LUCJAN ROMAN
Instytut Geologiczny

PROFILOWANIE NEUTRON — GAMMA

W ostatnich latach wprowadza się u nas coraz częściej do kompleksu metod geofizycznych badania profili otworów wiertniczych metodą neutron — gamma (n, γ). Zalety tej metody, takie jak: niezależność jej wskazań od temperatury i ciśnienia panującego w otworze, możliwość profilowania skał w otworze zarurowanym i zacementowanym, predestynuje ją na jedno z pierwszych miejsc. Metodą tą, jako jedną z metod radioaktywnych, bada się własności jądrowe pierwiastków wchodzących w skład skał, w przeciwieństwie do elektrometrii czy termometrii otworów, w których badane parametry uwarunkowane są własnościami atomów, molekuł i ich asocjacji, składających się na skałę.

Możliwość jakościowego i ilościowego rozwarstwienia przekroju otworu według zawartości w skałach wodoru oraz, przy dostatecznej mineralizacji wód pokładowych, ustalenia kontaktu kolektora wodonośnego z nieprzepuszczalnym są ważnymi zadaniami, które można rozwiązywać za pomocą tej metody. Aby nie uwzględniać zmian intensywności promieniowania gamma (γ), spowodowanych naturalną promieniotwórczością, moc źródła neutronowego dobiera się tak, że intensywność sztucznie wzbudzonego promieniowania gamma przekracza 10 — 15 razy intensywność naturalnego promieniowania γ. Aparaturę do pomiarów stosuje się tę samą co i dla profilowania γ z dodaniem jedynie źródła neutronów do przyrządu głębinowego.

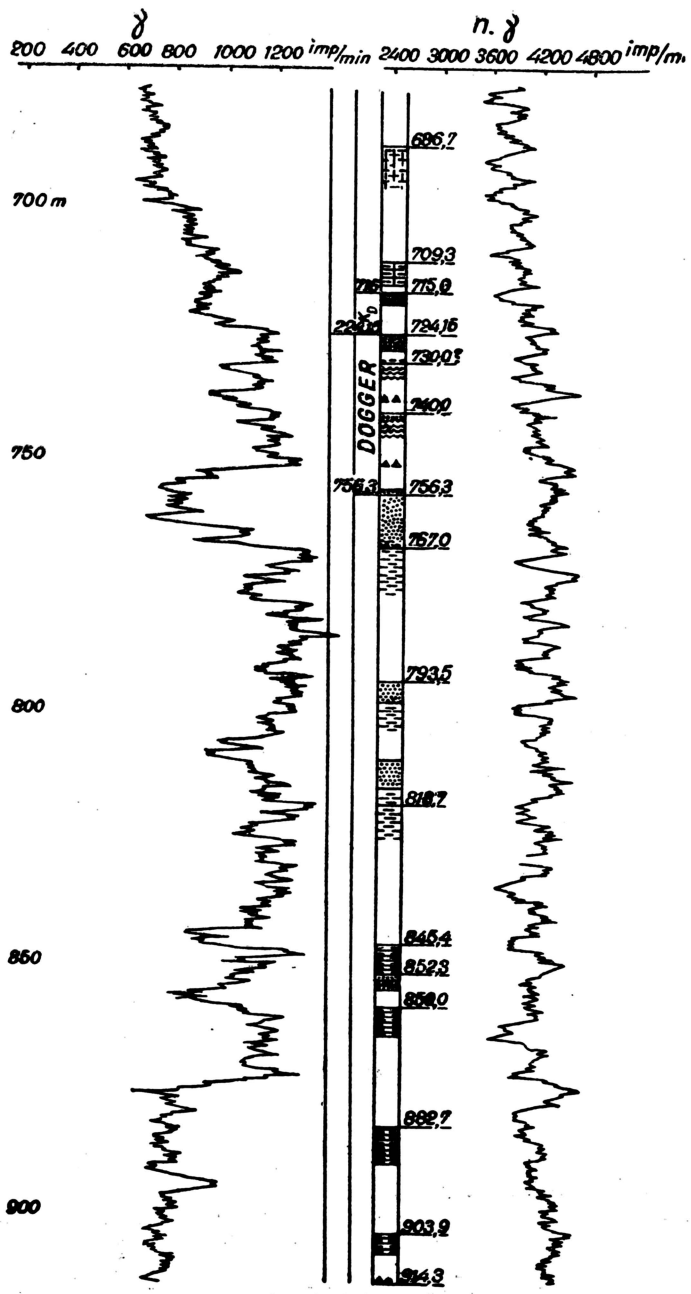
W przyrządzie głębinowym przy profilowaniu otworu Gorzów IG I jako źródło neutronów była użyta mieszanina polonu i berylu, o początkowej radioaktywności w chwili wyprodukowania 6 C. Okres półrozpadu polonu $_{84}Po^{219}$ używanego w źródle wynosi 139 dni = $1{,}2 \times 10^7$ sekund. $_{84}Po^{210}$ powstaje z rozpadu promieniotwórczego bizmutu $_{83}Bi^{210}$. Oba te pierwiastki należą do szeregu uranowego $_{92}U^{238}$. Rozpad promieniotwórczy polonu przebiega następująco:

