

Leopold JURKIEWICZ

Rozwiązywanie problemów geologiczno-inżynierskich i hydrogeologicznych metodami izotopowymi¹

WSTĘP

Badania radioizotopowe w hydrogeologii i w geologii inżynierskiej mają w chwili obecnej wysoką rangę na całym świecie, jako cenne uzupełnienie szeregu metod dawniej opracowanych, które można by umownie nazwać klasycznymi.

PRACE Z ZAMKNIĘTYMI ŹRÓDŁAMI PROMIENIOWANIA JĄDROWEGO

Jedną z ważnych cech środowiska skalnego, będącego przedmiotem naszych rozważań, jest jego ciężar objętościowy i porowatość. Pomiar tych dwu wielkości w warunkach nienaruszonej struktury skał może być w wielu przypadkach dość utrudniony lub wręcz niemożliwy.

Do pomiaru ciężaru objętościowego gruntów możemy wykorzystać fakt, że rozpraszanie promieniowania gamma odpowiednio wysokiej energii w lekkim materiale, jakim jest skała osadowa, powoduje głównie tzw. zjawisko Comptona, czyli zderzenia sprężyste fotonów gamma z elektronami materii rozpraszającej. Dzięki temu obserwowany efekt natężenia rozproszonego promieniowania gamma zależy głównie od gęstości gruntu. Pomiar ciężaru objętościowego gruntu tą metodą jest pomiarem względnym. Aparatura, której częścią składową jest sonda zawierająca źródło promieniowania gamma Co^{60} lub Cs^{137} , oddzielone odpowiednio grubym filtrem ołowianym od detektora promieni gamma, najczęściej licznika GM, musi być wycechowana na modelach przygotowanych z takiego samego gruntu jak grunt badany. Krzywa cechowania (fig. 1) daje nam zależność między częstością zliczeń fotonów gamma przez sondę pomiarową i ciężarem objętościowym gruntu. Częstość zliczeń mierzymy przy pomocy lekkiego przenośnego przelicznika impulsów. Cechowanie sond pomiarowych w modelach napełnionych różnymi gruntami pozwala uwzględnić ewentualne drobne różnice własności rozpraszających różnych gruntów zależnie od ich składu chemicznego. Dokładność pomiaru $\pm 0,03 \text{ G/cm}^3$.

¹ Referat wygłoszony na Sesji Naukowej I. G. w dniu 21 lutego 1964 r.

Pomiar ciężaru objętościowego gruntu wykonujemy przez wciśnięcie sondy zakończonej ostrzem w dno otworu wiertniczego lub w powierzchnię gruntu na głębokość około 4 cm. Do pomiarów powierzchniowych możemy też użyć sondy w kształcie żelazka do prasowania, przez przyłożenie jej do wyrównanego gruntu. Ze względu na duże wymagania dokładności stawiane przyrządom pomiarowym, muszą być one kontro-

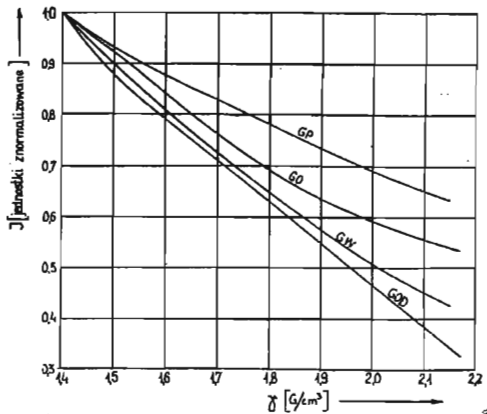


Fig. 1. Krzywe cechowania sond do pomiaru ciężaru objętościowego gruntów

Curves of calibrating the probes for measuring the bulk density of soils

GP — gęstościomierz powierzchniowy, GO — gęstościomierz odwiertowy, GW — gęstościomierz widelkowy, GOD — gęstościomierz odwiertowy denny

GP — surface densimeter, GO — bore-hole densimeter, GW — fork densimeter, GOD — bore-hole bottom densimeter

lowane w terenie na poprawność ich działania przy pomocy specjalnych źródeł standaryzujących Co^{60} lub Cs^{137} , w stosunku do których przelicznik winien wykazywać ustalone częstości zliczeń impulsów z licznika GM. Zasięg pomiaru w tej metodzie zależy od ciężaru objętościowego gruntu — wynosi on około 15 cm.

