzie rozpatrzona dla trzech typowych wartości σ , mianowicie 25, 50 i 100 lat. Na wykresie podane jest, w funkcji T , prawdopodobieństwo P tego, że owe dwie próbki dadzą w datowaniach wyniki (daty radiowęglowe) pozostające we właściwej kolejności: starsza – młodsza (ryc. 2). Gdyby nie krzywa kalibracyjna, wartość P byłaby stała i równa 0,92. Należy pamiętać, że wydobyty jest tu dokładnie aspekt rozdzielczości metody związany z kształtem krzywej kalibracyjnej. Jak widać na wykresie, prawdopodobieństwo P braku inwersji jest z reguły największe dla przypadku $\sigma = 100$ lat, jednak wtedy chodzi o różnicę wieku próbek 200 lat. Krzywa kalibracyjna jest wtedy, w jakimś sensie, wyraźnie wygładzana (gaussowsko). Przypadek $\sigma = 25$ lat, czyli dat bardzo precyzyjnych pomiarowo, doświadcza ze strony kalibracji brutalnej interwencji.

Ciekawa jest sytuacja, np. wokół wieku 2700 lat BP, para próbek starszych zostaje „udoskonalona” — niemal na pewno nie będzie inwersji, jednak para próbek o wieku między 2650 i 2400 BP da inwersję wieku na zasadzie zupełnie losowej, jak w rzucie monetą. Takie niekorzystne strefy czasowe wynikają z istnienia na krzywej kalibracyjnej tzw. *plateau*, związanych z tym, że paleokoncentracja ^{14}C w atmosferze w pewnych okresach malała w czasie. Spadek koncentracji ^{14}C mógł być na przykład taki, jaki

wynikałby z okresu połowicznego zaniku izotopu ^{14}C , wtedy wszystkie próbki z takiego okresu spadku będą dawały ten sam wiek, co oznacza, że rozdzielczość metody radiowęglowej będzie beznadziejna.

Przedstawione na ryc. 2 krzywe rozdzielczości metody radiowęglowej są innym spojrzeniem na kwestię wpływu na datowania krzywej kalibracyjnej. Wydaje się, że jest to podejście bardziej bezpośrednie, bliższe temu, o co pyta użytkownik dat, zastanawiający się nad dokładnością metody w interesującym go przedziale czasowym. Alternatywne podejście do zagadnienia rozdzielczości metody radiowęglowej jest opublikowane w trudno dostępnych materiałach konferencyjnych (Michczyńska i in., 1990), przy czym dotyczy ono oczywiście krzywej kalibracyjnej sprzed dwudziestu lat.

Literatura

- MICHCZYŃSKA D.J., PAZDUR M.F. & WALANUS A. 1989 — Bayesian approach to probabilistic calibration of radiocarbon ages. *PACT*, 29: 69–79.
- MICHCZYŃSKA D.J., MICHCZYŃSKI A. & PAZDUR M.F. 1990 — The resolving power of calibrated radiocarbon dates. [W:] Grodzicki J. (ed.), *El Fenomeno El Nino. A Traves de las Fuentes Arqueologicas y Geologicas, Mision Arq. Andina*, Warszawa.
- REIMER P.J., BAILLIE M.G.L., BARD E., BAYLISS A., BECK J.W., BERTRAND C., BLACKWELL P.G., BUCK C.E., BURR G., CUTLER K.B., DAMON P.E., EDWARDS R.L., FAIRBANKS R.G., FRIEDRICH M., GUILDERSON T.P., HUGHEN K.A., KROMER B., MCCORMAC F.G., MANNING S., BRONK RAMSEY C., REIMER R.W., REMMELE S., SOUTHON J.R., STUIVER M., TALAMO S., TAYLOR F.W., VAN DER PLICHT J. & WEYHENMEYER C.E. 2004 — IntCal04 terrestrial radiocarbon age calibration. *Radiocarbon*, 46: 1029–1058.
- WALANUS A. 2005 — Archeologia awangardą nauk ścisłych. O formie kalibrowanych dat ^{14}C . *Archeologia Polski*, 50: 129–133.
- WALANUS A. 2006 — Groups of too close radiocarbon dates. *Geochronometria*, 25: 5–9.
- WALANUS A. 2009 — Systematic bias of radiocarbon method. *Radiocarbon*, 51: 433–436.
- WALANUS A. & GOSLAR T. 2009 — Datowanie radiowęglowe. Wyd. AGH, Kraków.

Praca wpłynęła do redakcji 25.08.2008 r.

Po recenzji akceptowano do druku 14.09.2009 r.