

JAN SZEWCZYK
Instytut Geologiczny

ZASTOSOWANIE METOD RADIOMETRII WIERTNICZEJ DO IŁOŚCIOWEGO OKREŚLANIA SKŁADNIKÓW LITOLOGICZNYCH ORAZ WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH PRZEKROJÓW PIASZCZYSTO-ILASTYCH

UKD 550.832.5:551.734:552.51+539.217+531.755

Z efektywnych zastosowań metod geofizyki wiertniczej interpretacja jakościowa przekroju skał piaszczysto-ilastych należy na ogół do zagadnień względnie prostych. W większości przypadków nawet wyniki pojedynczych profilowań typu PS, PO, PG, PNG czy niekiedy nawet Pśr pozwalają na jakościowe zróżnicowanie profilu, tj. wydzielenie warstw ilastych i piaszczystych. Już jednak uzyskanie wiarygodnych informacji o ilościowym składzie litologicznym, porowatości efektywnej czy ciężarze objętościowym badanych skał było w praktyce niemożliwe przy obecnie stosowanej metodyce badań geofizycznych. Głównym czynnikiem, który dotychczas uniemożliwiał efektywne rozwiązywanie powyższego zagadnienia był wpływ minerałów ilastych na wyniki profilowań geofizycznych. Materiał ilasty, jako jeden z podstawowych składników omawianego typu skał

wykazuje zarówno zmienność form występowania (zailenie dyspersyjne, laminarne, strukturalne), jak i zmienność składu mineralnego oraz granulometrycznego.

Materiał ilasty wpływa w większym lub mniejszym stopniu na wskazania wszystkich metod geofizycznych, niezależnie od charakteru pola, na którym opiera się dana metoda. Szczególnie złożony i trudny do wyeliminowania jest wpływ zailenia na pomiary akustyczne oraz elektrometryczne. Wiąże się to z silną zależnością wskazań tych metod od sposobu rozmieszczenia materiału ilastego w skale (6). Istnieje wiele metod uwzględnienia wpływu zailenia na te pomiary, z tym jednak, że za najskuteczniejszą uważana jest metoda tzw. korelacyjnych wykresów krzyżowych oparta na jednoczesnym wykorzystaniu wielu ~~tych~~ profilowań o odpowiednio wysokim

standardzie*. Wśród metod geofizyki wiertniczej szczególnie korzystnie w aspekcie zailenia wyróżniają się metody radiometrii wiertniczej, takie jak: metoda naturalnego promieniowania gamma, metody neutronowe oraz metoda gamma-gamma.

Związek naturalnego promieniowania gamma z zaileniem jest od dawna szeroko znany i wykorzystywany w metodzie PG, do jakościowej a niekiedy ilościowej jego oceny. Bardziej szczegółowa analiza tego zagadnienia pokazuje jednak, że geneza tego związku jest niejednokrotnie bardzo złożona (8). Zmienność mineralna ilów i związana z nią zmienność koncentracji izotopu K^{40} , mającego z reguły największy udział w naturalnej promieniotwórczości gamma skał wpływa na to, że próby jej ilościowego wykorzystania do oceny zailenia natrafiają niejednokrotnie na duże trudności; np. czołowa światowa firma karotażowa — Schlumberger traktuje profilowanie gamma jedynie jako jakościowy wskaźnik zailenia (6). W sytuacjach jednak, gdy warunki sedymentacji i skład mineralny ilów (w sposób udokumentowany) pozostają stałe w obrębie określonych formacji litostratigraficznych — PG może służyć również jako ilościowy wskaźnik zailenia (4).

Wyniki profilowań neutronowych (PNG, PNNt i PNNnt) zależą, w głównej mierze, od zawartości wodoru w skałach, niezależnie od formy jego występowania (woda złożowa, bituminy, woda krystalizacyjna oraz adsorpcyjna w minerałach ilastych itp.). Większość dotychczas wykonywanych w kraju profilowań neutronowych wyrażano w jednostkach nieporównywalnych (imp/min) i tym samym rejestrowane wielkości informowały jedynie o względnych zmianach zawartości wodoru, nie dając możliwości bezpośredniego określania ani porowatości efektywnej, ani określania składu litologicznego skał. Zbudowanie w Owińskich k. Poznania stanowiska modelowego do kalibracji sond radiometrycznych umożliwiło wykonywanie m. in. kalibracji sond neutronowych (2).

Chąc określić porowatość efektywną skał na podstawie jednej z metod neutronowych należy, m. in., określić ilość wodoru znajdującego się w skałach poza otwartą przestrzenią porowatą. Porowatość neutronowa (Φ_N) jest określana następującą zależnością:

$$\Phi_N = S_w \cdot \Phi_{ef} + m_{il} \cdot C_i + m_{rg} (1 - S_w) + \Phi_{sk} + f(\Phi_f) \dots [1]$$

gdzie: S_w — nasycenie warstwy wodą;

Φ_{ef} — porowatość efektywna;

m_{il} — porowatość neutronowa minerałów ilastych;

C_i — objętościowa zawartość minerałów ilastych;

m_{rg} — porowatość neutronowa węglowodorów;

Φ_{sk} — porowatość neutronowa szkieletu skały zależna m. in. od składu mineralnego,

typu sondy oraz metody neutronowej;

$f(\Phi_f)$ — wielkość związana z porowatością neutronową płynu znajdującego się w strefie zasięgu stosowanej metody (wielkość zależna przede wszystkim od stopnia zmineralizowania mieszaniny filtratu płuczki wiertniczej z wodą złożową).

Dokładniejsze informacje dotyczące wpływu powyższych składników na profilowania neutronowe można znaleźć w innej pracy autora (10). Uwzględnienie wszystkich tych czynników jest niewątpliwie trudne, wymagające nie tylko dokładnych informacji o parametrach charakterystycznych dla badanego typu skały (typ szkieletu, zailenie itd.), ale również o parametrach charakterystycznych dla stosowanego typu sondy (porowatość neutronowa szkieletu, płynu, węglowodorów itd.).

