ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1985
Seria: MATEMATYKA-FIZYKA z. 46 Nr kol. 831

Mieczysław PAZDUR

Instytut Fizyki Politechniki Śląskiej
w Gliwicach

WSPÓŁCZESNY STAN I KIERUNKI ROZWOJU CHRONOMETRII RADIOWĘGLOWEJ

Streszczenie. W ostatnich kilku latach zaznaczył się w chronometrii radiowęglowej istotny postęp zarówno w dziedzinie techniki pomiarowej, jak też i metodyki badań. Artykuł zawiera krótkie podsumowanie tych osiągnięć, przedstawione z myślą o ich wykorzystaniu w ośrodkach krajowych. Naszkicowano wyniki uzyskane w dziedzinie technik akceleratorowych wraz z wynikami podstawowych badań nad metodami wzbogacania laserowego i wykorzystaniem technik laserowych do bezpośredniej detekcji ^{14}C. Przedstawiono najwybitniejsze osiągnięcia konstrukcyjne w zakresie klasycznej techniki detekcji ^{14}C za pomocą liczników proporcjonalnych. Jako przykłady nowych zastosowań izotopu ^{14}C przedstawiono badania antropogenicznych zmian koncentracji ^{14}C oraz możliwości pojawiające się przy jednoczesnych pomiarach ^{14}C i ^{13}C w próbkach naturalnych. Przedyskutowano postęp w dziedzinie kalibracji radiowęglowej skali czasu oraz koncepcje wykorzystania techniki komputerowej do gromadzenia, klasyfikacji i dystrybucji dat radiowęglowych.

WSTĘP

Okres końca lat siedemdziesiątych zaznaczył się jako niewątpliwie przełomowy w rozwoju chronometrii radiowęglowej. Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie najistotniejszych zagadnień, czy raczej trendów, jakie pojawiły się w ostatnich 5-6 latach i ich znaczenia dla dalszego rozwoju metody radiowęglowej oraz jej wykorzystania w archeologii i naukach przyrodniczych.

Najważniejsze osiągnięcia i nowości ostatnich lat można zgrupować w czterech działach:

1. Techniki pomiarowe.
2. Nowe zastosowania izotopu ^{14}C.
3. Unifikacja wyników pomiarów i kalibracja radiowęglowej skali czasu.
4. Komputerowe systemy informatyczne.

1. NOWE TECHNIKI POMIAROWE W CHRONOMETRII RADIOWĘGLOWEJ

Osiągnięcia ostatnich lat w dziedzinie technik pomiarowych dotyczą przede wszystkim nowych metod detekcji izotopu ^{14}C związanych z wykorzysta-

niem techniki akceleratorowej i laserowej, przy czym urządzenia laserowe wykorzystane są również dla wzbogacania w izotop ^{14}C próbek naturalnych. Niebagatelny postęp widoczny jest jednak również w dziedzinie "klasycznych" metod detekcji, tzn. metod licznikowych, a w szczególności wybitną nowością jest pojawienie się zestawów typu "mikro", czyli miniaturowych liczników proporcjonalnych i zestawów typu "mega", tzn. zespołów liczników o bardzo dużej objętości, pracujących przy wysokich ciśnieniach gazu roboczego.

1.1. Metody akceleratorowe

Koncepcja wykorzystania akceleratorów do detekcji ^{14}C wiąże się z ideą wysuniętą w 1970 roku przez Hansa Oeschgera i współpracowników (Oeschger et al, 1971), w której zasugerowano możliwość zastąpienia zliczania cząstek β pochodzących z rozpadów jąder ^{14}C zliczaniem samych atomów ^{14}C. Możliwości, jakie kryje w sobie ta idea, wynikają wyraźnie z porównania dwóch liczb: liczba rozpadów ^{14}C jakie zachodzą w 1 g węgla wypreparowanego z żyjącego organizmu wynosi 13,5 na minutę, liczba atomów ^{14}C zawartych w takiej próbce wynosi $\sim 10^{12}$. Przyjmując, że w "konwencjonalnej" metodzie pomiaru ^{14}C używa się próbek o masie 2-3 g C stosując czasy pomiaru ~ 2000 minut, stosunek liczb zliczanych obiektów wynosi $\sim 10^{7}$ na korzyść techniki akceleratorowej.

Pierwsze próby praktycznej realizacji idei Oeschgera, podjęte w latach 1974-76 przez Anbara, Schnitzera i współpracowników polegające na adaptacji typowych spektrometrów masowych do detekcji atomów ^{14}C, zakończyły się niepowodzeniem. Dopiero w 1977 r. kilka niezależnie pracujących grup fizyków opublikowało pierwsze artykuły, podające sposób rozwiązania problemu bezpośredniego zliczania atomów ^{14}C z wykorzystaniem akceleratorów. Purser et al (1977) z firmy General Ionex Corp. oraz Bennett et al (1977) z Uniwersytetu w Rochester zaproponowali rozwiązanie wykorzystujące akcelerator liniowy typu Van de Graaffa w układzie tandem, zaś Muller (1977) przedstawił możliwość wykorzystania małego cyklotronu.

