

Włodzimierz Mościcki

Zakład Fizyki Technicznej  
Katedra Fizyki A Politechniki Śląskiej

W 20 ROCZNICĘ ODKRYCIA NATURALNEGO "RADIOWĘGLA"  
(Referat inauguracyjny)

Streszczenie. Artykuł zawiera: Historię odkrycia naturalnego  $^{14}\text{C}$ . Uwagi dotyczące techniki pomiaru aktywności naturalnych węgla. Problem krążenia  $^{14}\text{C}$  w przyrodzie. Wzmiankę o źródłach aktywności  $^{14}\text{C}$  wód gruntowych.

#### Wstęp

20 lat temu w miesięczniku Science ukazały się publikacje zespołu uczonych amerykańskich poświęcone potwierdzeniu hipotezy późniejszego laureata nagrody Nobla prof. W.L. Libbego o naturalnej produkcji promieniotwórczego radiowęglu [1].

Również 20 lat temu w lokalnym poznańskim czasopiśmie prehistorycznym "Z otchłani Wieków" ukazała się krótka notatka o rozpoczęciu prac nad budową aparatury do pomiarów aktywności naturalnego węgla dla celów chronometrycznych [2].

Dziś po dwudziestu latach sukcesów tej najsławniejszej i najprecyzyjniejszej metody ustalania wieku zabytków organicznych, dzięki której udało się definitywnie rozstrzygnąć długi szereg doniosłych i ważnych problemów historycznych z różnych dziedzin nauki jak np. ustalenie wieku, kolejności i czasu trwania kilku ostatnich okresów lodowcowych w Europie i Ameryce Północnej, szeregu zjawisk geograficznych i geologicznych, czy też tak ważnych dla historii kultury człowieka dat i korelacji czasowych jak przykładowo nierozwiązany przez kilka wieków problem korelacji kalendarza Majów z kalendarzem współczesnym (Ralph), czy tak doniosłe dla nauk przyrodniczych wykrycie słynnej mistyfikacji naukowej: sztucznej preparatyki szkieletu tzw. "człowieka z Piltown" (de Vries), a wreszcie posiadające duże znaczenie gospodarcze "radiowęglowa" metoda określenia źródeł wód podskórnych (Münnich), która w wielu wypadkach, tam gdzie inne metody okazały się bezsilne, pozwalała na ustalenie pochodzenia wód zalewających kopalnie i kopalnie - nadarza się dobra bo jubileuszowa okazja przypomnienia założeń tej metody, jej zasięgu i przynajmniej niektórych osiągnięć.

W 1946 roku W.F. Libby [3] opierając się na wynikach prac Rubena i Kamena nad sztucznym wytwarzaniem jąder promieniotwórczych, długoścyciowego, izotopu węgla o masie atomowej 14 - tzw. "radiowęglu" - postawił hipotezę, że w wyniku absorpcji neutronów promieniowania kosmicznego w atmosferze ziemskiej powstają dość znaczne ilości promieniotwórczego izotopu węgla

$^{14}\text{C}$ . Uwzględniając średni czas życia jąder "radiowęgla" należało spodziewać się, że całkowity zapas tego izotopu na Ziemi wynosi około 100 t, z czego około 5 t przypada na atmosferę i biosferę. Libby zwrócił też uwagę na to, że obecność "radiowęgla" w biosferze stwarza możliwość określenia wieku wszelkiego rodzaju szczątków organicznych. Organizmy żywe mające bezpośredni kontakt z atmosferą, w której powstaje "radiowęgiel", wykazywałyby maksymalną radioaktywność węgla wchodzącego w skład ich komórek. Szczątki starsze, które utraciły kontakt biologiczny z atmosferą przed setkami, a nawet tysiącami lat wykazywałyby wskutek rozpadu części atomów "radiowęgla" zmniejszoną aktywność, malejącą w miarę upływu czasu zgodnie z prawami rozpadu promieniotwórczego. Szczątki organiczne z przed 50 000 lat lub jeszcze starsze byłyby już w ogóle pozbawione atomów radiowęgla i nie powinny wykazywać już żadnej aktywności.

Możliwość użytecznego wykorzystania naturalnego "radiowęgla" dla celów chronometrycznych wzbudziła duże zainteresowanie. To też do sprawdzenia hipotezy Libbego przystąpił niezwłocznie duży zespół jego współpracowników i uczni.

