

ZASTOSOWANIE METOD RADIOAKTYWNYCH DO PROFILOWANIA ODWIERTÓW

W CIĄGU UBIEGŁYCH PIĘCIU LAT w dziedzinie geofizycznych metod poszukiwawczych można zauważyć wyjątkowo dynamiczny rozwój metod radioaktywnych. Wiąże się on z nowymi osiągnięciami fizyki jądrowej, z wprowadzeniem do prac przemysłowych izotopów promieniotwórczych i silnych źródeł neutronowych oraz z upowszechnieniem techniki liczników, scyntylacyjnych. Szczególnie wielkie zastosowanie znalazły metody radioaktywne przy badaniu stanu technicznego i kontroli odwiertów oraz przy eksploatacji złóż ropy naftowej. Można stwierdzić, że wysunęły się one ostatnio na czoło spośród innych metod profilowania odwiertów.

W chwili obecnej kompleksowe stosowanie i interpretacja wyników metod radioaktywnych, elektrycznych, wykresów zwiercalności skał oraz fotografia w odwiertach pozwalają w praktyce na zupełne wyeliminowanie rdzenia. Oznacza to znaczne zwiększenie szybkości i obniżenie kosztów wiercenia.

O rozmiarach prac poszukiwawczych prowadzonych za granicą za pomocą metod radioaktywnych może świadczyć np. fakt, że w ZSRR w ciągu ostatnich pięciu lat ilość terenowych grup pomiarowych posługujących się tymi metodami wzrosła 20-krotnie, z 4 w r. 1950 do 80 w r. 1955 (10). W niektórych ośrodkach geofizycznych projektuje się już budowę specjalnych reaktorów przeznaczonych wyłącznie do produkcji izotopów, potrzebnych do wykonywania różnych operacji w odwiertach. Niniejszy artykuł ma na celu przeglądowe omówienie najbardziej interesu-

jących wariantów metody radioaktywnego profilowania odwiertów oraz przedstawienie możliwości zastosowania ich w warunkach krajowych.

W chwili obecnej można wyróżnić następujące warianty profilowań radioaktywnych w odwiertach:

1. Metoda naturalnego promieniowania gamma.
2. Metoda neutronowa.
3. Metoda rozproszonego promieniowania gamma.
4. Metoda wzbudzonej aktywności.
5. Metoda izotopowa.

1. METODA NATURALNEGO PROMIENIOWANIA GAMMA

Naturalna promieniotwórczość skał jest warunkowana obecnością w nich minerałów uranu, toru, aktynouranu (wraz z produktami ich rozpadu) oraz potasu.¹ Wszystkie skały posiadają zazwyczaj niewielkie dość charakterystyczne zawartości wymienionych pierwiastków.

Pierwotnym źródłem elementów radioaktywnych w skałach skorupy ziemskiej są skały magmowe, przy czym spośród nich skały kwaśne odznaczają się większą aktywnością

¹ Promieniotwórczość naturalną rubidu, samaru i luteceu jako nie mającej zasadniczego wpływu wskutek małych koncentracji tych pierwiastków w skorupie ziemskiej w rozważaniach niniejszych pominięto.

niz skały zasadowe. Obecność związków uranowych i torowych w skałach osadowych tłumaczy się nie tylko mechanicznym osadzeniem się drobnych cząstek minerałów torowo-uranowych oraz tworzeniem się minerałów wtórnych, lecz także skutkiem strącania się z roztworów związków uranowych.

Dużą rolę w ogólnej promieniotwórczości skał przypisuje się również potasowi.

Najwyższą aktywność spośród znanych skał obserwuje się w utworach głębokowodnych: bitumicznych, drobnosproszkowanych ilach, glinach, łupkach itp. Przyczyna tego zjawiska nie jest jeszcze dokładnie wyjaśniona. Przypuszcza się, że wpływały na to specjalne cechy środowiska, jak np. katalityczne oddziaływanie koloidów na strącanie się wielowartościowych jonów U i Th. Najsłabszą promieniotwórczością spośród znanych skał odznaczają się sole kamienne, gipsy, anhydryty i węgle kamienne. Zawartość w skałach określonej ilości pierwiastków radioaktywnych stanowi niekiedy cechę charakterystyczną poszczególnych skał. Ilościowa rejestracja promieniowania jądrowego emitowanego przez daną skałę może z kolei w pewnych przypadkach dać podstawę do litologicznego zróżnicowania skał następujących po sobie w niezna-nej kolejności. Warunki takie istnieją właśnie przy profilowaniu odwiertów.

Zawartość pierwiastków promieniotwórczych w skałach jest zazwyczaj bardzo niewielka. Do ilościowego określenia jej w geologii wprowadzono umowną jednostkę tzw. gramorównoważnik radu. Wyraża on aktywność promieniotwórczą wszystkich zawartych w danej skale elementów radioaktywnych w przeliczeniu na rad. Co do wielkości bezwzględnej gramorównoważnik radu równa się stosowa-nej w fizyce jednostce aktywności promieniotwórczej — jednemu curie (preparat ma aktywność jednego curie, jeżeli w jednej se-kundzie następuje średnio rozpad $3,7 \cdot 10^{10}$ ato-mów). Radioaktywność skały podaje się zwy-kle w gramorównoważnikach radu na gram skały. Wartość ta jest na ogół mała i waha się w granicach 10^{-11} — 10^{-12} Ra/g skały. Są to ilości nie dające się określić za pomocą me-tod chemicznych. Ocenia się je wyłącznie na drodze fizycznej na podstawie rejestracji wy-syłanego przez te pierwiastki promieniowania jądrowego

Pierwsze próby nad radioaktywnym profi-lowaniem odwiertów przeprowadzono w ro-ku 1933 w celu odtworzenia profilów lito-logicznych na podstawie względnych różnic pro-mieniotwórczości naturalnej skał. Na ogół jednak różnice między typowymi skałami, jak np. piaskowiec, wapień, anhydryt, dolomit itp. są niewielkie i trudne do uchwycenia. Z tego powodu metody gamma używa się przeważnie do wykrywania obecności łupków, ilów oraz glin i wyróżniania ich od innych skał. Jednak kompleksowa interpretacja krzywych gamma

z wynikami profilowań elektrycznych, neutro-nowych, termicznych i in. pozwala na praw-dłowe zidentyfikowanie szeregu innych skał. W większości krajów we wszystkich odwier-tach przeprowadza się na ogół profilowanie radioaktywne. Natomiast sama interpretacja odbywa się za pomocą ustalonych założeń i specjalnie do tego celu zestawionych tabel. Dziedzinę interpretacji krzywych profilowania radioaktywnego omówiono szerzej w książce W. N. Dachnowa (11). Autor książki podkreśla wyraźnie kompleksowy sposób interpretacji wyników uzyskanych wieloma metodami.

Metodę pomiaru naturalnego promieniowa-nia gamma w odwiercie poleca się stosować, jak wynika z opublikowanych prac, w nastę-pujących przypadkach:

1. Przy odtwarzaniu profilu litologicznego w starych odwiertach. Zdarza się często, że istniejące odwierty zostały niedostatecznie spro-filowane lub ich dokumentacje geologiczne uległy zniszczeniu. W warunkach zarurowanego odwiertu nie można stosować innych metod ba-dawczych. W takich przypadkach metoda gamma pozwala na wydzielenie formacji łup-kowych oraz na przybliżone odtworzenie pro-filu litologicznego, jeżeli znany jest uprzed-nio rząd wielkości promieniowania skał na danym obszarze. Zestawienie wykresu gam-ma z krzywą neutronową pozwala stwierdzić obecność złoża ropy naftowej, określić jego miąższość, głębokość występowania oraz sto-pień nasycenia węglowodorami.

2. Przy przeprowadzaniu korelacji między sąsiednimi odwiertami. Przy określaniu pew-nych charakterystycznych warstw przewod-nich oraz kąta ich upadu można posługiwać się względnymi anomaliami na krzywej wy-nikowej. W ten sposób udaje się korelować nie tylko odwierty leżące blisko siebie, lecz także przeprowadzać na tej podstawie studia stratygraficzne na większych przestrzeniach

3. Przy poszukiwaniu złóż pierwiastków ra-dioaktywnych. Jest to jedyna metoda poszu-kiwań dająca natychmiastową odpowiedź, co do występowania złóż tych pierwiastków. W USA zbudowano w ostatnich latach specjalną apa-raturę do profilowania radioaktywnego od-wiertów nastawioną na poszukiwania złóż uranowych, rejestrującą jednocześnie radio-aktywność skał oraz ich opór elektryczny (1). Niezależnie od powyższych zastosowań metody radioaktywne dają pozytywne wyniki przy poszukiwaniu złóż innych kopalin użytecznych, które z reguły posiadają domieszki radio-aktywne (np. fosforyty, niektóre węgle bru-natne itp.).

4. Przy poszukiwaniu soli potasowych. Me-toda ta polega na rejestracji naturalnego pro-mieniowania gamma wysyłanego przez potas. Ma ona szczególne znaczenie przy prowadzeniu prac poszukiwawczych i jest opracowywana w różnych wariantach.

5. Przy poszukiwaniu węgla kamiennych, które odznaczają się wyjątkowo niską radioaktywnością. Z wypowiedzi przedstawicieli przemysłu węglowego prowadzących prace poszukiwawcze wynika, że dzięki metodzie profilowania gamma uzyskują oni szereg cennych informacji pomocnych przy identyfikacji pokładów niezauważonych podczas wiercenia.

6. Jako metodę uzupełniającą wskazania innych metod profilowania oraz przy kompleksowej interpretacji danych pomiarowych uzyskanych za pomocą wielu metod.

Niezależnie od dotychczasowych wyników uzyskanych omawianą metodą w ubiegłym pięcioleciu wykonano wiele prac, zmierzających do teoretycznego opracowania fizycznych podstaw metody oraz szereg prac związanych ze sposobami interpretacji uzyskanych wyników i unowocześnieniem aparatury pomiarowej. I tak np. znaleziono teoretyczną zależność między kształtem otrzymanych krzywych a ϕ odwiertu, prędkością profilowania, wymiarami detektora i gęstością płuczki wypełniającej odwiert (4).

Zbudowano także w tym czasie specjalną aparaturę do profilowania głębokich odwiertów przystosowaną do pracy w temp. do 174°C i przy ciśnieniu 964 kG/cm². Przez wprowadzenie do rejestracji liczników scyntylacyjnych wielokrotnie zwiększono efektywność pomiaru, a co za tym idzie i prędkość profilowania. W chwili obecnej na skalę przemysłową stosuje się sondy zawierające liczniki scyntylacyjne jedynie w USA i Kanadzie. W ZSRR znalazły już one zastosowanie na skalę półprzemysłową.

Korzyści wynikające z zastosowania liczników scyntylacyjnych są znaczne. Wydajność rejestracji zwiększa się kilkadziesiąt razy przy ednoczesnym znacznym zmniejszeniu powierzchni przekroju czynnego detektora. Wskutek tego detektor promieniowania można z pewnym przybliżeniem traktować jako punktowy. Dzięki temu aparatura taka jest w stanie wykrywać przy pełnej szybkości profilowania wkładki skał o miąższości poniżej 30 cm, a więc użycie liczników scyntylacyjnych zwiększa znacznie ostrość i dokładność profilu. Pozwala ono również na przeprowadzenie kalibracji aparatury w określonych jednostkach, np. mikrorentgenach na godz., co z kolei pozwala na ilościową interpretację uzyskiwanych wykresów (2). Zastosowanie liczników scyntylacyjnych do aparatury pomiarowej dało również możliwość rozwoju dalszych metod opartych na rejestracji promieniowań jądrowych².