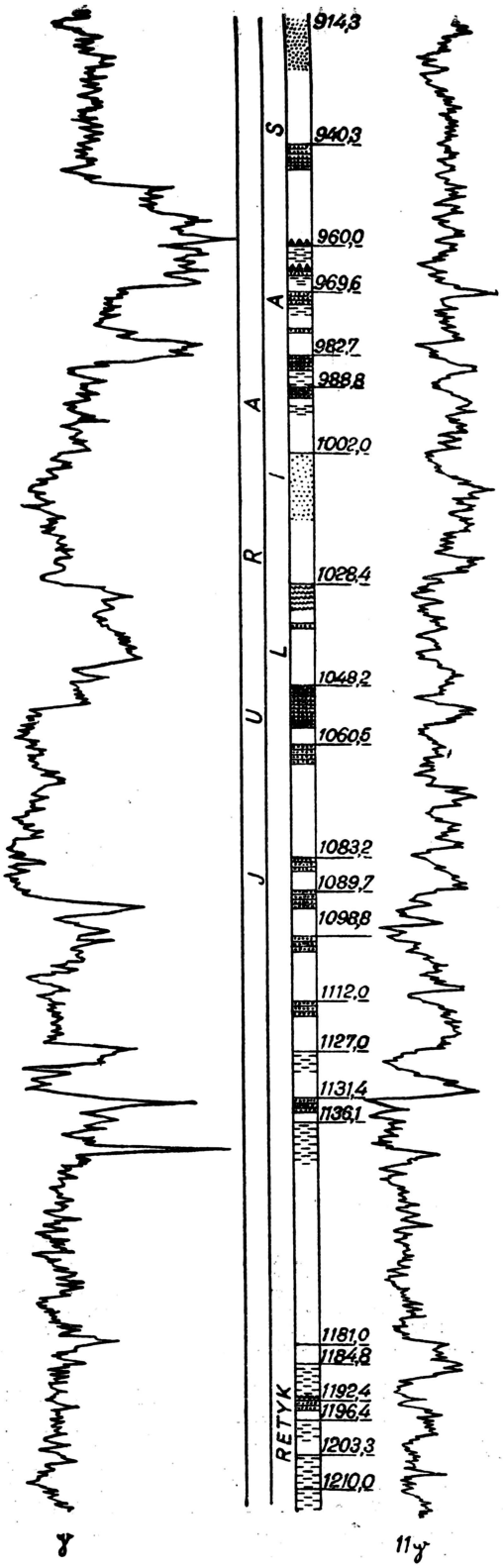
$$_{84}Po^{210} \rightarrow {}_{82}Pb^{206} + {}_{2}He^{4}$$

Powstający $_{82}Pb^{206}$ jest stałym izotopem ołowiu. W mieszaninie polonu z berylem w źródle neutronów cząsteczki α wchodzą w reakcje jądrowe z berylem:

$$_{4}Be^{9} + {}_{2}He^{4} \rightarrow {}_{6}C^{12} + {}_{0}n^{1}$$

Źródło (Po + Be) daje 3×10^6 neutronów na sekundę na 1 C. W momencie początkowym, kiedy źródło było wyprodukowane i miało radioaktywność 6 C, dawało $1{,}8 \times 10^7$ neutronów na sekundę. Na