W bieżącym roku minęło właśnie 20 lat od daty definitywnego potwierdzenia hipotezy Libbego. Zespół uczonych w składzie: Libby, Andersson, Arnold, Kirchenbaum, Grosse, Reid i Weinhouse [4] stwierdził, że dwie próbki metanu z których jedna pochodziła ze współcześnie butwiejących roślin a druga towarzyszyła ropie naftowej, wykazują przewidywane różnice aktywności "radiowęgla". W biometanie stwierdzono obecność "radiowęgla", w metanie z ropy naftowej nie. Dla demonstracji aktywności biometanu uczeni musieli poddać próbkę procesowi 1000 krotnego wzbogacenia izotopowego. Konieczność wzbogacenia podtytkowana była tym, że zgodnie zresztą z przewidywaniami, aktywność naturalnego węgla okazała się niezmiernie niska i wynosiła zaledwie około 15 rozpadów na minutę "radiowęgla" w 1 g czystego węgla biosfery. Warto tu zwrócić uwagę na to, że prawie wszystkie zupełnie nie radioaktywne z natury ciała znajdujące się na powierzchni Ziemi wykazują, wskutek nieuniknionych zanieczyszczeń radioaktywnych, promieniotwórczość często znacznie większą niż naturalny, czysty węgiel biosfery. Dla zilustrowania nikłości aktywności właściwej węgli naturalnych można obliczyć, że dla uzyskania takiej właśnie aktywności dowolnej niepromieniotwórczej substancji wystarczyłyby zanieczyścić tę substancję np. radem w stosunku 1/2 mikro grama radu na 1 tonę dowolnej nie radioaktywnej substancji.

Trudności techniczne precyzyjnego pomiaru tak nikłych aktywności zostały pokonane w ciągu kilku następnych lat. Zasadnicze idee współczesnej metodyki pomiaru aktywności węgla zostały opracowane w Polsce już w roku 1952 [5], a niezależnie rok później w Holandii przez H. de Vries'a [6]. Zasadnicza idea i technika pomiaru nie uległa od tego czasu żadnym istotnym zmianom. Pray opracowaniu techniki dokładnego pomiaru aktywności  $^{14}\text{C}$  należało przezwyciężyć dwie główne trudności: znikomą aktywność próbek i bardzo niską energię elektronów emitowanych przez "radiowęgiel". Elektronów te

wskutek posiadanej energii zdolne są do przebycia drogi zaledwie kilka cm w powietrzu pod normalnym ciśnieniem, względnie dziesiątych części milimetra w ciałach stałych i cieczech.

Wszelkie detektory i liczniki promieniowania jądrowego reagują na ogół w podobny sposób na każdy rodzaj promieniowania jądrowego, niezależnie od jego źródła, a więc i na promieniowanie wszelkich zanieczyszczeń radioaktywnych i na szczególnie przenikliwe promieniowanie kosmiczne. Okazuje się, że liczba impulsów licznika, sygnalizujących pojawianie się promieniowania jądrowego, którego źródłami są zanieczyszczenia radioaktywne laboratorium oraz przenikliwe promieniowanie kosmiczne, tj. liczba impulsów tzw. "tła" przewyższałaby wiele set razy oczekiwany efekt radioaktywności próbek naturalnego węgla. We współczesnej technice pomiarowej redukcję tego szkodliwego "tła" uzyskuje się otaczając licznik dostatecznie grubymi i czystymi pod względem zanieczyszczeń radioaktywnych osłonami. Decydującą jednak redukcję zapewniają odpowiednie układy licznikowo-elektroniczne tzw. osłony antykońcencyjne eliminujące z rejestracji wszelkie impulsy licznika związane z promieniowaniem pochodzącym ze źródeł zewnętrznych, a więc w szczególności i przenikliwe promieniowanie kosmiczne.

Dla pokonania trudności związanych z małą przenikliwością elektronów pochodzących z rozpadu radiowęgla należało znaleźć taki gaz syntetyzowany z węgla próbki, który nadawałby się jako gaz roboczy do wypełnienia licznika. W tych warunkach wszystkie elektrony pochodzące od atomów  $^{14}\text{C}$  związanych w molekułach gazu, niezależnie od swojej energii pojawiają się w objętości czynnej licznika i mogą być z niemal 100% wydajnością rejestrowane.