² Istnieje nowa metoda radiometryczna, która przy użyciu liczników scyntylacyjnych pozwala na wszczęcie poszukiwań złóż ropy naftowej z powierzchni ziemi.

W Polsce istnieje 5 aparatów do profilowania gamma produkcji krajowej. Do chwili obecnej za pomocą tych zestawów uzyskano szereg ciekawych wyników pomiarowych z zakresu poszukiwań ropy naftowej, fosforytów, soli potasowych, węgla kamiennych itp. Wyniki te zostały zreferowane na zjeździe naukowym wychowanków AGH w Krakowie w dn. 13 XI 1955 r. przez mgr inż. St. Plewa (Przedsiębiorstwo Geofizyki Kopalnianej Przemysłu Naftowego). Dla przykładu można przytoczyć omawianą na zjeździe krzywą gamma i krzywą potencjałów własnych przedstawioną na ryc. 1.

Jak widać z wykresu krzywa promieniowania gamma niezależnie od rejestracji zmian litologicznych daje również pewne informacje, co do profilu stratygraficznego odwiertu.

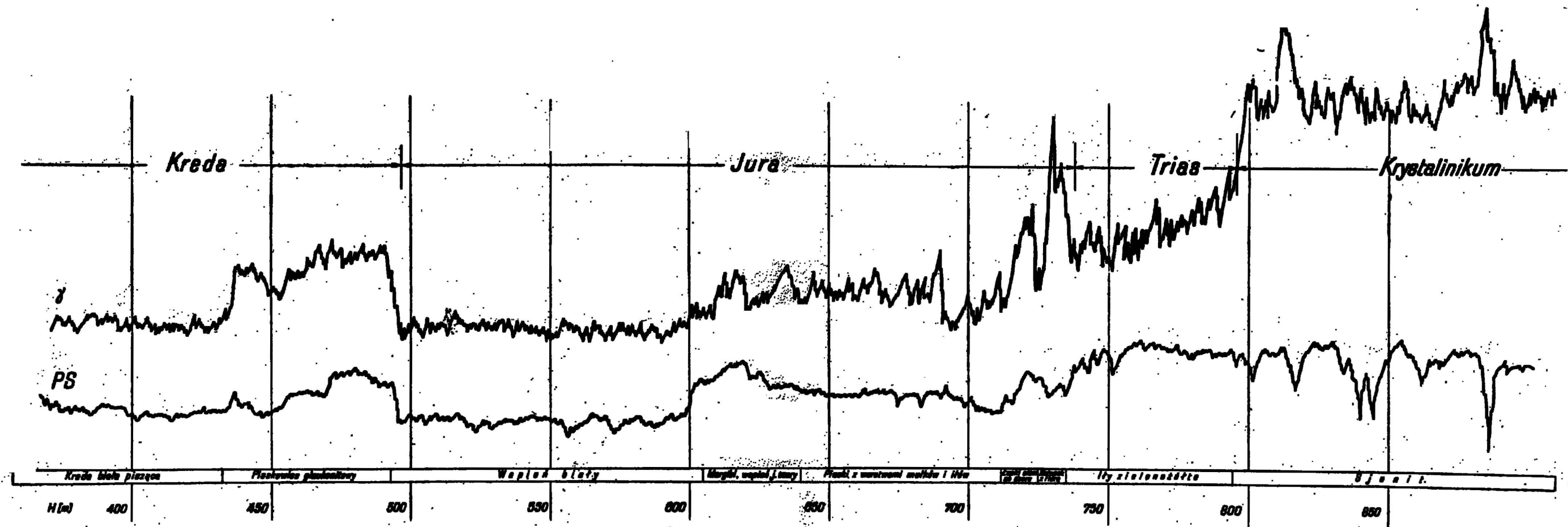
Z powyższego przeglądu wynika, że metoda naturalnego promieniowania gamma znalazła już w kraju szerokie zastosowanie. Wychowano użytkowników i interpretatorów tej metody, zyskała ona już wielu zwolenników wśród polskich geofizyków, dzięki niej osiągnięto (zwłaszcza przy kompleksowej interpretacji wielu metod) szereg interesujących wyników nieustępujących osiągnięciom tej metody w innych krajach. Jednak brak odpowiednich środków nie pozwolił dotychczas na dalszy rozwój w kraju badań i prac przemysłowych w tym kierunku, zwłaszcza w dziedzinie wprowadzenia i szerokiego zastosowania metod neutronowych i izotopowych.

2. METODA NEUTRONOWA

Neutronową metodę profilowania odwiertów wprowadzono w latach 1941—42 w celu określania stopnia porowatości przewierczanych skał oraz do wyróżnienia obszarów złoża zawierających węglowodory.

Właściwe pomiary wykonuje się w zasadzie za pomocą aparatury używanej do zdejmowania profili naturalnego promieniowania gamma, z tym że wraz z sondą opuszcza się do odwiertu silne źródło neutronowe. Jest ono odpowiednio odseparowane grubym absorberem ołowianym, aby nie oddziaływało na umieszczony powyżej detektor promieniowania.

Szybkie neutrony wysyłane ze źródła stosunkowo łatwo przenikają przez płuczkę, rury wiertnicze i słup cementowy, dostając się do otaczającego górotworu. W skałach ulegają one spowolnieniu a następnie pochłanianiu przez jądra pierwiastków wchodzących w skład skał tworzących ściany odwiertu. Wynikiem pochłonięcia neutronu jest wypromieniowanie jednego lub kilku fotonów (o sumarycznej energii równej energii wiązania neutronu w jądrze). W tabeli I zestawiono energie promieniowania γ , wysyłanego przez



Ryc. 1 — PS — krzywa potencjałów własnych; γ — krzywa naturalnego promieniowania gamma (wg S. Plewy)

Tabela I

ENERGIE PROMIENIOWANIA GAMMA WYSŁANEGO PRZY POCHWYCIENIU TERMICZNYCH NEUTRONÓW
(P. S. MITTELMAN, R. A. LIECKE, „NUCLEONICS”, MAY 1955)

Pierwiastek wyjściowy	Przekrój czynny na absorpcję termicznych neutronów (σ) w barnach	Energia fotonów gamma w określonych przedziałach na 100 pochwyceń w megaelektronowoltach (MeV)					Najwyższa energia fotonów gamma (MeV)	Średnia ilość fotonów przypadająca na 1 akt pochwyceń
		0-1	1-3	3-5	5-7	> 7		
Azot 14	0,1	?	> 5	> 35	90	39	10,8	
Aluminium	0,215	?	> 13	77	21	35	7,724	~ 2
Antymon	6,4	?	80	36	12		6,80	2,7
Arsen	4,1	?	80	47	22	1	7,30	
Bar	1,17	?	80	75	14	1	9,23	
Beryl	0,009	0	0	50	75	0	6,814	
Bismut	0,015	0	0	100	0	0	4,17	
Bor-10	3990	0	0	0	0	0	0,478	
Chlor	32	?	20	13	18	21	8,56	> 3,1
Chrom	2,9	> 37	16	12	18	69	9,716	> 2
Cynk	1,06	?	?	48	29	14	9,51	
Cyna	0,65	?	?	139	33	4	9,35	
Cyrykon	0,18	?	?	113	35	4	8,66	
Fosfor	0,193	?	?	115	43	11	7,94	
Fluor	0,009	?	?	?	35	0	6,63	
Gadolin	36300	?	80	28	4	2	7,78	3,9
Ind	190	?	?	26	4	0	5,86	3,3
Kadm	3500	> 120	20	73	17	1	9,046	4,1
Krzem	0,160	?	< 100	229	41	16	10,55	
Kobalt	34,8	?	?	36	49	8	7,486	
Lit	910	0	0	0	0	0	0	
Magnez	0,059	?	< 59	110	25	11	9,216	
Mangan	12,6	?	?	27	30	27	7,261	2,6
Miedź	3,59	?	?	23	22	42	7,914	2,6
Molibden	2,4	?	?	84	26	3	9,15	
Nikiel	4,8	?	?	14	30	72	8,997	
Niob	1,1	?	?	54	14	0	7,19	2,6
Ołów	0,17	0	0	0	7	93	7,38	
Płatyna	8,1	?	~ 120	45	15	1	7,820	
Potas	1,69	?	36	36	32	12	9,28	
Praseodym	11,2	?	80	34	8	0	5,83	
Rod	150	?	70	38	10	0	6,792	
Rtęć	380	?	?	86	41	0	6,446	3,3
Samar	10600	?	~ 150	45	5	1	7,89	5,6
Skand	22	?	?	63	29	14	8,85	
Selen	11,8	?	?	65	27	11	10,483	
Sód	0,47	100	< 56	61	29	0	6,41	> 2
Srebro	60	?	80	70	17	0,5	7,27	2,9
Stront	1,18	?	~ 140	62	49	13	9,22	
Siarka	0,49	?	19	80	91	8	8,64	
Tantal	21,3	?	~ 50	26	2	0	6,07	
Tal	3,3	?	~ 100	76	62	0	6,54	
Tytan	5,8	> 50	100	33	99	10	9,39	
Wapń	0,406	?	50	60	101	2,4	7,83	
Węgiel 12	0,0045	?	> 30	100	0	0	4,95	1,3
Wolfram	19,2	?	?	53	14,5	0,5	7,42	
Wanad 51	4,7	?	?	24	54	18	7,305	2,5
Wodór 1	0,330	0	100	0	0	0	2,220	
Złoto	94	?	?	66	38	0	6,794	3,5
Zelazo	2,43	?	< 10	24	22	50	10,16	1,7

Uwaga: emisja zachodzi w czasie $\sim 10^{-14}$ sek.

Jądra pierwiastków przy pochwyceń termicznych neutronów. Proces spowalniania neutronów zależy od własności środowiska, w którym to spowalnianie zachodzi; im masa atomów medium spowalniającego jest bardziej zbliżona do masy neutronu, tym prędzej zachodzi zjawisko spowalniania. Z rozważania tego wynika, że proces ten najlepiej przebiega w środowisku bogatym w wodór. Neutrony osiągający energię taką, jaką posiadają drobiny materii będące w ruchu cieplnym (ok. 0,025 eV), nie ulegają już dalszemu hamowaniu; dalszy ich ruch rządzący jest prawami dyfuzji.

Dyfundujące neutrony zostają pochłaniane przez jądra atomów środowiska, przez które przechodzą. Zdolność pochłaniania powolnych neutronów jest cechą charakterystyczną dla każdego pierwiastka (opisuje się ją przez tzw. przekrój czynny atomu na absorpcję termicznych neutronów — wielkość proporcjonalną do współczynnika absorpcji).

Z pierwiastków posiadających stosunkowo duży przekrój czynny i często spotykanych w przyrodzie można wymienić wodór i chlor. Wskutek tego na neutronowych profilach odwiertów skały zawierające wodór i chlor są łatwe do wyróżnienia.

Rejestrowane efekty zależą jednak również od warunków geometrycznych. Przy małych odległościach preparatu neutronowego i detektora (przy tzw. małej długości sondy) w przypadku profilowania skał zawierających wodór obserwuje się anomalie dodatnie, czyli wzrost natężenia promieniowania gamma, przy większych zaś długościach sondy efekt jest odwrotny — zmniejszenie się natężenia promieniowania gamma, tzw. efekt inwersji (14). W praktyce jednak ze względu na niebezpieczeństwo rejestracji promieniowania gamma, pochodzącego bezpośrednio ze źródła, stosuje się na ogół większe długości sondy i strefy zawierające wodór wyróżniają się na wykresie jako anomalie ujemne.