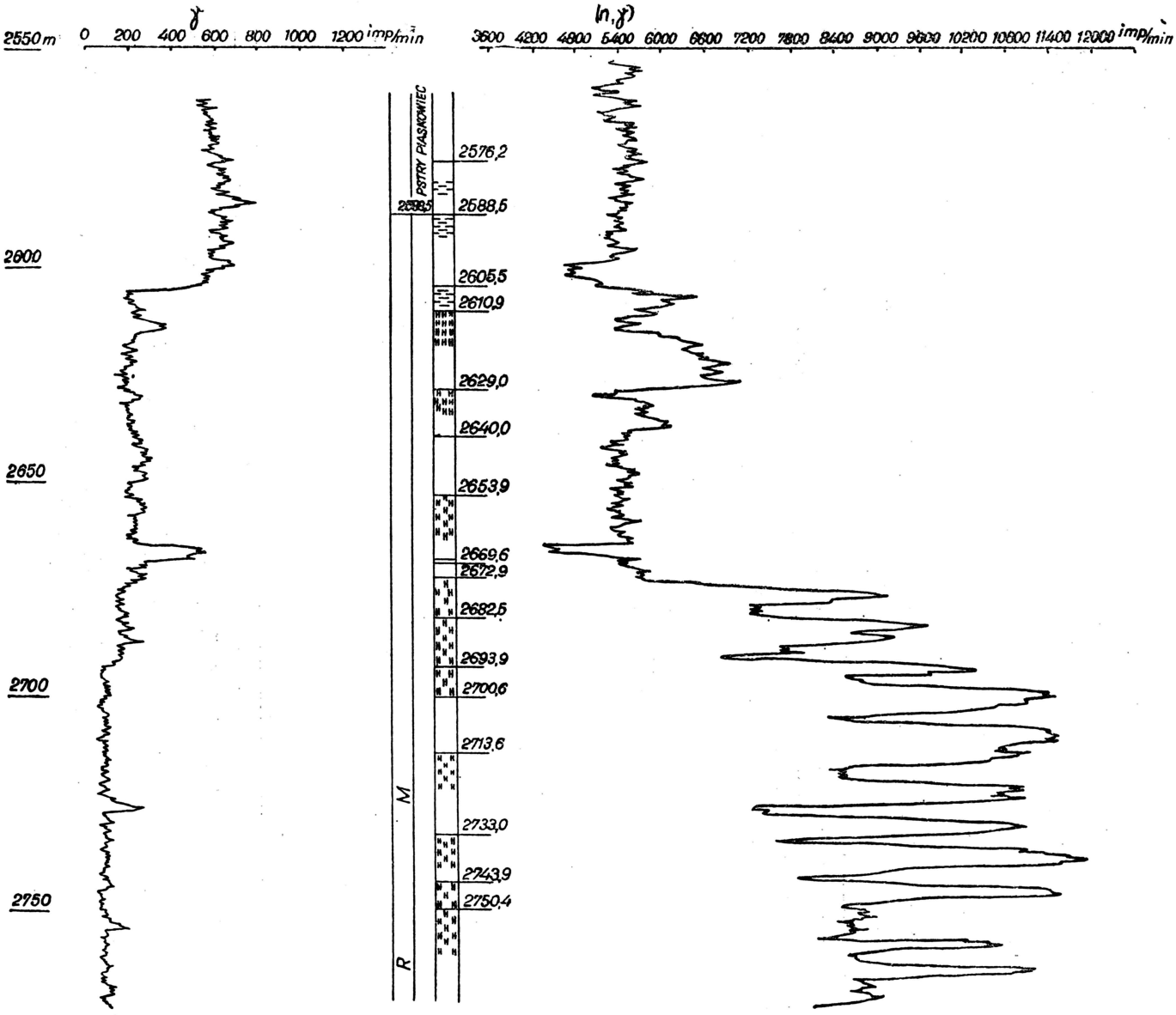




Ryc. 1

686,7 — margle szare ku spągowi przechodzą w iłowiec, 709,3 — margle ilaste, zwięzłe silnie reagujące z HCl, 715,0 — piaskowce drobnoziarniste 1,3 m dalej iły czarnozielone, w spągu piaski, mułkowe, 724,15 — piaski syderytyczne w dolnej części iły ciemnoszare, 730,0? — mułowce szare z wkładkami syderytu, fauna, 740,0 — mułowiec, mułowiec piaszczysty z wkładkami syderytu przewarstwiony piaskowcem, fauna, 756,3 — piaski drobnoziarniste, jasnoszare w spągu, mułki, 767,0 — iłowce szarozielone miejscami piaszczyste, 793,5 — iłowce szare z odcieniem zielonawym, z przemazami piaszczystymi i wkładką piasków drobnoziarnistych, 818,7 — iłowce z bardzo słabym odcieniem zielonkawym z przemazami piaszczystymi, miejscami sferosyderyty, 845,4 — łupki ilaste ciemnoszare, 852,3 — piaskowce białe ze smugami ilastymi, 859,0 — łupki szare z przemazami piaszczystymi, 882,7 — piaskowce drobnoziarniste, brunatne z przerostami i toczeńcami iłów ciemnobrunatnych, 903,9 — piaskowce drobnoziarniste, szare z wkładkami syderytu.

914,3 — piaski drobnoziarniste szare z wkładkami iłów i piaskowców, 940,3 — piaskowce drobnoziarniste z detrytem roślinnym i wkładkami iłów. W spągu 10 cm warstwa syderytu, 960,0 — iłowce z wkładkami piaskowca w stropie, syderyty piaszczyste, 969,6 — piaskowce ciemnozielone przewarstwione iłowcami, 982,7 — piaskowce ciemnoszare, w spągu iłowce z soczewek piaskowców, 988,8 — piaskowce i piaski drobnoziarniste z laminacjami iłów, 1002,0 — piaski jasnoszare, drobnoziarniste, 1028,4 — mułowce piaszczyste laminowane piaskowcem z wkładkami węgla. Upad 10—12°, 1048,2 — piaskowce słabo scementowane i piaski szare przewarstwione iłami, 1069,5 — piaskowce drobnoziarniste białe, miejscami z wkładkami iłowca, 1083,2 — piaski z wtrąceniami iłów, 1089,7 — piaskowce z zielonawym odcieniem, 1098, 8 — piaskowce z wkładkami mułowców i iłowców miejscami syderytycznych. Upady 20—25°, 1112,0 — piaskowce jasnoszare, 1127,0 — iłowiec ciemnoszary, 1131,4 — piaskowce jasnoszare ze śladami węgli, 1136,1 — iłowce czerwonobrunatne, ślady zlustrowań, 1181,0 — brak rdzenia, 1184,8 — 1192,4 — iłowiec czerwonobrunatny z konkr. dolomitowymi, w dolnej części mułowce, 1196,4 — piaskowce jasnoszare z konkrecjami dolomitowymi, 1203,3 — iłowce czekoladowobrunatne z konkrecjami dolomitowymi, 1210,0 — mułowce z przemazami piaszczystymi



Ryc. 2. Otwór Gorzów, profile γ i (n, γ).

2576,2 — iłowiec czekoladowobrunatny, dolomityczny, 2588,5 — iłowiec czek. brun., dolomityczny, 2605,5 — iłowiec czek. brun. z przewarstwieniami anhydrytu, 2610,9 — sól kamienna czerwona i różowa z wkładkami iłowca czekoladowego od 10 do 80 cm, 2629,0 — sól kamienna biała z 20 cm wkładką anhydrytu w środku warstwy, 2640,0 — brak rdzenia sole wypłukane, 2653,9 — sól kamienna jasna, miejscami z odcieniem woskowożółtym lub pomarańczowym z warstewkami anhydrytu od 0,1—2 cm. W spągu 50 cm wkładka anhydrytu, 2669,6 — iły czerwone z odcieniem hematytowym, wypłukanym, 2672,9 — sól czerwona i pomarańczowa z nieregularnymi wypryśnięciami anhydrytu, 2682,5 — sól czerwona i woskowożółta z przewarstwieniami anhydrytu od 3 mm do 50 cm, 2693,9 — sól pomarańczowoczerwona ze śladami warstw rocznych anhydrytu, 2700,6 — brak rdzenia, 2713,6 — sól rdzawa przewarstwiona jasną, ślady porostów rocznych anhydrytu, 2733,0 — sól pomarańczowa z podrzędnymi wkładkami jasnej, w spągu i w stropie wkładki anhydrytu od

jeden uwalniany neutron przypadało więc średnio około 12 000 cząsteczek alfa.

Promieniowanie gamma polonu jest daleko mniej intensywne niż radu. Źródło neutronowe z mieszaniny polonu z berylem odznacza się słabym promieniowaniem γ — około 1 kwant gamma na 1 neutron.