Do pomiaru wilgotności gruntu wykorzystujemy właściwość silnego spowalniania neutronów prędkich przez atomy wodoru, wchodzące w skład drobin wody zawartej w gruncie. Jako źródeł neutronów używamy mieszanin berylu z Po, Pu lub Ra. Najczęściej w naszej praktyce używamy źródeł Po-Be, charakteryzujących się niskim tłem promieniowania gamma. Minusem tych źródeł jest ich szybki rozpad (do połowy, po około 140 dniach).

Sonda do pomiaru wilgotności gruntu jest w zasadzie dość podobna do sondy ciężarowej. Zawiera ona detektor neutronów spowolnionych do energii ruchu cieplnego drobin skały, tzw. neutronów termicznych. Detektor jest oddzielony filtrem ołowiowym od źródła neutronów prędkich. W naszych sondach detektorem neutronów termicznych jest licznik chlorowcowy GM, taki sam, jak w sondach do pomiaru ciężaru objętościowego, owinięty blachą kadmową. W niektórych sondach stosuje się liczniki proporcjonalne, napełnione BF_3 , lub liczniki scyntylicyjne, ze scyntylatorem uczulonym na neutrony termiczne. Częstość zliczeń neutronów termicznych jest w pewien sposób proporcjonalna do wilgotności gruntu. Zależność tę w postaci krzywej cechowania ustalamy przy pomocy pomiarów modelowych (fig. 2). W przypadku gruntu całkowicie nasyconego wodą, pomiar sondą neutronową dostarcza nam nie tylko informacji o wilgotności lecz i o porowatości tego gruntu. Dla gruntów wilgotnych, lecz nie nasyconych wodą, dla wyznaczenia porowatości niezbędny jest równoczesny pomiar wilgotności i ciężaru objętościowego.

Zasięg metody zależy od wilgotności gruntu — wynosi on około 30÷40 cm w gruntach suchych i około 10÷15 cm w gruntach silnie zawodnionych. Dokładność pomiaru = 0,5÷1,5% wilgotności obj.

Należy podkreślić dużą użyteczność tych pomiarów dla kompleksowych badań hydrogeologicznych i dla badań geologii inżynierskiej. Przyrządy wycechowane w laboratorium lub w terenie dają nam natychmiastowe informacje o interesujących nas parametrach gruntów już w trakcie pomiarów polowych.

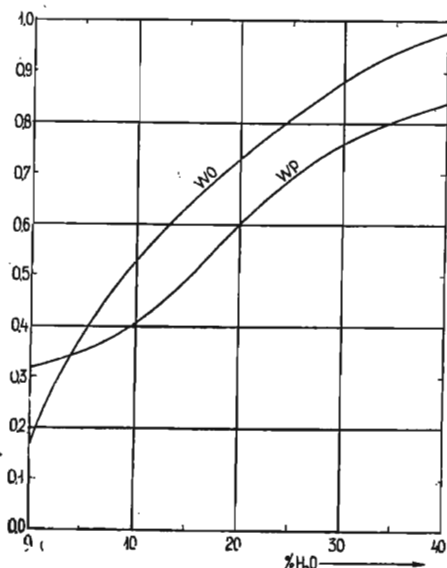


Fig. 2. Krzywe cechowania sond do pomiaru wilgotności gruntów

Curves of calibrating the probes for measuring the humidity of soils

WO — wilgotnościomierz odwiertowy,
WP — wilgotnościomierz powierzchniowy
WO — bore-hole hygrometer, WP — surface hygrometer

W Instytucie Techniki Jądrowej A.G.-H. w Krakowie przy współpracy z Katedrą Mechaniki Gruntów i Fundamentowania Politechniki Łódzkiej i z Zakładem Geologii Inżynierskiej Instytutu Geologicznego zbudowano szereg prototypów aparatury pomiarowej dla różnych warunków technicznych, do pomiarów ciężaru objętościowego i wilgotności w otworach i na powierzchni gruntu.

PRACE Z OTWARTYMI ŹRÓDŁAMI PROMIENIOWANIA JĄDROWEGO

Skala porowata i zawarta w niej woda tworzą skomplikowany układ fizyczno-chemiczny. Im lepiej wyznaczymy parametry charakteryzujące ten układ, tym lepiej potrafimy zaplanować tok postępowania w ewentualnych pracach eksploatacyjnych. Do jego poznania służy szereg metod pomiarowych, które we wstępie nazwano klasycznymi, a którym ostatnio przychodzi w sukurs technika badań oparta o znaczniki radioizotopowe.