Inną istotną trudność związaną z pomiarami aktywności próbek naturalnego węgla jest statystyczny charakter pomiaru polegający na sliczaniu liczby rozpadów  $^{14}\text{C}$ . Okazuje się, że dla uzyskania wymaganej dla pomiarów chronometrycznych dokładności statycznej 0,5% należy sliczyć akty rozpadów tzn. impulsy detektora w ciągu ok. 50 godzin, zapewniając w tym czasie pełną kontrolę stabilności wszystkich parametrów fizycznych wpływających na pomiar.

W około 30 laboratoriach C-14 rozrzuconych po całym świecie wykonano w ciągu 20 lat historii pomiarów chronometrycznych kilkanaście tysięcy pomiarów, z których każdy rozwiązywał bodaj cząstkę jakiegoś problemu naukowego.

Nie jest rzeczą ani możliwą, ani nie wydaje się celową omawianie całego dorobku naukowego uzyskanego dzięki wynikom pomiarów aktywności węgla.

Dobrą ilustracją zasięgu i znaczenia pomiarów  $^{14}\text{C}$  będzie przedstawienie wyników dotyczących rozwiązania jednego z wielkich problemów geograficznych, meteorologicznych i przyrodniczych: problemu krążenia węgla, a w szczególności  $^{14}\text{C}$  w przyrodzie.

### Produkcja i krącenie węgla w przyrodzie.

Jak wspomniałem "radiowęgiel" powstaje w górnych warstwach atmosfery, na wysokości 10-20 km nad powierzchnią Ziemi w wyniku reakcji jądrowej zapisanej symbolicznie



Powstający izotop  $^{14}\text{C}$  jest jądrem nietrwałym ulegającym rozpadowi  $\beta$  z średnim czasem życia  $\bar{\tau} = 8300$  lat. Maksymalna energia elektronów rozpadu wynosi ok. 150 keV.

Średniemu czasowi życia jąder "radiowęgla" odpowiada okres połowicznego zaniku  $T_{1/2} = 5740$  lat.

Powstające atomy radiowęgla ulegają praktycznie natychmiastowemu utlenieniu w atmosferycznym  $\text{O}_2$  tworząc radioaktywny  $^{14}\text{CO}_2$  o praktycznie identycznych własnościach chemicznych z niepromieniotwórczym  $\text{CO}_2$ .

Pomiary natężenia strumienia neutronów promieniowania kosmicznego na wysokościach obszaru generacji  $^{14}\text{C}$  prowadzą do wyniku  $2 \cdot 7 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$ . Ponieważ na poziomie morza w składzie promieniowania kosmicznego neutronów prawie nie obserwuje się, należy przyjąć, że prawie cały strumień neutronów zostaje zaabsorbowany przez jądra azotu wytwarzając w efekcie tyleż atomów "radiowęgla", tj. ok.  $n = 2 \cdot 7$  atomy  $^{14}\text{C/cm}^2 \cdot \text{s}$ . Mnożąc tę liczbę przez powierzchnię Ziemi  $S = 5,1 \cdot 10^{18} \text{ cm}^2$  otrzymuje się całkowitą produkcję  $^{14}\text{C}$  w atmosferze w ciągu 1 s. Uwzględniając ciężar atomowy "radiowęgla"  $A(^{14}\text{C}) = 14$ , znajdujemy, że łączna masa produkowanego "radiowęgla", wynosi  $m = 9 \cdot 7 \frac{\text{kg}}{\text{rok}}$ . Dla obliczenia całkowitej masy ( $M$ ) obecnego na Ziemi "radiowęgla" należy zwrócić uwagę na to, że w stanie równowagi ubytek atomów  $^{14}\text{C}$  wskutek rozpadu promieniotwórczego, którego wartość na jednostkę czasu wynosi  $\lambda \cdot N$  (przy czym  $\lambda = \frac{1}{\bar{\tau}}$  oznacza prawdopodobieństwo rozpadu, a  $N$  liczbę atomów  $^{14}\text{C}$  w stanie dynamicznej równowagi), musi się równać produkcji  $^{14}\text{C}$  w atmosferze, tj.  $\lambda \cdot N = n$ , a stąd  $N = \frac{n}{\lambda} = n \cdot \bar{\tau}$ . W ten sposób otrzymuje się, że całkowita masa "radiowęgla" wynosi  $M = m \cdot \bar{\tau} = 9 \cdot 7 \text{ kg/rok} \cdot 8300 \text{ lat} \approx 80 \text{ t}$ .