Pod wpływem promieniowania gamma polonu może również zajść w mieszaninie polonu z berylem reakcja fotorozszczepienia jąder berylu:

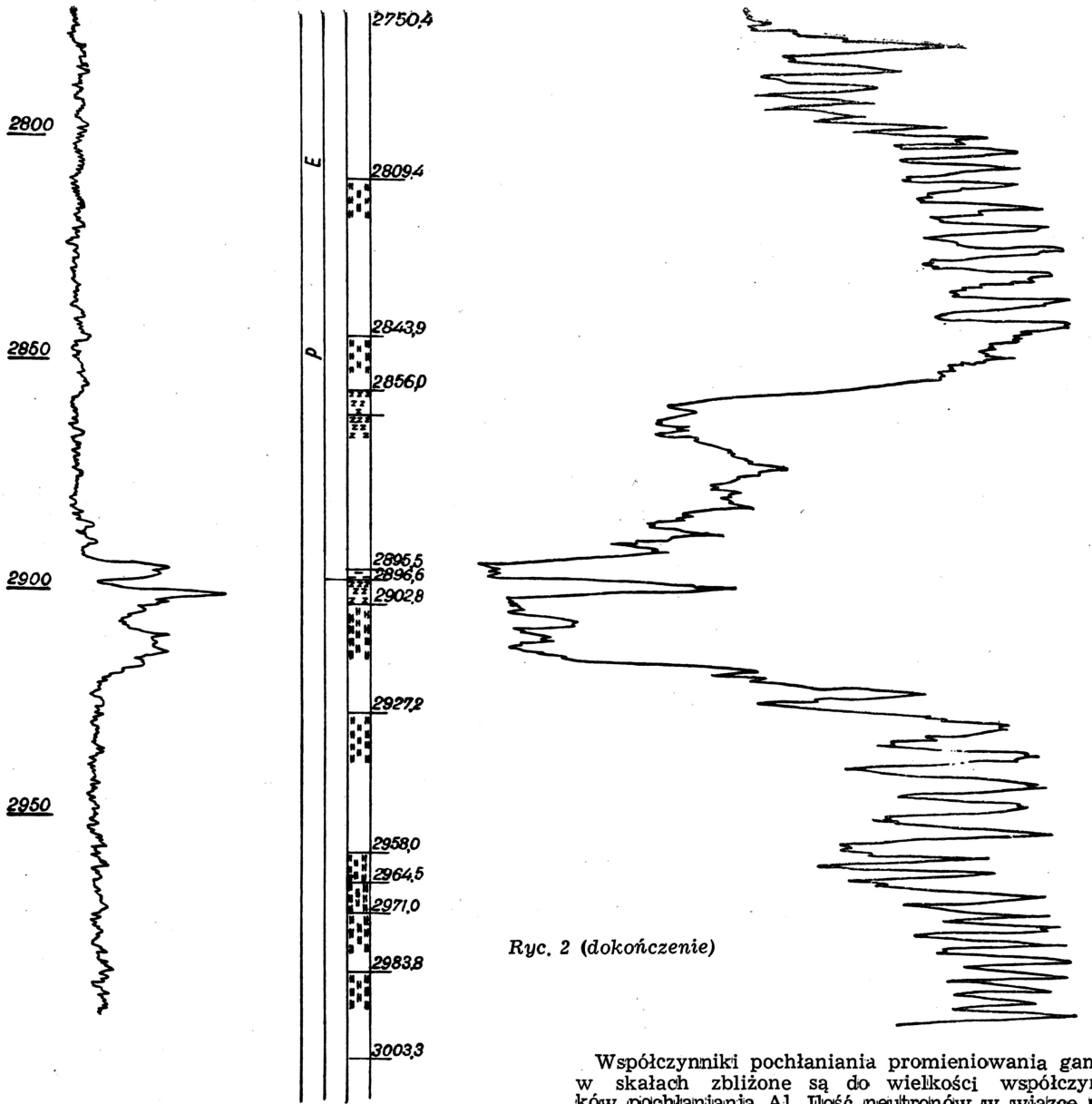
$$_4Be^9 + \gamma \rightarrow {}_4Be^8 + {}_0n^1$$

Pod wpływem naświetlenia jąder berylu cząsteczkami — α może zajść oprócz poprzednio podanej głównej reakcja następująca:

$$_4Be^9 + {}_0n^1 \rightarrow {}_4Be^8 + 2\,{}_0n^1 \rightarrow 2\,{}_2He^4 + 2\,{}_0n^1$$

a więc reakcja typu (n, 2n), która zachodzi przy wysokiej energii neutronów (około 14 MeV).

Energia neutronów emitowanych przez źródło (Po + Be) zmienia się w sposób ciągły od 0 do 11 MeV z dwoma wyraźnymi maximami w obszarze 3 i 5 MeV. Ich prędkości są rzędu 3×10^9 cm/sek = 30 000 km/sek. Neutrony, przechodzące przez płuczkę w otworze, zarurowanie i skały, stopniowo tracą swoją prędkość. Do ich spowolnienia przyczyniają się przede wszystkim zderzenia z wodorem, ponieważ masy wodoru i neutronu są zbliżone do siebie. Miarą średniego przesunięcia neutronu od źródła do punktu, w którym jego prędkość zmaleje do $2{,}22 \times 10^5$ cm/sek = 2,22 km/sek, jest długość spowolniania Lf. Dla wody Lf = 7,7 cm, dla anhydrytu 27 cm. Pochłanianie neutronów spowolnionych przez skały charakteryzuje się: długością dyfuzji Ld — będącej miarą średniego przesunięcia neutronu od punktu, gdzie stał on się spowolnionym, do punktu, w którym został on pochłonięty i średnim czasem życia neutronu spowolnionego τ — czasem, w ciągu którego neutron spowolniony dyfunduje od chwili jego powstania do pochłonięcia. Ld dla wody wynosi 2,3 cm, a dla anhydrytu 8,2 cm. τ dla wody wynosi $2{,}2 \times 10^{-4}$ sek. a dla anhydrytu $3{,}4 \times 10^{-4}$ sek.