Metoda określania tą drogą zawartości wodoru w skałach nosi potoczną nazwę metody neutron-gamma, ponieważ rejestruje się promieniowanie gamma powstałe w wyniku pochłonięcia neutronu przez jądro atomu (reakcja n, γ).

W trakcie dalszych badań wykazano, że analogiczne krzywe jak w metodzie n, γ otrzymuje się przez pomiar w odwiercie gęstości powolnych (termicznych) rozproszonych neutronów. Metoda ta jest nazywana metodą „neutron-neutron” (n, n) i również znalazła szerokie i praktyczne zastosowanie. Różnica w budowie aparatury polega jedynie na tym, że w sondzie zamiast detektora promieniowania gamma umieszczony jest licznik neutronów. Mimo że wskazania obu opisanych metod są bardzo podobne, metody (n, n) używa się chętniej przy ilościowej interpretacji porowatości skał, bowiem zarówno rozważania teoretyczne, jak i prace modelowe wykazują, że gęstość neutronów termicznych (dokładniej — gęstość neutronów nadtermicznych) w mniejszym stopniu zależy od składu chemicznego skał, co znacznie ułatwia interpretację wyników. Zaletą metody (n, γ) natomiast jest to, że pozwala ona w sposób bardziej efektywny wyróżnić strefę kontaktu między wodą i ropą naftową przy zastosowaniu licznika scyntylacyjnego i odpowiedniego dyskryminatora rejestrowanych impulsów.

Do opisanych pomiarów używa się źródeł neutronowych radowo-berylowych lub polonowo-berylowych. Źródła radowe zawierają zwykle ok. 1 g radu zmieszanego z berylem, co odpowiada mniej więcej emisji $1-1,5 \cdot 10^7$ neutronów na sekundę. Niekorzystnie jednak przedstawia się w takim przypadku stosunek tła promieniowania gamma pochodzącego ze źródła do ilości emitowanych neutronów. Przy takim samym natężeniu neutronów wychodzących ze źródła ilość emitowanych fotonów gamma przez źródło $Ra + Be$ jest około 10 000 razy większa niż przy źródle $Po + Be$. Jednakże wydajność źródeł polonowych jest mniejsza. Z 1 curie $Po + Be$ uzyskuje się średnio ok. $2,8 \cdot 10^6$ neutr./sek., wskutek czego do profilowań stosuje się zwykle źródła neutronów składających się z ok. 3 curie $Po + Be$. Źródła polonowe są w użyciu bezpieczniejsze i o wiele tańsze, co znacznie zmniejsza ryzyko pozostawienia preparatu w odwiercie w przypadku awarii. Wadą tych źródeł jest jednak krótki okres półtrwania polonu (138,3 dni).

Naturalne źródła neutronowe stanowią mimo stosowania środków ochronnych wielkie niebezpieczeństwo dla obsługi i zwiększanie ich aktywności poza podane wyżej granice jest bardzo ryzykowne. W związku z tym obecnie dyskutuje się możliwość budowy małych akceleratorów, które pozwoliłyby na czyszczenie wewnątrz odwiertu strumienia neutronów przewyższającego o kilka rzędów wielkości natężenie uzyskiwane w źródłach

opisywanych powyżej. Przewiduje się mianowicie możliwość budowy małego akceleratora o wymiarach pozwalających na wprowadzenie go do odwiertu, który pozwalałby na uzyskanie aktywności rzędu $10^7 - 10^9$ neutr./sek. Dyskutuje się możliwość uzyskiwania neutronów z reakcji deuteronów z trytem $^3T(d, n)^4He$, która może mieć dużą wydajność w obszarze rezonansowym ok. 100 keV. Urządzenie takie pozwalałoby na kontrolowany proces wytwarzania bardzo silnego strumienia neutronów przy zachowaniu zupełnego bezpieczeństwa obsługi, gdyż akcelerator mógłby być wyłączany zgodnie z życzeniem operatorów.

W warunkach spotykanych w przyrodzie woda na ogół wypełnia pustacie i pory w skałach, wskutek czego krzywa neutronowa może być interpretowana jako krzywa porowatości skał. W ostatnich latach na podstawie krzywych neutronowych interpretuje się ilościowo porowatość skał tworzących ściany odwiertu. W tym celu zdejmuje się kilka profili neutronowych przy różnych odległościach między preparatem a detektorem. Z rozważań teoretycznych wynika bowiem, że rejestrowane natężenie promieniowania w odwiercie zależy od porowatości skał i od długości sondy (odległości preparat-detektor). Mając do dyspozycji wyniki profilowania przy kilku długościach sondy, można z wystarczającą do celów praktycznych dokładnością ocenić wartość współczynnika porowatości skał (11).

Rewelację w rozwoju tej metody stanowi wprowadzenie do pomiarów nowej aparatury z wykorzystaniem liczników scyntylacyjnych. Nowsze modele takich aparatów, niezależnie od zwiększonej wydajności i zmniejszenia wymiarów detektora, pozwalają również na rejestrację promieniowania gamma o ściśle określonej energii (przez zastosowanie w elektronowej części aparatury dyskryminatorów amplitudy). Pozwalają one na przeprowadzenie spektroskopii promieniowania gamma w odwiercie w trakcie pomiaru, co znacznie rozszerza możliwości opisywanej metody.

Jak wynika z publikowanych prac (9), można tą metodą dokonać w złożu oznaczenia granicy kontaktu woda-ropa naftowa. Zarówno woda, jak i ropa naftowa co do charakteru sztucznej promieniotwórczości spowodowanej bombardowaniem neutronami nie wykazują różnic. Obydwie zawierają wodór, węgiel aktywując się nie wysyłając promieniowania gamma natomiast izotop tlenu ^{16}O posiada niewielki przekrój czynny aktywacji za pomocą termicznych neutronów ($0,0017$ barna²), co powoduje, że nie wpływa on zupełnie na zmiany radioaktywności. Dla wydzielenia strefy kontaktu wody i ropy w odwiercie wykorzystano

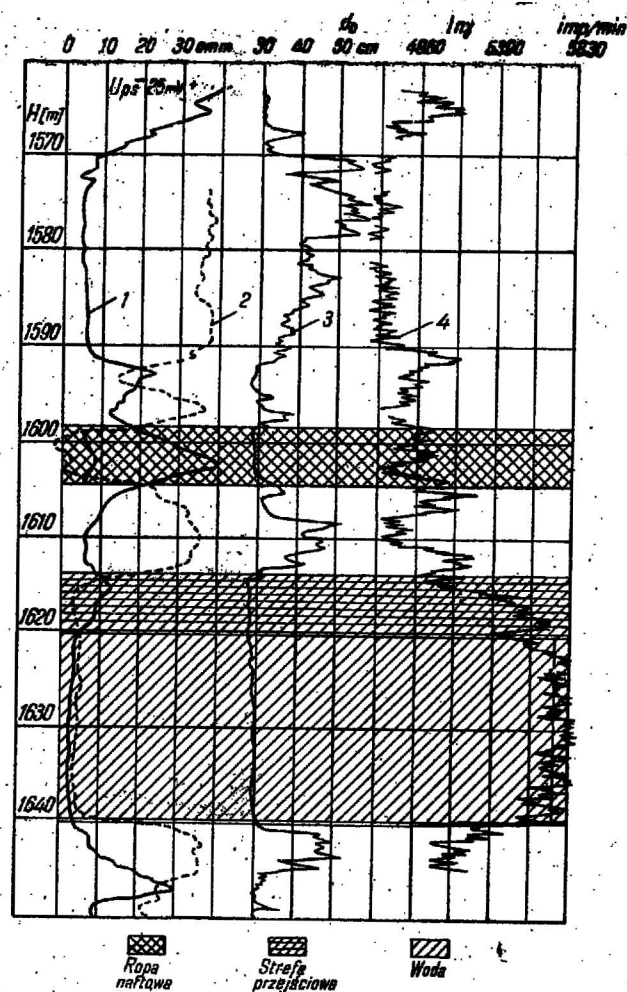
² Jest to jednostka, w jakiej wyraża się przekrój czynny jąder atomowych, wynosząca 10^{-24} cm².

fakt, że wody złożowe są zwykle zmineralizowane. W przeważnej części mineralizacja ta jest spowodowana obecnością chlorku sodu. Chlor, posiadający stosunkowo duży przekrój czynny na absorpcję termicznych neutronów (32 barny), na profilu wyróżnia się zwiększoną promieniotwórczością rejestrowaną w czasie profilowania. Wysyłane promieniowanie gamma jest bezpośrednim skutkiem pochłonięcia neutronu przez jądro atomu chloru, przy czym energia wiązania neutronu (dla chloru $E \sim 8,56$ MeV) zostaje wypromieniowana w formie jednego kwantu lub w kaskadzie. Skutkiem tego wtórne promieniowanie gamma wysyłane ze środowiska zawierającego chlor charakteryzuje się zwiększoną energią poszczególnych kwantów. W wyniku tego procesu naprzeciw strefy kontaktu woda-ropa obserwuje się wzrost rejestrowanego promieniowania gamma pod warunkiem użycia aparatury rejestrującej ze zwiększoną wydajnością twardą składową promieniowania. Za pomocą tej metody uzyskano wyniki pozwalające na jednoznaczne w wielu przypadkach wyróżnienie poszukiwanego kontaktu między ropą a wodą w złożu w warunkach zarurowanego odwiertu. Jeden z przykładów przedstawia ryc. 2.

Metody neutronowe stosuje się obecnie z reguły w połączeniu z metodą naturalnego promieniowania gamma i są one ściśle uzupełnieniem tej ostatniej metody⁴. Metodą gamma można wyróżnić szczególnie wyraźnie łupki i iły spośród innych skał. Notowane są jednak wypadki anomalnej promieniotwórczości pewnych skał przewyższającej naturalną radioaktywność łupków (np. wapienie z Wyoming i promieniotwórcze piaski w pld. Texasie). Pomocną w tych przypadkach jest krzywa neutronowa. Łupki jako utwory zawierające wiele wody krystalicznej odznaczają się na niej niskim efektem promieniotwórczym.

Metody neutronowe, wraz z metodą naturalnego promieniowania gamma, stanowią jedyny sposób profilowania zarurowanych odwiertów, pozwalający na przybliżone odtworzenie ich litologii, wyznaczenie horyzontów roponośnych i wodonośnych oraz ich wzajemnego kontaktu. Wiele odwiertów zostało wykonanych w czasie, gdy nie stosowano jeszcze żadnych metod geofizycznych lub dokumentacje ich mogły ulec zniszczeniu. Metody radioaktywne stanowią w tych przypadkach bardzo ważny środek rozpoznawczy. Przykładem rozwiązania podobnych problemów może służyć fakt, że w ZSRR całą dokumentację geologiczną zagłębia borysławskiego odtworzono wyłącznie za pomocą tych metod (10).

⁴ Od kilku lat stosuje się do pomiarów specjalny przyrząd pozwalający na jednoczesną rejestrację obu krzywych w trakcie jednego zapuszczenia przyrządu do odwiertu.

