

Pazdur, Anna / Pazdur, Mieczysław F.

**Problemy tworzenia chronologii
bezwzględnej kultur archeologicznych**

Światowit 39, 83-104

1994

Artykuł został zdigitalizowany i opracowany do udostępnienia w internecie przez **Muzeum Historii Polski** w ramach prac podejmowanych na rzecz zapewnienia otwartego, powszechnego i trwałego dostępu do polskiego dorobku naukowego i kulturalnego. Artykuł jest umieszczony w kolekcji cyfrowej bazhum.muzhp.pl, gromadzącej zawartość polskich czasopism humanistycznych i społecznych.

Tekst jest udostępniony do wykorzystania w ramach
dozwolonego użytku.

PROBLEMY TWORZENIA CHRONOLOGII BEZWZGLĘDNEJ KULTUR ARCHEOLOGICZNYCH

Z bogatego zestawu metod geochronologii izotopowej (zob. np. Geyh, Schleicher, 1990) w badaniach nad chronologią kultur archeologicznych występujących na terenie Polski są wykorzystywane dotychczas tylko nieliczne metody. Dominującą rolę odgrywa oczywiście metoda radiowęglowa, która jest powszechnie stosowana w praktyce od ponad dwudziestu lat. Popularność metody radiowęglowej jako podstawy do tworzenia bezwzględnych skal czasowych wynika z połączenia dwóch sprzyjających okoliczności: powszechnego występowania materiałów organicznych na stanowiskach archeologicznych oraz technicznej dostępności datowań. Liczba datowań radiowęglowych wykonanych na obiektach z terenu Polski prawdopodobnie przekracza obecnie 1500, z czego ponad 1000 zostało wykonanych w Laboratorium Radiowęglowym Instytutu Fizyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Stosunkowo znaczna liczba datowań radiowęglowych nie została dotychczas opublikowana i jest niedostępna dla ogółu zainteresowanych badaczy lub też została opublikowana w formie utrudniającej ich poprawne i pełne wykorzystanie w syntetycznych opracowaniach chronologii kultur archeologicznych. Wielokrotne konsultacje i dyskusje metodyczne, a zwłaszcza doświadczenia zgromadzone podczas realizacji programu badawczego związanego z tworzeniem banku danych datowań radiowęglowych z rejonu Andów Środkowych, prowadzą do wniosku, iż konieczne jest podjęcie usystematyzowanego programu badawczego, którego celem powinno być w pierwszej kolejności upowszechnienie informacji o danych chronologicznych poprzez udostępnienie możliwie pełnego

katalogu wyników datowań, a w dalszej perspektywie stworzenie warunków do prac badawczych o charakterze syntez chronologicznych.

Chronometria radiowęglowa, pomimo jej dominującego znaczenia i powszechnego stosowania, jest jedną z wielu metod datowania bezwzględne, i jak każde z narzędzi badawczych posiada właściwe sobie ograniczenia. Muszą one być brane pod uwagę przy każdej próbie syntezy danych chronologicznych. Równie ważne dla prawidłowego zaplanowania badań zmierzających do syntezy chronologii pradziejów wydaje się rozpatrzenie potencjalnych możliwości zawartych w innych metodach datowania, nawet jeżeli na obecnym etapie gromadzenia danych wyjściowych zasób datowań uzyskanych tymi metodami jest znikomo mały.

Artykuł niniejszy ma za zadanie wprowadzenie zainteresowanych badaczy pradziejów w problematykę datowań izotopowych pod kątem ich przydatności dla syntezy chronologii kultur archeologicznych ze szczególnym uwzględnieniem metody radiowęglowej oraz projektowanego przedsięwzięcia polegającego na stworzeniu banku danych o datowaniach radiowęglowych z terenu Polski. W pierwszej części artykułu przedstawiono skrótową charakterystykę najważniejszych metod izotopowych, które potencjalnie mogą być wykorzystywane bądź to bezpośrednio do datowania zabytków lub stanowisk archeologicznych, bądź też służyć jako narzędzie w badaniach czwartorzędu, a tym samym pośrednio być pomocne przy ustalaniu bezwzględnych skal czasowych o różnych zasięgach. Część druga jest poświęcona omówieniu specyficznych cech chronometrii radiowęglowej, w końcowym rozdziale zaś przedstawiono próbę statystycznej charakterystyki istniejącego zasobu danych radiowęglowych dla obszaru Polski.

ZARYS DOSTĘPNYCH METOD GEOCHRONOLOGII IZOTOPOWEJ

Metoda radiowęglowa

Metoda ta jest od ponad czterdziestu lat fundamentalnym narzędziem w badaniach archeologicznych i geologii młodszego czwartorzędu. W badaniach krajowych jest stosowana powszechnie od lat sześćdziesiątych. Datowania radiowęglowe są wykonywane w trzech

ośrodkach naukowych w Polsce: w Laboratorium ^{14}C Instytutu Fizyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach, w Instytucie Fizyki i Techniki Jądrowej AGH w Krakowie oraz w Muzeum Archeologicznym i Etnograficznym w Łodzi. Ze względu na powszechność stosowania oraz znaczenie tej metody dla badań czwartorzędu zostanie ona szerzej przedstawiona w dalszej części niniejszego artykułu.

Metoda uranowo-torowa

Metoda opiera się na zaburzeniu równowagi promieniotwórczej między izotopami naturalnego szeregu promieniotwórczego uranowo-torowego. W swej klasycznej postaci została opracowana i jest szeroko stosowana do datowania utworów węglanowych, w tym przede wszystkim nacieków jaskiniowych i koralii morskich (Ku, 1976; Ivanovich, Harmon, 1982; Geyh, Schleicher, 1990). W ostatnich latach podjęto – uwieńczone pozytywnymi wynikami – próby zastosowania tej metody do datowania kości kopalnych (Rae, Ivanovich, 1986; Wild, Stefan, 1991; Leitner-Wild, Stefan, 1993), co może mieć istotne znaczenie dla ustalania chronologii bezwzględnej kultur paleolitu. Istnieją poważne przesłanki pozwalające przypuszczać, że w pewnych sprzyjających okolicznościach można uzyskiwać wiarygodne wyniki przy datowaniu torfów (Van der Wijk et al, 1986).

Osady węglanowe, które mogą być przedmiotem datowania metodą uranowo-torową, występują dosyć powszechnie na terenie Polski, przede wszystkim są to nacieki jaskiniowe, których obszar występowania obejmuje przede wszystkim rejon Jury Krakowsko-Częstochowskiej z licznymi stanowiskami paleolitycznymi. Nieliczne dotąd próby wykorzystywania metody uranowo-torowej były podejmowane w ośrodku krakowskim (Duliński, Kuliś, 1989; Duliński, Róžański, 1986) bądź też przy współpracy z zagranicznymi ośrodkami naukowymi (Głazek, 1986; Głazek, Hercman, 1986; Pazdur, Pazdur, 1994), jednakże dotyczyły one wyłącznie datowania nacieków jaskiniowych.