W krótkim czasie doszło do uformowania się zespołu grupującego fizyków z uniwersytetów w Rochester i Toronto oraz z firmy General Ionex, który rozpoczął intensywne prace nad realizacją koncepcji wykorzystania akceleratora Van de Graffa. Firma General Ionex ogłosiła niebawem możliwość podjęcia produkcji tzw. zestawów dedykowanych, tzn. przeznaczonych wyłącznie do celów chronometrycznych, określając koszt pojedynczego zestawu na 500 000 USD. Liczba ta, choć stosunkowo wysoka, wydaje się być jednak zaniżona, a na pewno nie uwzględnia kosztów adaptacji pomieszczeń laboratoryjnych, kosztów instalacji, uruchomienia itp. W jednym z najnowszych opracowań przeglądowych (Polach et al, 1982) podany jest pełny koszt instalacji zestawu akceleratorowego, określony na ~ 4 mln USD. W 1978 roku powołano przy Laboratorium Geochemii Izotopowej Uniwersytetu Stanowego Arizony w Tuscon, oprócz istniejącego od dawna Laboratorium Radiowęglowego

także Regionalne Centrum Akceleratorowe (P.E. Damon, 1978, inf. prywatna). Prace przy instalacji "dedykowanych" akceleratorów lub adaptacji akceleratorów już istniejących rozpoczęto w ośrodkach naukowych USA (Argonne National Laboratory, Argonne, Ill. - Quaternary Isotope Laboratory, Seatle, Wash.), Kanady (Chalk River Nuclear Laboratories, Chalk River, Ontario), Wielkiej Brytanii (AERE Harwell, Didcot, Research Laboratory for Archaeology, Oxford), a także we Francji (Grenoble), Holandii (Utrecht) i Szwajcarii (Bern). W 1979 r. na X Międzynarodowej Konferencji Chronometrii Radiowęglowej w Bernie i Heidelbergu grupa z Rochester i Torontu (Gove et al, 1980) przedstawiła wyniki datowań kilku próbek metodą akceleratorową i licznikową, świadczące o dobrej zgodności i podobnej dokładności obu metod. Natomiast zespół z firmy General Ionex (Purser et al, 1980) przedstawił praktyczną realizację układu akceleratorowego w postaci systemu MACS (Masa And Charge Spectrometry). Podane przez Pursera et al parametry eksploatacyjne systemu MACS są następujące:

- masa próbki $\ni$ 1 mg,
- dokładność oznaczenia wieku bezwzględnego ~ 1% przy czasie pomiaru < 30 minut,
- obsługa systemu: 2 osoby (fizyk i technik),
- koszt obsługi systemu ~ 50-75 USD/próbkę,

(wynikający z zatrudnienia wymienionych dwóch pracowników, z pominięciem kosztów przygotowania próbek do pomiarów).

1.2. Metody laserowe

1.2.1. Wzbogacanie próbek naturalnych

W "klasycznej" chronometrii radiowęglowej wydłużenie zasięgu datowania poza umowną granicą 50 tysięcy lat uzyskiwano od ponad 20 lat przez zastosowanie wzbogacania próbek naturalnych w izotop ^{14}C w procesie dyfuzji termicznej wykorzystując w tym celu próbki gazowe pod postacią tlenku węgla (Grootes, 1977), a ostatnio także metanu (Erlenkeuser, 1978). Ogromne możliwości kryje w sobie wykorzystanie procesu fotolizy wywoływanej światłem laserowym do wstępnego wzbogacania próbek naturalnych w izotop ^{14}C. W literaturze opisano dotychczas wyniki badań nad wzbogacaniem trzech związków chemicznych. Karl i Innes (1975) opisali proces fotodysocjacji s-tetrazyny o wzorze chemicznym $C_2H_2N_4$ pod wpływem światła laserowego o długości fali 550 nm. Związek ten jest jednak bardzo trudny do syntezy z CO_2 uzyskiwanego ze spalania próbek organicznych i opisany proces nie ma większego znaczenia praktycznego. Fuss i Schmid (1979) przebadali szczegółowo proces selektywnej fotolizy CF_3I pod wpływem światła laserowego, stwierdzili oni, że przy długości fali $\lambda^* = 1073\ cm^{-1}$ ulega dysocjacji większość molekuł $^{12}CF_3I$, a niezdysocjowana pozostałość jest wzbogacona w molekuły $^{14}CF_3I$, przy czym stopień wzbogacenia może osiągać 90.

Ze względu na wykorzystanie w chronometrii radiowęglowej najbardziej obiecujące są jednak wyniki uzyskane przez Hedgesa i Moore'a (1978, 1980) w badaniach fotolizy formaldehydu CH_2O. Przez selektywną fotolizę $^{14}CH_2O$ pod działaniem światła laserowego w przedziale długości fali 300-360 nm uzyskuje się CO, dla którego wzbogacenie w izotop ^{14}C wynosi od 100 do 150. W opisanych przez Hedgesa i Moore'a eksperymentach z wyjściowej próbki zawierającej ok. 1 g węgla uzyskano w czasie ~ 2 godz. rozkład blisko połowy wprowadzanego do komory reakcyjnej formaldehydu przy mocy lasera wynoszącej ok. 5 mW. Obok wysokiego stopnia wzbogacania w ^{14}C (współczynnik wzbogacenia $q = 150$) równie istotny jest krótki czas trwania procesu ($\tau \sim 2$ godz.), co daje metodzie laserowej znaczną przewagę nad wzbogacaniem termodyfuzyjnym, gdzie typowe wartości q i τ są w przybliżeniu równe $q = 12$, $\tau = 150$ godz. Przyjmując za wskaźnik efektywności procesu wzbogacania iloraz tych dwóch wielkości, tzn. stopnia wzbogacenia i czasu trwania procesu

$$w = q/\tau,$$

otrzymuje się dla metody laserowej $w_l = 75$, a dla procesu termodyfuzji $w_{td} = 0{,}08$, co daje stosunek efektywności obu procesów bliski 10^3.