Procesy pionowego mieszania się powietrza atmosferycznego zapewniają, w czasie bardzo krótkim w porównaniu ze średnim czasem życia atomów "radiowęgla", a więc praktycznie wszystkim wyprodukowanym cząsteczkom radioaktywnego  $\text{CO}_2$ , wejście w kontakt z biosferą i powierzchnią wód oceanicznych.

Dzięki procesom fotosyntezy w biosferze oraz procesom wymiany pomiędzy atmosferycznym  $\text{CO}_2$  i węglanami rozpuszczonymi w wodzie, "radiowęgiel" przedostaje się do biosfery i wód oceanicznych tworząc tam charakterystyczne dla tych rezerwarów "radiowęgla" mieszanki radioaktywnego i niepromieniotwórczych izotopów węgla.

Pomiary aktywności, (a więc i koncentracji  $^{14}\text{C}$ ) tych rezerwarów wykazują istotne charakterystyczne różnice. Okazuje się np., że węglany wód



oceanicznych powierzchniowych wykazują koncentrację odpowiadającą pozornemu wiekowi około 320 lat. To znaczy są zubożone w  $^{14}\text{C}$  w stosunku do węgla współczesnej biosfery. Wody głębinowe mają jeszcze niższą koncentrację  $^{14}\text{C}$  odpowiadającą wiekowi 700 lat. Z kolei współczesna biosfera ma koncentrację o około 2% niższą niż atmosfera, a niektóre współcześnie powstające węglany wód słodkowodnych około 105% koncentracji  $^{14}\text{C}$  w atmosferycznym  $\text{CO}_2$ .

Okazało się dalej, że koncentracja "radiowęgla" w poszczególnych rezerwuarach takich jak atmosfera, biosfera, wody oceaniczne powierzchniowe i głębinowe nie pozostaje stała na przestrzeni wieków, ale podlega mniej lub więcej systematycznym fluktuacjom.



Rys. 1. Przebieg zmian koncentracji  $^{14}\text{C}$  w węglu drzewnym

a) w okresie ostatnich 4000 lat, b) w ostatnich 30 latach na podstawie pomiarów laboratoryjnych.  $\nabla$  - Groningen (De Vries, 1958),  $\Delta$  - Cambridge (Willis, 1960),  $\square$  - Copenhagen (Tauber, 1960),  $+$  - Heidelberg (Munnich, 1960)  $\circ$  - Arizona (Damon, 1963),  $\times$  - Pennsylvania (Ralph, 1960). Skala odciętych dwudziestokrotnie powiększona w stosunku do rys. 1a

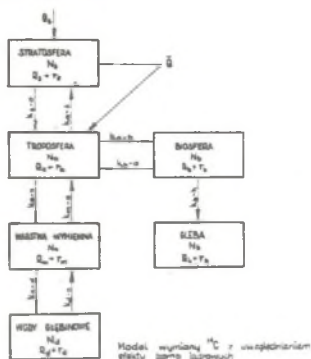
Na rysunku 1 widzimy zmiany koncentracji "radiowęgla" w biosferze wywołane procesami naturalnymi na powierzchni Ziemi (od okresu mniej więcej przed 3500 lat do roku 1956) i eksplozjami termojądrowymi (po roku 1956).

Przyczyny tych zarówno stałych zróżnicowań składu izotopowego w poszczególnych rezerwuarach jak też i fluktuacji składu izotopowego w określonym rezerwuarze wiążą się z nałożeniem się kilku niezależnych procesów. Dwa spośród tych procesów wpływają w głównej mierze na stałe, znaczne różnice składu izotopowego poszczególnych rezerwuarów. Jednym z nich jest różnicowanie izotopowe w procesach fotosyntezy i reakcji wymiany pomiędzy atmosferycznym  $\text{CO}_2$  a węglanami wód oceanicznych. Drugim jest mechanizm transportu i krążenia węgla pomiędzy rezerwuarami.