Substancje promieniotwórcze są tu stosowane zamiast znaczników barwnikowych lub chemicznych. Wyższość pierwszych nad dwoma ostatnimi polega na wielkiej czułości pomiarów radioizotopowych. Związane jest to z ogromną precyzją pomiarów promieniowania jądrowego, emitowanego przez użyte izotopy. Dzięki tej dużej czułości metody, koncentracje znaczników radioizotopowych w wodzie gruntowej są z punktu widzenia chemicznego koncentracjami śladowymi, nie zmieniającymi jej

gęstości. Ta duża czułość metody odkrywa geologowi różne szczegóły złoża wodnego, które nie dałyby się wykryć żadną inną metodą.

Izotop, który chcemy zastosować do projektowanego doświadczenia, powinien spełniać szereg warunków. Przede wszystkim musi on charakteryzować się odpowiednim okresem połowicznego rozpadu, którego wielkość powinna być stosownie dobrana do czasu trwania danego cyklu pomiarowego. Powinien on mieć odpowiednie własności fizyczno-chemiczne, umożliwiające jego swobodne przechodzenie w środowisku skalnym na żądane odległości. Dodany izotop powinien naznaczać wodę na wystarczająco długi czas i nie ulegać ani wytrącaniu, ani adsorpcji w badanym gruncie. Korzystne jest, z uwagi na wymagania przepisów ochrony przed promieniowaniem jądrowym, żeby to był izotop, dla którego maksymalnie dopuszczalna koncentracja w wodzie do picia jest możliwie wysoka. Dalej pożądane jest, by izotop, który zamierzamy użyć, był dostarczany o możliwie wysokiej aktywności właściwej, by jego koncentracja wagowa w wodzie była do pominięcia. W przypadku, gdy zamierzamy przeprowadzać pomiary bezpośrednio w gruncie, konieczne jest, by izotop emitował dość twarde promieniowanie gamma, zdolne docierać do detektora w sondzie. Gdy pomiar ma się opierać na badaniach pobieranych próbek wody żądamy, by promieniowanie beta lub gamma miało na tyle dużą energię, żeby dało się swobodnie mierzyć te próbki w terenie bez skomplikowanej procedury wstępnej. Jedyny wyjątek od tej reguły robimy w stosunku do „idealnego“ znacznika izotopowego, jakim jest tryt — promieniotwórczy izotop wodoru. Miano idealnego znacznika zyskał sobie tryt dzięki temu, że wprowadzony do gruntu w postaci wody trytowanej (HTO) nie ulega ani wytrącaniu, ani adsorpcji. Doznaje on w środowisku gruntowym (pomijając pewien drobny efekt izotopowy wynikły z ciężaru atomowego) tych samych oddziaływań chemicznych, co zwykły wódór. Tryt może być tracony w nieznacznym stopniu (dającym się ocenić) przez wymianę izotopową ze zwykłym wodorem związanym ze skałą. Ostatnim warunkiem, jaki musi spełniać wybierany znacznik izotopowy, jest jego niska cena.

Stosowanie trytu na szerszą skalę w geologii inżynierskiej i hydrogeologii jest utrudnione ze względu na skomplikowaną procedurę detekcji miękkiego promieniowania beta, jakie on emituje. Korzystniej jest szukać rozwiązań opartych o izotopy emitujące bądź to twarde promieniowanie beta, bądź też dość przenikliwe promieniowanie gamma. W tym ostatnim przypadku pomiary w gruncie mogą pozwolić na znaczne skrócenie czasochłonności badań.

Izotop dodany do wody w gruncie powinien podążać za jej ruchem. Nie powinien on, jak było wspomniane wyżej, być tracony w procesach fizyczno-chemicznych. Nie może on też wskutek tych procesów ulegać zapóźnieniu w stosunku do płynącej wody. Wskutek adsorpcji jonów i wymiany jonowej między promieniotwórczym roztworem i otaczającą skałą, lub osadem na niej, kationy są całkowicie tracone z roztworu, albo znacznie się opóźniają w ruchu w stosunku do płynącej cieczy. Te procesy zachodzą szczególnie silnie wtedy, gdy ośrodek porowaty zawiera domieszki ilaste lub też koloidy organiczne. Z obserwacji wynika,

Tabela 1

Ważniejsze izotopy promieniotwórcze mogące mieć znaczenie w badaniach hydrogeologicznych