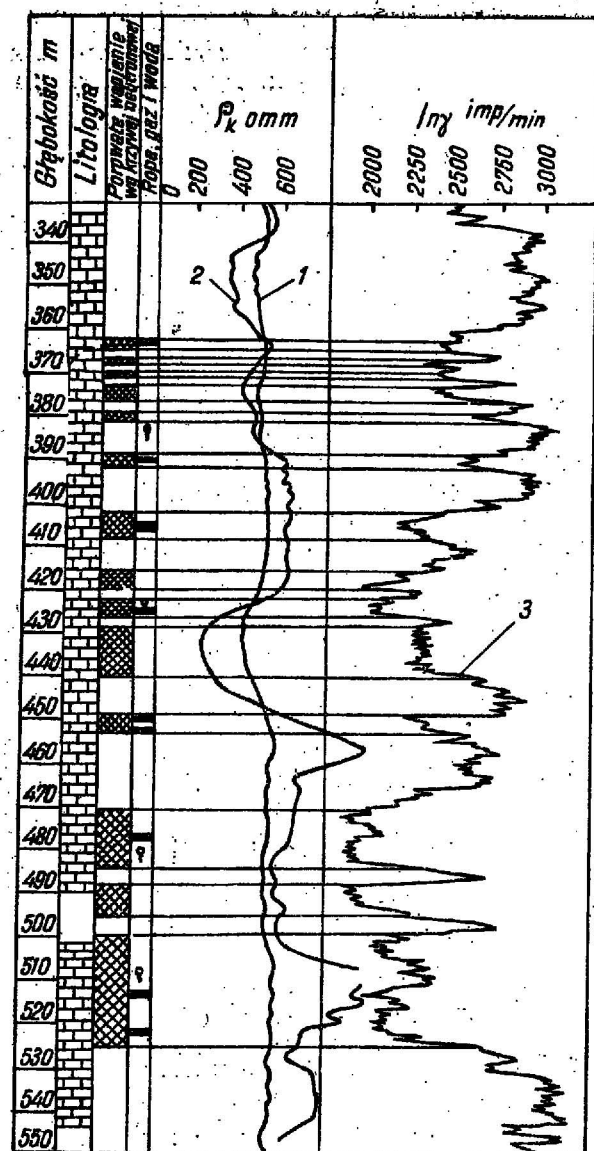


Ryc. 2 — Przykład wydzielenia w odwiertcie strefy kontaktu wody i ropy naftowej za pomocą analizy widma energetycznego wtórnego promieniowania gamma skał, wzbudzonego przez neutrony (wg W. N. Dąchnowa)

1 — krzywa oporowa (pozornego oporu właściwego; sonda B7, 5AO, 75 M; gk), 2 — krzywa potencjałów własnych, 3 — kawernogram, 4 — krzywa natężenia wzbudzonych promieni gamma, rejestrowanych przy użyciu spektrometru gamma (Iny)

Metody neutronowe są stosowane również z reguły przy ustalaniu miejsc perforacji odwiertów, zwłaszcza na dużych głębokościach. Za pomocą sondy neutronowej oraz specjalnego wskaźnika miejsc złączy rur wiertniczych można przeprowadzić bardzo dokładnie perforację. Wreszcie przez zastosowanie ilościowego pomiaru porowatości złoża można uzyskać informacje potrzebne do opracowania racjonalnych metod wtórnej eksploatacji złóż.

W nowych odwiertach wyniki metod radioaktywnych interpretuje się z reguły łącznie z wynikami uzyskanymi za pomocą innych metod profilowania. Przykład wyróżnienia stref porowatych na krzywej neutronowej przedstawia ryc. 3. W wielu przypadkach metody te stosuje się do wyznaczania w złożu poziomu zawodnienia oraz do umiej-



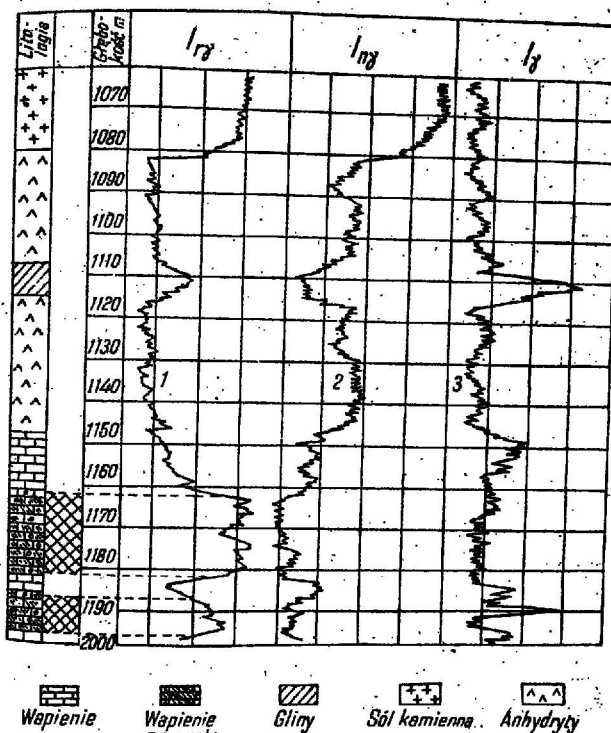
3 — Przykład wyróżnienia stref porowatych opornych i wodonośnych wapieniach metodą neutronową (wg W. N. Dachnowa) krzywa oporowa (sonda MB, OAIB; ρ_k), 2 — ta sama w innej skali, 3 — krzywa neutronowa (krzywa promieni gamma wzbudzonych przez neutrony; $I_{n\gamma}$)

wienia kontaktu fazy ciekłej i gazowej łożu (kontakt gaz-ropa).

3. METODA ROZPROSZONEGO PROMIENIOWANIA GAMMA

W chwili obecnej opracowywana jest metoda, która polega na rejestracji rozproszonego promieniowania γ . Razem z sondą opuszcza się w trakcie pomiaru, odpowiednio niżej ołowiem od liczników G.M., sztuczne źródło promieniowania (najczęściej preparat izotopowy) o aktywności rzędu kilku milirad.

Z rozważań teoretycznych i pomiarów doświadczalnych wynika, że natężenie promieniowania rozproszonego przez różne skały jest odwrotnie proporcjonalne do ich gęstości. Zależy ono również od średnicy otworu i gęstości płuczki znajdującej się w otworze, lecz ponieważ podczas pomiaru parametry te na ogół nie ulegają zmianie, krzywa wynikowa odzwierciedla zmianę gęstości skał w otworze. Metoda powyższa znajduje się w trakcie opracowywania i nie znalazła jeszcze zastosowania przemysłowego na szerszą skalę. Jednakże wyniki uzyskane tą metodą w fazie eksperymentów pozwalają przewidywać szeroki rozwój tej metody profilowania (ryc. 4).



Ryc. 4 — Zestawienie krzywych rozproszonego promieniowania gamma, krzywej neutronowej i krzywej naturalnego promieniowania gamma, uzyskanych w trakcie profilowania otworu (wg W. N. Dachnowa).

1 — krzywa rozproszonego promieniowania gamma (I_{γ}), 2 — krzywa promieniowania gamma wzbudzonego przez neutrony (krzywa neutronowa; $I_{n\gamma}$), 3 — krzywa naturalnego promieniowania gamma (I_{γ}). Uwaga: strefy porowate zostały zasraflowane ukośnie

Na rycinie tej zestawiono krzywe naturalnego promieniowania — neutronową i krzywą rozproszonego promieniowania (w literaturze anglosaskiej proponuje się nazwę „krzywej fotonowej”). Na ostatniej krzywej wyraźnie wyróżniają się sole kamienne od anhydrytów. Wyróżniono na niej również pośród zbitych wapieni strefę wapieni porowatych odznaczających się mniejszą gęstością. Strefę łupkową jednoznacznie zidentyfikowały dwie pozostałe krzywe. (maksimum na krzywej γ i minimum na krzywej neutronowej).

Przewiduje się, że wskazania opisywanej metody oprócz profilu litologicznego mogą dostarczyć informacji co do wtórnej mineralizacji skał (hydrotermalne złoża rudne, złoża polimetaliczne itp.) oraz występowania skał o zmniejszonej gęstości, do których mogą zaliczać się porowate piaskowce i wapienie stanowiące najczęstsze skały macierzyste dla złóż ropnych. Szczególnie interesującą okazuje się możliwość pomiaru porowatości skał jako funkcji gęstości. Pozwoli to przypuszczalnie na bardzo precyzyjną ilościową ocenę obydwu tych parametrów. Przewiduje się również, że metoda rozproszonego promieniowania gamma pozwoli na identyfikację gęstości cieczy nasycającej złoża, a tym samym pozwoli ustalić jej naturę. Mówi się także o możliwości dokonywania korelacji krzywej gęstości z wynikami powierzchniowych zdjęć grawimetrycznych.

Przemysłowego zastosowania opisywanej metody należy się spodziewać w ciągu najbliższych lat. Obecnie istnieją już teoretyczne opracowania tej nowej metody podające zależność natężenia rejestrowanego promieniowania jako funkcję gęstości skał, gęstości płuczki, ϕ odwiertu i odległości pomiędzy preparatem promieniotwórczym a detektorem promieniowania (12).

4. METODA WZBUDZONEJ AKTYWNOŚCI

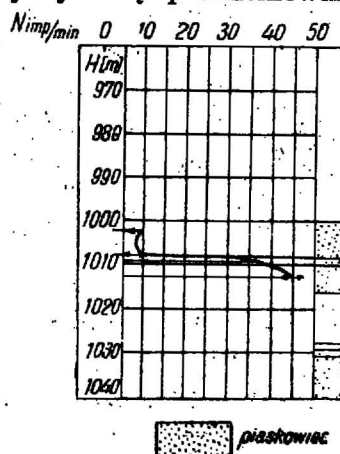
Przy użyciu nowoczesnej aparatury stosowanej przy wyżej opisanych pomiarach istnieje możliwość przeprowadzenia w odwiertach analiz na podstawie aktywacji określanych elementów w skałach. Metoda ta jest znana i stosowana już w wielu dziedzinach techniki. W przypadku stosowania jej w geofizyce polega ona na aktywowaniu skał za pomocą silnych źródeł neutronowych. W wyniku reakcji jądrowych, neutronów z materią, tworzy się szereg nowych izotopów. Są one na ogół nietrwałe (promieniotwórcze) i czas ich połowicznego zaniku jest zwykle rzędu godzin lub dni. W metodzie aktywacji mierzy się następnie czasy połowicznego zaniku rozpadających się jąder atomów krótkotrwałych pierwiastków oraz energie wysyłanego promieniowania. Na podstawie tych danych można nie tylko w wielu przypadkach zidentyfikować szukany pierwiastek, lecz także ocenić jego ilość w badanej substancji.

W zastosowaniu do zagadnień badania odwiertów metoda ta przypuszczalnie będzie stanowić największą rewelację w dziedzinie geofizyki poszukiwawczej. W chwili obecnej jednak czynione są dopiero pierwsze próby, które mają na celu opracowanie i adaptację opisywanej metody do badań w odwiertach.

W ZSRR w Instytucie Naftowym opracowano metodę wyróżnienia kontaktów woda-ropa naftowa metodą aktywacji sodu w wodach złożowych (wody złożowe zawierają pewne ilości NaCl). W procesie bombardowania neutro-

nami stref wodonosnych złoża aktywacji ulega sód, chlor oraz wiele innych pierwiastków często spotykanych, jak: mangan, glin, wapń, siarka. Ponieważ przyrząd rejestrujący notuje sumaryczną radioaktywność, opisany efekt zwiększonej promieniotwórczości, naprzeciw wodonosnej strefy złoża w porównaniu ze strefą nasyconą ropą naftową, wprawdzie istnieje, ale jest trudny do zauważenia wobec wysokiego tła pochodzącego od wymienionych pierwiastków. W celu zwiększenia efektu i wyeliminowania wpływu tła stosuje się specjalną aparaturę zdolną do rejestrowania wybiórczego określonych interesujących energii promieniowania oraz odpowiednio dobiera się czas między procesem aktywacji i pomiarem. Dobiera się go w ten sposób, aby efekt pochodzący od szukanego pierwiastka był możliwie duży, zaś efekt tła możliwie mały. Tabela II przedstawia pierwiastki najczęściej spotykane w praktyce wiertniczej.