1.2.2. Bezpośrednia detekcja ^{14}C metodą LSA

Pierwsza praca dotycząca możliwości wykorzystania absorpcji światła laserowego do bezpośredniego oznaczania koncentracji izotopu ^{14}C została opublikowana w 1977 roku przez zespół kierowany przez H. Oeschgera (Lehman et al, 1977). Przedstawiono w niej wyniki badań pochłaniania promieniowania podczerwonego przez molekuły $^{14}CO_2$, stwierdzając, że przy odpowiednio dużej czułości użytego do pomiaru laserowego spektrometru absorpcyjnego (LSA) można spodziewać się uzyskania zadowalających wyników, tj. określenia koncentracji ^{14}C przez pomiary współczynników pochłaniania linii wibracyjno-rotacyjnych w pasmie ν_3 w okolicy 4,5 μm.

Podejście to zostało rozwinięte przez Labrie i Reida (1981), którzy stwierdzili, że stosując CO_2 pod ciśnieniem 14 Tr schładzamy mieszaninę suchego lodu i alkoholu do temperatury 195 K, można metodami LSA oznaczać zawartość ^{14}C w próbkach pod postacią CO_2. Stwierdzona doświadczalnie przez tych autorów czułość metody (przy wykorzystaniu linii P(20)) zdefiniowana jako minimalna wykrywalna koncentracja izotopu ^{14}C wyrażana w stosunku do wzorca NBS Oxalic acid wynosi 0,8 przy długości komory absorpcyjnej $l = 1$ m i czasie pomiaru $\tau = 1$ s. Ekstrapolując ten wynik na większe wartości l i τ uzyskuje się oceny czułości metody, których zdaniem autorów wynika nawet przewaga metody LSA nad "klasycznymi" metodami liczników proporcjonalnych. W szczególności stosując komorę absorpcyjną o długości $l = 10$ m i czas $\tau = 10$ godz. wg tych przewidywań można uzyskać czułość 0,004 co odpowiada zasięgowi datowania blisko 45 000 lat.

1.3. Technika liczników proporcjonalnych

1.3.1. Zestawy typu MIKRO

Istotną nowością ostatnich lat w dziedzinie techniki liczników proporcjonalnych jest wprowadzenie tzw. zestawów MIKRO, zawierających miniaturowe liczniki proporcjonalne o objętościach kilku cm^3, przeznaczonych do datowania próbek o masie węgla w granicach od 10 do 100 mg. Prace z takimi zestawami prowadzone są m.in. w USA w Brookhaven National Laboratory (Harbottle et al, 1979, Sayer et al, 1981) i Washington State University (Sheppard et al, 1981), w AERE Harwell w Wielkiej Brytanii oraz w Australian National University (Polach et al, 1982). Jako gaz roboczy detektora stosuje się CH_4 lub CO_2 pod ciśnieniem 4-6 atm, masa węgla w próbce używanej do pomiaru zawiera się w przedziale od 10 do 50 mg, stosunek aktywności współczesnej do tła wynosi w większości opisanych układów od 2 do blisko 10. Przykładem praktycznej realizacji zestawu typu MIKRO może być ośmiolicznikowy zestaw opisany przez Harbottle'a et al (1979), w którym objętość pojedynczego licznika wynosi 5 cm^3, ciśnienie CO_2 - 4 atm., masa węgla - 10,7 mg. Parametry fizyczne zestawu pozwalają na uzyskanie przy czasie pomiaru wynoszącym 69 dni - dokładność datowania $\pm$150 lat, próbek o wieku 5500 lat, a $\pm$270 lat dla próbek o wieku 11 000 lat. Koszt zestawu 8 liczników 5 cm^3 podany przez Harbottle'a et al wynosi ok. 40 000 USD.

1.3.2. Zestawy typu MEGA

Drugim kierunkiem rozwoju metod licznikowych jest budowa zestawów typu MEGA, tzn. zespołów dużych liczników proporcjonalnych,pracujących przy wysokich ciśnieniach gazu roboczego i przeznaczonych do pomiarów koncentracji ^{14}C w próbkach zawierających kilkadziesiąt gramów węgla. Opisane w literaturze trzy najwybitniejsze zestawy zostały uruchomione w laboratoriach radiowęglowych w Groningen (Tans, Mook, 1979), Heidelbergu (Schoch et al, 1980) i Seatle (Stuiver et al, 1979).