Wykonywane dotychczas w kraju profilowania neutronowe ze względu na brak kalibracji sond dostarczały jedynie informacji o względnych zmianach porowatości neutronowych w badanych warstwach. W sytuacjach, gdy poziom zailenia, charakter nasycenia oraz skład mineralny pozostawały

względnie stałe wartość Φ_N informowała o względnych zmianach porowatości efektywnej. We wszelkich innych sytuacjach podejmowane próby eliminacji, np. zailenia, będącego z reguły najistotniejszą przyczyną różnic między wartościami Φ_N oraz Φ_{ef} , prowadziły w gruncie rzeczy do uzyskiwania wyników o charakterze w dalszym ciągu jakościowym, gdyż trudno nazwać inaczej wyniki, dla których nawet rząd wielkości błędów był z reguły nieznamy i niemożliwy do oszacowania. Wraz z wprowadzeniem kalibracji powstały możliwości znacznego podniesienia efektywności metod radiometrii wiertniczej. Jest to jednak proces stopniowy, wymagający zarówno znacznego wysiłku technicznego, jak i metodycznego. Niektóre z tych zagadnień, jak np. zagadnienie wpływu litologii czy porowatości neutronowej minerałów ilastych są badane m. in. w Instytucie Geologicznym. Należy przypuszczać, że w ciągu kilku najbliższych lat zagadnienia te zostaną w pełni rozwiązane. Już obecnie jednak dzięki wprowadzeniu kalibracji sond neutronowych istnieje wiele sytuacji, w których, jak to zostanie ukazane w dalszej części artykułu, istnieją realne szanse uzyskania wyników ściśle ilościowych.

Kolejną metodą radiometryczną, która pozwala na poznanie właściwości fizycznych skał w otworze wiertniczym jest metoda gamma-gamma (PGG). Intensywność rejestrowanego przez detektor strumienia kwantów gamma o wysokiej energii, jest przede wszystkim funkcją gęstości elektronowej badanej skały, wiążącej się w sposób ściśle z jej ciężarem objętościowym. W przypadku znanego i stałego składu litologicznego znajomość ciężaru objętościowego umożliwia określenie porowatości skał (ryc. 6a i b). I tu podobnie jak w odniesieniu do metod neutronowych określenie porowatości w ogólnym przypadku wymaga uwzględnienia wielu czynników, z których najistotniejsze jest zailenie. Ze względu na dotychczasowy brak odpowiedniego sprzętu pomiarowego metoda PGG była stosowana w badaniach krajowych w zasadzie jedynie w odniesieniu do surowców stałych — głównie węgla kamiennego i brunatnego (11).

Dużym postępow w tym zakresie była konstrukcja w PPG (7) nowych typów sond dla metody PGG, umożliwiających wykonywanie w głębokich otworach wiertniczych jakościowych, a po opracowaniu zagadnień kalibracyjnych — również ilościowych pomiarów ciężaru objętościowego. W dalszej części artykułu podane będą wyniki ilościowego określania tego parametru w skałach piaszczysto-ilastych otrzymane na podstawie jednego z pierwszych pomiarów wykonanych nowo skonstruowaną sondą typu LSE-3.

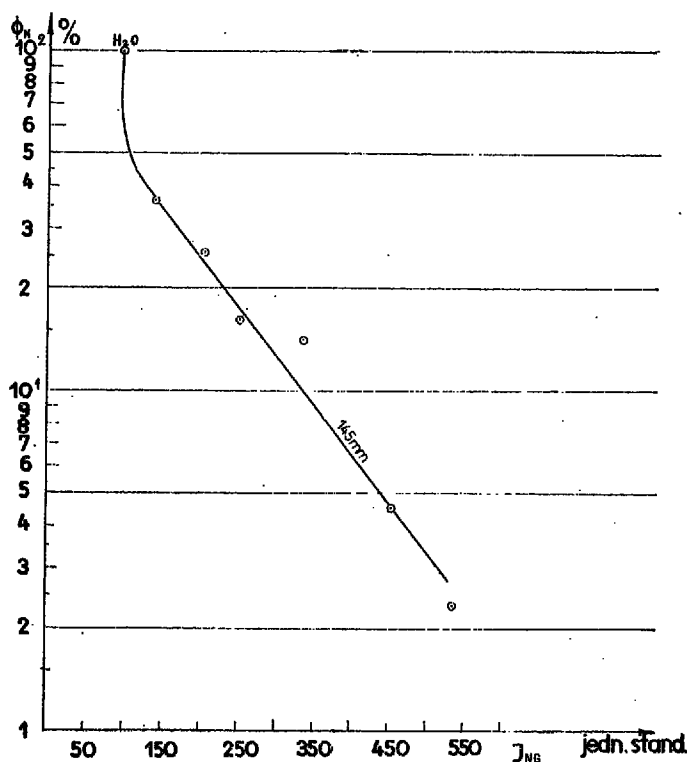
WYNIKI PRAC DOŚWIADCZALNYCH

Jako obiekt badań wybrano odcinek utworów piaszczysto-ilastych dewonu w otworze Wilga IG-1 na głębokości 3154—3300 m. Utwory te charakteryzowały się zarówno dużym zróżnicowaniem porowatości efektywnej jak i zailenia. Były to płaskowce krzemionkowe oraz minerały ilaste (prawdopodobnie illity), występujące w bardzo różnych i zmiennych proporcjach. Zarówno z danych geologicznych (5), jak i geofizycznych wynika, że warunki sedymentacji oraz skład mineralny zalegających tu utworów były jednolite. Podczas wykonywania badań geofizycznych otwór był wypełniony płuczką polimerową o ciężarze właściwym $1,16 \text{ g/cm}^3$, mineralizacji około 8 g/l NaCl ; temperatura w badanym odcinku nie przekraczała 75°C . Nominalna średnica otworu — 141 mm , poza częścią stropową, wykazywała (łącznie z odcinkami zalegania skał ilastych) umiarkowane skawernowanie (ryc. 4). Analizowany odcinek był rdzeniowany w ok. 50%, dysponowano łącznie 78 wynikami laboratoryjnych analiz właściwości fizycznych skał oraz przybliżonymi oznaczeniami CaCO_3 i $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$.

METODYKA OKREŚLANIA POROWATOŚCI EFEKTYWNEJ ORAZ SKŁADNIKÓW LITOLOGICZNYCH

Badane skały można przedstawić jako sumę 3 elementów, tj. krzemionki, minerałów ilastych oraz

* Badania mające na celu wprowadzenie metody korelacyjnych wykresów krzyżowych do prac prospekcyjnych prowadzone są, m. in., w Instytucie Geologicznym i Instytucie Naftowym.



Ryc. 1. Kalibracja sondy SP-62 nr 528 PNG.

Fig. 1. Calibration of neutron-gamma probe SP-62 no. 528.

przestrzeni porowej wypełnionej wysłodzonym filtrem płuczki w strefie przyotworowej bądź wysokomineralizowaną wodą złożową w strefie niezaburzonej. Pomiar PG oraz PNG wykonano standardową sondą radiometryczną typu SP-62, intensywności zliczeń były wyrażane w jednostkach porównywalnych, tj. odpowiednio PG w $\mu R/h^{**}$, a PNG w jednostkach porowatości wapienia.