Symbol	T _{1/2}	Energia maksymalna promieniowania beta-MeV (prawdop. emisji na 1 rozpad)	Energia promieniowania gamma MeV (prawdop. emisji na 1 rozpad)	Maksymalna dopuszczalna koncentracja w wodzie do picia dla pracujących zawod. przy ciągłym narażeniu $\mu\text{C/litr}$
Na ²⁴	15 ^h	1,40 (100%)	1,38 (100%); 2,75 (100%)	2
Br ⁸²	36 ^h	0,45 (100%)	0,55 (75%); 0,62 (42%); 0,70 (28%); 0,78 (83%); 0,83 (25%); 1,04 (29%); 1,32 (28%); 1,48 (17%)	3
Au ¹⁹⁸	2,7 ^d	0,96 (99%)	0,41 (95,6%)	5.10 ⁻¹
J ¹³¹	8 ^d	0,33 (9%); 0,61 (87%)	0,28 (5%); 0,36 (80%); 0,64 (9%)	2.10 ⁻²
P ³²	14,5 ^d	1,71	—	2.10 ⁻²
Rb ⁸⁶	18,7 ^d	0,68 (8,5%); 1,77 (91,5%)	1,08 (8,5%)	7.10 ⁻²
Cr ⁵¹	27,8 ^d	—	0,325 (10%)	20
In ^{114m}	50 ^d	1,98 (99%)	0,19 (18,5%); 0,56 (3,5%); 0,72 (3,5%)	2.10 ⁻¹
Sb ¹²⁴	60 ^d	0,22 (11%); 0,61 (51%); 0,95 (6%); 1,59 (7%); 2,31 (23%)	0,60 (99%); 0,65 (8%); 0,72 (14%); 1,37 (5%); 1,70 (50%); 2,09 (6%); 0,30 (30%); 0,31 (29%); 0,32 (83%); 0,47 (53%); 0,59 (6%); 0,61 (19%)	2.10 ⁻¹ 2.10 ⁻¹
Ir ¹⁹²	74,4 ^d	0,24 (6%); 0,54 (40%); 0,64 (50%)	0,30 (30%); 0,31 (29%); 0,32 (83%); 0,47 (53%); 0,59 (6%); 0,61 (19%)	4.10 ⁻¹
Sc ⁴⁶	84 ^d	0,36 (100%)	0,89 (100%); 1,12 (100%); 1,12 (45%)	4.10 ⁻¹
Zn ⁶⁵	245 ^d	—	1,12 (45%)	1
Ag ^{110m}	253 ^d	0,530 (43%)	0,66 (94%); 0,68 (12%); 0,71 (17%); 0,74 (5%); 0,76 (21%); 0,81 (8%); 0,88 (69%); 0,94 (29%); 1,38 (26%); 1,48 (5%); 1,51 (14%)	0,3
T ³	12,3 ¹	0,018	—	30
C ¹⁴	5685 ¹	0,159	—	8

że aniony w dużo mniejszym stopniu podlegają zjawisku adsorpcji w skałach.

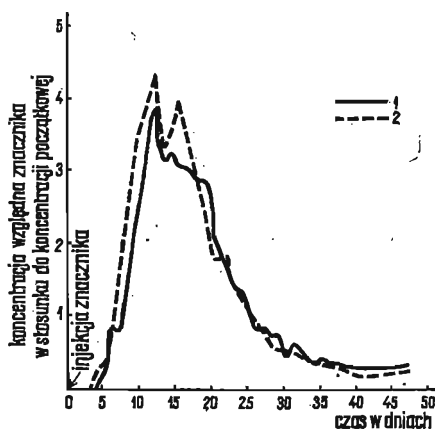
Z prostych anionów tylko 3 aniony chlorowcowe (Cl⁻, J⁻ i Br⁻) mogą wchodzić w rachubę jako ewentualne znaczniki izotopowe. Niestety chlor (Cl³⁶) ma tu ograniczone możliwości ze względu na jego wysoką cenę, bardzo długi okres połowicznego rozpadu (3,1.10⁵ lat) i brak emisji promieniowania gamma. Natomiast dość częste zastosowania znajdują J¹³¹

i Br^{82} . Oba te izotopy, ze względu na ich dość krótkie okresy połowicznego rozpadu, nie nadają się do użycia wtedy, gdy mamy śledzić bardzo długie drogi podziemne wody, do badania których czas pomiaru jest rozciągnięty na wiele tygodni lub miesięcy. W tabeli 1 podano zestawienie niektórych ważniejszych izotopów interesujących ze względu na omawiane badania.