Parametry fizyczne zestawu uruchomionego w Groningen, składającego się z 7 identycznych liczników proporcjonalnych wypełnionych CO_2 pod ciśnieniem 6 atm pozwalają na uzyskanie dokładności oznaczenia koncentracji ^{14}C w próbkach naturalnych wynoszącej $\sim$ 1,3%, co odpowiada dokładności wyznaczenia wieku ΔT = 10 lat przy czasie trwania pomiaru równym 2 dni. Zasięg datowania (bez wzbogacania wstępnego próbek) wynosi 61 500 lat, masa węgla używanego do pomiaru - prawie 2 mole ($\sim$23 g C).

2. NOWE ZASTOSOWANIA IZOTOPU ^{14}C

2.1. Antropogeniczne zmiany koncentracji ^{14}C w środowisku

Wpływ działalności człowieka na poziom koncentracji izotopu ^{14}C w środowisku wykryto już we wczesnych latach pięćdziesiątych,wprowadzając terminy: 1) efekt Suessa (czy też "efekt przemysłowy") na określenie zaniże-

nia koncentracji izotopu ^{14}C w atmosferycznym CO_2 wywołanego wprowadzeniem do atmosfery coraz większych ilości nieaktywnego CO_2 pochodzącego ze spalania węgla kamiennego i paliw płynnych oraz 2) "efekt bomby atomowej" na określenie zawyżenia naturalnego poziomu ^{14}C w atmosferze, biosferze i hydrosferze wskutek produkcji znacznych ilości izotopu ^{14}C podczas próbnych wybuchów jądrowych i termojądrowych. Badaniem tych efektów, a zwłaszcza efektu bomby atomowej, poświęcono wiele prac, szczególnie w latach sześćdziesiątych. Badania te dotyczyły zjawisk przebiegających w skali globalnej lub przynajmniej w skali wielkich rezerwuarów geochemicznych jak np.: stratosfera, troposfera, atmosfera półkuli północnej czy południowej, warstwa powierzchniowa oceanu itp.

Ostatnie lata przyniosły ponowny wzrost zainteresowania wykorzystaniem izotopu ^{14}C do badania zmian stosunków izotopowych w środowisku pod wpływem działalności człowieka. Większość obecnych badań dotyczy jednak zjawisk lokalnych, zachodzących w skali kilku - kilkudziesięciu kilometrów, a szczególnie rozcieńczania naturalnego CO_2 wskutek emisji nieaktywnego CO_2 w pobliżu autostrad (Freundlich, 1979), w rejonach wielkich aglomeracji (Florkowski, Kuc, 1979, Porter, 1981, Talma, Vogel, 1979, Levin et al, 1980). Duże potencjalne znaczenie mają badania koncentracji ^{14}C, prowadzone w otoczeniu czynnych elektrowni jądrowych,obejmujące pomiary koncentracji w atmosferycznym CO_2 (Levin et al, 1980), roślinach (Otlet et al, 1983), w odpadach (Wenzel, et al, 1979) i produktach żywnościowych (Fischer, Muller, 1982).

Oddzielnym i nowym zastosowaniem izotopu ^{14}C w badaniach degradacji środowisk wielkomiejskich są pomiary aktywności ^{14}C w pyłach (Berger et al, 1983, Currie et al, 1983). Podsumowanie dotychczasowych wyników badań antropogenicznych zmian koncentracji izotopu ^{14}C zawiera referat K.O. Münnicha (1983), wygłoszony na XI Międzynarodowej Konferencji Chronometrii Radiowęglowej w Seattle, USA w 1982 roku.

2.2. Datowanie nietypowych materiałów

Nowe aspekty chronometryczne izotopu ^{14}C związane są z wprowadzeniem omówionych wcześniej technik pomiarowych pozwalających na datowanie próbek zawierających miligramowe ilości węgla. Umożliwia to datowanie radiowęglowe materiałów i przedmiotów będących bezpośrednimi wytworami człowieka, takich jak wyroby z żelaza, ceramika (de Atley, 1980), czy zaprawa murarska (Van Strydonck et al, 1981, Willaime et al, 1981). Metodyka datowania tych substancji, aczkolwiek w ogólnym zarysie znana od dawna (Ralph, 1971) jest w związku z tym obecnie przedmiotem szczególnej uwagi. Technika akceleratorowa oraz miniaturowe liczniki proporcjonalne umożliwiają datowanie przedmiotów muzealnych o dużej wartości, planowane jest m.in. badanie radiowęglowego słynnego Całunu Turyńskiego (Gove et al, 1980), a także innych przedmiotów tekstylnych i zabytkowych rękopisów.