Metoda argonowo-potasowa

Metoda ta, z racji jej wieloletniego powszechnego wykorzystania w badaniach starszych formacji geologicznych, uważana jest często za nieprzydatną dla chronologii kultur archeologicznych. Istota metody polega na powstaniu radiogenicznego izotopu argonu ^{40}Ar wskutek rozpadu promieniotwórczego izotopu potasu ^{40}K . Ze wzglę-

du na bardzo długi czas połowicznego zaniku potasu ^{40}K , wynoszący 1,25 miliardów lat, ilości radiogenicznego argonu wytworzonego w próbkach utworów czwartorzędowych, mających związek z obiektami bądź warstwami kulturowymi, są znikomo małe i ich oznaczenie z zadowalającą dokładnością wymaga zastosowania szczególnie precyzyjnych technik eksperymentalnych. W latach osiemdziesiątych techniki spektrometrii masowej zostały udoskonalone na tyle, że umożliwiają datowanie próbek o wieku kilku tysięcy lat (Jäger et al, 1985; Gillot et al, 1985; Gillot, Cornette, 1986).

Typowymi materiałami stosowanymi w datowaniu metodą argonowo-potasową są skały metamorficzne, bazalty i skały wulkaniczne, a więc utwory nieistotne z punktu widzenia badań archeologicznych, tym niemniej w literaturze przedmiotu są opisane stosunkowo liczne przykłady skutecznego zastosowania metody argonowo-potasowej do datowania skał osadowych. Najbardziej przydatnymi do celów datowania są miki i minerały rodziny glaukonitu/montmorylonitu (Bonhomme, 1982; Odin, 1982). W datowaniu szkliwa wulkanicznego z czwartorzędowych erupcji szczególnie przydatna jest technika argonowo-argonowa, będąca odmianą metody K/Ar (Hall, York, 1984; van den Bogaard et al, 1987).

Metoda argonowo-potasowa nie była dotychczas stosowana w badaniach czwartorzędu w Polsce. Techniczne możliwości jej wprowadzenia zostały stworzone w Zakładzie Spektrometrii Mas Instytutu Fizyki UMCS w Lublinie dzięki pracom S. Hałasasa i jego współpracowników (Hałas, Durakiewicz, 1994; Hałas, Kamiński, 1992).

Metoda termoluminescencji

Datowanie metodą termoluminescencji, wykorzystujące do oznaczania wieku dozymetryczne własności naturalnie występujących minerałów, jest obok metody radiowęglowej powszechnie stosowane w badaniach archeologicznych i w geologii czwartorzędu. Do istotnych zalet metody termoluminescencji (zwanej w skrócie metodą TL) należy znacznie dłuższy niż w metodzie radiowęglowej zasięg datowania, wynoszący około 500 tysięcy lat, oraz możliwość bezpośredniego datowania zabytków (wypalana ceramika, przepalone narzędzia krzemienne), jak również jej stosowalność do datowania osadów mineralnych, znacznie powszechniejszych niż osady organiczne. Ta ostatnia

cecha jest szczególnie ważna dla ustalania chronologii bezwzględnej stanowisk paleolitycznych.

Zastosowanie metody TL do datowania ceramiki zabytkowej praktycznie nie budzi żadnych wątpliwości i jedynym istotnym elementem ograniczającym jej powszechne wykorzystanie jest niezbyt duża dokładność uzyskiwanych dat (rzędu 5–10 procent) oraz koszt datowań. Należy jednak wyraźnie stwierdzić, że wykorzystanie metody TL do oznaczania wieku osadów, pomimo wieloletniego rozwoju metodycznego, budzi liczne kontrowersje, zarówno w środowisku fizyków zajmujących się geochronologią izotopową, jak i wśród odbiorców datowań, tj. w środowisku przyrodników. Powszechnie uważa się, że utwory pochodzenia eolicznego, a zwłaszcza lessy, są idealnym materiałem do datowania metodą TL. Wątpliwości wzbudza możliwość datowania osadów o niepełnym bądź nieokreślonym mechanizmie zerowania uprzednio nabytej dawki, takich jak na przykład utwory fluwioglacjalne czy gliny zwałowe (zob. Bluszcz, 1986a, b; 1988; 1989a).

W latach osiemdziesiątych działały w Polsce cztery laboratoria: warszawskie – zorganizowane w latach siedemdziesiątych i kierowane początkowo przez M. Prószyńskiego, a następnie przez H. Prószyńską-Bordas; lubelskie – zorganizowane na początku lat osiemdziesiątych i kierowane przez J. Butryma; gliwickie – zorganizowane przez A. Bluszcza; gdańskie, zorganizowane i kierowane przez S. Fedorowicza. W ośrodkach tych wykonano znaczne ilości datowań wykorzystywanych w opracowaniach geologicznych i paleogeograficznych. Praktycznie tylko w ośrodku gliwickim były dotychczas wykonywane na potrzeby badań archeologicznych datowania metodą TL.

W wymienionych laboratoriach stosowano znacznie różniące się techniki pomiarowe (zob. Pazdur, 1989). Pomimo długotrwałej dyskusji na łamach pism geologicznych oraz podczas licznych konferencji naukowych, jak również krytyki niektórych aspektów metodycznych (zob. np. Bluszcz, Pazdur, 1985a, b; Pazdur, Bluszcz, 1987), nie udało się jednoznacznie wyjaśnić skali i przyczyn rozbieżności między wynikami datowań uzyskiwanych w poszczególnych laboratoriach. Podjęta przez trzy laboratoria (warszawskie, lubelskie i gliwickie) próba porównawczego wydatowania profilu lessowego w Odonowie nie spełniała warunków testu metodyki stosowanej przez laboratoria biorące udział w tym eksperymencie. Uzyskane wyniki nie mogą być

uważane za rozstrzygające, tym bardziej, że wyniki datowań wykonanych w laboratoriach warszawskim i gliwickim (w których zdaniem autora stosowano jednoznacznie opisaną i poprawną fizycznie metodykę pomiarów) okazały się zgodne ze sobą (Bluszcz, 1989c), odbiegając jednak od dotychczasowych poglądów na chronostratygrafię lessów, wyniki zaś otrzymane w laboratorium lubelskim okazały się zgodne z przewidywaniami stratygraficznymi, lecz zdecydowanie różniły się od wyników pozostałych dwóch laboratoriów.

Podsumowując stan obecny wykorzystania chronometrii termoluminescencyjnej można stwierdzić, że metoda ta znalazła powszechne zastosowanie w badaniach czwartorzędu w Polsce, w tym także w badaniach archeologicznych jako narzędzie datowania ceramiki zabytkowej (Bluszcz, 1989b) oraz przepalonych krzemieni (narzędzi bądź też odpadów powstałych przy ich wytwarzaniu; Guzek et al., 1989). Ze względu na to, że stosowane w praktyce datowania metody eksperymentalne są dalekie od pełnej unifikacji, a przy tym wiele zagadnień dotyczących zarówno metodyki datowań, jak i mechanizmów fizycznych zjawiska termoluminescencji dalekich jest od wyjaśnienia, należy przyjąć, iż wiele wyników datowań powinno być w przyszłości przedmiotem weryfikacji. W konsekwencji można się również liczyć z koniecznością zmian niektórych lokalnych lub regionalnych schematów chronostratygraficznych, zwłaszcza tych bazujących głównie na wynikach datowania metodą termoluminescencji.