Większość izotopów, wymienionych w tabeli 1, nie odznacza się właściwościami fizyczno-chemicznymi, o których mowa wyżej. Mogą one być jednak pożyteczne w zastosowaniach będących przedmiotem naszych rozważań, zarówno ze względu na ich okresy połowicznego rozpadu, jak też i na ich promieniowanie jądrowe, łatwe do wykrycia w terenie. Aby móc te izotopy wykorzystywać w omawianym celu przerabia się je chemicznie, wprowadzając atomy promieniotwórcze do trwałych związków komplek-

Fig. 3. Porównanie zachowania się znacznika chelatowego (kwasu wersenowego) znakowanego Cr^{51} i „idealnego” znacznika HTO w gruncie
Comparison of behaviour of chelate tracer (of versene acid) marked by Cr^{51} and that of “ideal” tracer HTO in soil

1 — znacznik Cr^{51} , 2 — znacznik HTO
1 — traser Cr^{51} , 2 — traser HTO



sowych, zwanych chelatami. Jest znanych wiele związków chelatujących, przeważnie organicznych, które są dziś próbowane z różnymi izotopami promieniotwórczymi w pracach hydrogeologicznych. Na fig. 3 przedstawiono porównanie zachowania się w gruncie porowatym chelatu zawierającego Cr^{51} w zestawieniu z wodą trytowaną. Technika przygotowania związków chelatowych dla badań hydrogeologicznych znajduje się na całym świecie w fazie prób.

POMIARY PRĘDKOŚCI FILTRACJI I KIERUNKU PŁYNIĘCIA WÓD GRUNTOWYCH

Zagadnienie zastosowań otwartych źródeł promieniowania jądrowego w badaniach hydrogeologicznych jest przedmiotem różnych opracowań w literaturze fachowej (E. Eriksson, 1962; H. W. Feely i inni, 1962). Stan badań światowych w tej dziedzinie najlepiej chyba charakteryzują sprawozdania z sympozjum, jakie się odbyło w marcu 1963 r. w Tokio pod auspicjami Międzynarodowej Agencji Atomowej w Wiedniu. Ogólnie można powiedzieć, że wykonane dotychczas prace są jeszcze mało zaawansowane i mają raczej wstępny charakter.

Na czoło wszystkich zagadnień pod względem ich zaawansowania eksperymentalnego wysuwają się prace dotyczące pomiaru ruchu wód gruntowych. W eksploatacji znajdują się metody pomiaru prędkości filtracji i kierunku płynięcia wód gruntowych. Znaczny krok naprzód w tych badaniach uczyniły prace, które wskazały na możliwość tych pomiarów w wybranym punkcie przy pomocy jednego otworu. Służy on równocześnie jako otwór, w którym się dokonuje iniekcji i pomiaru szybkości wynoszenia znacznika przez wodę.

Temat ten jest przedmiotem oddzielnego referatu, który podsumowuje dość poważne osiągnięcia polskie w tej dziedzinie (M. Borowczyk, Cz. Królikowski, 1964). Aparatura używana w naszych pomiarach zawiera sondę z licznikiem scyntylicyjnym oraz przelicznik impulsów. Przy wyznaczeniu kierunku płynięcia wody gruntowej scyntylator jest otoczony osłoną ołowianą ze szczeliną dopuszczającą promieniowanie gamma tylko z wybranego kierunku. Obrót sondy w otworze dokoła jej osi pozwala mierzyć rozkład koncentracji J^{131} w skale i ustalać stąd kierunek płynięcia wody. Aparatura, o której mowa, została skonstruowana w Instytucie Techniki Jądrowej A.G.-H. w Krakowie.

Przez zastosowanie aparatury zawierającej kilka sond, dających się opuścić równocześnie do otworu, na różne głębokości, wraz z urządzeniem do wstrzykiwania roztworu promieniotwórczego w określonej strefie między sondami, jesteśmy w stanie wykrywać i mierzyć ruch pionowy wody w otworze przy ustalonych pozycjach sond. Tego rodzaju badania mają duże znaczenie dla kontroli szczelności podłoża, w bezpośrednim sąsiedztwie tam, które zamykają duże zbiorniki wodne. Urządzenie to pozwala badać stan szczelności gruntu przy różnym spiętrzeniu wody (H. Moser i in., 1963). Takie urządzenie zostało zbudowane w Krakowskim Oddziale Zakładu VI IBJ i w końcu ubiegłego roku przeszło próbną eksploatację w terenie.

Metoda ta może się również okazać bardzo użyteczna w badaniach ruchu wody z powierzchni ziemi do zwierciadła wody gruntowej przez strefę aeracji, przy różnych warunkach poprzedzających ten ruch w różnych warunkach geologicznych.

BADANIA PODZIEMNYCH ZBIORNIKÓW WODY

Dużą przyszłość ma omawiana technika badawcza przy wykrywaniu połączeń między różnymi zbiornikami podziemnymi wody. Zagadnienie to ma pierwszorzędą wagę w pracach inżynierskich dotyczących zaopatrzenia w wodę. Metody tych badań są dziś jeszcze w bardzo początkowym stadium. Ze względu na długi czas trwania tych pomiarów w określonej próbie badawczej należy przypuszczać, że w przyszłości odegra tu ważną rolę technika związków kompleksowych, która pozwoli na wytwarzanie chelatów znaczonych, słabo oddziałujących z otoczeniem skalnym na przestrzeni czasu rzędu jednego roku.