Na ryc. 1 pokazano wyniki kalibracji zastosowanej w badaniach sondy SP-62. Widać tu niewątpliwie wpływ litologii — piaskowce oraz dolomit wykazują wyraźne odstępstwa od linii kalibracyjnej wapieni. Występująca tu konfiguracja punktów nie jest bynajmniej związana z błędami kalibracji — jest to typowy i zgodny z przesłankami teoretycznymi dla metody PNG wpływ litologii. Należy zaznaczyć, że dla sondy SP-62 będącej na przestrzeni wielu lat jedynym w zasadzie typem sondy radiometrycznej stosowanej w głębokich otworach wiertniczych wpływ litologii nie jest jeszcze określony w sposób ścisły. Prace mające na celu, m. in., określenie wpływu litologii oraz mineralizacji płuczki prowadzone są obecnie w Instytucie Geologicznym oraz OBRTG.

Ryc. 2 ukazuje przykład uśrednionej zunifikowanej krzywej kalibracji na podstawie kalibracji wykonanych różnymi egzemplarzami sondy SP-62 oraz DRST-2 (9). Na podstawie powyższych danych można oszacować, że w zakresie porowatości neutronowej wapienia rzędu 15–50% wielkość błędu (systematycznego) nie przekracza około 2% wartości bezwzględnej. Można przyjąć, że porowatość neutronowa filtratu płuczki znajdującej się w strefie zasięgu sondy — ze względu na jej minimalną mineralizację — jest równa porowatości neutronowej słodkiej wody, wypełniającej przestrzeń porową skał stanowiska

^{**} Jednostka intensywności dozy promieniowania źródła Ra^{226} — $\mu R/h$ jest jednostką w przybliżeniu porównywalną (wystarczającą dla praktyki przemysłowej) w stosunku do sondopodobnej zależności efektywności zliczeń od energii oraz w odniesieniu do utworów o zbliżonym widmie naturalnego promieniowania gamma.

modelowego. Ze względu na rzadkość występowania węglowodorów również składnik trzeci zależności [1] można pominąć. W rezultacie w zależności tej pozostają następujące składniki:

$$\Phi_N = \Phi_{ef} + m_H \cdot C_i + \Phi_{sk} = \Phi_{ef} + \Delta\Phi_N \dots [2]$$

W badanym odcinku dysponowano 78 wynikami oznaczeń współczynnika porowatości efektywnej (Φ_{ef}). Reprezentatywność wyników tych badań była o kilka rzędów niższa niż wyników badań metodą PNG oraz PG. Pojedynczy punkt reprezentowała tu próbka skalna o objętości około 9,5 cm³, gdy objętość materiału skalnego badanego np. metodą PNG przy długości sondy $L = 60$ cm jest równa 0,6–1,0 m³. Każdemu wynikowi laboratoryjnemu, po jego głębokościowym skorelowaniu z danymi geofizycznymi przyporządkowano na podstawie zależności [2] wartość $\Delta\Phi_N$. Następnie stwierdzono, że między zbiorem wartości $\Delta\Phi_N$ oraz natężeniem naturalnego promieniowania gamma I_g istnieje dwuwymiarowy związek statystyczny (ryc. 3). Ze względu na to, że wartość Φ_{sk} jest w praktyce stała, związek powyższy oznacza po prostu istnienie związku korelacyjnego między zaimieniem a wielkością I_g . Zależność $\Delta\Phi_N$ od I_g można opisać następującym równaniem regresji:

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_N &= 0.00378 \cdot I_g^{2.088} \\ R &= +0.831 \\ \sigma\Delta\Phi_N &= \pm 0.330 \end{aligned} [3]$$

gdzie: I_g — wartość naturalnego promieniowania gamma wyrażona w jednostkach względnych związanych z $\mu R/h$ (uwzględniono tło własne sondy);

R — współczynnik korelacji między zbiorami $\Delta\Phi_N$ i I_g ;

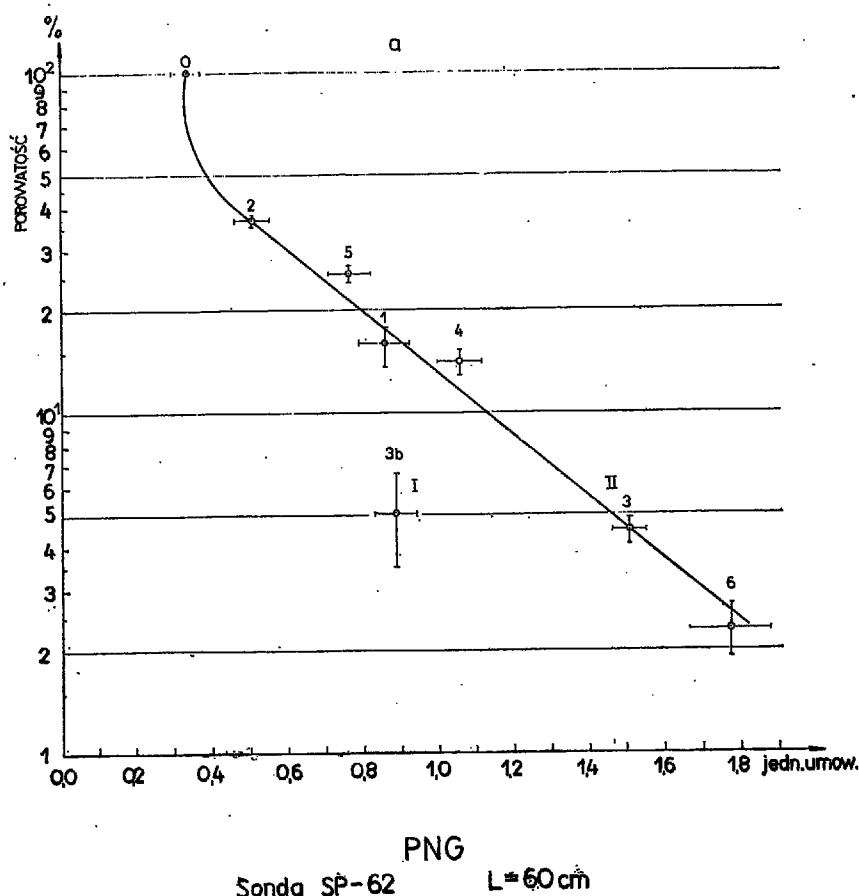
$\sigma\Delta\Phi_N$ — standardowe odchylenie pojedynczej wartości $\Delta\Phi_N$.