Metoda ESR

W tej metodzie do wyznaczenia wieku wykorzystuje się, podobnie jak w metodzie termoluminescencji, własności dozymetryczne ziaren określonego minerału, przy czym wielkość dawki pochłoniętej jest wyznaczana na podstawie natężenia odpowiednio dobranej linii elektronowego rezonansu spinowego. Metoda ESR może być stosowana w zasadzie tylko do utworów węglanowych; biorąc pod uwagę występujące na terenie Polski osady czwartorzędowe oznacza to praktycznie ograniczenie do datowania nacieków jaskiniowych oraz muszli mięczaków. Metoda ESR ma potencjalnie poważne zalety – należy do nich m.in. znacznie większy niż w przypadku metody TL zasięg datowania, oceniany na kilka milionów lat, jednak uzyskiwana dokładność jest z reguły gorsza niż w przypadku metody TL.

Badania nad wykorzystaniem zjawiska elektronowego rezonansu spinowego do celów chronometrycznych są prowadzone w Zakładzie Zastosowań Radioizotopów Instytutu Fizyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach (Bluszcz et al, 1988; Goslar, Hercman, 1988; Brik et al, 1993). Dotychczas były podejmowane stosunkowo nieliczne próby datowania metodą ESR nacieków jaskiniowych z terenu Tatr Zachodnich (Hercman et al; 1987, 1991) oraz Słowacji (Pazdur et al, 1994), z reguły związane z niezależną weryfikacją wyników uzyskanych przy zastosowaniu metody TL bądź metody radiowęglowej. Metoda ESR ma potencjalnie duże możliwości i może stać się źródłem wartościowych informacji chronologicznych, jednakże wymaga dalszych szczegółowych studiów metodycznych.

PRAKTYKA STOSOWANIA CHRONOMETRII RADIOWĘGLOWEJ W BADANIACH ARCHEOLOGICZNYCH

Podstawy fizyczne

Oznaczanie wieku metodą radiowęglą polega na wyznaczeniu zawartości izotopu ^{14}C w badanej próbce i porównaniu jej z zawartością tego izotopu w próbce wzorcowej. Izotop ^{14}C jest jednym z trzech występujących w naturze izotopów węgla; węgiel naturalny zawiera w przybliżeniu około 98,9 procent atomów zwykłego węgla ^{12}C , około 1,1 procent atomów cięższego węgla ^{13}C oraz około 10^{-10} procent najcięższego węgla ^{14}C . Izotop ^{14}C jest nieustannie wytwarzany w górnych warstwach atmosfery przez promieniowanie kosmiczne docierające do Ziemi, a następnie pod postacią dwutlenku węgla podlega procesowi mieszania atmosferycznego, jest absorbowany na powierzchni mórz i oceanów, asymilowany przez rośliny, wraz z pożywieniem wchodzi w skład organizmu ludzkiego oraz organizmów zwierząt. W czasie życia organizmu koncentracja izotopu ^{14}C jest stała, od momentu jego obumarcia (ustania czynności biologicznych) zachodzi stopniowy zanik izotopu ^{14}C , opisywany stosunkowo prostym równaniem, zwanym prawem zaniku promieniotwórczego. Do oznaczeń wieku metodą ^{14}C mogą być zatem używane wszystkie rodzaje szczątków organicznych, zarówno pochodzenia roślinnego, jak i zwierzęcego, pozyskiwane w trakcie prac wykopaliskowych, a ponadto niektóre typy materiałów nieorganicznych.

Zagadnienia techniki i metodyki datowań

Podstawowym parametrem, warunkującym przydatność chronometrii radiowęglowej w badaniach archeologicznych, jest dokładność uzyskiwania dat radiowęglowych. Jest ona determinowana przez cztery podstawowe czynniki:

- 1) związek pobranej do datowania próbki z odpowiednim zdarzeniem z przeszłości, którego wiek należy wyznaczyć,
- 2) zanieczyszczenie materiału próbki substancjami organicznymi bądź nieorganicznymi, zawierającymi węgiel obcego pochodzenia,
- 3) dokładność wyznaczenia koncentracji izotopu ^{14}C w badanej próbce,
- 4) dokładność określenia wartości wieku kalendarzowego odpowiadającego otrzymanemu w drodze pomiaru konwencjonalnemu wiekowi radiowęglowemu (dokładność kalibracji daty radiowęglowej).

Pierwszy z wymienionych czynników może być prawidłowo oceniony jedynie w czasie trwania prac terenowych bądź w trakcie opracowywania materiału pozyskanego z wykopalisk na podstawie zgromadzonej dokumentacji prac terenowych. Czytelnikom zainteresowanym szczegółową analizą związanych z tym zagadnień teoretycznych i praktycznych należy polecić lekturę krytycznych opracowań H.T. Waterbolka (1971, 1983a, b), a także artykuł Jopea (1986) i publikację w „Przeglądzie Archeologicznym” (Pazdur, Pazdur, 1982), jak również zbiór artykułów podsumowujących wyniki badań radiowęglowych wybranych stanowisk z terenu Polski, zawarty w monograficznym zeszycie serii „Geochronometria” (Nr 9, 1994).

Czynnikiem znacznie ograniczającym przydatność i wartość dat radiowęglowych, zwłaszcza w okresie średniowiecza, jest związek datowanej próbki organicznej z konkretnym zdarzeniem historycznym, którego wiek należy ocenić na podstawie datowania metodą ^{14}C . Z omówionych wyżej założeń chronometrii radiowęglowej wynika, że rezultat oznaczenia wieku metodą ^{14}C odnosi się bezpośrednio do momentu obumarcia organizmu żywego, którego są pozostałością datowane szczątki, z których z kolei została pobrana próbka do datowania. Najczęściej datowanymi materiałami organicznymi z wykopalisk archeologicznych są węgle drzewne i drewno. W ocenie wartości dat otrzymanych z takich materiałów należy brać pod uwagę, że moment obumarcia organizmu żywego oznacza rok uformowania kolejnego słoja rocznego przyrostu drzewa. W praktyce do

datowania wykorzystuje się próbki drewna lub węgla drzewnych, o których można przypuszczać, że zawierają od 10 do 100 słoí rocznych przyrostów. W wyniku pomiaru ^{14}C otrzymuje się wartość zbliżoną do średniego wieku konwencjonalnego sekwencji słoí rocznych przyrostów, zawartej w u¿ytej do datowania próbce. Przy datowaniu próbki węgla drzewnych z poziomu stratygraficznego zawierającego pozostałości spalonej osady następstwo czasowe zdarzeń tworzy ciąg: (1) – wzrost drzewa i formowanie kolejnych słoí rocznych przyrostów, (2) – ścięcie drzewa, (3) – zbudowanie osady, (4) – spalenie osady. Istotnymi z punktu widzenia badań archeologicznych są ostatnie dwa zdarzenia w tej sekwencji, chronometria radiowęglowa prowadzi natomiast do oznaczenia daty pewnego momentu czasowego zawartej w przedziale obejmującym wzrost drzewa, a więc zawsze wcześniejszego.

We wspomnianym opracowaniu H.T. Waterbolk, współpracujący przez wiele lat z Laboratorium Radiowęglowym Uniwersytetu w Groningen, wprowadził czterostopniową skalę wiarygodności datowań radiowęglowych, która jest właściwie skalą jakości datowanych próbek, uwzględniającą związek próbki z datowanym zdarzeniem pradziejowym.