2.4. Radiowęgiel i izotopy stabilne

Bardzo ciekawe możliwości zawarte są w połączeniu oznaczeń radiowęglowych i pomiarów izotopów ^{13}C i ^{18}O. W celu korygowania dat radiowęglowych pomiary współczynnika frakcjonowania izotopowego $\delta^{13}C$ były wykonywane od dawna. Na samoistną wartość tych pomiarów zwrócono jednak uwagę dopiero niedawno. Reprezentatywnymi przykładami mogą tu być wyniki przedstawione podczas I Międzynarodowej Konferencji "C-14 i Archeologia" 1981 r. w Groningen (Tauber, 1981, Chisholm, 1981) oraz prace Vogela i współpracowników (Vogel, 1978, van der Merwe, Vogel, 1978, von Schirnding et al 1982). Przedstawione przez H. Taubera (1981) wyniki pomiarów wieku oraz wartości $\delta^{13}C$ kolagenu wydzielonego z kilkudziesięciu próbek kości ludzkich zebranych na wybrzeżu Danii wskazują na istnienie wyraźnych grup wartości $\delta^{13}C$ w różnych przedziałach czasu, dla okresu mezolitu wartości $\delta^{13}C$ zawierają się w granicach od -11% do -16%, tj. w przedziale charakterystycznym dla organizmów morskich, co świadczy o tym, że grupy ludzkie zamieszkujące wówczas badane tereny korzystały głównie z pożywienia pochodzenia morskiego. W okresie neolitu i brązu wartości $\delta^{13}C$ zawierają się w granicach od -18% do -28%. Są to wartości typowe dla organizmów lądowych, co znaczy, że dominującym składnikiem pożywienia w tym czasie były rośliny i zwierzęta lądowe. Ponownie w okresie średniowiecza aż po czasy nowożytne wartości $\delta^{13}C$ zawierają się w przedziale identycznym jak w mezolicie.

3. UNIFIKACJA WYNIKÓW POMIARÓW I KALIBRACJA RADIOWĘGLOWEJ SKALI CZASU

Charakterystyczną cechą ostatnich lat jest podjęcie przez różne grupy badaczy inicjatyw zmierzających do możliwie najdalej posuniętego ujednolicenia metody radiowęglowej zarówno pod względem metodyki laboratoryjnej, jak również opracowywania, publikowania i interpretacji wyników datowań radiowęglowych. Przejawia się to w zorganizowaniu kilku niezależnych programów międzylaboratoryjnej kontroli pomiarów, obejmujących laboratoria radiowęglowe w różnych krajach, stosujące różne techniki pomiarowe, podejmowanych przede wszystkim w celu dokonania wszechstronnej kontroli wzorców używanych w chronometrii radiowęglowej (Polach, 1979, Currie, Polach 1980, Cavallo, Mann, 1980, Otlet et al, 1980).

Ogromne znaczenie dla metodyki i metodologii badań radiowęglowych mają prace dwóch międzynarodowych zespołów roboczych, zajmujących się unifikacją sposobów obliczania i publikowania wyników pomiarów radiowęglowych (Stuiver, 1980) oraz opracowaniem jednolitych wersji kalibracji radiowęglowej skali czasu (Damon et al 1980, Klein et al, 1980). Wyniki prac tego ostatniego zespołu przedstawione w ostatnim roku (Klein et al, 1982), stanowią istotny krok w kierunku uporządkowania zdecydowanie niekorzystnej sytuacji powodowanej istnieniem i stosowaniem co najmniej kilku nierównoważnych sobie, a często także sprzecznych, wersji kalibracji radio-

węglowej skali czasu, opracowanych w latach 1970-79 przez liczne grupy autorów (zob. np. Pazdur, Pazdur, 1982).

Chociaż w opinii autora wersja zaproponowana przez Kleina i współpracowników jest obarczona pewnymi niedogodnościami i niedociągnięciami metodycznymi, stanowi ona istotny postęp, a realizacja następnych zadań, jakie wyznaczył sobie ten zespół roboczy (zob. Damon et al, 1980), powinna przynieść w najbliższych latach całkowite usunięcie obecnego bałaganu w dziedzinie kalibracji radiowęglowej skali czasu w przedziale ostatnich 8 tysięcy lat.

4. SYSTEMY INFORMATYCZNE W CHRONOMETRII RADIOWĘGLOWEJ

Wzrastająca liczba publikacji, poświęconych różnym aspektom chronometrii radiowęglowej, od prac czysto technicznych po konkretne zastosowania i syntezy powoduje w ostatnich latach istotne utrudnienia w obiegu informacji naukowej wśród zainteresowanych. Sytuacja ta jest typowa dla współczesnej nauki, jednak w dziedzinie chronometrii radiowęglowej wydaje się być szczególnie dotkliwa, a to ze względu na różnorodność dyscyplin i specjalności naukowych, z którymi styka się chronometria radiowęglowa. Jeszcze bardziej trudna jest sytuacja w dostępie do datowań wykonywanych w różnych laboratoriach. Absolutnie nie wystarcza już analiza wykazów datowań publikowanych w czasopiśmie "Radiocarbon", zresztą zasięg tego czasopisma jest ograniczony, a ponadto zawarte w poszczególnych zestawieniach daty radiowęglowe często reprezentują ogromną rozpiętość czasową i terytorialną, nie dając tym samym poszukiwanej chronologicznej podbudowy konstruowanych syntez regionalnych czy też korelacji między różnymi obszarami kulturowymi czy klimatycznymi. Próby rozwiązania tych problemów podejmowane wielokrotnie w poprzednich latach, m.in. poprzez publikowanie okresowych zestawień bibliograficznych oraz syntetycznych wykazów dat radiowęglowych (por. np. imponujące zestawienie dotyczące prahistorii Holandii, wykonane przez Lantinga i Mooka (1977)), jednak w obecnej chwili tylko zastosowanie systemów informatycznych z automatycznym wprowadzaniem, segregacją i wyszukiwaniem danych może doprowadzić do zadowalających rezultatów.