Ryc. 2 (dokończenie)

20 do 30 cm, 2743,9 — sól woskowożółta ze śladami warstw rocznych w spągu, wpryśnięcia iłów ciemnoszarych, 2750,4 — sól jasnoszara z przeławiceniami szarej, miejscami ze śladami warstw rocznych anhydrytu, 2809,4 — sól jasnoszara z wkładkami soli zaróżowionej, z cienkimi warstwami rocznymi anhydrytu, 2843,9 — sol jasna z licznymi warstwami rocznymi anhydrytu, 2856,0 — anhydryt, 1 cm od góry wkładki iłów ciemnoszarych, 2895,5 — anhydryt szary w spągu, od głęb. 2890,3 — nieregularne wtrącenia iłów ciemnoszarych. Anhydryt główny, 2896,6 iły ciemnoszare (szary ił solny), 2902,8 — anhydryt z wpryśnięciami soli, od 2902,8 do 2927,2 — sól szara przechodząca ku dołowi w czerwoną i wtrąceniami anhydrytu białego, 2927,2 — sól jasnoszara ze śladami warstw rocznych, 2958,0 — sól jasnoszara z wkładkami anhydrytu, 2971,0 — 2983,8 — sól jasna przechodząca w szarą, 2971,0 — 2983,8 — sól szara smugowana iłem, 2983,8 — 3003,3 — sól szara.

Reakcji pochłonięcia spowolnionego neutronu przez jądra atomów towarzyszy emisja promieniowania gamma:

$$ {}_1H^1 + {}_0n^1 \rightarrow {}_1H^2 + \gamma $$

$$ {}_{13}Al^{27} + {}_0n^1 \rightarrow {}_{13}Al^{28} + \gamma $$

Pochłanianie neutronów w zależności od ich energii przez glin (Al) jest złożone. Maksymalny przekrój pochłaniania (σ) 12,5 barn występuje przy energii neutronów 0,16 MeV. Przy energii 0,05 MeV σ dochodzi do 10 barn; dla neutronów o energii 0,2 do 0,9 MeV σ wynosi średnio 4 barn.

Współczynniki pochłaniania promieniowania gamma w skałach zbliżone są do wielkości współczynników pochłaniania Al. Ilość neutronów w wiązce promieniowania przy jej przejściu przez skały stopniowo zmniejsza się. Przy wiązce równoległej przechodzi N neutronów, gdzie $N = No\, e^{-n\sigma}$. We wzorze tym No jest ilością neutronów padających na warstwę materiału, σ — osłabieniem wiązki neutronów wskutek rozproszenia i pochłaniania — zwane pełnym efektywnym przekrojem: składającym się z przekroju pochłaniania σ_z i przekroju rozpraszania σ_p; n — ilością atomów w 1 cm^3 skały.

Wyemitowane, przy pochłonięciu neutronu, promieniowanie gamma zanim dojdzie do indykatora, również ulega osłabieniu. Kwanty gamma, zderzając się z elektronami obwódki atomu, ulegają efektowi Komptona, w wyniku którego ulegają rozproszeniu i zmniejszają swoją energię. Przy efekcie fotoelektrycznym energia padającego kwantu gamma jest w całości przekazywana jednemu z elektronów obwódki atomu. Trzecią typową reakcją promieniowania gamma z materią jest tworzenie par elektron-pozytron. Przy przejściu cienkiej, monochromatycznej, równoległej wiązki promieni gamma przez warstwę skały o grubości X natężenie promieniowania gamma zmienia się według prawa wykładniczego:

$$ I = Io\, e^{-\mu x} $$

gdzie Io i I są odpowiednio wielkościami intensywności promieniowania gamma wchodzącej i wycho-

dzącej wiązki promieniowania, a μ współczynnikiem pochłaniania promieniowania gamma przez daną skałę. Pochłanianie sztucznie wzbudzonego promieniowania zależy od energii promieniowania. Np. przy zmianie energii promieniowania gamma od 0,25 MeV do 3,0 MeV grubość warstwy pochłaniającej połowę promieniowania gamma w wodzie wzrasta z 5,58 cm do 17 cm, w Al z 2,39 cm do 6,93 cm. Przy energii promieni gamma 1,375 MeV odpowiednie grubości wynoszą dla wody 11,6 cm, dla Al 5 cm. Promienie o większej energii są więc słabiej pochłaniane.

Profilowanie gamma i neutron-gamma w otworze Gorzów IG 1 zostało wykonane na odcinku od 29 m głębokości do 2993 m głębokości. Z profilu neutron-gamma wynika, że w utworach czwartorzędowych piaski i żwiry oraz iły ciemnoszare warwowe, zalegające od 29 m do 75 m głębokości, odznaczają się mniejszą zawartością wody (czy to w postaci wody grawitacyjnej, wypełniającej pory skał, czy też w postaci wody higroskopijnej lub konstytucyjnej) od niżej zalegających glin zwałowych. Bardzo charakterystyczny jest odcinek profilu od 675 do 1215 m głębokości (ryc. 1). Mułowce na głębokości 745 m, iłowce na głębokości 775 m, 835 m, łupki szare na głębokości 865 m, iłowce na głębokości 965 m, mułowce na głębokości 1040 m, iłowce na głębokości 1122 m, 1132,5 m i 1141,5 m odznaczają się na profilu naturalnego promieniowania gamma podwyższonymi o około 500 impulsów na minutę wskazaniami w stosunku do zalegających w stropie tej partii margli, wapieni marglistych i wapieni detrytycznych. Przewarstwienia piasków na głębokości 760 m, 920 m, 1015 m, piaskowców na głębokości 900 m, 975 m, 1062 m, 1110 m na profilu naturalnego promieniowania gamma zostały zarejestrowane o intensywności około 400 impulsów na minutę niższej. Poniżej od 1142,5 m, na profilu gamma, mamy odcinek o małej zmienności zarejestrowanej naturalnej promieniotwórczości gamma, o średniej wielkości natężenia: 850 imp/minutę. Odcinek ten przedłuża się aż do głębokości 1350 m. W przeciwieństwie do profilu naturalnej promieniotwórczości gamma skał, profil wzbudzonej przez bombardowanie skał neutronami promieniotwórczości gamma jest na tym odcinku mało zróżnicowany. Obserwowane tu wahania leżą w granicach statystycznych fluktuacji, spowodowanych nierównomiernym w czasie rozpadem promieniotwórczym pierwiastka.