Odwrotną korelację między I_g a $\Delta\Phi_N$ można opisać następującym równaniem:

$$\begin{aligned} I_g &= 38.37 \cdot \lg \Delta\Phi_N + 8,57 \\ R &= 0.833 \\ \Delta I_g &= \pm 6,58 \end{aligned} [4]$$

Obserwowany stosunkowo duży rozrzut punktów doświadczalnych związany jest z różnym stopniem „dokładności” zbiorów $\Delta\Phi_N$ oraz I_g wynikające ze wspomnianej, różnej reprezentatywności elementów tworzących te zbiory. Wydaje się, że w przypadku wykonania badań Φ_{ef} , $\Delta\Phi_N$ i I_g bezpośrednio na próbkach skał — związek korelacyjny byłby bardziej ścisły, zbliżony do funkcyjnego. Konsekwencją istnienia przedstawionego związku jest możliwość bezpośredniego określania na podstawie pomiarów PNG oraz PG nie tylko wartości porowatości efektywnej, ale również ilościowo składników litologicznych tworzących skałę. Badane skały składają się z 3 składników, z których Φ_{ef} określana jest na podstawie zależności [2] przy wykorzystaniu związku [3], a wartość $\Delta\Phi_N$ jako wielkość liniowo związana z zawartością minerałów ilastych informuje o ich ilości w skałe. Trzeci składnik — krzemionka jako dopełnienie do 100% jest tym samym również możliwy do określenia. Ilościowe określenie składników litologicznych wymaga jednak wprowadzenia informacji o porowatości neutronowej ików (m_H).

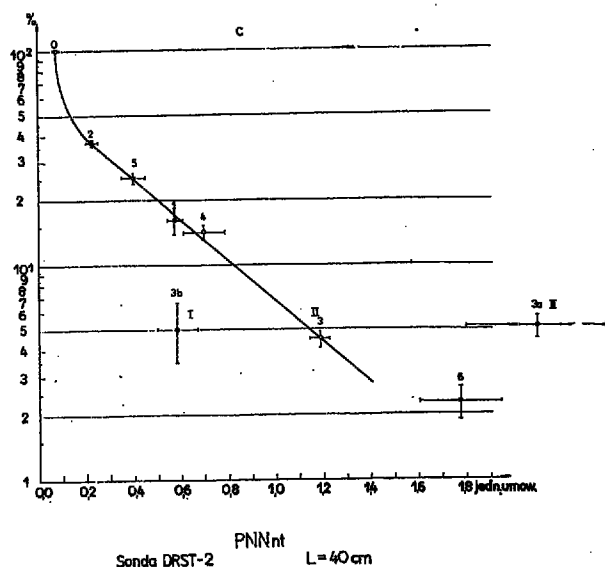
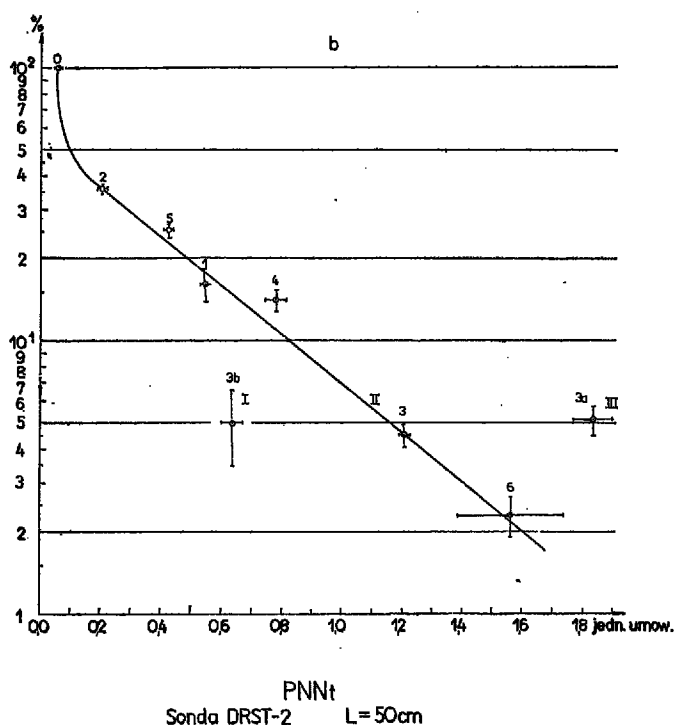
Według danych zachodnich (6) dla sondy typu GNT, najbardziej zbliżonej pod względem wpływów litologii do sondy typu SP-62 najprawdopodobniejszą wartością m_H jest wartość 50%. W rozważanym przypadku zarówno z bilansu składników, jak i omówionego w dalszej części zastosowania korelacyjnego wykresu krzyżowego gęstościowo-neutronowego (ryc. 7) wynika, że wartość ta jest rzeczywiście zbliżona do 50%. Ryc. 4 przedstawia końcowy wynik interpretacji geofizycznej zawierający m. in. wartości Φ_{ef} oraz składniki litologiczne. We wskazanych odcinkach o



powiększonej średnicy, tj. w interwałach występowania części warstw skał ilastych, ze względu na brak możliwości ścisłego oszacowania zmian wpływu średnicy na pomiar PNG — wartości Φ_{ef} są z oczywistych względów zawyżone, a oznaczenia składu litologicznego (głównie zawartości krzemionki) — заниżone. Obok wyników Φ_{ef} określonych według badań geofizycznych na rycinie podano również przebieg zmian wartości Φ_{ef} według badań laboratoryjnych.

METODYKA OKREŚLANIA CIĘŻARU OBJĘTOŚCIOWEGO ORAZ POROWATOŚCI EFEKTYWNEJ

Trzecią analizowaną metodą radiometryczną była metoda PGG. Jak już wspomniano, pomiary wykonano prototypową sondą typu LSE-3 o długości $L=41$ cm (odległość między źródłem a detektorem), przeznaczoną do wykonywania pomiarów w głębokich otworach wiertniczych. Ponieważ w trakcie wykonywania pomiarów nie były zakończone prace badawcze prowadzone w OBRTG związane z kalibracją sondy, krzywą kalibracji sondy znaleziono na podstawie wyników laboratoryjnych oznaczeń ciężaru objętościowego. Na ryc. 5 przedstawiono zależność wskazań metody PGG od ciężaru objętościowego. Zależność ta jest opisywana następującym liniowym równaniem regresji:

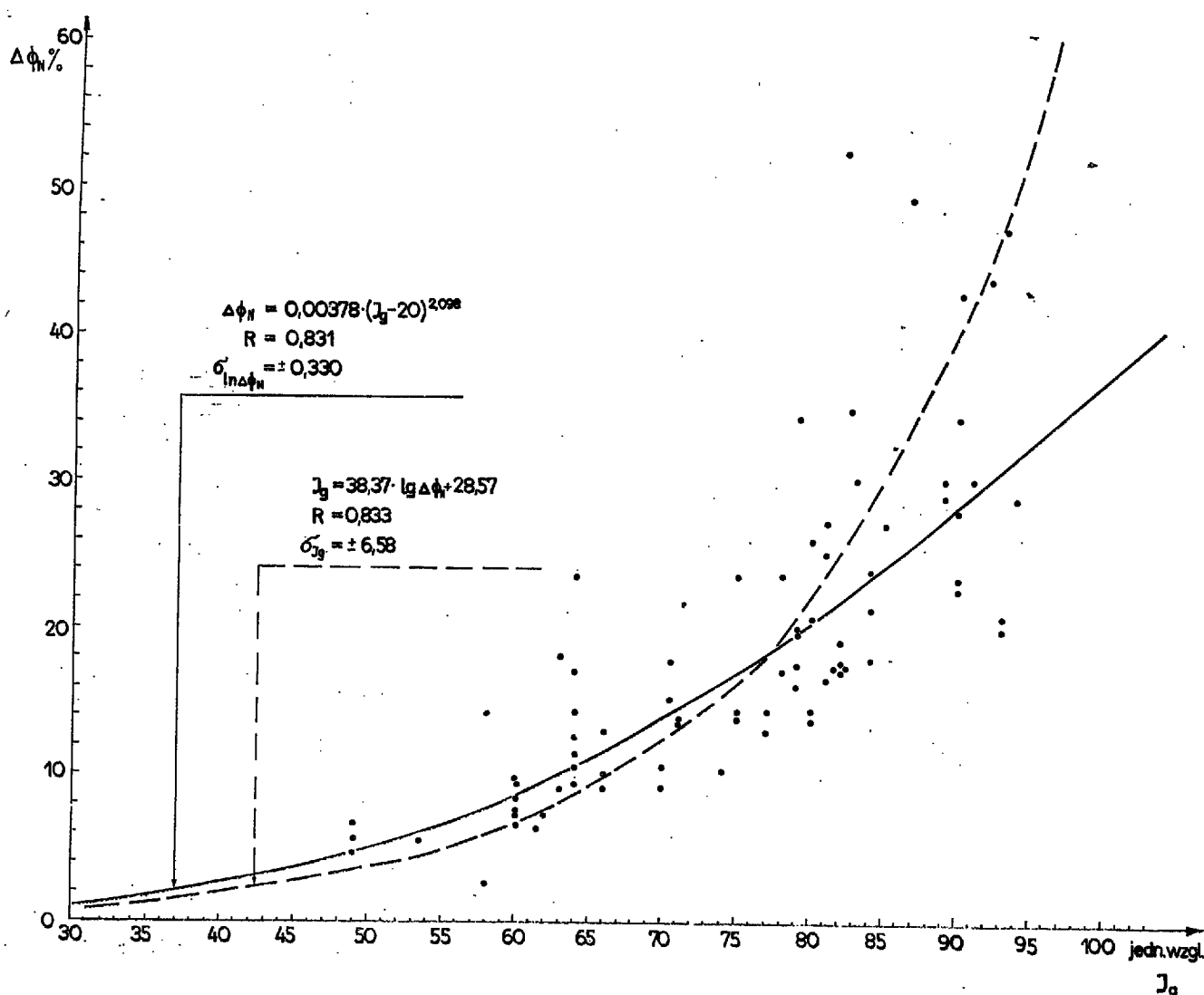


Ryc. 2. Uśrednione krzywe kalibracji PNG dla sondy SP-62 oraz PNNt (PNNnt) dla sondy DRST-2.

I — średnica odwiertu — 220 mm, II — średnica odwiertu — 145 mm, III — średnica odwiertu 90 mm, nasycenie — woda słodka, O — H_2O , 1 — dolomit, 2 — wapień, 3 — wapień, 3a — wapień, 3b — wapień, 4 — piaskowiec, 5 — piaskowiec, 6 — granit.

Fig. 2. Averaged calibration curves for neutron-gamma probe (type SP-62) and epithermal (thermal) neutron probe (type DRST-2).

I — borehole diameter, 220 mm, II — borehole diameter 145 mm, III — borehole diameter, 90 mm; saturation — fresh water, O — H_2O ; 1 — dolomite, 2 — limestone, 3 — limestone, 3a — limestone, 3b — limestone, 5 — sandstone, 5 — sandstone, 6 — granite.



Ryc. 3. Zależność porowatości neutronowej składnika ilastego skał od ich naturalnej promieniotwórczości gamma.

Fig. 3. Dependence of neutron porosity of clay component of rocks on their natural gamma radiation.

$$\rho = -0.01037 \cdot I_{gg} + 2.9329 \quad [5]$$

$$R = 0.897$$

$$\sigma_{\rho} = \pm 0.081 \text{ g/cm}^3$$

gdzie:

ρ — ciężar objętościowy skały w g/cm³;
 I_{gg} — wskazania metody PGG w jednostkach względnych;
 R — współczynnik korelacji,
 σ_{ρ} — średnie odchylenie standardowe pojedynczej wartości ρ .

W zależności [5] wzięto pod uwagę wyniki dotyczące piaskowców i nie rozmytych skał ilastych dewonu środkowego oraz dolomitów dewonu górnego, zalegającego bezpośrednio nad analizowanym odcinkiem profilu. I tu, podobnie jak w przypadku zależności pokazanej na ryc. 3, rozrzut punktów jest spowodowany przede wszystkim niewielką reprezentatywnością analiz laboratoryjnych. Z omawianej korelacji wynika, że stosowana sonda wykazuje korzystną zależność od ciężaru objętościowego od 2,1 do 2,9 g/cm³. Na ryc. 5 liniami prostymi przerywanymi pokazano przedział, w którym znajduje się nie mniej niż 95% pojedynczych wartości ρ . Przebieg zmian wartości ρ określonych na podstawie pomiaru PGG w odwiercie Wilga IG-1 pokazano na ryc. 4.