Skażenie próbki może wystąpić w czasie zalegania szczątków organicznych w gruncie, jeszcze przed rozpoczęciem prac wykopaliskowych, wskutek infiltracji rozpuszczonych w wodzie gruntowej związków chemicznych, penetracji korzonków roślin, działalności zwierząt ryjących nory i przemieszczających szczątki organiczne, a w przypadku wielowarstwowych stanowisk archeologicznych także w wyniku nałożenia się i przemieszania oryginalnych warstw kulturowych. Z pewnym uproszczeniem można twierdzić, że skażenia typu chemicznego, a więc mające postać prostych związków chemicznych, są w całości bądź też w znacznym stopniu, usuwalne w trakcie obróbki laboratoryjnej, natomiast domieszki mechaniczne obcej materii organicznej są bardzo trudne do rozpoznania i z reguły powodują skutki nieodwracalne, prowadząc do fałszywych wyników oznaczeń laboratoryjnych. Dla uniknięcia nieodwracalnego skażenia próbki należy zapewnić takie warunki pobierania i przechowywania próbek, w których nie będzie możliwe mechaniczne domieszanie obcych substancji organicznych. Próbki przeznaczone do datowania metodą ^{14}C powinny być przechowywane, po uprzednim wysuszeniu, w szczelnie zamkniętych pojemnikach szklanych lub metalowych lub czys-

tych i wytrzymałych workach z folii polietylenowej z umieszczonymi na zewnątrz etykietami. Dopuszczalne jest płukanie lub przemywanie w terenie lub w laboratorium przy użyciu wody, natomiast bezwzględnie należy unikać umieszczania próbek w papierowych kopertach, pudełkach kartonowych itp. oraz wkładania do pojemnika z próbką papierowych etykiet. Oddzielnym problemem są skażenia powstałe wskutek stosowania substancji konserwujących; próbki poddane zabiegom konserwacyjnym przy użyciu odczynników organicznych nie powinny być wykorzystywane do datowania metodą ^{14}C . W szczególnych wypadkach datowanie takich próbek jest możliwe, wymaga jednak wykonania pracochłonnych (i nie zawsze w pełni skutecznych) operacji ekstrakcji środków konserwujących. W każdym takim przypadku do standardowego opisu należy dołączyć szczegółowy opis sposobu konserwacji wraz z wykazem użytych chemikaliów.

Dokładność wyznaczenia zawartości izotopu ^{14}C w datowanej próbce zależy bezpośrednio od rodzaju i wielkości próbki oraz od jakości stosowanej aparatury pomiarowej, a pośrednio od zawartości i stanu zachowania substancji organicznej w przekazanej do datowania próbce. Każda próbka jest poddawana w laboratorium procesowi chemicznego usuwania zanieczyszczeń (zob. np. Pazdur et al, 1986) poprzez działanie na nią roztworami kwasu solnego (w celu usunięcia węglanów) oraz zasady sodowej (w celu usunięcia związków organicznych pochodzących z procesów rozkładu materii organicznej). W trakcie tych czynności występują nieuniknione straty materiału, które mogą być znaczne w przypadku próbek o złym stanie zachowania.

W laboratorium ^{14}C w Gliwicach wykonuje się oznaczenia wieku wszystkich rodzajów substancji organicznych, napotkanych w praktyce badań archeologicznych, a ponadto wielu typów materiałów nieorganicznych, zawierających węgiel. Masy próbek różnego typu substancji organicznych niezbędne do wykonania oznaczenia wieku z zadaną dokładnością są zestawione w tabeli 2. Pod względem możliwej do uzyskania dokładności wykonywane datowania można podzielić na cztery grupy:

- 1) Datowania o podwyższonej dokładności. Błąd laboratoryjny oznaczenia wieku wynosi około 25 lat, niekiedy może być nieco większy. Datowania tego typu mogą być wykonywane jedynie na próbkach drewna, węgla drzewnych lub zwęglonych nasion o dobrym

Tabela 1

Ważniejsze metody mające zastosowanie do datowania utworów czwartorzędowych i stanowisk archeologicznych

Lp.	Metoda	Zastosowanie	Zakres wieku
1	C ₁₄	Szczałki i osady organiczne, osady węglanowe	do 50 000 lat
2	U/Th	Osady węglanowe, torfy i kości	do 500 000 lat
3	K/Ar	Skały wulkaniczne, metamorficzne, osady (?)	powyżej 5 000 lat
4	TL	Osady, ceramika	do 500 tys. lat
5	ESR	Osady węglanowe	do kilku milionów lat

Tabela 2

Masa próbki (w gramach) niezbędna do wykonania oznaczenia wieku o zadanej dokładności

Lp.	Próbka	Wersja datowania		
		A	B	C
1	Drewno	100	30	10
2	Węgle drzewne	30	10	5
3	Torf	–	100	20
4	Nasiona (zwęglone)	30	10	5
5	Kości	–	500	250

Objaśnienia:

A – datowanie o podwyższonej dokładności (błąd ± 25 lat)

B – datowanie standardowe (błąd ± 50 lat)

C – datowanie na minilicznikach (błąd ± 100 lat)

stanie zachowania i odpowiednio dużej masie (por. tabela 2). Liczba możliwych do wykonania datowań wynosi około 50 rocznie.

2) Datowania o standardowej dokładności; błąd oznaczenia wieku od 50 do 70 lat, w zależności od wielkości i wieku próbki. Liczba wykonywanych rocznie datowań wynosi około 250.

3) Datowania na minilicznikach z dokładnością 100–150 lat, w szczególnie ważnych przypadkach jest możliwe uzyskanie dokładności 70–80 lat (jedynie w przypadku próbek o wieku nie przekraczającym 3–4 tys. lat).

4) Datowania z zastosowaniem rozcieńczenia izotopowego; błąd wyznaczenia wieku z reguły większy niż 150 lat.

Spośród licznej grupy materiałów nieorganicznych do datowania radiowęglowego stosowane bywają nacieki jaskiniowe, które dają z reguły wiarygodne oceny wieku w przypadku badania paleolitycz-

nych stanowisk jaskiniowych, a także muszle mięczaków morskich (zob. np. Goslar, Pazdur, 1985a, b) oraz muszle ślimaków środowiska lądowego. Jako całkowicie nieprzydatne przy określaniu chronologii stanowisk archeologicznych należy uznać wyniki oznaczeń wieku wykonywanych przy wykorzystaniu próbek osadów jeziornych, osadów martwicowych, różnego typu konkrecji węglanowych (np. tzw. kukiełek lessowych) oraz muszli mięczaków słodkowodnych. Powodem nieprzydatności tego typu utworów jest zjawisko tzw. efektu rezerwarowego (efekt twardej wody – ang. hard-water effect), polegające na zaniżeniu koncentracji izotopu ^{14}C w węglanach rozpuszczonych w wodzie, a także w żyjących w środowisku wodnym roślinach, ślimakach, małżach itp. W wyniku tego efektu daty radiowęglowe uzyskane na materiałach wymienionej grupy są postarzone o pewną, z reguły nieznaną wartość, zwaną wiekiem pozornym. Wartość wieku pozornego zawiera się zwykle w granicach od ok. 500 lat do ok. 2500 lat, niekiedy jednak może wynosić i 5000 lat (Pazdur, Pazdur, 1986; Pazdur A., 1988). Wyznaczenie wartości wieku pozornego dla określonego zbiornika czy środowiska sedymentacyjnego jest niekiedy możliwe (np. w przypadku datowania słodkowodnych martwic wapiennych – A. Pazdur, 1988). Stosunkowo liczne w ostatnich latach są przypadki datowania skorup jaj oraz zaprawy wapiennej (Van Strydonck et al, 1986), a przeprowadzone porównania wykazują dużą wiarygodność wyników. Kilkuletnie badania prowadzone przez zespół laboratorium radiowęglowego Uniwersytetu w Lyonie (Gabasio et al, 1986) doprowadziły do opracowania i zweryfikowania metodyki datowania szczątków ceramiki na podstawie zawartej w nich materii organicznej. Istotnym ograniczeniem jest wyjściowa masa próbki, która powinna wynosić nie mniej niż jeden kg.