Poważnym krokiem naprzód w dziedzinie informacji bibliograficznej jest opracowanie przedstawione przez Dilette Polach (1980). Wykonane metodą komputerową zestawienie bibliograficzne obejmuje dotychczas lata 1948-1968, wyszukiwaniem objęto bazy danych: INSPEC-PHYSICS, Geoarchiwe, SCI, CA, SSCI, NTIS, SPIN oraz Meteorological and Geoastrophysical Abstracts, ograniczając się do publikacji w języku angielskim. Najtrudniejszymi do wyszukiwania okazały się prace z dziedziny archeologii, pojawiające się jedynie w bazie danych SSCI (Social Science Citation Index), a zupełnie sporadycznie w bazach danych NTIS i SPIN. Wyniki wyszukiwania wskazują na

wyraźnie wykładniczy wzrost całkowitej liczby publikacji za okres 20 lat. Liczba prac z dziedziny chronometrii radiowęglowej opublikowanych w języku angielskim do 1968 roku wynosi ok. 3300, przewidywana przez ekstrapolację wartość po następnych 10 latach, tj. w roku 1978, przekracza 7 000.

Od 2-3 lat trwają prace nad sformułowaniem zasad organizacji skomputeryzowanych systemów obejmujących wyniki datowań radiowęglowych, ograniczające się na razie jedynie do datowań próbek archeologicznych. Propozycja atlasu dat radiowęglowych europejskiego mezolitu została przedstawiona przez Goba (1981), zaś Gulliksen (1983) oraz Webb (1983) sformułowali ostatnio zasady funkcjonowania i wstępne możliwości użytkowania baz danych obejmujących wszelkie datowania radiowęglowe wykonywane na potrzeby badań archeologicznych. Natomiast całkowicie nie tknięty jest problem konstrukcji baz danych obejmujących datowania wykonywane na potrzeby nauk przyrodniczych, chociaż, jak się czasuje, datowania te stanowią co najmniej 3/4 całkowitej liczby datowań radiowęglowych.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawiona charakterystyka obecnego rozwoju chronometrii radiowęglowej wykazuje dobitnie ogromny postęp osiągnięty w ostatnich latach zwłaszcza w dziedzinie technik pomiarowych. Obecne warunki uniemożliwiają zaadoptowanie w ośrodkach krajowych kompletnych rozwiązań technicznych w rodzaju systemu MACS, wydaje się jednak realne podjęcie w przyszłości badań nad wykorzystaniem metod laserowych i to w obu opisanych w p. 1.2 kierunkach. Podobnie realne jest uruchomienie przy użyciu wyłącznie krajowych materiałów i urządzeń zestawu liczników typu MIKRO o parametrach porównywalnych z przedstawionymi w p. 1.3.1. Natomiast konieczna, a przy tym całkowicie możliwa jest systematyczna kontrola międzylaboratoryjna wykonywanych datowań, obejmująca laboratoria krajowe i zagraniczne. Wyniki wspomnianych w p. 3 międzynarodowych programów kontroli międzylaboratoryjnej świadczą bezspornie, że tylko w ten sposób można przekonać się o poprawności wykonywanych pomiarów oraz wykryć ewentualne źródła błędów wewnątrzlaboratoryjnych.

LITERATURA

Atley S.P. de, 1980, Radiocarbon dating of ceramic materials: progress and prospects; Radiocarbon, 22, 987-993.

Bennett C.L., Beukens R.P., Clover M.R., Gove H.E., Liebert R.B., Litherland A.E., Purser K.H., Sondheim W., 1977, Radiocarbon dating using accelerators: negative ions provide the key; science, 198, 508-510.

Berger R., Holmes T.R., Johnson R.M., 1983, Radiocarbon measurements of particulates in smog; Radiocarbon, 25, 615-620.

Cavallo C.M., Mann W.B., 1980, New National Bureau of Standards contemporary carbon-14 standards; Radiocarbon, 22, 962-963.

Chisholm B.S., Nelson D.E., Schwarcz H.P., 1981, Dietary information from $\delta^{13}C$ measurements on bone collagen; First Int. Symp. on C-14 and Archaeology, Groningen. Program and Abstracts, Univ. of Groningen, 38.

Currie L.A., Klouda G.A., Continetti R.E., Kaplan I.R., Wong W.W., Dzubay T.G., 1983, On the origin of carbonaceous particles in american cities results of radiocarbon "dating" and chemical characterization; Radiocarbon, 25, 603-614.

Currie L.A., Polach H.A., 1980, Exploratory analysis of the international radiocarbon cross-calibration data: consensus values and interlaboratory errors; Preliminary note; Radiocarbon, 22, 933-935.

Damon P.E., Lerman J.C., Long A., Bannister B., Klein J., Linick T., 1980 Report on the Workshop on the Calibration of the Radiocarbon Dating Time Scale; Radiocarbon, 22, 947-949.