Jak już wspomniano, przy ustalonej i niezmienniej litologii istnieje związek korelacyjny między ciężarem objętościowym skał a ich porowatością. Na ryc. 6a pokazano zależność między wymienionymi wielko-

ściami określonymi na podstawie badań laboratoryjnych. Opisywana jest ona następującym liniowym równaniem regresji:

$$\Phi_{ef} = 29.802 \rho + 81.281 \dots \quad [6]$$

$$R = 0.912$$

$$\sigma \Phi_{ef} = \pm 1.71\%$$

Analogiczną zależność sporządzoną dla ρ oraz Φ_{ef} , określonych na podstawie badań geofizycznych (PGG, PNG i PG) pokazano na ryc. 6b. Opisuje ją równanie regresji ***:

$$\Phi_{ef} = 28.583 + 77.249 \dots \quad [7]$$

$$R = 0.707$$

$$\sigma \Phi_{ef} = \pm 3.44\%$$

Jak wynika z równań regresji oraz wykresów — zależności Φ_{ef} od ρ oparte na danych laboratoryjnych oraz geofizycznych są do siebie bardzo zbliżone, wykazują jednak znaczną różnicę w dokładnościach. Wynika ona przede wszystkim z faktu, że wartości laboratoryjne Φ_{ef} oraz ρ dotyczą tych samych małych próbek określonych dokładnymi badaniami laborato-

*** Zarówno równanie [6], jak i [7] można stosować jedynie w obszarze obserwowanych zmian parametrów Φ_{ef} oraz ρ . Ekstrapolacja tych równań poza ten obszar może prowadzić do błędnych wyników.

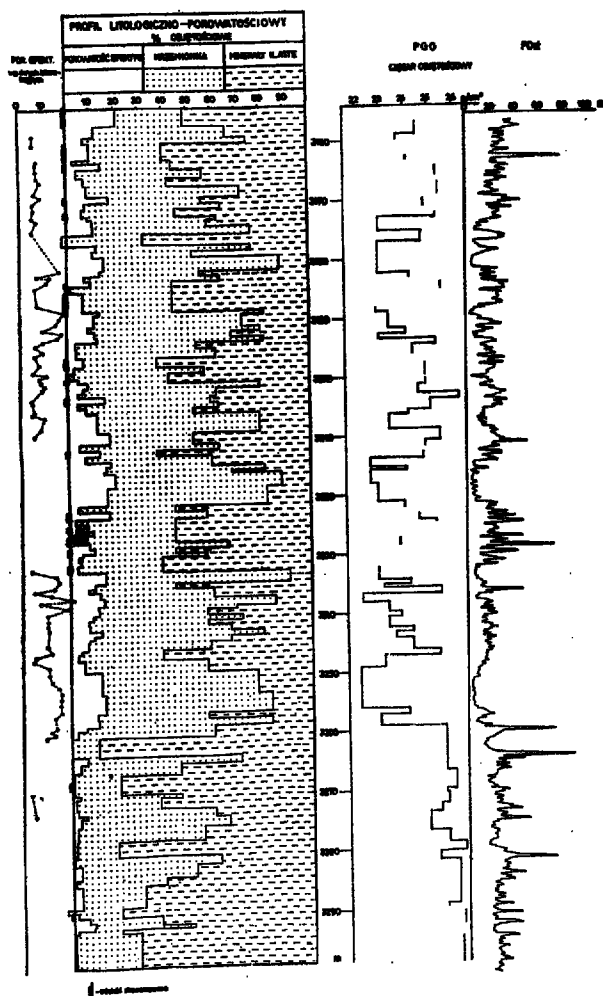
ryjnymi, gdy informacje geofizyczne (podobnie, jak to miało miejsce w odniesieniu do metod PNG i PG) o tych parametrach dotyczą objętości skał o kilka rzędów większych. Tak więc, mimo że błąd określenia wartości Φ_{ef} na podstawie PGG jest znacznie wyższy niż ma to miejsce w przypadku określenia tej wartości na podstawie ρ z badań laboratoryjnych, to w sensie statystycznym wiarygodność pierwszego wyniku jest znacznie większa i, co najważniejsze, może być ona określona w sposób ciągły dla całego profilu (z wyjątkiem odcinków skawernowanych).

Należy w tym miejscu zaznaczyć, że w obydwu wypadkach na wielkość błędów — poza dokładnościami metod pomiarowych — wpływa również zmienność ciężarów właściwych związana z obecnością w skale minerałów ilastych, niewielkich domieszek węglanów oraz, jak wynika z badań rdzenia, pirytów. Obserwowane na ryc. 6a i b wzajemne względne przesunięcie wartości porowatości efektywnej mułwców jest prawdopodobnie związane z nieuwzględnieniem, przy pomiarze PGG, wpływu osadu ilastego z płuczki, występującego w piaskowcach. Uzyskanie na podstawie PGG dokładniejszych informacji o wartości Φ_{ef} wymaga, podobnie jak w metodzie neutronowej, uwzględnienia wpływu zailenia. Jedną z metod określenia wpływu zailenia jest metoda tzw. korelacyjnego wykresu krzyżowego gęstościowo-neutronowego (6).

Na ryc. 7 przedstawiono wyniki zastosowania powyższej metody w odniesieniu do analizowanego odcinka profilu. Jako punkty węzłowe przyjęto następujące parametry poszczególnych składników: krzemionka — $\rho = 2,65 \text{ g/cm}^3$; $\Phi_N = 0\%$, materiał ilasty $\rho = 2,53 \text{ g/cm}^3$; $\Phi_N = 50\%$; H_2O — $\rho = 1,0 \text{ g/cm}^3$, $\Phi_N = 100\%$. Dla każdej pary wartości Φ_N oraz ρ określonych z pomiarów PNG i PGG można na podstawie przedstawionego nomogramu określić wartości Φ_{ef} oraz C_i . Wychodzenie części punktów poza obszar nomogramu jest związane z dokładnościami badań geofizycznych. Większy błąd w rozważanym przypadku wnosi pomiar PGG.

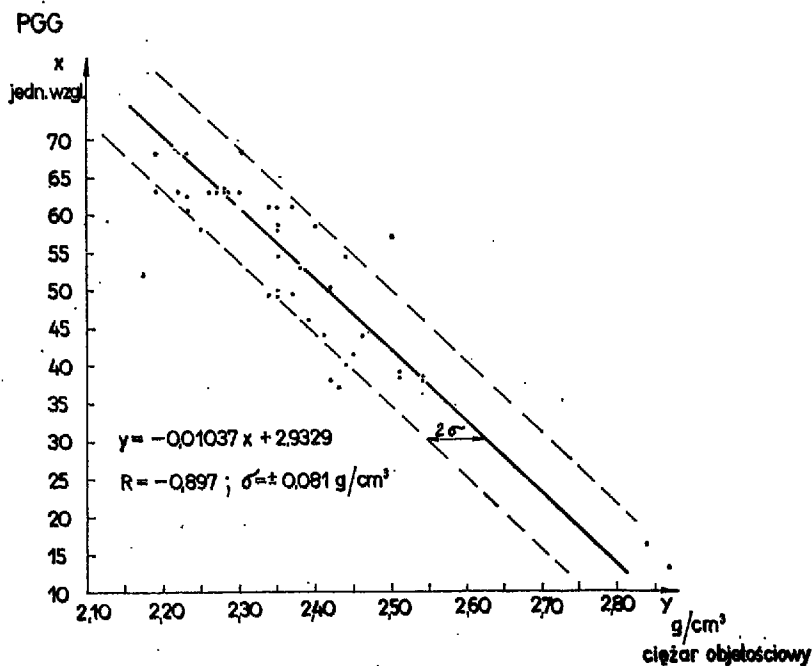
ZAKOŃCZENIE

Przedstawione wyniki zastosowań metod radiometrii wiertniczej do ilościowej oceny profilu litologicznego oraz właściwości fizycznych skał w przekroju piaszczysto-ilastym wskazują na ich niewątpliwie du-