Należy tu wspomnieć o wciąż jeszcze nie rozstrzygniętej kontrowersji między specjalistami na temat stosowania w tych badaniach trytu jako znacznika. Wyrażany jest pogląd, że badania te mogą być wykonywane

wyłącznie przy pomocy trytu naturalnego, jaki istnieje w wodach powierzchniowych, a nie trytu produkowanego sztucznie w reaktorach atomowych. Ta grupa specjalistów twierdzi, że trzeba absolutnie zachować „czystość“ zbiorników podziemnych. Należy pamiętać, że tryt, który się rozpada do połowy w ciągu 12,3 lat, na długo może „zanieczyścić“ wodę. Jeżeli go zastosujemy w jakimś zbiorniku zamkniętym, to przez długi czas nie możemy w nim podjąć nowych badań trytowych, lub będziemy zmuszeni do znacznego zwiększenia porcji tego izotopu w następnej próbie badawczej.

Mimo nie rozstrzygniętych dyskusji, o których mowa, podjęto w marcu 1961 r. i w lutym 1962 r. badania z zastosowaniem dużych ilości sztucznego trytu. Doświadczenia te przeprowadzono w Grecji (D. J. Burdon i in., 1963). Celem tych badań było ustalenie połączeń między dwoma zapadliskami krasowymi i źródłami wody odległymi od nich od kilku do około 30 km. W źródle odległym o około 6 km od pierwszego zapadliska tryt w wodzie pojawił się po 10 dniach od momentu zastrzyknięcia wody trytowanej. Rzeczą ciekawą jest, że wystąpił on w tym źródle jeszcze raz w próbkach wody, choć w znacznie mniejszej ilości, po 15 miesiącach od iniekcji porcji skażającej. W drugiej próbie skażenie trytowe pojawiło się po 7 dniach w wodzie innego źródła, po przejściu od miejsca „wstrzyknięcia“ (od drugiego zapadliska) drogi o długości około 30 km. Na podstawie tych pomiarów autorzy przeprowadzili ocenę zasobu wody nagromadzonej w zbiorniku związanym z pierwszym zapadliskiem. Praca ta spotkała się z pewną krytyką merytoryczną w związku z pewnymi jej niedociągnięciami metodycznymi. Z drugiej strony wzbudziła ona zainteresowanie jako pierwsza poważna próba w kierunku stosowania trytu w badaniach hydrogeologicznych. Trzeba tu podkreślić ogromny nakład środków, jakie zostały zaangażowane w wykonanie tej pracy.

Jedną z dużych zalet omawianej metody jest jej przydatność do oceny zasobu wody nagromadzonej w podziemnym zbiorniku. Przykładem techniki, jaką tu należy stosować, jest praca Smitha i Clarka (1963), dotycząca badania podziemnego zbiornika w rejonie krasowym w sąsiedztwie brzegu morskiego. Komora, w której znajdował się ten zbiornik zawierający częściowo słoną wodę, była dostępna dla człowieka. Zbiornik był rozpatrywany jako potencjalne źródło zaopatrzenia w wodę słodką.

Aby zdecydować o możliwości wykorzystania zasobu wody z tego zbiornika, trzeba było go dokładnie zbadać — ustalić wielkość i miejsce jego połączeń z morzem, sprawdzić, czy istnieją w sąsiedztwie inne duże zbiorniki łączące się z badanym, czy nie jest on jakimś odgałęzieniem większego systemu podziemnego, ustalić objętość jego zasobu wody.

Przeprowadzono najpierw próbę ustalenia kierunku, z którego woda morska wpływa do zbiornika w czasie przypływu i wypływa podczas odpływu. Zastosowano w tym celu bardzo prosty i pomysłowy pływak, zawierający detektory promieniowania gamma i urządzenie do wstrzykiwania J^{132} o bardzo krótkim okresie połowicznego rozpadu (2^h30^m). Izotop ten był na miejscu oddzielany tzw. metodą „dojenia“ od macierzystego izotopu Te^{132} ($T^{1/2} = 78^h$), z którego powstaje w trakcie rozpadu promieniotwórczego. Ta technika „dojenia“ zasługuje na szczególną uwagę w badaniach hydrogeologicznych i inżynierskich. Pozwala ona posłu-

giwać się w terenie bardzo krótkożyciowymi izotopami i umożliwia częste, wielokrotne powtarzanie prób z wstrzykiwaniem izotopów radioaktywnych do gruntu.