Erlenkeuser H., 1978, Optimum operating conditions of ^{14}C-methane isotope enrichment by concentric type thermal diffusion collumns for use in radiocarbon dating; Radiocarbon, 20, 313-332.

Fischer E., Müller H., 1982, Kohlenstoff 14 in der terrestrische Nahrungskette; Atomkernenergie Kerntechnik, 41, 124-126.

Florkowski T., Kuc T., 1979, Carbon isotopes and sulphur content as indicators of atmospheric pollution from burning fossil fuels; Environment Int., 2, 431-435.

Freundlich J.C., 1979, Fossil fuel exhaust-gas admixture with the atmosphere; [w:] R. Berger, H.E., Suess(eds.), Radiocarbon dating, Univ. of California Press, Berkeley/Los Angeles, 388-393.

Fuss W., Schmid W.E., 1979, Ber. Bunsenges. Phys. Chem., 83, 1148.

Gob A., 1981, C-14 dates of European Mesolithic. Project of an Atlas; First Int. Symp. on C-14 and Archaeology, Groningen. Program and Abstracts, Univ. of Groningen, 41.

Gove H.E., Elmore D., Ferraro R.D., Beukens R.P., Chang K.H., Kilius L.R. Lee H.W., Litherland A.E., Purser K.H., Rubin M., 1980, Radiocarbon dating with tandemelelectrostatic accelerators; Radiocarbon, 22, 785--793.

Grootes P.M., 1977, Thermal diffusion isotopic enrichment and radiocarbon dating beyond 50 000 years BP; Ph.D. Thesis, Univ. of Groningen, 1-221

Gulliksen S., 1983, Radiocarbon database: a pilot project; Radiocarbon, 25, 661-666.

Harbottle G., Sayre E.V., Stoenner R.W., 1979, Carbon-14 dating of small samples by proportional counting; Science, 206, 683-685.

Hedges R.E.M., Ho P., Moore C.P., 1980, Enrichment of carbon-14 by selective laser photolysis of formaldehyde; Appl. Phys.,

Hedges R.E.M., Moore C.P., 1978, Enrichment of ^{14}C and radiocarbon dating Nature, 276, 255-257.

Karl R.R., Innes K.K., 1975, Chem. Phys. Lett., 36, 275.

Klein J., Lerman J.C., Damon P.E., Linick T., 1980, Radiocarbon concentration in the atmosphere: 8000-year record of variations in tree-rings First results of a USA Workshop; Radiocarbon, 22, 950-961.

Klein J., Lerman J.C., Damon P.E., Ralph E.K., 1982, Calibration of radiocarbon dates: Tables based on the consensus data of the Workshop on Calibrating the Radiocarbon Time Scale; Radiocarbon, 24, 103-150.

Labrie D., Reid J., 1981, Radiocarbon dating by infrared laser spectroscopy. A feasibility study; Appl. Phys., 24, 381-386.

Lanting J.N., Mook W.G., 1977, The pre- and protohistory of the Netherlands in terms of radiocarbon dates; Univ. of Groningen, 1-247.

Lehman B., Wahlen M., Zumbrunn R., Oeschger H., Schnell W., 1977, Isotope analysis by infrared laser absorption spectroscopy; Appl. Phys., 13, 153-158.

Levin I., Münnich K.O., Weiss W., 1980, The effect of anthropogenic CO_2 and ^{14}C sources on the distribution of ^{14}C in the atmosphere; Radiocarbon, 22, 379-391.

Muller R., 1977, Radioisotope dating with a cyclotron; Science, 196, 489--494.

Oeschger H., Houtermans J., Loosli H.H., Wahlen M., 1971, The constancy of cosmic radiation from isotope studies in meteorites and on the earth; [w:] I.U. Olsson (ed.), Radiocarbon variations and absolute chronology, Wiley, New York, 471-498.

Otlet R.L., Walker A.J., Hewson A.D., Burleigh R., 1980, ^{14}C interlaboratory comparison in the U.K.: experiment design, preparation and preliminary results; Radiocarbon, 22, 936-946.

Otlet R.L., Walker A.J., Longley H., 1983, The use of ^{14}C in natural materials to establish the average gaseous dispersion patterns of release from nuclear installations; Radiocarbon, 25, 593-602.

Pazdur A., Pazdur M.F., 1982, Chronometria radiowęglowa jako metoda badawcza w archeologii. Możliwości, ograniczenia, perspektywy; Przegląd Archeol., 30, 5-45.

Polach H.A., 1979, Correlation of ^{14}C activity of NBS oxalic acid with Arizona 1850 wood and ANU sucrose standards; [w:] R. Berger, H.E. Suess (eds.), Radiocarbon dating, Univ. of California Press, Berkeley/Los Angeles, 115-124.

Polach H., Soini E., Kojola H., Robertson S., Kaihola L., 1982, Radiocarbon dating of milligram-size samples using gas proportional counters: an evaluation of precision and of design parameters; Wallac Report Turku, 3-14.

Polach D., 1982, The first 20 years of radiocarbon dating. An Annotated Bibliography, 1948-1968; a pilot study; Radiocarbon, 22, 997-1004.

Porter G., 1981, New twist on dating: radiocarbon dating techniques applied to air pollution studies; Dimensions NBS, 64, No 4, 13-17.