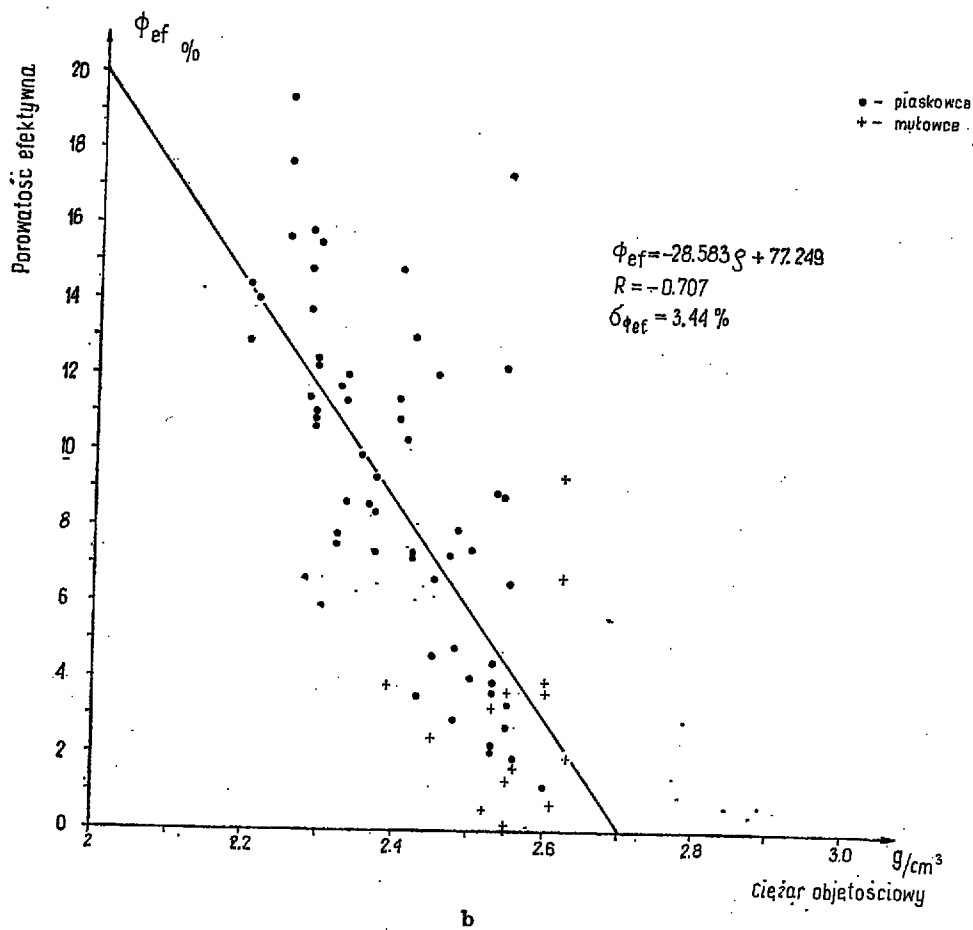
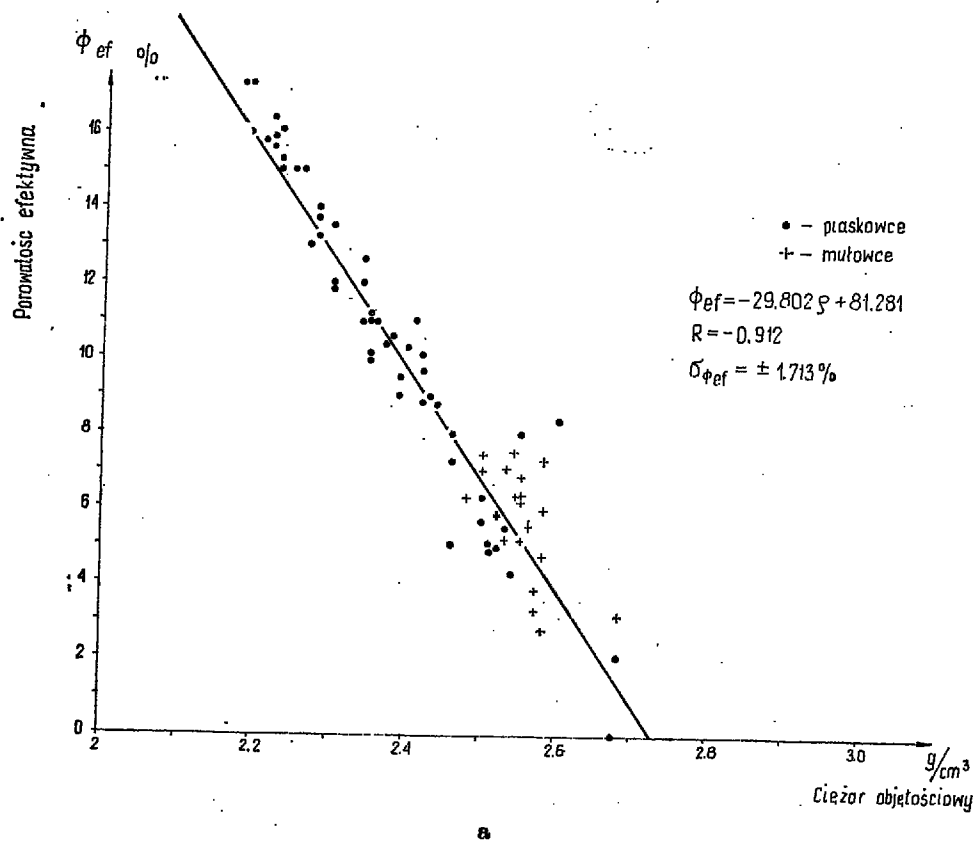
Ryc. 4. Wyniki badań geofizycznych; odwiert Wilga IG-1.

Fig. 4. Results of geophysical studies; Wilga IG-1 borehole.



Ryc. 5. Zależność wskazań metody PGG od ciężaru objętościowego.