Ze względu na pojemność określoną przez ilość zawartego w nim węgla największym rezerwuarzem są wody oceaniczne, a ściślej rozpuszczone w nich węglany. Rezerwuar ten zawiera około 94% istniejącego na Ziemi w stanie równowagi "radiowęgla", a całkowitą masę węgla niepromieniotwórczego w tym rezerwuarze ocenia się na około  $36 \cdot 10^{12}$  t. "Radiowęgiel" przedostaje się do wód oceanicznych dzięki reakcji wymiany, uprzywilejowanej przejściu ciężkiego "radiowęgla" z fazy gazowej, tj. atmosferycznego  $\text{CO}_2$ , do fazy

ciekłej, tj.  $H_2CO_3$  względnie  $(HCO_3)^-$  lub  $CO_3^{2-}$ . W rezultacie tego w stanie równowagi koncentracja  $^{14}C$  w węglanach wynosiłaby około 105% w stosunku do koncentracji w  $CO_2$  atmosferycznym.

Do biosfery, której całkowitą zawartość węgla szacuje się na  $0.3 \cdot 10^{12}$  t, a pośrednio do węgla biologicznego pochodzenia gleby ( $0.4 \cdot 10^{12}$  t "radiowęgiel" przedostaje się w procesie fotosyntezy. Proces ten uprzywilejowany lekkie - trwałe izotopy węgla tak, że w stanie równowagi koncentracja węgla w komórkach organicznych wynosi ok. 95% koncentracji  $^{14}C$  w atmosferze.



Rys. 2. Uproszczony schemat wymiany międzyrezzerwuarowej wg oryginalnej koncepcji Craiga [1957]:

$Q$  - oznacza strumień  $^{14}C$  generowany w atmosferze.  $N$  z odpowiednim indeksem - globalną zawartość jąder  $^{14}C$  w rezerwuarach:  $a$  - atmosfera,  $b$  - biosferze,  $m$  - wodach oceanicznych powierzchniowych,  $d$  - głębinowych,  $h$  - w glebie. Wartości  $R$  dają stopień zróżnicowania izotopowego w stosunku do składu biosfery, dla której koncentracja  $^{14}C$  w  $^{12}C$  wynosi  $R_D =$

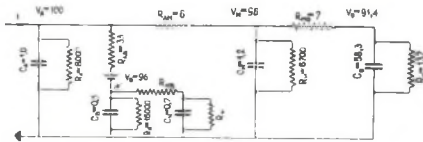
$$R_m = 1,14 \cdot 10^{-12}$$

Drugim jeszcze donioslejszym eksperymentem były wybuchy bomb atomowych i termojądrowych, które podwyższyły przejściowo koncentrację  $^{14}C$  w atmosferze średnio o ponad 100%, a przejściowo dawały krótkotrwałe impulsy przekraczające setki %. Eksperymenty te pozwoliły między innymi bardzo dokładnie prześledzić momenty pojawienia się poszczególnych maksimów odpowiadających nasileniom prób jądrowych w poszczególnych rezerwuarach i uzyskać stosunkowo przejrzysty obraz nie tylko krążenia węgla w przyrodzie, ale też i wszelkich ruchów stratosfery, atomosfery i mieszania się wód oceanicznych.

Nie uwzględniając poprawek związanych z procesem rozpadu promieniotwórczego  $^{14}C$ , zachodzącym w czasie przechodzenia "radiowęgiel" pomiędzy rezerwuarami, otrzymalibyśmy następujący grubszy obraz krążenia i zmian koncentracji  $^{14}C$  w poszczególnych rezerwuarach (rys. 2). Jak wspomniałem, rzeczywiste koncentracje  $^{14}C$  w poszczególnych rezerwuarach, a w szczególności w wodzie oceanicznej są mniejsze a nie większe od koncentracji wynikających z różnicowania izotopowego w procesie wymiany. Świadczy to o konieczności szczegółowego rozpatrzenia procesów globalnej wymiany międzyrezzerwuarowej węgla z uwzględnieniem średnich czasokresów przebywania atomów węgla, których wskaźnikiem jest promieniotwórcza domieszka  $^{14}C$ , w poszczególnych rezerwuarach.

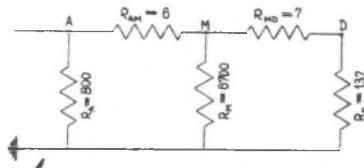
Okazją do tego rodzaju badań były dwa nieplanowane, gigantyczne eksperymenty. Pierwszym z nich było wprowadzenie wzrastających wykładniczo w czasie, poczynając od połowy 19 wieku, mas niepromieniotwórczego  $CO_2$  pochodzącego ze spalania węgla kamiennego i ropy naftowej. Ten tzw. efekt industrialny (Suess 1955) [7] spowodował wzrost zawartości  $CO_2$  w powietrzu i obniżenie koncentracji  $^{14}C$  w atmosferycznym  $CO_2$  o około 4% w roku 1956.