Na przebieg krzywej neutron gamma decydujący wpływ wywiera zawartość w skałach wodoru. Własności neutronowe wodoru wybitnie wyróżniają go spośród innych pierwiastków, pospolicie występujących w skałach. Przyczynia się do tego mała masa jądra wodoru, zbliżona do wielkości masy neutronu. Na skutek tego przy elastycznych zderzeniach tych mas zachodzi duży spadek energii neutronu. Skały zawierające dużo wodoru, czy to w postaci wody, czy w postaci węglowodorów stałych, płynnych lub gazowych, na profilach neutron gamma zaznaczają się obniżonymi albo podwyższonymi wartościami intensywności sztucznie wzbudzonego promieniowania gamma, w zależności od długości użytej do pomiaru sondy. Przy sondzie krótkiej, o długości do 20—40 cm, w skałach zawierających dużo wodoru obserwujemy podwyższone wartości intensywności wzbudzonego promieniowania gamma. Na krótkiej już bowiem odległości od źródła neutrony dzięki zderzeniom z jądrami wodoru stracą energię i szybkość ich obniży się dostatecznie, aby mogły być pochłaniane przez jądra pierwiastków a zwłaszcza wodoru. Wyemitowane przy pochłonięciu neutronu promieniowanie gamma zanim zostanie osłabione przez rozproszenie, efekt fotoelektryczny i tworzenie par elektron-pozytron dojdzie do indykatora promieniowania gamma — licznika Geigera-Müllera lub licznika scyntylacyjnego. Przy sondzie długiej natomiast, w naszym przypadku (55 do 65 cm), obserwuje się obniżone wartości promieniowania gamma w skałach o dużej zawartości wodoru. W tym wypadku neutrony, spowolnione na krótkiej odległości od źródła i pochłonięte na dość znacznej odległości od indykatora promieniowania gamma, spowodują wtórne promieniowanie gamma, które zanim dojdzie do indykatora, ulegnie znacznemu osłabieniu.

Wtórne promieniowanie gamma na załączonym odcinku od 675 do 1215 m nie wykazuje większych zmian. Pewne wyraźniejsze jego obniżenie mamy poniżej 1130 m i to nie wychodzące za granice zmienności natężenia, spowodowane nie zawsze centrycznym położeniem sondy w otworze i zmiennością średnicy otworu. Mała zmienność krzywej (n, γ) na tym odcinku świadczy o jednakowej porowatości skał tu występujących i jednakowej zawartości w nich wody.

Na odcinku profilu gamma od 1349,25 m do 1359,5 m (ryc. 2) obserwuje się dodatnią i ujemną anomalię promieniotwórczości gamma, a na odcinku profilu neutron-gamma od 1350,0 m do 1361,5 m — obserwujemy cztery dodatnie piki wzbudzonego promieniowania gamma. W profilu geologicznym od 1317,9 m do 1345,7 m i od 1352,5 do 1356,5 zanotowano występowanie iłowców czerwonobrunatnych i szarych z wkładkami dolomitu, od 1360,9 m do 1372,8 m — mułowców i iłowców z wkładkami anhydrytu. Piki od 1357,5 do 1359 m i od 1360 do 1361,5 m na krzywej (n, γ) odpowiadać mogą anhydrytom, których promieniotwórczość naturalna jest bardzo niska, a stałe neutronowe jak: długość spowolnienia L_f, długość dyfuzji L_d i czas życia neutronów τ bardzo wysokie. Podobnie ostra i wąska pika od 1350 do 1351 m i od 1349,5 do 1350,5 odpowiadać może przewarstwieniom dolomitu.