Praktyka wykazała, że metoda analizy strefy kontaktu woda-ropa naftowa za pomocą aktywacji Cl jest bardzo trudna ze względu na wpływ tła pochodzącego od Ca i Mn. Wapń jest jednym z najczęstszych składników skał, natomiast Mn znajduje się w rurach wiertniczych lub powstaje z Fe na drodze reakcji (np.). O wiele lepiej nadaje się do tego celu sód posiadający znaczny przekrój czynny na absorpcję termicznych neutronów ($\sigma_{Na} = 0,63$ barna) oraz odpowiednio długi okres połowicznego zaniku równy 15,1 godzin. Jądra sodu ^{24}Na w trakcie rozpadu promieniotwórczego emitują poza tym szczególnie twarde promieniowanie gamma o energii 2,75 MeV⁵. Dzięki zastosowaniu dyskryminacji oddolnej (np. obcięcie widma promieniowania poniżej 2,5 MeV) można rejestrować ze szczególną wydajnością promieniowanie gamma pocho-



Ryc. 5 — Przykład wydzielenia strefy kontaktu ropy naftowej wody metodą wzbudzonej aktywności (wg N. K. Kucharenki, W. P. Odnokowa, J. C. Szimiewicza)

dzące od sodu. Pomiar doświadczalny przeprowadzono w ZSRR na jednym ze złóż ropnych „Żirnoje” (15). Poprzednio ustalono, że porowatość złoża jest rzędu 20%, mineraliza-

⁵ Elektronowolt — jednostka wyrażająca energię promieniowań jądrowych. Elektron nabywa energię 1 elektronowolta (eV) przebywając różnicę potencjałów 1 volta.

Tabela II

FIZYCZNE DANE NIEKTÓRYCH PIERWIASTKÓW SPOTYKANYCH W PRAKTYCE WIERTNICZEJ (TABELA ZOSTAŁA ZESTAWIONA PRZEZ N. K. KUCHARENKĘ, W. P. ODINOKOWĄ I J. S. SZYMIELEWICZĄ)

Pierwiastek	Reakcja	Powstały pierwiastek promieniotwórczy	$T_{1/2}$	E_{γ} Me V	σ aktywacji izotopu	σ aktywacji mieszaniny izotopów
H_1^1	n, γ	—	—	brak	—	0,3
C_6^{12}, C_6^{13}	n, γ	—	—	brak	—	0,005
O_8^{16}, O_8^{17}	n, γ	—	—	brak	—	0,0002
O_8^{18}	n, γ	O_8^{19}	27 sek.	1,2	0,0002	0,0002
Na_{11}^{23}	n, γ	Na_{11}^{24}	15,1 godz.	2,75; 1,37	0,63	0,63
Mg_{12}^{26}	n, γ	Mg_{12}^{27}	9,39 min.	0,84; 0,05	0,05	0,06
Al_{13}^{27}	n, γ	Al_{13}^{28}	2,3 min.	1,28; 2,43	0,21	0,21
S_{16}^{36}	n, γ	S_{16}^{37}	5 min.	2,75	—	0,49
Cl_{17}^{37}	n, γ	Cl_{17}^{38}	37,3 min.	2,12; 1,6	0,137	33
K_{19}^{41}	n, γ	K_{19}^{42}	12,44 godz.	1,51	0,07	—
Ca_{20}^{48}	n, γ	Ca_{20}^{49}	2,5 godz.	0,8	—	—
Mn_{25}^{55}	n, γ	Mn_{25}^{56}	2,59 godz.	2,06; 1,77; 0,822	10	10
Fe_{26}^{58}	n, γ	Fe_{26}^{59}	47,1 dnia	1,098; 0,191	—	—
Al_{13}^{27}	n, α	Na_{11}^{24}	15,1 godz.	2,75; 1,37	—	—
Si_{14}^{28}	n, p	Al_{13}^{28}	2,3 min.	1,28; 2,43	—	—
Fe_{26}^{56}	n, p	Mn_{25}^{56}	2,59 godz.	2,06; 1,77; 0,822	—	—
Mg_{12}^{24}	n, p	Na_{11}^{24}	15,1 godz.	2,75; 1,37	—	—

U w a g a: pełna nazwa rubryki szóstej brzmi — σ aktywacji izotopu wyjściowego z uwzględnieniem procentu jego występowania w przyrodzie i rubryki siódmej — σ aktywacji mieszaniny izotopów z uwzględnieniem procentowego stosunku występowania ich w przyrodzie.

cja wód złożowych — ^{15}Be oraz zawartość Na ok. 0,01 g na 1 cm^3 piaskowca roponośnego.

Aktywowano 5 punktów złoża, wybranych na podstawie przeprowadzonych uprzednio pomiarów radioaktywności i karotażu elektrycznego na głębokości 1002,5 m, 1007,5 m, 1008,5 m, 1009,5 m oraz dla porównania na głębokości 950 m (ryc. 5).

Każdy punkt aktywowano przez okres 5 godzin. W określonym czasie po ukończonej aktywacji wykonywano pomiary. Czas pomiaru aktywności jednego punktu trwał 8–15 min. Jak widać z przedstawionego wykresu, metodą tą wyróżniono poszukiwaną strefę kontaktu w sposób jednoznaczny i bardzo wy-

raźny. Metoda wzbudzonej promieniotwórczości rokuje bardzo duże nadzieje na przyszłość, zwłaszcza przy poszukiwaniu innych kopalin użytecznych. Na podstawie specyficznych właściwości neutronowych pewnych pierwiastków przewiduje się możliwość identyfikacji takich pierwiastków, jak: B — ($\sigma=718$ barnów), Cd — ($\sigma=3500$ barnów), Mn — ($\sigma=13$ barnów), Co — ($\sigma=40$ barnów), W — ($\sigma=35$ barnów), Cu — ($\sigma=3,6$ barna). Za koncentracje przemysłowe tych rud uważa się obecnie zawartości rzędu 1%, które szczególnie łatwo mogą ująć uwagę obserwatora przy dotychczas stosowanych metodach badań. Domieszki Ag, In i Cd, występujące zwykle w niewiel-

kich ilościach wspólnie z rudami cynkowymi, dzięki dużej zdolności do aktywacji będą mogły przypuszczalnie służyć jako wskaźnik przy poszukiwaniu tych rud. Metoda ta również może służyć do poszukiwania złóż boksytów dzięki stosunkowo łatwej do przeprowadzenia aktywacji aluminium.

Interesujący bardzo jest sposób badania szeregu parametrów z dziedziny prac neutronowych w odwiertach stosowany w wielu laboratoriach. Potrzebne dane uzyskuje się za pomocą prac modelowych. Buduje się sztuczne złoża o małych wymiarach. Pozwala to na dokładne ustalenie określonych warunków fizyczno-chemicznych. Przejścia z wymiarów uzyskanych na modelu złoża do wyników spodziewanych w odwiertach o wymiarach normalnych jest stosunkowo proste w oparciu o doświadczenia szeroko stosowanej w technice metody modelowania. Za pomocą prac modelowych opracowano podstawowe zagadnienia metody neutronowej (7). Należy przewidywać, że w przyszłości metody wzbudzonej aktywności pozwolą wykonywać formalne analizy skał w warunkach zarurownego odwiertu.

5. METODY IZOTOPOWE

Jedno z najpoważniejszych zastosowań w technice znajdują izotopy promieniotwórcze w wiertnictwie, eksploatacji ropy naftowej oraz w specjalnych problemach techniki górniczej. W związku z tym należy przewidywać wielki postęp techniczny we wspomnianych dziedzinach, a zwłaszcza w dziedzinie unowocześnienia metod eksploatacji ropy naftowej.

Izotopy promieniotwórcze do celów przemysłowych uzyskuje się za pomocą reaktorów atomowych. Pod wpływem bombardowania neutronami atomów określonych pierwiastków zachodzą w nich reakcje jądrowe, w których wyniku tworzą się nowe izotopy o innej masie lub atomy nowych pierwiastków.

Nowo utworzone atomy w większości przypadków znajdują się w stanie pobudzonym i są nietrwałe. Przechodząc do stanu normalnego wysyłają promieniowanie bądź cząsteczkowe (promieniowanie beta — negatony lub pozytony), bądź też promieniowanie natury falowej (kwanty promieniowania gamma i rentgenowskie). Średnio czas połowicznego rozpadu tych atomów dla izotopów stosowanych w technice waha się od kilku dni do kilku lat.

Zastosowanie praktyczne w zagadnieniach przemysłowych znajdują się tylko niektóre izotopy, odznaczające się odpowiednim czasem połowicznego zaniku, rodzajem i energią promieniowania oraz własnościami chemicznymi i toksycznymi. Przy badaniach odwiertów, kontroli procesu wiercenia i eksploatacji ropy znalazły dotychczas zastosowanie takie izotopy, jak:

cynk (^{65}Zn , $T_{1/2}=250$ dni), kobalt (^{60}Co , $T_{1/2}=4,95$ lat), jod (^{131}I , $T_{1/2}=8,14$ dnia), iryd (^{192}Ir , $T_{1/2}=74,37$ dnia), tryt (^3T , $T_{1/2}=12,4$ dnia) i inne. Z ostatnich publikacji amerykańskich wynika, że do badań odwiertów w roku 1955 stosowano już 24 różne izotopy (6). Okres połowicznego rozpadu tych izotopów nie przekracza zazwyczaj kilkudziesięciu lub kilkuset dni. Opisywana metoda nosi nazwę metody wskaźników promieniotwórczych (śladowników⁶).

Istnieją 3 zasadnicze formy wprowadzania wskaźników promieniotwórczych.

1. Do odwiertu wprowadza się rozpuszczony w cieczy wskaźnik promieniotwórczy nie reagujący chemicznie ze skałami. W ten sposób można wydzielić strefy przepuszczalne przez rejestrację promieniowania wysyłanego przez atomy wskaźnika, które wniknęły w głąb ścian odwiertu. Ogranicza tę metodę trudność znalezienia izotopów nieaktywnych chemicznie. We wszystkich doświadczeniach obserwowano znaczne straty śladownika spowodowane jego absorpcją. Fakty te mają szczególne znaczenie przy kontroli procesu wtórnego zawadniania złoża lub przy studiach filtracji między odwiertami.

W Instytucie Naftowym Akademii Nauk ZSRR opracowano metodę kontroli wspomnianych procesów przy zastosowaniu beta promieniotwórczego izotopu wodoru — trytu. Tryt wchodząc w skład chemiczny wody jest praktycznie nieaktywny chemicznie. Dzięki wielkiej czułości stosowanych metod rejestracyjnych, za których pomocą udaje się wykryć 1 atom trytu na 10^{16} atomów wodoru, można stosować go prawie bez strat przy badaniu pól naftowych o znacznych wymiarach. Tryt otrzymuje się poddając działaniu neutronów związki litu, z reakcji ^6Li (n, α).

2. Do odwiertu wprowadza się czynny chemicznie śladownik w tym celu, by uzyskać reakcję wymiany kationów. Przykładem może służyć jeden z patentów zgłoszonych w Stanach Zjednoczonych (patent nr U.S. 2,691, 109). Polega on na wyprowadzaniu do odwiertu płuczki zawierającej aktywny związek chemiczny — np. octan baru — przy czym bar naturalny jest zastąpiony w tym związku jednym ze sztucznie promieniotwórczych izotopów baru. Bar podstawia kationy Ca^{++} , Na^{+} , K^{+} wchodzące w skład chemiczny skał tworzących odwiert. Według cytowanych z podanego źródła danych po upływie godziny reakcja wymiany kationów w odwiercie jest ukończona. Po zamianie płuczki na normalną wykonuje się profilowanie. W wyniku przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że uzyskana krzywa daje podstawę do przeprowadzenia różnicowania pokładów ilastych.