Interesujące jest to, że globalna międzyrezerwarowa wymiana "radiowęgla" (a więc i niepromieniotwórczego węgla, który jest nośnikiem  $^{14}\text{C}$ ) może być dość dobrze przedstawiona przy pomocy prostego modelu elektrycznego, którego schemat pokazano na rysunku 3. Na schemacie tym kondensatory



Rys. 3. Uproszczony układ analogowy de Vriesa (1958). Objasnienie symboli w tekście. Pojemności kondensatorów i opory upływowe dobrane są tak, aby stałe czasowe  $R_1 C_1 = 8000$  były równe średniemu czasowi życia jąder  $^{14}\text{C}$

reprezentują rezerwuary węgla, opory upływowe kondensatorów dobrane są w taki sposób ażeby stałe czasowe rozładowania kondensatorów przez opory upływowe wynosiły 8000 lat, tj. równały się średniemu czasowi życia "radiowęgla". Odcięty od źródła prądu kondensator, zmniejszy swój ładunek (który reprezentuje w tym schemacie atomy "radiowęgla") do połowy w okresie połowicznego zaniku  $^{14}\text{C}$ , tj. 5700 lat. Opory pomiędzy kondensatorami dobrane są tak ażeby napięcia na poszczególnych kondensatorach odpowiadały rzeczywistym koncentracjom  $^{14}\text{C}$  w poszczególnych rezerwarach w porównaniu z koncentracją atmosfery przyjętą za 100%.



Rys. 4. Układ równoważny w stanie stacjonarnym

Ze względu na bardzo duże wartości oporów upływowych, rzędu kilku tysięcy, można uważać, że w stanie stacjonarnym dostrzegalny prąd płynie praktycznie tylko przez układ oporów szeregowych przedstawionych na schemacie (rys. 4). Suma tych oporów wynosi 150, a spadki potencjału na oporach 6 i 7 wynoszą odpowiednio  $100 \cdot \frac{6}{150}$ ;  $100 \cdot \frac{7}{150}$ , tj. 4 względnie ok. 4,7 tak, że w p. M napięcie wynosi  $100 - 4 = 96$ , a w p. D  $100 - 8 \cdot 7 = 91,3$ , tj. odpowiada rzeczywistym koncentracjom w warstwie powierzchniowej (M) i w głębinach oceanu (D).

Jednym z najistotniejszych założeń metody  $^{14}\text{C}$  jest stałość natężenia strumienia neutronów, a co za tym idzie promieniowania kosmicznego, Ujawnione fluktuacje koncentracji  $^{14}\text{C}$ , w ostatnich kilku tysiącach lat, wydawały się poddawać w wątpliwość słuszność tego założenia. Ponieważ wspomniane fluktuacje są rzędu 2%, można zastanowić się jakim fluktuacjom i w

ciągu jakiego czasu musiałyby ulec natężenie promieniowania kosmicznego dla wywołania takiego efektu.

Łatwo zauważyć, że wzrost natężenia prądu o np. 10% wywołałby, z grubsza biorąc zmianę napięcia w p. M zaledwie o  $\frac{10 \cdot 6}{150}$ , tj. 0,4%. Okazuje się że dla wywołania obserwowanych w biosferze fluktuacji koncentracji  $^{14}\text{C}$  rzędu 2% należałoby przyjąć periodyczne o czasie trwania rzędu 20 lat sięgające 50%, wzrosty natężenia promieniowania kosmicznego.

Taki wniosek wydaje się mało usprawiedliwiony. Istnieje jednak alternatywne wyjaśnienie problemu. Okazuje się mianowicie, że podobny skutek mogłaby wywołać zmiana wartości oporów 6 i 7. Z punktu widzenia mechanizmów transportu  $^{14}\text{C}$  odpowiadałoby temu gwałtowne mieszanie się np. warstwy wody powierzchniowej bogatszej w  $^{14}\text{C}$  z głębinową. Okazuje się, że zjawiska takie istotnie zachodzą w okresach silnych i długotrwałych chłódów, kiedy to warstwy wód powierzchniowych poprostu toną w głębinie. Jak widać z tego, można z analizy fluktuacji  $^{14}\text{C}$  w biosferze i węglanach wyciągnąć bardzo istotne wnioski z zakresu oceanologii i klimatologii odległych epok.