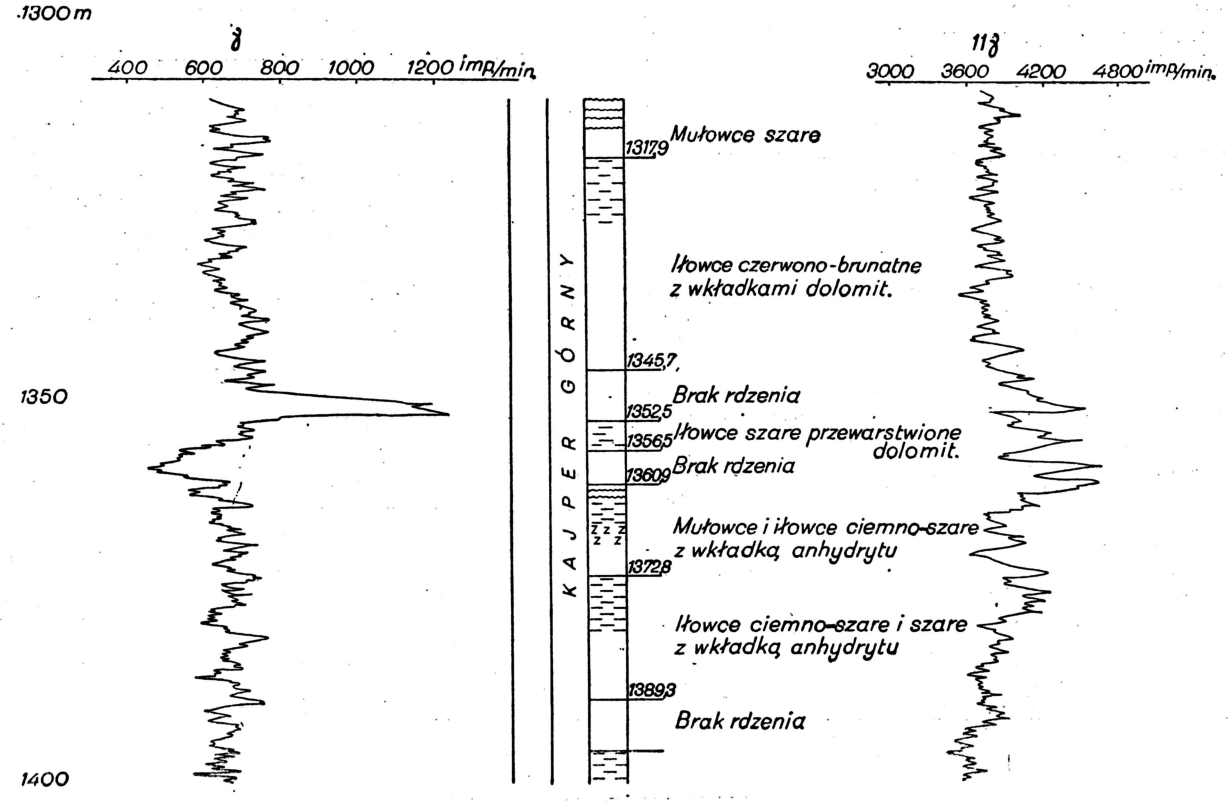
Wkładka od 1350 do 1351 występuje na tle wyraźnej dodatniej anomalii promieniotwórczości naturalnej od 1349,25 m do 1352 m. Intensywność promieniotwórczości jest tu prawie dwa razy większa niż w skałach towarzyszących.

Na ryc. 3 w profilu promieniotwórczości gamma wyróżnić można odcinki: od początku do 2605,5 m od 2605,5 m do 2894, od 2894 do 2918,5 i od 2918,5 do końca profilu. W profilu neutron gamma wydzielić można następujące zasadnicze części: od 2605,5 do 2631,5 od 2631,5 do 2668,0, od 2668,0 do 2855,5, od 2855,5 do 2894, od 2894 do 2915 m i od 2915 m do końca profilu. Na głębokości 2605,5 następuje spadek naturalnej promieniotwórczości gamma średnio o około 400 impulsów i wzrost promieniotwórczości gamma — wzbudzonej o około 600 imp/min. w stosunku do skał w dalszym stropie leżących.

Odpowiada tej granicy najprawdopodobniej przejście osadów soli kamiennej w osady ilaste, odnotowane na głębokości 2610,9 m. Poprawka głębokościowa w takim wypadku wynosiłaby 2610,9 — 2605,5 = = 5,4 m.

Od 2605,5 do 2631,5 m na tle obniżonych wartości natężenia radiacji γ zaznaczają się dwie dodatnie anomalie, którym w profilu (n — γ) odpowiadają obniżenia wartości (n — γ). Będą to prawdopodobnie warstewki iłowców w soli kamiennej. Dla odcinka od 2631,5 do 2668 m charakterystyczny jest profil (n, γ) z nieco podwyższonymi wartościami u góry, środkowymi zasadniczo przeciętnymi na poziomie 5700 imp/min, i wyraźnie zmniejszonymi wartościami u dołu, którym odpowiadają dodatnie wartości promieniotwórczości naturalnej. Piką od 2665 do 2668 na profilu γ i wgłębienie na profilu (n — γ) odpowiadają iłom zaznaczonym w profilu geologicznym na głębokości od 2669,6 do 2672,9 m. Poprawka głębokościowa wyniesie 2672,9 — 2668,0 = 4,9 m. Podwyższone wartości na profilu (n — γ) odpowiadają nieco grubszym warstewkom soli kamiennej z mniejszymi wkładkami anhydrytu niż w niższej zasadniczej partii.

Od 2668 m do 2855,5 m występują znacznie podwyższone wartości na profilu (n — γ) przy obniżonych wartościach na profilu gamma. W profilu sporządzonym na podstawie rdzenia zanotowano występowanie soli kamiennej z przewarstwieniami, wtryśnięciami lub przerostami anhydrytu. Płytszym wgłębieniom w profilu (n, γ) będą na ogół odpowiadać przewarstwienia anhydrytu, a głębszym na głębokościach 2672,5, 2687,5, 2726, 2754 wkładki ilaste.



Ryc. 3. Otwór Gorzów, profile γ i (n, γ).

Na głębokości od 2855,5 do 2894 m na profilu (n — γ) zarejestrowano średnio około 7800 impulsów na minutę. W profilu geologicznym mniej więcej tej głębokości odpowiada występowanie anhydrytów. Naprzeciwko warstw soli, biorąc pod uwagę piki na profilu (n, γ), mamy około 11 400 imp/min., dla iłowców: 5850 imp/min. Anhydryty należą do skał, które na profilach wzbudzonej promieniotwórczości gamma (n, γ), zdjętych sondami o długości przekraczającej 20—40 cm, zaznaczają się najwyższymi wartościami. Powodem tego jest niska w nich zawartość wodoru, stąd wynika długa droga, zanim neutrony, uwalniane ze źródła polonowo-berylowego w przyrządzie głębinowym, zostaną spowolnione do prędkości cieplnych. Dzięki temu promienie gamma wypromieniowane blisko indykatora przez jądra atomowe pierwiastków wchodzących w skład anhydrytu docierają do licznika Geigera-Müllera i wywołują w nim impulsy prądu. Atomy chloru, które tu wchodzą w skład soli kamiennej, odznaczają się dużym przekrojem pochłaniania dla neutronów termicznych ($\sigma_z = 33$ barn) w porównaniu np. do krzemu 0,16 barn, aluminium 0,212, wodoru 0,31 i tlenu 0,0016 barn. Z drugiej strony, przy pochłonięciu neutronu przez jądro chloru, uwalnia się nie jeden, lecz kilka kwantów gamma wskutek kaskadowych przejść jądra chloru ze stanu wzbudzonego do stanu zasadniczego (o najmniejszej energii). Niektóre zmiany wartości zarejestrowanego natężenia na krzywej neutron gamma odnieść należy do statystycznych fluktuacji przy rozpadzie jąder atomowych. Wielkość fluktuacyjnych odchyleń na krzywych radiometrii otworów wiertniczych, od średniej wartości natężenia charakteryzuje średni błąd (δ *I*):