⁶ Czasami używa się terminu „metoda śladowników” — dla skrócenia nazwy „metoda wskaźników promieniotwórczych”.

Okazało się mianowicie, że gliny i łył osadzone w określonym okresie sedymentacyjnym posiadają tę samą zdolność wymiany kationów, co pozwala identyfikować je wielokrotnie w przypadku badania terenu silnie zaburzonego tektonicznie. Metodę tę również można stosować do wydzielania stref porowatych w odwiercie. Jednakże jak wynika z dotychczasowych doświadczeń, sposób ten stosuje się na ogół rzadko ze względu na małą kontrastowość efektów.

3. Do odwiertu wprowadza się aktywowany izotop w stanie zawiesiny mechanicznej. Aktywuje się najpierw medium niosące, którym zazwyczaj jest muł lub drobne granulki z żywicy i po wymieszaniu medium niesionego przez ciecz wprowadza się je do odwiertu. W miejscach, gdzie następuje filtracja w głąb górotworu, aktywowane granulki pozostają na ścianach odwiertu znacząc w ten sposób miejsce wnikięcia cieczy. Metoda ta jest stosowana najczęściej przy badaniach odwiertów.

Ciecz wprowadzoną do odwiertów aktywuje się bądź częściowo (np. kontrola zawadniania złożeń), bądź też w całości (zagadnienie wiertnicze). Jeżeli pomiar wykonywany jest w trakcie wiercenia w otworze niezarurowanym, aktywuje się całą płuczkę, którą następnie trzeba usunąć i wymienić na nową. W niektórych przypadkach używa się również radioaktywnych koloidów lub gazów.

Aparatura pomiarowa stosowana w tych operacjach nie różni się zupełnie od aparatury do rejestracji naturalnego promieniowania gamma. Inna jest jedynie technika pomiaru. Na wstępie wykonuje się pomiar naturalnej promieniotwórczości skał (krzywa gamma), który służy jako tło odniesienia. Po wprowadzeniu do odwiertu izotopów zdejmuje się zależnie od potrzeb jedną lub więcej krzywych przy jednakowej czułości aparatury. Poszukiwanym efektem jest różnica krzywych pomiarowych i krzywej tła. Szczególną wagę ma w pracach polowych z izotopami zagadnienie bezpieczeństwa osobistego obsługi. Śladowniki promieniotwórcze wybiera się w miarę możliwości w ten sposób, aby nie były toksyczne oraz aby posiadały stosunkowo krótki czas połowicznego zaniku. Podczas pomiaru i w czasie transportu zwraca się uwagę na to, by personel był możliwie jak najmniej narażony na wpływ promieniowania. Izotopy specjalnie poprzednio rozdzielone dostarcza się na pole naftowe w zapieczętowanych, metalowych puszkach, które otwiera się w bezpośrednim sąsiedztwie badanego otworu wiertniczego. Puszki te przygotowane w laboratoriach zawierają preparaty o „jednostkowych” aktywnościach rzędu 1–2 mc. Procedurę taką ustala się po to, aby zmniejszyć do minimum niebezpieczeństwo przypadkowego rozlania substancji promieniotwórczych oraz by ograniczyć czas trwania na-

świetlania się personelu. W wielu przypadkach pomiar prowadzi się całkowicie automatycznie. Puskę z preparatem wkłada się do specjalnego urządzenia, gdzie zostaje ona nakłuta stalowymi kolcami. Silny strumień wody wypłukuje następnie zawartość puszki i przenosi bezpośrednio do naczynia, w którym następuje opuszczenie do odwiertu, np. do łyżki wiertniczej.

Do prac polowych używa się preparatów o aktywności od paru (1–2) do stu mc (np. przy prowadzeniu studiów porównawczych pomiędzy kilku odwiertami). Ponieważ okres bezpośredniej styczności pracowników z izotopami trwa jedynie kilka minut, dlatego otrzymywana dawka nie przekracza zazwyczaj 50 mrtg⁷/dzień (dopuszczalna dawka dzienna), średnio przyjmuje się, że przy bezpośredniej styczności z preparatami o wymienionych aktywnościach obok puszki z preparatem otrzymywałoby się dawki 40–200 mrtg/godz.

Poza tym cały personel zaopatruje się z reguły w dozomierz dla kontroli dawki dziennej, specjalny film dla kontroli dawki tygodniowej, w liczne monitory promieniowania oraz przedmioty służące do ochrony osobistej, jak: rękawiczki, maski i okulary.

Metoda wskaźników promieniotwórczych posiada praktycznie nieograniczone możliwości jej stosowania. Istnieje jednak szereg typowych zagadnień zarówno w badaniu stanu technicznego odwiertu, jak też w zagadnieniach eksploatacyjnych, gdzie śladowniki znalazły określone zastosowanie. Poniżej przedstawia się przykłady zastosowania śladowników.

1. Śladowników używa się do określenia obszarów cyrkulacji wód poza rurami. Do odwiertów wtłacza się aktywowaną izotopami promieniotwórczymi ciecz i bada się następnie jej ruch poza kolumną rur. S.F. Wybornych (18) podaje następujący przykład. W pewnym odwiercie uzyskiwano produkcję ropy naftowej równoległą z wodą. W celu wyjaśnienia miejsc przecieków wodnych wtłaczono partię aktywowanej śladownikami cieczy do przestrzeni poza rurami. Uzyskane wyniki pozwoliły na wydzielenie zawodnionego pokładu II. Po przeprowadzeniu wtórnej cementacji odizolowano go od pokładu I i uzyskano w ten sposób czystą produkcję ropy.

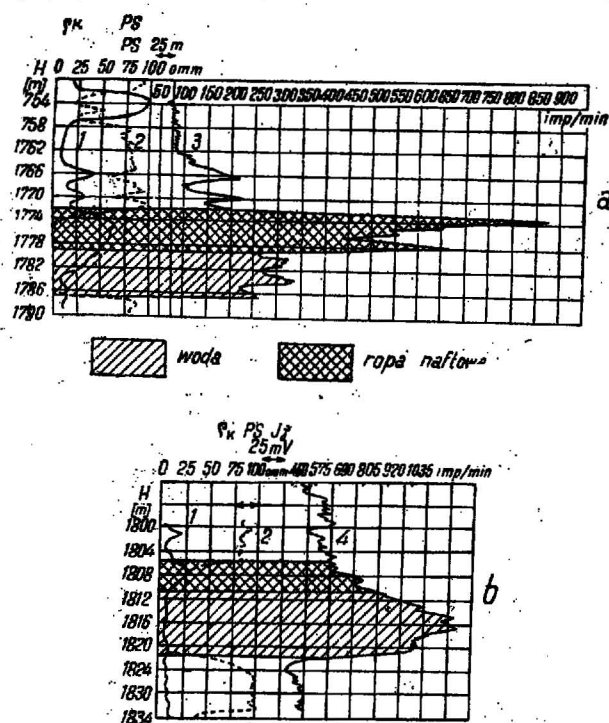
2. Za pomocą śladowników można umiejscawiać przecieki w rurach. Pomiar wykonuje się w sposób następujący. Do odwiertu wtłacza się, w interesującym przedziale, ciecz zawierającą nośnik (żywicę) aktywowany wskaźnikiem. W wyniku przeprowadzonych

⁷ Rentgen — jednostka służąca do określania intensywności promieniowania gamma i rentgenowskiego. Promieniowanie ma natężenie 1 rentgena, jeżeli w 1 g powietrza tworzy się pod jego działaniem $1,61 \cdot 10^{12}$ par jonów.

następnie pomiarów można zlokalizować przecieki. Metodę tę również można oceniać z dużą dokładnością miejsce, w którym rury wiertnicze zostały perforowane.

3. Zastosowanie izotopów promieniotwórczych pozwala także identyfikować przepuszczalne strefy złoża. W tym celu wprowadza się do odwiertu izotopy bądź w postaci koloidu lub też nierozpuszczalnych cząstek aktywowanych za pomocą pierwiastków promieniotwórczych, bądź w formie gazowej. W miejscu występowania w odwiercie stref przepuszczalnych obserwuje się zwiększoną radioaktywność, powstałą wskutek osadzania przez ciecz filtrującą na ścianach odwiertu cząstek nośnika. Metodą tą można identyfikować na przykład miejsca ucieczek płuczki w trakcie wiercenia, strefy porowate oraz ilościowo oceniać przepuszczalność złoża (14). Należy jednak zauważyć, że w przypadku niektórych złóż zawierających węglowodory w stanie gazowym, istnieje trudność określenia ich przepuszczalności za pomocą śladownika zawieszonego w cieczy. Znacznie lepsze wyniki uzyskuje się w takim przypadku przy użyciu śladowników gazowych (3).

4. Jednym z ciekawych zastosowań izotopów jest możliwość wyróżnienia za ich pomocą kontaktu woda-ropa naftowa w odwier-



Ryc. 6 — Wydzielenie strefy kontaktu pomiędzy wodą i ropą naftową za pomocą wskaźników promieniotwórczych (wg A. I. Cholina): a) przez wtłaczanie aktywowanych izotopami reagentów chemicznych, b) przez wtłaczanie aktywowanej izotopami wody 1 — krzywa oporowa (sonda B7, 5A0, 75M; 0k), 2 — krzywa potencjałów własnych, 3 — krzywa γ uzyskana po wtłoczeniu do odwiertu aktywowanych reagentów chemicznych (I_γ), 4 — krzywa natężenia promieniowania gamma uzyskana po wtłoczeniu do odwiertu aktywowanej wody

tach niezarurowanych. W porównaniu z opisanymi poprzednio metoda ta posiada tę wyższość, że wskazania jej są niezależne od stopnia zmineralizowania wód. Wyniki jakie udało się uzyskać tą metodą przedstawia ryc. 6. Wydzielenie strefy wodnej uzyskano w przedstawianym przykładzie przez wtłaczanie do odwiertu aktywowanej wody. Wskutek powstawania na granicy kontaktu wody i ropy znacznych wartości napięć powierzchniowych zdolność przenikania aktywowanej wody do zawadnionej strefy odwiertu jest większa, wobec czego po przepłukaniu odwiertu na krzywej gamma zawadniona część złoża odznacza się zwiększoną promieniotwórczością. Na ryc. 6b przedstawiono wyniki uzyskane przy wtłaczaniu do złoża reagentów chemicznych. Do zabiegu aktywowania zastosowano jeden ze środków używanych przy tamponowaniu wód, zawierający sodowe sole kwasów naftenowych, zaznaczone za pomocą izotopów promieniotwórczych. Wskutek reakcji wymiany przy zetknięciu się z wodami złożowymi tworzą się nierozpuszczalne sodowe i magnezowe sole kwasów naftenowych, które cementują pory w skałach, odcinając tym samym możliwość dalszej filtracji aktywowanej cieczy do zawadnionej części złoża. Wskutek tego naprzeciw strefy roponośnej rejestruje się, po uprzednim przemyciu odwiertu, znaczne dodatnie anomalie promieniotwórczości. Prawdopodobnie metoda ta znajdzie w najbliższych latach powszechne zastosowanie.

5. Izotopów używa się również do określania pionowego rozprzestrzenienia się słupa cementowego poza rurami oraz do określania jakości cementowania. Do cementu dodaje się pewną ilość izotopów promieniotwórczych. Po zakończeniu operacji cementowania można za pomocą profilu gamma dokładnie ustalić górny poziom słupa cementowego oraz w niektórych przypadkach jego grubość. Ponieważ w przypadku cementowania odwiertu operacja ta jest na ogół jedną z ostatnich przed eksploatacją i wszystkie pomiary geofizyczne wykonuje się uprzednio, zachodzi tu również możliwość stosowania tanich izotopów o stosunkowo długim okresie połowicznego zaniku. W Stanach Zjednoczonych np. do aktywacji cementu używa się mułów zawierających rad otrzymywanych jako produkt uboczny przy przeróbce chemicznej uranu.