Do szczególnie ważnych osiągnięć chronometrii radiowęglowej w dekadzie lat osiemdziesiątych należy niewątpliwie opanowanie i upowszechnienie techniki datowania mikropróbek z wykorzystaniem akceleratorów (tzw. metoda AMS). Oznaczenia wieku tą techniką wymagają próbek o całkowitej zawartości węgla wynoszącej około 1–2 mg, co odpowiada 4–5 miligramom typowych szczątków roślinnych, a uzyskiwana dokładność oznaczeń wieku jest porównywalna z dokładnością dostępną przy stosowaniu klasycznych technik pomiarowych (Vogel et al, 1989). Można w ten sposób wykonywać datowania pojedynczych ziaren zbóż, niewielkich fragmentów obiektów o dużej wartości zabytkowej bez konieczności ich znaczącego uszkodzenia

a nawet śladów krwi na prahistorycznych narzędziach krzemiennych (Nelson et al, 1986). Podstawową wadą tej techniki jest ogromny koszt instalacji i eksploatacji urządzenia pomiarowego (koszt instalacji wynosi około 5 mln USD), co powoduje, że koszt pojedynczego oznaczenia wieku wynosi od 500 do 1500 USD. W Europie działa obecnie kilka ośrodków wyposażonych w aparaturę do datowania metodą AMS: w Szwajcarii (ETH, Zurich, Prof. W. Woelfli), w Wielkiej Brytanii (Uniwersytet w Oksfordzie, Dr R.E.M. Hedges), we Francji (CNRS-CEA, Gif-sur-Yvette, Prof. J.C. Duplessy), w Szwecji (Uniwersytet w Upsali, Dr G. Possnert), w Holandii (Uniwersytet w Groningen, Dr J. van der Plicht), a kilka innych ośrodków jest w trakcie uruchamiania. Postęp w zakresie techniki akceleratorowej w ostatnich kilku latach (zob. np. Beukens, 1992; Hedges, 1992) doprowadził do dalszego zmniejszenia wielkości próbek wymaganych do wykonania oznaczenia wieku; w kilku ośrodkach badawczych istnieją możliwości datowania próbek o masie zbliżonej do 0,1 miligramu. Pozwala to na znaczne poszerzenie możliwości metody zwłaszcza w przypadku badania stanowisk paleolitycznych i mezolitycznych, gdzie często jedynymi stosunkowo dobrze zachowanymi i wiarygodnymi znaleziskami są szczątki kostne. Wymagania klasycznej wersji metody radiowęglowej w stosunku do próbek kości (około pół kilograma próbki; por. tabela 2) były możliwe do spełnienia tylko w nielicznych przypadkach.

Kalibracja radiowęglowej skali czasu

Powszechnie wiadomo, że konwencjonalny wiek radiowęglowy, wyznaczony na podstawie pomiaru zawartości izotopu ^{14}C w badanej próbce, różni się od wieku kalendarzowego. Przyczyna tych różnic jest całkowicie zewnętrznej natury, jest ona związana z procesami klimatycznymi geofizycznymi i astrofizycznymi w przeszłości. Z punktu widzenia ustalania chronologii bezwzględnej obiektów archeologicznych ważna jest w zasadzie jedynie znajomość zależności między konwencjonalną radiowęglową skalą czasu a czasem rzeczywistym, jaki upłynął od określonego zdarzenia prahistorycznego, wyrażanym w latach kalendarzowych (astronomicznych). W rezultacie wieloletnich prac nad skalami dendrochronologicznymi oraz systematycznego, coraz bardziej dokładnego, datowania próbek o znanym wieku kalendarzowym precyzyjne krzywe kalibracyjne, sięgające

około 6 tysięcy lat BP (Stuiver, Pearson, 1986; Pearson, Stuiver, 1986; Pearson et al, 1986), zostały w ostatnich latach przedłużone i pokrywają obecnie około 10 tysięcy lat. Opracowano także metody wyznaczania wieku kalendarzowego odpowiadającego konkretnym wartościom konwencjonalnego wieku radiowęglowego, uwzględniające zarówno dokładność daty konwencjonalnej, jak i skomplikowany kształt krzywej kalibracyjnej (Pazdur, Michczyńska, 1989; Michczyńska, Pazdur, 1989). Równoczesne datowanie utworów koralowych z Barbadosu metodami ^{14}C i U/Th doprowadziło do przybliżonego wyznaczenia przebiegu krzywej kalibracyjnej w przedziale czasu sięgającym do około 30 tysięcy lat BP (Bard et al, 1990). Uszczegółowienia tej krzywej w przedziale czasowym obejmującym późny paleolit i mezolit można spodziewać się w najbliższych latach w rezultacie postępu prac nad chronologią osadów laminowanych jeziora Gościąż na Pojezierzu Gostyńskim (Goslar et al, 1989).

CHRONOMETRIA RADIOWĘGLOWA W BADANIACH ARCHEOLOGICZNYCH W POLSCE

Pierwsze oznaczenia wieku metodą radiowęgla w Polsce wykonał Mościcki na początku lat pięćdziesiątych (Mościcki, 1953), jednak systematyczne prace pomiarowe zostały podjęte dopiero w latach sześćdziesiątych w Gdańsku (Mościcki, Zastawny, 1962; Mościcki et al, 1967). Rozwiniętą na szeroką skalę działalność naukową w zakresie chronometrii radiowęglowej zapoczątkowano przeniesieniem gdańskiego laboratorium radiowęglowego do Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Z początkiem lat siedemdziesiątych, po uruchomieniu Laboratorium ^{14}C w Gliwicach, rozpoczęto zarówno rutynowe oznaczenia wieku materiałów pozyskiwanych w trakcie prac terenowych, jak też systematyczne doskonalenie metodyki datowań i stosowanej aparatury pomiarowej, prowadzące do stopniowego zwiększania liczby wykonywanych rocznie oznaczeń wieku oraz wzrostu ich precyzji.

W połowie lat siedemdziesiątych rozpoczęły działalność dwa inne laboratoria radiowęglowe: krakowskie – zlokalizowane w Międzyresortowym Instytucie Fizyki i Techniki Jądrowej Akademii Górniczo-Hutniczej, specjalizujące się głównie w badaniach hydrogeologicznych, oraz łódzkie – zorganizowane w Muzeum Archeologicznym

i Etnograficznym, wykonujące przede wszystkim datowania na potrzeby badań archeologicznych (Kanwiszer, Trzeciak, 1984, 1986).