Dla oceny objętości wody w omawianym zbiorniku zastosowano tak zwaną metodę rozcieńczenia izotopowego. Sporządzono roztwór wodny zawierający J^{131} w odpowiednio dobranej koncentracji. Z przyrządzonej porcji odmierzono pewną niewielką ilość dla wykonania roztworów standardowych, z którymi porównywano radioaktywność próbek wody ze zbiornika w czasie jego badania. Resztę wiano do zbiornika i podjęto bardzo intensywne mieszanie wody strumieniem powietrza. Próby wody pobierano z określonego miejsca co pół godziny. Dzięki intensywnemu mieszaniu znacznik izotopowy okazał się wymieszany z wodą po 2,5 godzinach. Przemuchiwanie było utrzymywane przez cały czas pomiaru (114 godz.). Ustalono, że objętość wody skażonej po 30 godzinach mieszania była o około 40% większa niż objętość początkowa, co wskazało na istnienie połączeń badanego zbiornika z innymi.

OZNACZANIE WIEKU BEZWZGLĘDNEGO WÓD PODZIEMNYCH

Metoda radioizotopowa znajduje dziś coraz częstsze zastosowania do oznaczania wieku bezwzględnego wód, tj. do oceny okresu czasu, w ciągu którego rozpatrywany podziemny zbiornik wodny pozostaje w izolacji od wód powierzchniowych, zaopatrujących go w chronometryczny znacznik promieniotwórczy. Ta metoda okazuje się bardzo użyteczna przy rozwiązywaniu niektórych specjalnych problemów hydrogeologicznych.

Wykorzystujemy w niej zjawisko rozpadu promieniotwórczego naturalnych domieszek trytu lub C^{14} w wodzie, wytwarzanych w powietrzu atmosferycznym przez promienie kosmiczne. Dla określenia wieku pobranej próbki wody musimy oznaczyć stosunek koncentracji danego znacznika chronometrycznego w momencie pomiaru i w momencie odizolowania rozpatrywanego zbiornika od wód powierzchniowych. Przyjmujemy tu, że tryt i C^{14} w powietrzu atmosferycznym znajdują się w równowadze wiekowej, ich koncentracja w powietrzu nie zależy od czasu. Koncentrację początkową znacznika w wodzie podziemnej otrzymujemy przeprowadzając szczegółową analizę procesów chemicznych, jakim może on podlegać przy przesączaniu się wody opadowej przez grunt. Dla znacznika C^{14} musi być dodatkowo uwzględniony efekt frakcjonowania izotopowego w procesach biochemicznych. To frakcjonowanie izotopowe powoduje pewien deficyt C^{13} i C^{14} w roślinach lądowych w stosunku do CO_2 atmosferycznego i pewną nadwyżkę C^{13} w skałach wapiennych w stosunku do C^{12} .

Metoda trytowa pozwala na wyznaczanie wieku próbek poniżej 50 lat. Metoda C^{14} daje się stosować dla wód, których wiek jest większy od paru set lat, lecz nie dłuższy od 45—50 tys. lat. Przy zastosowaniu skomplikowanej i czasochłonnej techniki wzbogacania C^{14} w próbce na drodze termodyfuzji, ta górna granica może być przesunięta do 60÷70 tys. lat. W omawianych badaniach muszą być dobrze ustalone warunki pobierania próbek wody; by nie zachodziła obawa zanieczyszczenia ich wodami młodszymi, czy współczesnymi. Jest to szczególnie ważne, gdy badane

wody są bardzo stare, np. 20% domieszka węgla współczesnego w wodzie, która została odcięta od kontaktu z wodami powierzchniowymi przed 40 tys. lat, spowoduje obniżkę wyznaczonego wieku do 12,9 tysięcy lat.

Należy tu wspomnieć, że doświadczenia z eksplozjami termojądrowymi, przeprowadzone w latach 1954—1961 bardzo silnie zakłóciły równowagę wiekową trytu i C^{14} w przyrodzie i spowodowały znaczne zwiększenie błędu w ocenie wieku bezwzględnego próbek wody omawianą metodą.

Przykłady zastosowań omawianej metody w badaniach hydrogeologicznych podają I. C. Vogel i D. Ehhalt (1963) oraz K. O. Münnich i W. Roether (1963).

Instytut Techniki Jądrowej A.G.-H. w Krakowie.
Nadesłano dnia 25 lutego 1964 r.