6. Jedną ze szczególnie obiecujących dziedzin stosowania izotopów w przemyśle naftowym jest eksploatacja ropy i kontrola wtórnych metod jej eksploatacji. Do takich należy przede wszystkim wymieniona już poprzednio kontrola procesu zawadniania złoża w celu wytworzenia sztucznego ciśnienia złożowego. Interesującymi parametrami są tu przede wszystkim kontrola kierunków zawadniania i prędkości przesuwania się frontu wodnego.

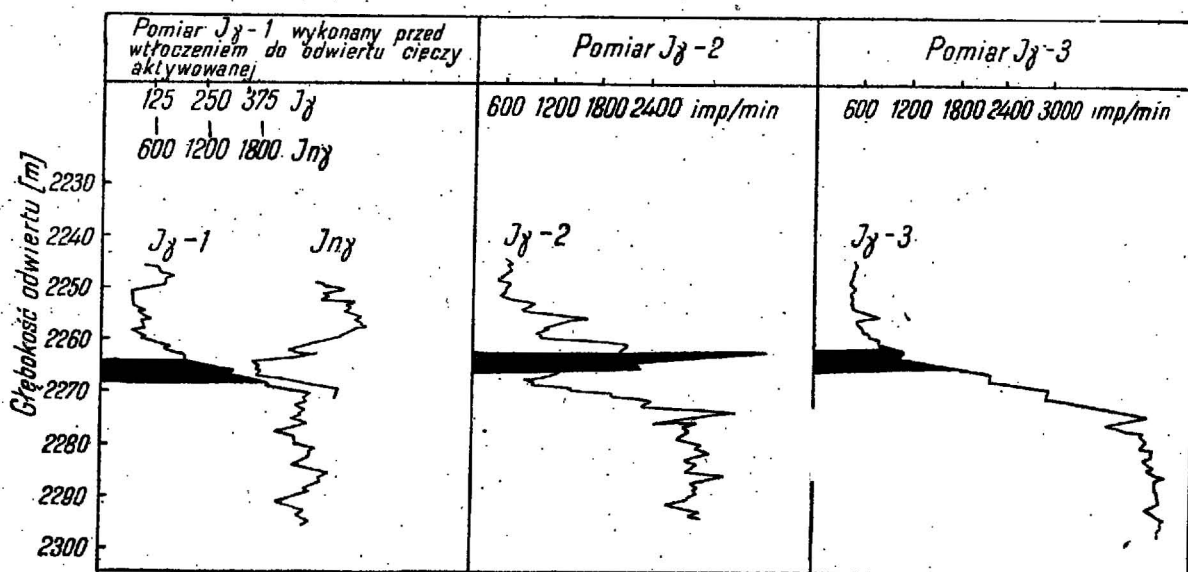
Szczególnie wielkie znaczenie ma znajomość wymienionych wielkości w przypadku eksploatacji dużych złóż, gdzie zaważnianie złoża zaczyna się nie od jego obwiedni, lecz od wewnątrz złoża, przez co dzieli się je na kilka oddzielnych obszarów. Proces zaważniania dzięki zmienności warunków fizyczno-chemicznych w złożu jest bardzo trudny do ujęcia ilościowego za pomocą obliczeń matematycznych. Przy wtłaczaniu określonej ilości izotopów promieniotwórczych do odwiertów wodnych można za pomocą badania radioaktywności w odwiertach produkcyjnych prowadzić kontrolę procesu zaważniania w sposób eksperymentalny. Z nielicznych dotychczas informacji publikowanych na ten temat można wywnioskować, że w omawianej operacji aktywuje się nie całą masę wodną, lecz tylko pewną jej część (po kilka m³). Dawki takie wprowadza się porcjami. Powyżej omówiono już trudności doboru odpowiedniego izotopu do tego celu, powodujące duże straty śladowników, a prowadzące z konieczności do stosowania ich w wielkich ilościach (wysoki koszt, niebezpieczeństwo dla obsługi). Dotychczas często stosowany do tego celu jest ¹³¹J. Metoda śladowników daje również dobre rezultaty przy kontroli innych metod wtórnej eksploatacji, takich jak wtłaczanie gazu do złoża i hydrauliczne rozwarstwianie złóż, oraz przy kwasowaniu odwiertów.

7. Jako typowy przykład specjalnych zastosowań izotopów może służyć przykład przedstawiony na ryc. 7 podany przez S.F. Wybornycha (18). Na głębokości 2260—2270 m próbowano bez skutku wykonać w odwiercie most cementowy. Za pomocą krzywej neutronowej zidentyfikowano tam strefę o zwiększonej porowatości. Po wprowadzeniu do odwiertu aktywowanej cieczy uzyskano w tym miejscu maksimum promieniotwór-

czości, wskutek czego przyjęto istnienie tam strefy pochłaniającej. Jednakże, ponieważ w ostatnim pomiarze wykonanym po 4 dniach stwierdzono spadek radioaktywności w badanej strefie, wyciągnięto wniosek o istnieniu w tym miejscu strefy silnego wypływu wody uniemożliwiającego wiązanie cementu. Przy użyciu wskaźników promieniotwórczych można również kontrolować przepływ ropy w rurociągach dalekosieżnych, a zwłaszcza wyznaczać miejsce kontaktu ropy różnych gatunków. Pozwala to na stacji odbiorczej segregować poszczególne rodzaje ropy i skierowywać je do odpowiednich zbiorników. Inną dziedzinę zastosowań specjalnych stanowi zastosowanie izotopów wprowadzanych za pomocą odwiertów dla potrzeb górnictwa. Szczególnie duże perspektywy rozwojowe przewiduje się przy zastosowaniu materiałów izotopowych w celu dokładnego określenia wodonośnych skał w odwiertach wykonywanych dla przemysłu węglowego. Przy projektowaniu nowych kopalni informacje te są szczególnie ważne. Metoda izotopów może służyć również do przeprowadzania badań w kopalniach soli. Przy eksploatacji wysadów solnych ważnym zagadnieniem jest kontrola składu chemicznego wód kopalnianych i określenie ich pochodzenia. Opisanymi metodami można ustalić, czy wody kopalniane kontaktują się z powierzchniami.

Uwzględniając przytoczone przykłady należy stwierdzić, że możliwość zastosowania izotopów w przemyśle naftowym jest bardzo wielka. Omawiane przykłady były jednymi z wielu zastosowań izotopów w tej dziedzinie.

Znamienny jest fakt, że nie ma żadnych ograniczeń w stosowaniu metod izotopowych do szeregu nowych i specjalnych problemów do szeregu nowych i specjalnych problemów. Pomysłowość poszczególnych jednostek ma tu



Ryc. 7 — Wyniki pomiaru przeprowadzonego w celu wyjaśnienia trudności związanych z ustawieniem w odwiercie mostu cementowego (wg S. F. Wybornycha)

prawie nieograniczone pole do działania. Za pomocą izotopów można oceniać prawie wszystkie warunki złożowe w sposób doświadczalny. Drugą zaletą metod izotopowych jest fakt, że są one stosunkowo tanie.

APARATURA

Tak dynamiczny rozwój metod promieniotwórczych uwarunkowany był również wprowadzeniem nowej aparatury, w której detektorem promieniowania był licznik scyntylacyjny. Zalety liczników scyntylacyjnych w porównaniu z używanymi dotychczas licznikami G.M. są następujące:

1. Licznik scyntylacyjny posiada dużą wydajność na rejestrację fotonów gamma rzędu kilkudziesięciu % w stosunku do 1—1,5% dla liczników G.M.

2. Scyntylator posiada małe wymiary w stosunku do używanych liczników G.M., wskutek tego może być uważany w odwiercie za detektor prawie punktowy. Pozwala to na wyróżnienie granic stosunkowo cienkich pokładów miąższości rzędu kilkunastu cm.

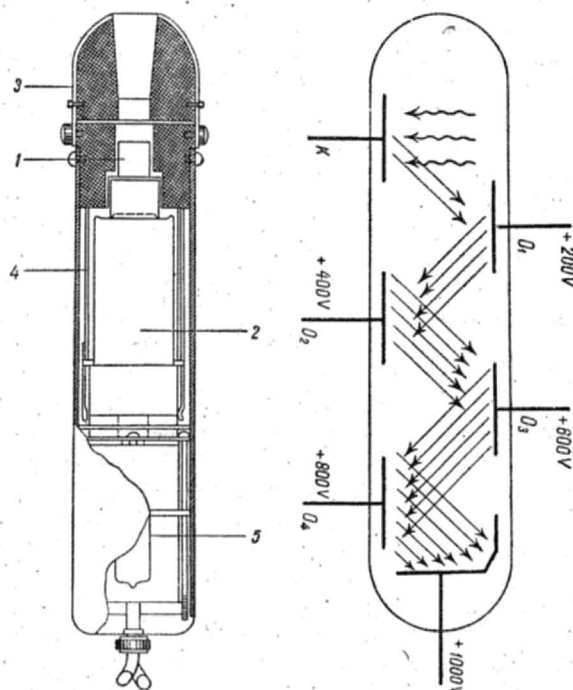
3. Dzięki mniejszym wymiarom w porównaniu z licznikami G.M. liczniki scyntylacyjne charakteryzują się mniejszym tłem (biegiem własnym).

4. Wielkość impulsów elektrycznych w liczniku scyntylacyjnym jest proporcjonalna do energii rejestrowanych kwantów. Licznik scyntylacyjny działa na innej zasadzie niż licznik z wyładowaniem elektrycznym. Detektorem jest tzw. scyntylator, najczęściej specjalny kryształ. Najpospolitszymi scyntylatorami są kryształy jodku sodu (NaJ/Tl), jodku ceszu (CsJ/Tl) i jodku potasu (KJ/Tl) aktywowane talem. W momencie przejścia fotonu przez kryształ powstaje w nim krótkotrwały błysk światła (zjawisko luminescencji).

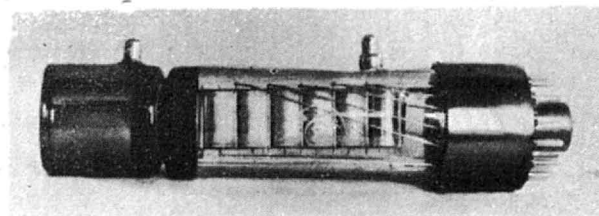
Kryształ scyntylacyjny jest połączony optycznie ze specjalnym urządzeniem zwanym fotopowielaczem (ryc. 8). Fotopowielacz jest specjalnym typem lampy elektronowej z fotokatodą i pewną ilością dynod, rzędu kilkunastu lub kilkudziesięciu. Działanie jego oparte jest na wykorzystaniu zjawiska dynatronowego (wybijanie wtórnych elektronów — stąd nazwa elektrod — „dynody”).