$$\delta I = \pm \frac{1}{\sqrt{2 \bar{I}_{rej} \cdot \tau}}$$

gdzie $\bar{I}_{rej}$ jest średnią intensywnością promieniowania w skali zapisu

τ — stałą czasową obwodu całkującego

Dla odcinka od 2800 do 2850 m $\bar{I}_{rej} = 11\,550$ impulsów na minutę

$$\tau = 12 \text{ sek} = \frac{1}{5} \text{ min} = 0{,}2 \text{ min.}$$

$$\delta I = \pm \frac{1}{\sqrt{2 \cdot 11550 \cdot 0{,}2}} = \pm \frac{1}{68}$$

Szerokość dróżki normalnych fluktuacji wyniesie tu 340 imp/min. Interpretacji podlegają na ogół wychylenia krzywej, których wielkość 2,5 do 3 razy przekracza szerokość tej dróżki, a więc wynoszące $2{,}5 \times 340 = 850$ do 1020 impulsów na minutę. Odpowiednio dla odcinka od 2870 do 2882 m

$$\delta I = \pm \frac{1}{\sqrt{2 \cdot 8400 \cdot 0{,}2}} \simeq \frac{1}{58}$$

Szerokość dróżki wyniesie około 290 imp/min. i interpretacji podlegają wychylenia powyżej 870 impulsów na minutę, a dla odcinka od 2570 do 2595 m.

$$\delta I = \pm \frac{1}{\sqrt{2 \cdot 5850 \cdot 0{,}2}} = \frac{1}{48}$$

szerokość dróżki 245 imp/min. i interpretacji podlegają wychylenia większe od 735 imp/min.

Bardzo wyraźnie zaznaczają się warstwy iłów od 2894 do 2897,5 m i od 2900 do 2905 m, dające na krzywej (n, γ) głęboko wcięte minima z powodu dużej zawartości wodoru, a na krzywej γ ostre piki z powodu zwiększonej promieniotwórczości naturalnej. Ostro również zaznacza się warstwa anhydrytu od 2897,5 do 2900 m z dodatnią piką na profilu (n, γ) i wcięciem w profilu γ. Odcinkom od 2905 do 2915,0 m zgodnie z częściowymi próbkami odpowiada sól z wtrąceniami anhydrytu. Profile (n, γ) i γ wskazują na występowanie w tych głębokościach również skał o dużej zawartości wodoru i o podwyższonej promieniotwórczości naturalnej — prawdopodobnie iłów.

Od 2815 m do 2918,5 m zanotowano wzrost natężenia naturalnej promieniotwórczości i spadek pro-

mieniotwórczości wzbudzonej, ale wielkość promieniowania (n, γ) przekracza 8400 imp. na minutę. Wzrost promieniotwórczości naturalnej wskazuje na zwiększoną zawartość substancji ilastej, a poziom (n, γ) na skałę o dość dużej gęstości z małą zawartością wodoru.

Odcinek od 2918,5 m do końca profilu (2994 m) jest analogiczny do odcinka od 2800 do 2850 m.

LITERATURA

1. Chombart L. G. — Reconnaissance et évaluation des formations par diagraphies électriques et nucléaires. „Revue de l'Institut Français du Pétrole" 1956, nr 11.
2. Dachnow W. N. — Intierprietacija riezultatow gieofiziczeskich issledowanij razriezow skważin. Moskwa 1955.
3. Kanaszewski W. — Wstępny opis profilu litologicznego otworu Gorzów IG 1. Archiwum IG 1959.
4. Pierkow N. A., Korszikow W. N. — Intierprietacija diagramm radioaktiwnogo karottaża skważin. Moskwa 1956.
5. Radioaktiwnyje mietody issledowanija nieftianych i gazowych skważin. Moskwa 1958.
6. Wyllie M. R. J. — The fundamentals of electric log interpretation. New York 1957.

SUMMARY

Adventages of the neutron-gamma method in comparison to electric and thermal methods also problems which can be solved with help of this method are presented here. Properties of the most frequently used neutron source, composed of Polonium-Berilium mixture and the process of radioactive decay of Polonium also reactions of the type ${}_zX^A + {}_0n^1$ are here given. Neutron constants of some elements and minerals influencing on the result of logging (n, γ) are mentioned. Theoretical solutions are illustrated by examples of neutron-gamma and gamma logging accomplished in the Gorzów IG 1 bore-hole.

РЕЗЮМЕ

В этой работе описаны преимущества метода нейтрон-гамма по сравнению с электрическими и термическими методами, а также задачи, которые могут быть решены при помощи этого метода. Приведены свойства наиболее часто употребляемого источника нейтронов, состоящего из смеси полония с бериллием, а также процесс радиоактивного распада полония и реакции типа ${}_zX^A + {}_0n^1$. Приведены нейтронные константы некоторых элементов и минералов, имеющих основное влияние на результаты профилирования (n, γ). Теоретические решения проиллюстрированы примерами нейтронного гамма-каротажа и гамма-каротажа, произведенного в скважине Гожув ИГ 1.