W czasie ponad dwudziestoletniej działalności Laboratorium ^{14}C w Gliwicach datowania radiowęglowe wykonywane na potrzeby badań archeologicznych stanowiły z reguły niewielką część wykonywanych rocznie analiz. Udział datowań obiektów archeologicznych ulegał znacznym zmianom w różnych okresach, nigdy jednak nie przekraczał 25 procent. W roku 1992 łączna liczba datowań, wykonanych na próbkach pochodzących ze stanowisk archeologicznych z terenu Polski przekroczyła 1000, włączając datowania obiektów muzealnych oraz luźnych znalezisk. Dodatkowym uzasadnieniem, odwołującym się do spojrzenia w przyszłość, jest fakt, iż przy aktualnej wydajności laboratorium, wynoszącej blisko 500 datowań rocznie, podwojenie czy nawet potrojenie tej liczby jest możliwe w horyzoncie czasowym kilku lat, oczywiście pod warunkiem odpowiedniego ukierunkowania programów badawczych i dostępności środków finansowych.

Zestawienie statystyczne wykonanych datowań z podziałem na grupy, obejmujące główne jednostki chronologiczne, przedstawiono w tabeli 3. Przeprowadzony dla celów czysto statystycznych podział ma charakter orientacyjny. Należy zaznaczyć, że stanowisk wielokulturowych wymienionych w tabeli 3 nie rozdzielano, lecz zaliczano do jednej z wymienionych grup, z reguły do grupy wcześniejszej lub do grupy reprezentowanej przez większość datowanych próbek z danego stanowiska. Sytuacja taka dotyczy zwłaszcza stanowisk obejmujących warstwy kulturowe z epoki żelaza i wczesnego średniowiecza.

Tabela 3

Datowania radiowęglowe wykonane w Laboratorium ^{14}C w Gliwicach

Lp.	Okres	Liczba		Udział procentowy		W
		stanowisk	dat	stanowisk	dat	
1	Paleolit/mezolit	27	159	11,2	15,2	5,89
2	Neolit	69	263	28,8	25,0	3,81
3	Epoka brązu	21	82	8,8	7,8	3,90
4	Epoka żelaza	38	212	15,8	20,2	5,58
5	Średniowiecze	95	318	39,6	30,3	3,35
6	Nieokreślony		16		1,5	
	Razem	240	1050	100,0	100,0	

W rezultacie wymienione w tabeli 3 liczby odnoszące się do średniowiecza obejmują jedynie te stanowiska, na których odkryto wyłącznie średniowieczne warstwy kulturowe.

W kolejnych kolumnach tabeli 3 podano liczby stanowisk, z których pochodzą datowane próbki, oraz liczby wykonanych datowań wraz z odpowiednimi udziałami procentowymi. Dodatkowy wskaźnik zamieszczony w ostatniej kolumnie tabeli, zdefiniowany jako iloraz liczby datowań do liczby stanowisk, określa przeciętną liczbę wydатовanych próbek przypadającą na jedno stanowisko.

Jak wynika z danych zawartych w tabeli 3 dominujący udział w wykonanych datowaniach mają stanowiska średniowieczne (blisko 40 procent), z których pochodzi ponad 30 procent ogólnej liczby datowanych próbek. Tak wysoki udział datowań związanych z obiektami średniowiecznymi jest zrozumiałą, gdyż obiekty te są bardzo liczne i stosunkowo dobrze zachowane, a ponadto z reguły zawierają znaczne ilości różnorodnych substancji organicznych nadających się do datowania metodą radiowęglową. Zdecydowaną okolicznością jest natomiast znaczne rozproszenie datowań. Średnia liczba dat przypadających na jedno stanowisko średniowieczne wynosi tylko 3,35. Jest to wartość najniższa, a jeżeli pominąć wszechstronnie wydатовany zespół stanowisk średniowiecznych w rejonie Wolina, otrzymuje się jeszcze niższy wskaźnik, wynoszący 2,9 datowań na jedno stanowisko. Wartość ta jest dwukrotnie niższa od wyliczonego w analogiczny sposób wskaźnika dla stanowisk paleolitycznych i mezolitycznych.

Powszechnie akceptowany jest pogląd, że wysoką wartość naukową mają serie datowań wykonane na materiale pochodzącym z pewnej sekwencji stratygraficznej w obrębie badanego stanowiska. Datowania takie umożliwiają między innymi wewnętrzną weryfikację wyników. Spośród 240 stanowisk archeologicznych wymienionych w tabeli 3 tylko co dziesiąte ma serię co najmniej dziesięciu dat. Wykaz takich stanowisk, datowanych w laboratorium gliwickim, przedstawiono w tabeli 4.

Oprócz wymienionych w tabeli 4 stanowisk znaczące serie datowań dla ważnych stanowisk archeologicznych otrzymano w laboratorium łódzkim (Kanwiszer, Trzeciak, 1984, 1986). Stanowiska te są wymienione w tabeli 5. Ponadto kilka ważnych stanowisk było datowanych przez laboratoria zagraniczne. Do stanowisk tych należą

Tabela 4

Wykaz stanowisk archeologicznych datowanych w Laboratorium ^{14}C w Gliwicach o największej liczbie dat

Lp.	Okres	Stanowisko	Liczba lat
1	Paleolit/mezolit	Dudka	24
		Całowanie	23
		Rydno	16
		Tłokowo	15
2	Neolit	Krzemionki	26
		Opatowice	22
		Gródek Nadbużański	16
		Sandomierz	16
		Dęby	10
		Boguszewo	10
3	Epoka brązu	Iwanowice	11
		Ożarów	10
4	Epoka żelaza	Biskupin	39
		Haćki	34
		Warszkowo	26
5	Średniowiecze	Wolin Stare Miasto	31
		Wolin Przedmieście	12
		Podeblocie	17
		Puck	15
		Gronowo	13
		Czersk	12
		Wyszogród Drwały	11

Tabela 5

Wykaz stanowisk archeologicznych datowanych w Laboratorium ^{14}C
Muzeum Archeologicznego i Etnograficznego w Łodzi o największej liczbie dat

Lp.	Okres	Stanowisko	Liczba lat
1	Paleolit/mezolit	Łykowe	13
2	Neolit	Brześć Kujawski	20
3	Epoka żelaza	Zawada	9
		Przywóz	11
		Stobnica	11
4	Średniowiecze	Rękoraj	9

Całowanie i Rydno, datowane przez laboratorium Uniwersytetu w Groningen, oraz Bronocice (27 datowań wykonanych w Laboratorium DICARB Radioisotope Company w USA).