Napięcia przykładane do każdej następnej dynody są wyższe, wskutek czego zjawisko przebiega lawinowo, jak to uwidocznione jest na rycinie. Dzięki temu spadek napięcia na oporze jest dość znaczny i osiąga wartość rzędu wolta. Cenną zaletą licznika scyntylacyjnego jest fakt, że wielkość impulsów na wyjściu jest proporcjonalna do energii rejestrowanych fotonów. Im wyższa jest energia, tym bardziej intensywny błysk światła, a dzięki proporcjonalnemu charakterowi wzmacniania fotopowielacza — różna wielkość impulsów (ryc. 9). Dzięki temu przy użyciu odpowiednich dyskryminatorów można przeprowadzać

spektroskopię widma promieniowania γ , czyli wybiórczo rejestrować impulsy odpowiadające kwantom γ o określonej energii. Oprócz



a) przekrój licznika, b) schemat fotopowielacza,

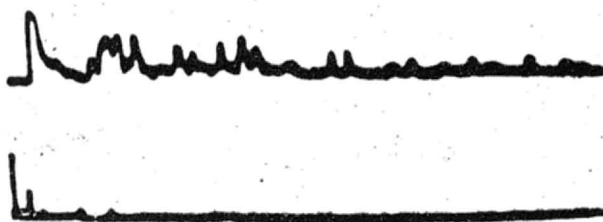


c) fotopowielacz ФЭУ 19

Ryc. 8 — Licznik scyntylacyjny

1 — kryształ scyntylacyjny, 2 — fotopowielacz, 3 — zdejmowalny ekran ołowiany, 4 — ekran magnetyczny, 5 — przedwzmacniacz

wyżej wymienionych stosuje się i inne scyntylatory, pozwalające rejestrować ze zwiększoną wydajnością cząstki alfa lub beta albo neutrony. Nawiasowo można wspomnieć, że istnieją także scyntylatory cieczowe oraz scyntylatory plastyczne.



Ryc. 9 — Zdjęcie oscylograficzne impulsów z licznika scyntylacyjnego z kryształem terfenylu (3)

Technika liczników scyntylacyjnych jest szeroko rozwinięta głównie w krajach o silnym potencjale przemysłowym. Fotopowielacze są na ogół drogie — cena ich waha się

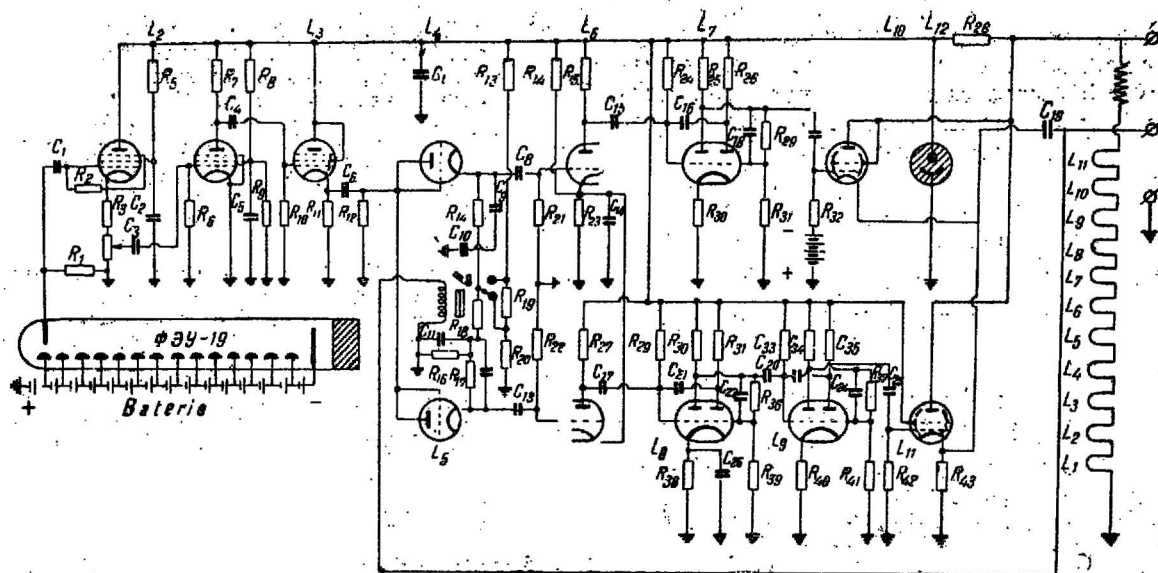


Fig. 10 — Schemat sondy do profilowania radioaktywnego odwiertów z licznikiem scyntylacyjnym (wg B. G. Jerozolimskiego i D. F. Biespałowa)

od kilkudziesięciu do kilkuset dolarów za sztukę.

Rycina 10 przedstawia układ prototypu sondy do profilowania odwiertów z licznikiem scyntylacyjnym skonstruowanym w Instytucie Naftowym Akademii Nauk ZSRR. Detektorem promieniowania jest fotopowielacz typu ΦЭУ-19 wraz z kryształem jodku cezu o Φ 35 mm i wysokości 20 mm, zasilany z baterii suchych, o małych wymiarach i łącznym napięciu ok. 1 KV. Pierwsza lampa pracuje jako wtórnik katodowy w celu uzyskania wysokoomowego wejścia układu, dzięki któremu prąd pobierany przez pierwszy stopień układu jest bardzo mały. Lampa L2 pracuje jako wzmacniacz, natomiast lampa L3 znowu jako wtórnik w celu uzyskania niskoomowego wyjścia, ze względu na dalsze zastosowanie dyskryminatorów amplitudy (lampy L4 i L5).

Dyskryminatory te ograniczają amplitudę oddolnie. Dzięki różnej polaryzacji katod lamp L4 i L5 uzyskuje się 2 kanały. Następnymi stopniami są wzmacniacze (L6) i uniwbatory standaryzujące impuls, co do wielkości i czasu trwania L7 i L9, oraz stopień mieszający w układzie wtórnik katodowego (L10, L11).

Impulsy uniwbatora z lampy L9 są opóźnione względem impulsów pierwszego kanału ok. 0,1 m/sek. i przeciwnie co do znaku. Uzyskuje się to za pomocą uniwbatora pomocniczego (lampa L8) w celu przesunięcia w czasie równoległych w obu kanałach impulsów na kablu przesyłowym. Polaryzację katod dyskryminatorów można zmieniać za pomocą przekaźnika sterowanego z powierzchni. Dzięki temu uzyskiwano możliwość rejestracji 4 widm energetycznych przy 2 opuszczeniach sondy bez potrzeby wyjmowania jej na powierzchnię. Zasilanie całości odbywa się z powierzchni za pomocą trójdzielnego kabla karotażowego. Bar-

dziej szczegółowo aparatura ta została opisana w pracy Jerozolimskiego i Biespałowa (13).

Aparatura powierzchniowa składa się z układu rozdzielającego impulsy na 2 kanały oraz z 2 intergratorów z samopisami i aparatury kontrolnej, w której skład wchodzi oscylograf i przelicznik, oraz z elektronowego stabilizatora napięć. W zasadzie układ nie różni się wiele od opracowanego do celów profilowania odwiertów podobnego układu w kraju (5).

W związku z powyższym przeglądem w dziedzinie rozwoju metod radioaktywnych na świecie, należy zdać sobie sprawę z tego, że metody te w Polsce nie były należycie opracowywane. Zbyt mało uwagi poświęcano przemysłowemu zastosowaniu metod radioaktywnych i korzyściom, jakie można było na tej drodze osiągnąć.

Nie zaczęto dotychczas starań w celu nawiązania kontaktów naukowych z zagranicą dla zapoznania własnych pracowników naukowych z obecnym stanem rozwoju tych metod w innych krajach, a zwłaszcza w ZSRR, gdzie badania takie prowadzone są na szerszą skalę. W Polsce nie istnieje żaden zakład przemysłowy, który mógłby produkować seryjnie aparaturę do radioaktywnego profilowania odwiertów dla potrzeb własnych jak i eksportowych. W związku z rozwojem fizyki jądrowej i korzyściami wynikającymi z przemysłowego zastosowania metod badawczych fizyki jądrowej, powinno się dążyć do uruchomienia w kraju produkcji scyntylatorów i fotopowielaczy w celu postawienia produkcji aparatury pomiarowej na należytych poziomach. Realizacja tego jest konieczna, by włączyć się w chwili obecnej do badań światowych nad tymi zagadnieniami i nie być zmuszonymi później do znużającego odrabiania wieloletnich zaległości.

W specyficznych warunkach polskich, wobec intensyfikacji poszukiwań geologicznych i podnoszenia na wyższy poziom techniczny eks-

плоатации ropy naftowej wszystkie inwestycje zrobione w kierunku opracowania i zastosowania nowych metod radioaktywnych wielokrotnie się opłaca. Chodzi przecież o surowce stanowiące o sile gospodarczej kraju. Najlepszym dowodem opłacalności stosowania metod radioaktywnych jest masowe stosowanie ich w krajach przodujących pod względem naukowym i technicznym.

L I T E R A T U R A

1. Broding R. A., Rummerfield B. F. — Simultaneous gamma ray and resistance logging as applied to uranium exploration. „Geophysics“ vol. 20, str. 841, 1955.
2. Busch R. E., Stick J. C. — A review of radioactivity well logging methods. J. E. Walstrom — Symposium on well bore surveys. Fourth World Petrol. Congress., Rome, Proceedings sec. II, 1955.
3. Flagg A. N., Myers J. J., Campbell J. L. P., Terry J. M., Mardock E. S. — Radioactive tracers in oil production problems. „Journal of Petroleum Technology“ AIME, vol. 204, str. 1, 1955.
4. Hyman S. C., Minushkin, Certaine J. — How drill-hole diameter affects gamma-ray intensity. „Nucleonics“ vol. 13, nr 2, str. 49, 1955.
5. Jurkiewicz L., Mięslowicz M., Mikucki A. — A GM counter apparatus for gamma-ray well logging. „Acta Geoph. Polonica“ vol. 1, str. 187, 1953.
6. Kohl J., Newacheck R. L., Anderson E. E. — Locating casing shoe leaks with radioactive argon. „Journal of Petroleum Technology“ AIME, vol. 204, str. 213, 1955.
7. Tittle C. W., Faul H., Goodman C. — Neutron logging of drill holes: the neutron-neutron method. „Geophysics“ vol. 16, str. 826, 1951.
8. Выборных С. Ф. — Метод меченых атомов для исследований и контроля технического состояния нефтяных и газовых скважин. «Нефтяное Хозяйство» том 33, № 7, стр. 61, 1955.
9. Галявич А. Ш., Дворкин И. Л., Лепешинский И. Ю., Дорофеев В. С. — Оценка водонефтеносности пластов в обсаженных скважинах методом нейтронного гамма каротаж. «Нефтяное Хозяйство» том 33, № 11, стр. 59, 1955.
10. Дахнов В. Н. — Применение радиоактивных методов при разведке полезных ископаемых. «Сессия А. Н. СССР по мирному использованию атомной энергии» 1—5 июля 1955 г., Москва 1955.
11. Дахнов В. Н. — Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. Москва 1955.
12. Дядькин И. Г. — К теории гамма, каротаж буровых скважин. Доклады А. Н. СССР серия геофизическая, том 4, стр. 323, 1955.
13. Ерозолимский В. Г., Беспалов Д. Ф. — Применение спитилиационного счетчика для радиометрической аппаратуры в нефтяной промышленности. «Сессия А. Н. СССР по мирному использованию атомной энергии» 1—5 июля 1955 г., Москва 1955.
14. Кантор С. А. — Основы теории нейтронного каротаж. «Прикладная геофизика» (выпуски) № 13, 1955.
15. Кухаренко Н. К., Одинокоев В. П., Шимелевич Ю. С. — Возможности использования метода активации натрия для выявления нефтеносных и водоносных пластов и определения водонефтяного контакта в условиях обсаженной колонной скважины. «Сессия А. Н. СССР по мирному использованию атомной энергии» 1—5 июля 1955 г., Москва 1955.
16. Чечик Н. О., Файнштейн С. М., Лифшиц Т. М. — Электронные умножители. Москва 1955.