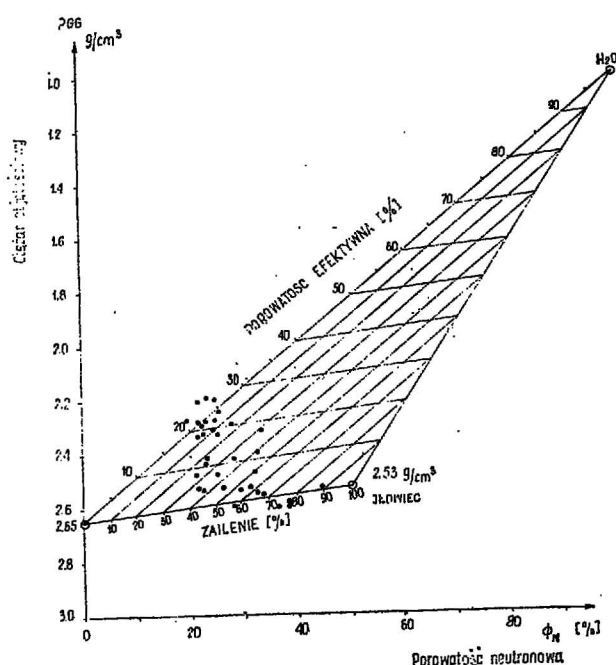
Fig. 5. Dependence of results obtained by gamma-gamma logging method on volume weight.



Ryc. 6. Zależność porowatości efektywnej od ciężaru objętościowego: a — według danych laboratoryjnych, b — według danych geofizycznych.

Fig. 6. Dependence of effective porosity on volume weight.

a — according to laboratory data, b — according to geophysical data.



Ryc. 7. Korelacyjne zestawienie krzyżowe gęstościowo-neutronowe.

Fig. 7. Correlational density-neutron cross-plot.

żą efektywność. Pomimo że metody te stosowane w badaniach krajowych od wielu lat, ich właściwe i efektywne wykorzystanie było w praktyce niemożliwe zarówno ze względu na brak porównywalności wyników, jak i niską jakość samych pomiarów. Dopiero wprowadzenie standaryzacji i kalibracji sond (1, 3) oraz konstrukcja sond gamma-gamma (7) stworzyły realne szanse efektywnego wykorzystania metod radiometrii. Przedstawioną w artykule metodę określania profilu litologiczno-porowatościowego można stosować w sytuacji, gdy istnieją przesłanki geologiczne, co do jednorodności warunków mineralogiczno-facjalnych, umożliwiającą zastosowanie promieniotwórczości naturalnej jako ilościowego wskaźnika zailenia. Jak to wykazano w odniesieniu do utworów dewonu — warunki takie istnieją.

Zastosowanie powyższej metodyki w odniesieniu do innych formacji geologicznych wymaga znalezienia, na podstawie badania rdzeni wiertniczych, związków między wartościami $\Delta\phi_N$ a I_g .

SUMMARY

Constant increase in the accuracy of radiometric measurements, the introduction of calibration and standardization of probes and, finally, of new types of gamma-gamma probes for determining volume weight markedly increased the range of geological problems solvable on the basis of well-logging data. Actual possibilities of utilizing neutron-gamma, gamma, and gamma-gamma logging methods for determining lithological components, effective porosity, and volume weight of rocks forming borehole section are illustrated on an example of the results of geophysical studies of sandy-clay Devonian rocks penetrated by Wilga IG-1 borehole. Accuracy of various radiometric methods is discussed and the results are compared with those obtained from laboratory analyses of core material.

Drugą z przedstawionych metod, tj. metodę korelacyjnych wykresów krzyżowych gęstościowo-neutronowych będzie można stosować bez jakiegokolwiek korzystania z wyników badań laboratoryjnych po całkowitym zakończeniu prac związanych z kalibracją pomiarów PGG.

LITERATURA

1. Curyło Z. — Zastosowanie profilowań neutron-neutron do wyznaczania porowatości skał zbiornikowych. Sprawozdanie z zadania 03.01.c.09 tematu 03 Problemu Węzłowego 01.1.1. PPG, 1972.
2. Czubek J. A. — Analiza i ocena opracowanych wzorców i standaryzatorów do cechowania i standaryzacji sond radiometrycznych. Sprawozdanie z zadania 03.01.c.11 tematu 03 Problemu Węzłowego 01.1.1 Instytut Fizyki Jądrowej, 1973.
3. Darski J. — Opracowanie nowoczesnych wzorców do cechowania sond radiometrycznych i kalibracji sond radiometrycznych. Sprawozdanie z zadania 03.01.c.11 tematu 03 Problemu Węzłowego 01.1.1. OBRTG, 1975.
4. Helsop A. — Gamma-ray log response of shaly sandstones. The Log Analyst, 1974, vol. 15, no. 5.
5. Miłaczewski L. — Informacja ustna, 1975.
6. Schlumberger — Interpretacja materiałów geofizyki wiertniczej. Tłumaczenie polskie instrukcji f-my Schlumberger z roku 1969, pod red. J. Frydeckiego. Wyd. Geol., 1973.
7. Stępniewski J., Wojda F. — Opracowanie aparatur oraz techniki badań i interpretacji pomiarów metodą gamma-gamma. Sprawozdanie z zadania 03.01.c.15, tematu 03 Problemu Węzłowego 01.1.1. OBRTG, 1974.
8. Szewczyk J. — Związek naturalnego promieniowania gamma z zaileniem oraz litologią, na przykładzie utworów dewonu Gór Świętokrzyskich. Prz. geol. 1974, nr 12.
9. Szewczyk J. — Ocena możliwości ilościowego określenia litologii utworów cechsztynu metodami radiometrii wiertniczej. IG, 1975.
10. Szewczyk J. — Wpływ zasolenia płuczki wiertniczej na wyniki określania współczynnika porowatości skał metodami neutronowymi. Techn. Poszuk. geol. (praca w druku), 1975.
11. Szymborski A. — Badanie możliwości oznaczania popielności węgla brunatnego metodami radiometrii wiertniczej. Biul. Inst. Geol. nr 266 — Z badań złóż węgla brunatnych w Polsce, tom IV, 1972.

РЕЗЮМЕ

Постоянное повышение качества радиометрических замеров, применение калибровки и стандартизации зондов, конструкция новых зондов гамма-гамма для определения объемного веса значительно увеличили круг геологических задач, которые можно решать этим методом в буровых скважинах. На примере данных геофизических работ в скважине Вильга ИГ-1, в разрезе песчано-глинистых пород девона, автор продемонстрировал возможность использования методов ГК, НГК и ГГК для количественного определения литологических компонентов, эффективной пористости и объемного веса пород по разрезу. Анализируются точность результатов по отдельным радиометрическим методам с сопоставлением их с данными лабораторного испытания керна.