BIBLIOGRAFIA

- Bard E., Hamelin B., Fairbanks R.G., Zindler A., 1990: *Calibration of the ^{14}C timescale over the past 30 000 years using mass spectrometric U-Th ages from Barbados corals*. „Nature”, t. 345, s. 405–410
- Beukens R.P., 1992: *Radiocarbon accelerator mass spectrometry: background, precision and accuracy*. [W:] Taylor R.E., Long A., Kra R.S. (eds.): „Radiocarbon After Four Decades. An Interdisciplinary Perspective”. Springer, Berlin, s. 230–239
- Bluszcz A., 1986a: *Podstawy datowania osadów metodą termoluminescencji*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, seria mat.-fiz., zeszyt 46, „Geochronometria” Nr 1, s. 147–158
- Bluszcz A., 1989a: *Thermoluminescence sensitivity changes of mineral grains after optical bleaching*. Quaternary Sci., Rev., t. 7, s. 321–323
- Bluszcz A., 1989a: *Wpływ przemrażania na termoluminescencję ziaren minerałów w glinach*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, seria mat.-fiz., zeszyt 61, „Geochronometria” Nr 6, s. 213–218
- Bluszcz A., 1989b: *Datowanie ceramiki metodą termoluminescencyjną*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, seria mat.-fiz., zeszyt 61, „Geochronometria” Nr 6, s. 193–201
- Bluszcz A., Pazdur M.F., 1985a: *Propozycja ujednoczenia sposobu podawania i cytowania wyników datowania osadów metodą TL*. „Przegląd Geologiczny”, t. 33, s. 277–281
- Bluszcz A., Pazdur M.F., 1985b: *Comparison of TL and ^{14}C dates of young eolian sediments – a check of zeroing assumption*. „Nuclear Tracks”, t. 10, s. 703–710
- Bluszcz A., Pazdur M.F., 1986: *TL and ^{14}C dating of the Upper Palaeolithic site at Wadi Kubbanija, Egypt*. „Acta Interdisciplinaria Archeologica”, t. 4, s. 97–105
- Bonhomme M.G., 1982: *The use of Rb-Sr and K-Ar dating methods as a stratigraphic tools applied to sedimentary rocks and minerals*. „Precambrian Res.”, t. 18, s. 5–25
- Brik A.B., Saduev N., Pawlyta J., Pazdur A., Pazdur M.F., 1993: *Dynamical characteristics of paramagnetic centers in speleothems from selected caves in Bulgaria, Turkey and Poland*. [W:] Gaigalas A. (ed.), „Geochronological and isotope – geochemical investigations. Abstracts 10th conference”, Vilnius Univ., Vilnius, s. 74

- Duliński M., Kuliś J., 1989: *Najnowsze wyniki datowań metodą $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ oraz analiz koncentracji izotopów stabilnych w naciekach kalcytowych z jaskiń południowo centralnej Polski*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, seria mat.-fiz., zeszyt 61, „Geochronometria” Nr 6, s. 265–276
- Duliński M., Rózański K., 1986: *Datowanie kontynentalnych osadów węglanowych metodą stosunków $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$, $^{231}\text{Pa}/^{235}\text{U}$, $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$ – uwagi metodyczne*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, seria mat.-fiz., zeszyt 47, „Geochronometria” Nr 2, s. 67–76
- Gabasio M., Evin J., Arnal G.B., Andrieux P., 1986: *Origins of carbon in potsherds*. „Radiocarbon”, t. 28, s. 711–718
- Geyh M.A., Schleicher H., 1990: *Absolute Age Determination. Physical and Chemical Dating Methods and Their Applications*. Springer, Berlin
- Gillot P.-Y., 1985: *K-Ar Upper Pleistocene dating*. „Terra Cognita”, t. 5, s. 234
- Gillot P.-Y., Cornette Y., 1985: *The Cassinogol technique for potassium-argon dating, precision and accuracy: examples from the late Pleistocene to recent volcanics from Southern Italy*. Chem. Geol. Isot. Geosci. Sect., t. 59, s. 205–222
- Głazek J., 1986: *Wyniki datowań nacieków jaskiniowych z terenu Polski metodą $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$* . „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, seria mat.-fiz., zeszyt 47, „Geochronometria” Nr 2, s. 55–65
- Głazek J., Hercman H., 1986: *Metoda $^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ datowania osadów węglanowych i jej rola w geologii czwartorzędu*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, seria mat.-fiz., zeszyt 47, „Geochronometria” Nr 2, s. 39–53
- Goslar T., Pazdur M.F., 1985a: *Contamination studies on mollusk shell samples*. „Radiocarbon”, t. 27, s. 33–42
- Goslar A., Pazdur M.F., 1985b: *Datowanie muszli metodą ^{14}C – postępy i problemy*. „Kwartalnik Geologiczny”, t. 29, s. 459–472
- Grün R., 1988: *Die ESR-Alterbestimmungsmethode*. Springer, Berlin
- Grün R., 1989: *Electron spin resonance (ESR) dating*. „Quaternary International”, t. 1, s. 65–109
- Guzek J., Bluszcz A., Pazdur M.F., 1989: *Datowanie paleolitycznych narzędzi krzemianych metodą termoluminescencyjną*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, seria mat.-fiz., zeszyt 61, „Geochronometria” Nr 6, s. 291–299
- Hall C.M., York D., 1984: *The applicability of $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating to young volcanics*. [W:] Mahaney W.C. (eds.): „Quaternary Dating Methods, Elsevier”, Amsterdam, s. 67–74
- Hałas S., Kamiński A., 1992: *Lubelska aparatura do datowania minerałów metodą K-Ar*. [W:] Materiały V Konferencji „Analityka w służbie geologii”, PIG, Warszawa, s. 35–36

- Hałas S., Durakiewicz T., 1994: *Ultra - high vacuum instrumentation for potassium - argon dating of minerals*. [W:] Jędrysek M.O. (eds.): „Isotope Workshop II. Extended Abstracts”, Wrocław, s. 52-58
- Hedges R.E.M., 1992: *Sample treatment strategies in radiocarbon dating*. [W:] Taylor R.E., Long A., Kra R.S. (eds.): „Radiocarbon After Four Decades. An Interdisciplinary Perspective”, Springer, Berlin, s. 165-183
- Hercman H., 1991: *Rekonstrukcja elementów środowiska geologicznego Tatr Zachodnich na podstawie datowania izotopowego nacieków jaskiniowych*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, seria mat.-fiz., zeszyt 66, „Geochronometria” Nr 8, s. 3-139
- Ivanovich M., Harmon R.S. (eds.), 1982: *Uranium Series Disequilibrium. Applications to Environmental Problems*. „Clarendon Press”, Oxford
- Jäger E., Ji C.W., Hurford A.J., Xin L.R., Hunziker J.C., Ming L.D., 1985: *BB-6: A Quaternary age standard for K-Ar dating*. Chem. Geol. Isot. Geosci. Sect., t. 52, s. 275-279
- Jope E.M., 1986: *Sample credentials necessary for meaningful high-precision ^{14}C dating*. „Radiocarbon”, t. 28, s. 1060-1064
- Kanwiszer A., Trzeciak P., 1984: *Łódź radiocarbon dates I*. „Radiocarbon”, t. 26, s. 111-126
- Kanwiszer A., Trzeciak P., 1986: *Łódź radiocarbon dates II*. „Radiocarbon”, t. 28, s. 1102-1109
- Kra R.S., 1988: *Updating the past: The establishing of the International Radiocarbon Data Base*. „American Antiquity”, t. 53, s. 118-125
- Ku T.L., 1976: *The uranium - series methods of age determination*. „Annual Rev. Earth Planetary Sci.”, t. 4, s. 347-379
- Leitner-Wild E., Stefan I., 1993: *Uranium - series dating of fossil bones from alpine caves*. „Archaeometry”, t. 35, s. 137-146
- Mamzer H., Pazdur M.F., 1984: *A chronology of the metallurgic site in Psary, Leszno voivodship, in the light of ^{14}C dating*. „Archaeologia Polona”, t. 23, s. 67-85
- Michczyńska D.J., Pazdur M.F., 1989: *Probabilistyczna kalibracja dat radiowęglowych*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria mat.-fiz., „Geochronometria” Nr 6, s. 37-60
- Mościcki W., Zastawny A., 1962: *Gdańsk ^{14}C laboratory measurement*. „Acta Phys. Polon.”, t. 22, s. 189-193
- Mościcki W., Bujko W., Dutkiewicz A., Zastawny A., 1967: *Gdańsk ^{14}C laboratory measurements*. „Acta Phys. Polon.”, t. 32, s. 39-43
- Mościcki W., Zastawny A., 1976: *Gliwice (Gdańsk) radiocarbon dates III*. „Radiocarbon”, t. 18, s. 50-59
- Mościcki W., Pazdur A., Pazdur M.F., Zastawny A., 1978: *Gliwice radiocarbon dates IV*. „Radiocarbon”, t. 20, s. 405-415