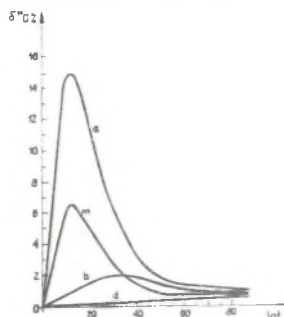
Przedstawiony skrótowo mechanizm wymiany międzyrezerwuarowej  $^{14}\text{C}$  jest dzisiaj stosunkowo dobrze zaawansowany. Można skonstruować układ elektryczny uwzględniający w znacznie szerszym zakresie niż to zostało pokazane na schematach ideowych, specyfikę procesów wywołujących i regulujących krążenie  $^{14}\text{C}$  w przyrodzie. Układ taki pozwala śledzić skutki wynikające ze zmiany różnych i licznych parametrów mających wpływ na ustalanie się koncentracji  $^{14}\text{C}$ .

Wspomniałem, już, że zaawansowanie tego problemu stało się możliwiedzięki wykorzystaniu krótkotrwałych, ale bardzo znacznych zmian koncentracji  $^{14}\text{C}$ , wywołanych efektami industrialnym i wybuchami bomb atomowych.

Można wykorzystać te zmiany dla rozpracowania szczegółów układu elektrycznego imitującego np. eksplozje termojądrowe. Odpowiada temu wstrzyknięcie odpowiedniego ładunku elektrycznego na kondensator zastępujący atmosferę i przewidywać skutki eksplozji w poszczególnych rezerwuarach.

Na rysunku 5 przedstawiono przebieg oscylogramów uzyskane przy pomocy odpowiednio skonstruowanego układu elektrycznego w Gdańskiej Pracowni  $^{14}\text{C}$ , odpowiadających przewidywanym zmianom koncentracji  $^{14}\text{C}$  w poszczególnych rezerwuarach wywołanych eksplozją bomby termojądrowej o mocy 35 Mt.

Chciałbym jeszcze powiedzieć parę uwag na temat przenikania  $^{14}\text{C}$  do wód gruntowych.



Rys. 5. Oscylogramy przebiegów zmian koncentracji  $^{14}\text{C}$  ( $\delta^{14}\text{C}$ ) w rezerwuarach wyniku wskutek wstrzyknięcia po późnocnej hemisferze dolnej stratosfery ładunku 140 kg  $^{14}\text{C}$ , powstałego w wyniku eksplozji termojądrowej o energii 35 Mt TNT



Z punktu widzenia globalnego krążenia  $^{14}\text{C}$  w przyrodzie mechanizm ten nie ma większego znaczenia. Stwarza jednak możliwość określenia wieku i źródeł wody gruntowej i pozwala, jako jedyna często metoda, rozwiązywać doniosłe gospodarczo wielkie problemy hydrogeologiczne.

Woda z opadów atmosferycznych po przedostaniu się do warstw wodonośnych, znajduje się w kontakcie z praktycznie "żywym"  $\text{CO}_2$ , tzn. o koncentracji  $^{14}\text{C}$  odpowiadającej biosferze, wydychanym przez korzenie roślin. Rozpuszczony w wodzie  $\text{CO}_2$  reaguje z niezawierającymi  $^{14}\text{C}$  węglanami wapnia, tworząc rozpuszczalne w wodzie kwaśne węglany o zawartości  $^{14}\text{C}$  - 50% (w stosunku do biosfery). Alternatywne reakcje związane z wietrzeniem składają kwaśne węglany o 100%  $^{14}\text{C}$ , wreszcie rozpuszczanie  $\text{CaCO}_3$  w kwasach humusowych względnie  $\text{CO}_2$  pochodzenia wulkanicznego mogą dawać nieaktywne węglany wapnia.

Dla chronometrii wód metodą  $^{14}\text{C}$  istotne są trzy fakty. 1. Wskutek powolnego przenikania wody przez warstwy wodonośne następuje pełne wymieszanie węgla martwego i żywego.

2. Bp zerwania się kontaktu z atmosferą koncentracja "radiowęgla" zmienia się wyłącznie wskutek rozpadu  $^{14}\text{C}$ , nawet w tych wypadkach kiedy przepływ odbywa się poprzez skały wapienne. Niezrozumiałe to na pierwszy rzut oka zjawisko tłumaczy się tym, że w bardzo szybkim czasie następuje ustalenie się stanu równowagi koncentracji "radiowęgla" w kwaśnych węglanach rozpuszczonych w wodzie i węglanach skał, przy czym równowaga ta dotyczy kilkumikronowej warstewki ciała stałego. Dyfuzja atomów  $^{14}\text{C}$  w samych węglanach jest tak powolna, że związany z nią ubytek radiowęgla z wody może być pominięty.