Purser K.H., Liebert R.B., Litherland A.E., Beukens R.P., Gove H.E., Bennett C.L., Clover M.R., Sondheim W.E., 1977, An attempt to detect stable N^- ions from a sputter source and the implication for ^{14}C detection; Rev. Phys. Appl., 12, 1487-1492.

Purser K.H., Liebert R.L., Russo C.J., 1980, MACS: an acceleratorbased radioisotope measuring system; Radiocarbon, 22, 794-806.

Ralph E.K., 1971, Carbon-14 dating; [w:] H.N. Michael E.K. Ralph (eds.), Dating Techniques for the Archaeologist, MIT Press, Cambridge, Mass., 1-48.

Sayre E.V., Harbottle G., Stoenner R.W., Otlet R.L., Ewans G.V., 1981, The use of the small gas proportional counter for the carbon-14 measurement of very small samples; Proc. Int. Symp. on Methods of Low-Level Counting and Spectrometry, IAEA, Vienna.

Schoch H., Bruns M., Münnich K.O., Münnich M., 1980, A multi-counter system for high precision carbon-14 measurements: Radiocarbon, 22, 442--447.

Stuiver M., 1980, Workshop on ^{14}C data reporting; Radiocarbon, 22, 964--966.

Stuiver M., Robinson S.W., Yang I.C., 1979, ^{14}C dating to 60,000 years BP with proportional counters; [w:] R. Berger, H.E. Suess (eds.), Radiocarbon dating, Univ. of California Press, Berkeley/Los Angeles, 202--215.

Talma A.S., Vogel J.C., 1979, Carbon dioxide variations in continental air; Environment Int., 2, 393-399.

Tauber H., 1981, C-14 dating of human beings; First Int. Symp. on C-14 and Archaeology, Groningen. Program and Abstracts, Univ. of Groningen, 35.

Tans P.P., Mook W.G., 1979, Design, construction, and calibration of a high accuracy carbon-14 counting set-up; Radiocarbon, 21, 22-40.

Van der Merwe N.J., Vogel J.C., 1978, ^{14}C content of human collagen as a measure of prehistoric diet in Woodland North America; Nature, 276 815-816.

Van Strydonck M., Dupas M., Dauchot-Dehon M., 1981, Radiocarbon dating of old mortars; First Int. Symp. on C-14 and Archaeology, Groningen Program and Abstracts, Univ. of Groningen, 29.

Vogel J.C., 1978, Isotopic assessment of the dietary habits of ungulates; South African J. Sci., 74, 298-301.

Von Schirnding Y., van der Merwe N.J., Vogel J.C., 1982, The influence of diet and age on carbon isotope ratios in ostrich eggshell; Archaeometry, 24, 3-20.

Moffett J.C., Webb R.E., 1983, Database management systems. Radiocarbon and archaeology; Radiocarbon, 25, 667-668.

Wenzel U., Herz D., Schmidt P., 1979, Determination of carbon-14 in spent HTGR fuel elements; J. Radioanal. Chem., 53, 7-15.

Willaime B., Coppens R., Jaegy R., 1981, Datation des mortiers du chateau de Chatel-sur-Moselle (Vosges) par le C-14; First Int. Symp. on C-14 and Archaeology, Groningen. Program and Abstracts, Univ. of Groningen, 30.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ РАДИОУГЛЕРОДНОГО МЕТОДА

Р е з ю м е

Во время нескольких последних лет выступил в области радиоуглеродных исследований замечательный технический и методический прогресс. В статье представлено краткий очерк современных достижений принимая во внимание возможность их адаптировки в отечественных условиях. Подробно проанализировано успехи в области применения акцелераторной техники в измерениях концентрации радиоуглерода, результаты фундаментальных исследований по применению лазерной техники для обогащения в радиоуглерод натуральных образцов и прямой детекции радиоуглерода, а также некоторые выдяющиеся успехи по конструкции пропорциональных счётчиков. Как пример новейших применений радиоуглеродного метода приведен обзор исследований антропогенных вариаций концентраций радиоуглерода и возможности создаванных одновременным определением концентраций ^{14}C и ^{13}C. Представлено успехи по калибровке радиоуглеродного масштаба времени и первые попытки использования электронной вычислительной техники для сборки и классификации результатов радиоуглеродных датировок археологических образцов.

PRESENT STATUS AND FUTURE TRENDS OF THE RADIOCARBON DATING METHOD

S u m m a r y

During last several years an essential advance has been achieved in the field of both measurement techniques and the methodology of radiocarbon dating. In the present article are summarized recent achievements with special attention paid to the possibility of adapting them in Polish laboratories. The results obtained in the field of accelerator techniques are presented in details together with the results of more fundamental researches on laser enrichment methods and utilization of laser techniques to the detection of ^{14}C. Some outstanding results in classical methods of ^{14}C detection using proportional counters are also summarized. As examples of new applications of radiocarbon are discussed the studies of antropogenic ^{14}C variations and the possibilities presented by simultaneous measurements of both ^{14}C and ^{13}C in natural samples. The progress in calibration of the radiocarbon time scale is discussed and the ideas of introducing computers to storage and distribution of radiocarbon dates are briefly outlined.