- Nelson D.E., Loy T.H., Vogel J.S., Southon J.R., 1986: *Radiocarbon dating of blood residues on prehistoric stone tools*. „Radiocarbon”, t. 28, s. 170-174
- Nowaczyk B., Pazdur A., Pazdur M.F., Awiśnik R., 1985: *Startygrafia i warunki rozwoju wydmy w Pomorsku koło Sulechowa w świetle nowych badań*. „Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią”, t. 35A, s. 103-127
- Odin G.S., 1982: *How to measure glaucony ages*. [W:] Odin G.S. (eds.): „Numerical Dating in Stratigraphy”, Part I, Wiley, New York, s. 387-403
- Pazdur A., 1988: *The relations between carbon isotope composition and apparent age of freshwater tuffaceous sediments*. „Radiocarbon”, t. 30, s. 7-18
- Pazdur A., Awiśnik R., Bluszcz A., Pazdur M.F., Walanus A., Zastawny A., 1982: *Gliwice radiocarbon dates VII*. „Radiocarbon”, t. 24, s. 171-181
- Pazdur A., Pazdur M.F., 1992: *Chronometria radiowęglowa jako metoda badawcza w archeologii*. „Przegląd Archeologiczny”, t. 30, s. 5-45
- Pazdur A., Pazdur M.F., 1986: *¹⁴C dating of calcereous tufa sediments from different environments*. „Radiocarbon”, t. 28, s. 534-538
- Pazdur A., Pazdur M.F., Hercman H., Górny A., Olszewski M., 1994: *Wstępne wyniki badań nad chronologią powstawania nacieków w jaskiniach Wyżyny Krakowsko-Wieluńskiej*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej”, seria mat.-fiz., „Geochronometria” Nr 10
- Pazdur A., Pazdur M.F., 1994: *Isotopic studies of speleothems from Cracow-Wieluń Upland*. [W:] Jędrysek M.O. (eds.): „Isotope Workshop II. Extended Abstracts”, s. 114-116
- Pazdur A., Pazdur M.F., Zastawny A., 1979: *Gliwice radiocarbon dates V*. „Radiocarbon”, t. 21, s. 165-170
- Pazdur M.F., Awiśnik R., Bluszcz A., Pazdur A., Walanus A., Zastawny A., 1982: *Gliwice radiocarbon dates VIII*. „Radiocarbon”, t. 24, s. 182-193
- Pazdur M.F., Awiśnik R., Bluszcz A., Pazdur A., Walanus A., Zastawny A., 1983: *Gliwice radiocarbon dates IX*. „Radiocarbon”, t. 25, s. 843-866
- Pazdur M.F., Awiśnik R., Bluszcz A., Goslar T., Pazdur A., Walanus A., Zastawny A., 1985: *Gliwice radiocarbon dates X*. „Radiocarbon”, t. 27, s. 52-73
- Pazdur M.F., Michczyńska D.J., 1989: *Improvement of the procedure for probabilistic calibration of radiocarbon dates*. „Radiocarbon”, t. 31, s. 824-832
- Pazdur A., Pazdur M.F., Awiśnik R., Goslar T., 1986: *Metody preparatyki wstępnej próbek przeznaczonych do pomiarów radiowęglu*. „Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, seria mat.-fiz., Nr 2, s. 101-107
- Pazdur A., Pazdur M.F., Zastawny A., 1980: *Gliwice radiocarbon dates VI*. „Radiocarbon”, t. 22, s. 61-67
- Pearson G. W., Stuiver M., 1986: *High-precision calibration of the radiocarbon time scale, 500-2500 BC*. „Radiocarbon”, t. 28, s. 839-862

- Pearson G.W., Pilcher J.R., Baillie M.G.L., Corbett D.M., Qua F., 1986: *High-precision ^{14}C measurements of Irish oaks to show the natural ^{14}C variation from AD 840–5210 BC.* „Radiocarbon”, t. 28, s. 911–934
- Rae A.M., Ivanovich M., 1986: *Successful application of uranium-series dating of fossil bone.* „Appl. Geochem.”, t. 1, s. 419–426
- Stuiver M., Pearson G.W., 1986: *High-precision calibration of the radiocarbon time scale AD 1950–500 BC.* „Radiocarbon”, t. 28, s. 805–838
- Van den Bogaard P., Hall C.M., Schmicke H.-U., York D., 1987: *$^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ laser dating of single grains: ages of Quaternary tephra from the East Eifel volcanic field, FRG.* Geophys. Res. Lett. 14, 1211–1214
- Van der Wijk A., El-Daoushy F., Arends A.R., Mook W.G., 1986: *Dating peat with U/Th disequilibrium: some geochemical considerations.* „Chem. Geol. Isot. Geosci. Sect.”, t. 59, s. 283–292
- Van Strydonck M., Dupas M., Dauchot-Dehon M., Pachiaudi Ch., Marechal J., 1986: *The influence of continuing (fossil) carbonate and the variations of ^{14}C in mortar dating.* „Radiocarbon”, t. 28, s. 702–710
- Vogel J.S., Helson D.E., Southon J.R., 1989: *Accuracy and precision in dating microgram carbon samples.* „Radiocarbon” t. 31, s. 145–149
- Waterbolk H.T., 1971: *Working with radiocarbon dates.* „Proc. Prehistoric Society”, t. 37, s. 15–33
- Waterbolk H.T., 1983a: *The integration of radiocarbon dating in archeology.* „Radiocarbon”, t. 25, s. 639–644
- Waterbolk H.T., 1983b: *Ten guidelines for the archeological interpretation of radiocarbon dates.* [W:] W.G. Mook, H.T. Waterbolk (eds.): „Proc. Groningen Conference on C_{14} Dating and Archeology”, „PACT Publication”, t. 8, s. 17–27
- Wild E., Stefan I., 1991: *Isolation of uranium and thorium for age determination of fossil bones by uranium-series method.* „Radiochim. Acta”, t. 54, s. 85–89