PIŚMIENNICTWO

- BOROWCZYK M., KRÓLIKOWSKI CZ. (1964) — Jednotworowe metody izotopowe i elektryczne pomiaru kierunku przepływu wód gruntowych. *Prz. geol.*, 12, p. 106—112, nr 2. Warszawa.
- BURDON D. J., ERIKSSON E., PAYNE B. R., PAPADIMITROPOULOS, PAPA-KIS N. (1963) — The Use of Tritium in Tracing Karst Groundwater in Greece. In *Proceedings of the Symposium on the Application of Radioisotopes in Hydrology held by the International Atomic Energy Agency in Tokyo*, p. 309—316. Vienna.
- ERIKSSON E. (1962) — Radioactivity in Hydrology. In *Nuclear Radiation in Geophysics*, p. 47—60. Springer Verlag. Berlin.
- FEELY H. W., WALTON A., BARNETT C. R., BAZAN F. (1962) — Zastosowanie izotopów w badaniach zasobów wodnych. *Postępy Techniki Jądrowej*, Dod. nr 43. Warszawa.
- MOSER H., NEUMAIER F., RAUERT W. (1963) — New Experiences with the Use of Radioactivity Isotopes in Hydrology. In *Proceedings of the Symposium on the Application of Radioisotopes in Hydrology held by the International Atomic Energy Agency in Tokyo*, p. 283—295. Vienna.
- MÜNNICH K. O., ROETHER W. (1963) — A Comparison of Carbon-14 and Tritium Ages of Groundwater. In *Proceedings of the Symposium on the Application of Radioisotopes in Hydrology held by the International Atomic Energy Agency in Tokyo*, p. 397—406. Vienna.
- SMITH D. B., CLARK W. E. (1963) — An Investigation of the Hydraulics of an Underground Pool with Jodine-131. In *Proceedings of the Symposium on the Application of Radioisotopes in Hydrology held by the International Atomic Energy Agency in Tokyo*, p. 77—88. Vienna.
- VOGEL I. C., EHHALT D. (1963) — The Use of the Carbon Isotopes in Groundwater Studies. In *Proceedings of the Symposium on the Application of Radioisotopes in Hydrology held by the International Atomic Energy Agency in Tokyo*, p. 383—395. Vienna.

Леопольд ЮРКЕВИЧ

**РЕШЕНИЕ ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИХ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ
ВОПРОСОВ ИЗОТОПНЫМИ МЕТОДАМИ**

Резюме

В статье дается обзор применения радиоизотопов в инженерно-геологических и гидрогеологических исследованиях. Закрытые источники ядерного излучения находят применение при определении объемного веса и влажности грунтов. Приводятся типовые кривые градуировки для нескольких зондов, разработанных в Горно-Металлургической Академии в Кракове. Рассматривается способ выбора радиоизотопных измерителей для гидрогеологических исследований. Обращается внимание на большие возможности использования в этой области устойчивых комплексных соединений, меченных различными радиоактивными изотопами. Эти соединения будут более удобны для употребления в поле, чем идеальный изотопный измеритель, которым является тритиевая вода. В гидрогеологических исследованиях, основанных на радиоизотопных измерителях наиболее широко развиты работы по измерению движения грунтовых вод. Рассматриваются примеры оценки запасов вод подземных бассейнов и деланные попытки по определению сообщений между этими бассейнами. Указывается на большие возможности использования при решении специальных гидрогеологических вопросов метода определения абсолютного возраста подземных вод с помощью естественного трития и естественного изотопа углерода C^{14} .

Leopold JURKIEWICZ

**SOLUTION OF GEOLOGICAL-ENGINEERING AND HYDROGEOLOGICAL
PROBLEMS BY MEANS OF ISOTOPIC METHODS**

S u m m a r y

The paper deals with the application of radioisotopes in engineering geology and hydrogeology works. Closed nuclear radiation sources are used in measuring the bulk density and humidity of soils. In the paper there are given typical calibration curves for some probes, worked out in the Academy of Mining and Metallurgy in Cracow, as well as principles of selecting the radioisotope tracers used in hydrogeological studies. Moreover, the utility of durable complex compounds marked by various radioactive isotope is stressed, too. When using in the field, these are easier to apply than the ideal isotopic tracers, f.e. tritiated water. In hydrogeological investigations based on radioisotope tracers, the works concerning measurements of ground water flows are most developed. In addition to this, there are also presented estimates of water resources in underground basins, as well as attempts to determine the relationship between these basins. Further, it was pointed at the possibilities of method of absolute age determination of ground waters by means of native tritium and C^{14} , serving for solution of special hydrogeological problems.