3. Jak wspomniano wyżej, istnieją trzy typy procesów wytwarzania kwaśnych węglanów będących nośnikami  $^{14}\text{C}$  w wodzie gruntowej. Koncentracje  $^{14}\text{C}$  w węglu niepromieniotwórczym przybierają wartości 50%, 100% względnie 0% w stosunku do atmosfery. Wydawało by się, że wyklucza to możliwość datowania wód. Na przykład węglany powstałe z wietrzenia współczesnych skał wykazywałyby koncentrację współczesnych wód podskórnych z warstw wodonośnych dopiero po upływie ok. 5000 lat. Z kolei nawet współcześnie powstające źródła zawierające  $\text{CO}_2$  pochodzenia wulkanicznego byłyby "martwe" i przy próbach datowania wskazywałyby na wiek powyżej 50000 lat.

Na szczęście istnieje niezależna metoda pozwalająca dokładnie ustalić źródło  $\text{CO}_2$  w rozpuszczonych w wodzie kwaśnych węglanach i wolnym  $\text{CO}_2$ . Metoda ta polega na określeniu zawartości innego, trwałego izotopu węgla  $^{13}\text{C}$ .

Przedstawiłem w ogromnym skrócie jeden z wielkich problemów którymi zajmowały się w ostatnim dziesięcioleciu laboratoria  $^{14}\text{C}$ . Problemów takich bądź rozwiązanych, bądź opracowywanych o dużym nieraz znaczeniu gospodarczym, a nawet i militarnym, jest sporo. Dla przykładu wspomnę może, że np. zbadanie warunków meteorologicznych towarzyszących krótkotrwałym, ale gwałtownym wzrostom koncentracji  $^{14}\text{C}$  w troposferze, jak to miało miejsce w Abisco w 1961 roku i Mikošzewie w 1962 roku [8], pozwala na poznanie wa-

runków i mechanizmu gwałtownego przedostawania się powietrza atmosferycznego do troposfery, a co za tym idzie przewidywanie miejsca i momentu tego zjawiska. Może to mieć niemałe znaczenie w przypadku celowego lub przypadkowego umieszczenia w stratosferze znacznych ilości lotnych substancji radioaktywnych, które mogłyby w przypadku przedostania się do troposfery zagrażać populacji terenu, nad którym powstaną warunki sprzyjające wymianie powietrza między stratosferą i troposferą.

#### LITERATURA

- [1] W.F. Libby, i współpracownicy Science 105, 576, (1947), 106,403 (1947)
- [2] Wł. Mościcki, Z otchłani Wieków, 18, 135 (1949),
- [3] W.F. Libby, Phy s. Rev. 69, 671, (1946).
- [4] I.R.C. Arnold, W.F. Libby Science, 110, 687, (1949), W.F. Libby, E.C. Anderson I.R.C. Arnold, Science, 109, 227, (1949).
- [5] Wł. Mościcki, Muzeum Ziemi, 6, 298, (1952).
- [6] H.I. de Vries, Physica, 19 (1987), (1953).
- [7] H.E. Suess, Science, 122, 415, (1955).
- [8] Wł. Mościcki, A. Bujko, J. Dudkiewicz, A. Zastawny, Zesz.Nauk. Politechniki Gdańskiej, nr 113, 67 (1967).

#### S u m m a r y

The paper contains: The history of discovery of natural  $^{14}\text{C}$ , remarks on the measurerent technique, the problem of  $^{14}\text{C}$  circulation in nature, remark on the sources of the  $^{14}\text{C}$  activity in ground water.

#### В ДВАДЦАТУЮ ГОДОВШИНУ ОТКРЫТИЯ НАТУРАЛЬНОГО РАДИОУГЛЕРОДА

#### Р е з ю м е

В статье содержится история открытия радиоуглерода, замечания с технике измерения активности натуральных образцов  $^{14}\text{C}$ , проблема циркуляции  $^{14}\text{C}$  в природе, заметка об источниках активности  $^{14}\text{C}$  в почвенных водах.