

Janusz FRYDECKI

## Wstęp do geofizycznej oceny własności zbiornikowych osadów górnej jury niecki mogileńskiej

Geofizyka wiertnicza znajdowała dotychczas najszerze zastosowanie przy poszukiwaniach złóż ropy i gazu ziemnego, choć jej stosowanie wiąże się z dużymi trudnościami tak technicznymi, jak i metodycznymi. Metodyka badań skał zbiornikowych i uszczelniających jest w zasadzie opracowana w najdrobniejszych szczegółach. Mimo braku niejednokrotnie możliwości zdobycia sprawdzianu wyników interpretacji (niski stopień rdzeniowania głębokich otworów, niezbyt miarodajne wyniki badań laboratoryjnych) podstawą wyszukiwania w profilach otworów poziomów perspektywicznych i ich oceny zbiornikowej są jednak materiały geofizyczne. Stosowane metody nie pozwalają na ogół jednak na zadowalającą ocenę własności zbiornikowych skał. Jedną z podstawowych przyczyn niedostatecznej efektywności „tradycyjnych” metod interpretacji okazuje się niedoskonałość odwzorowania modeli geologicznych skał. Obecnie istnieje tendencja stosowania przy pośredniej ocenie parametrów obiektów geologicznych bardziej efektywnych modeli.

O zmianach wielkości parametrów fizycznych skał w największym stopniu decyduje porowatość, fakt ten można prześledzić metodami geofizyki wiertniczej. Do określenia porowatości najlepiej się nadają metody: neutronowa, akustyczna, elektryczna i gęstościowa. Okazuje się jednak, że nie bez znaczenia jest tu też charakter litologiczny szkieletu (matrycy) skały i stąd różne postacie nomogramów i związków dla różnych typów skał. W przypadku istnienia niejednorodnego litologicznie szkieletu powstają dość duże trudności przy określaniu porowatości z uwagi na różny wpływ poszczególnych składników na powstające przy pomiarach zjawiska fizyczne. Naprzeciw tym trudnościom wybiegają prace geofizyków firmy Schlumberger: J. A. Burke, Schlumberger Well Services, Houston, Texas; R. L. Campbell, Jr., Schlumberger Technical Services, Paris France; A. W. Schmidt, Schlumberger Well Services, Houston, Texas. Zostały one zaanonsowane w 1969 r. w „Schlumberger Interpretation Principles” w Paryżu oraz przedstawione na 10 dorocznym sympozjum geofizyki wiertniczej w Houston, Texas (25—28 maj 1969 r.). Początek tym pracom dały opracowania W. C. Savre (1963) i J. A. Burke, M. R. Curtis, J. P. Cox (1967).

Obliczenia wielkości porowatości  $\Phi^1$  trzema metodami — PA, PGGg i PNN (ew. PNG) — przez ich porównanie prowadzą do utworzenia „profilowania litologicznego”, stanowiącego procentowe odwzorowanie poszczególnych frakcji budujących szkielet skały. Ten system opracowywania danych prowadzi do obliczania charakterystyk skał, które zawierają: wyliczenie porowatości w kompleksach skał węglanowych i piaszczysto-ilastych, z uwzględnieniem wtórnej porowatości i obecności nie wypłukanego gazu, oraz określenie litologii i obecności szeregu minerałów.

Metodyka ta jest przeznaczona do interpretacji w formacjach skał o mieszanym składzie litologicznym. Wykorzystuje się jednocześnie dane trzech standardowych sond (pomiarów): Sidewall Neutron Porosity (SNP) — PNN, Formation Density Compensated (FDC) — PGGg; i Borehole Compensated Sonic (BCS) — PA (R. E. Sheriff, 1970).

Z tych pomiarów otrzymuje się dwa niezależne od porowatości parametry  $M$  i  $N$ ;  $M$  z PA i PGGg i  $N$  z PNN i PGGg.  $M$  i  $N$  zostały zdefiniowane dla szkieletów skał „czystych” litologicznie (mineralogicznie) następująco:

$$M = \frac{\Delta t_c - \Delta t_{sk}}{\rho_{sk} - \rho_c} \cdot 0,01, \quad (1)$$

$$N = \frac{(\Phi_N)_c - (\Phi_N)_{sk}}{\rho_{sk} - \rho_c}, \quad (2)$$

zaś dla skał o mieszanym składzie litologicznym, czyli praktycznie rzecz biorąc badanych poziomów:

$$M = \frac{\Delta t_c - \Delta t}{\rho - \rho_c} \cdot 0,01, \quad (3)$$

$$N = \frac{(\Phi_N)_c - \Phi_N}{\rho - \rho_c} \quad (4)$$

gdzie: —  $\Delta t$ ,  $\Delta t_{sk}$ ,  $\Delta t_c$  — czasy interwałów (odwrotności prędkości) wg PA odpowiednio, dla badanego poziomu, szkieletu (matrycy) czystej litologicznie (mineralogicznie) skały i cieczy nasycającej pory skały;  $\rho$ ,  $\rho_{sk}$ ,  $\rho_c$  — gęstości wg PGGg odpowiednio, badanego poziomu, szkieletu czystej litologicznie (mineralogicznie) skały i cieczy;  $\Phi_N$ ,  $(\Phi_N)_{sk}$ ,  $(\Phi_N)_c$  — neutronowe „porowatości węglanowe” wg SNP ew. GNT, FNL, GNL, HNL — odmiany PNN i PNG — odpowiednio dla badanego poziomu, szkieletu czystej litologicznie skały i cieczy; współczynnik 0,01 dla wartości  $M$  stosuje się w celu uzyskania wartości numerycznych porównywalnych z  $N$ .

W związku  $M = f(N)$  każdy minerał skały jest reprezentowany przez pojedynczy punkt niezależny od porowatości (1), (2). Dla formacji typu „mieszanej litologicznej” położenie punktów z danych pomiarowych (3), (4) na nomogramie  $M-N$  względem punktów odpowiadających czystym minerałom dobrze identyfikuje zmiany procentowe minerałów w formacji.

<sup>1</sup> Oznaczenia parametrów wg J. Frydeckiego (1968).

Zasygnalizowane wyżej głośne już osiągnięcie metodyczne geofizyków firmy Schlumberger nie może jednak być bezpośrednio przeniesione na warunki polskie, a to przede wszystkim z uwagi na brak sprzętu. Brak możliwości korzystania z oddzielnych nomogramów interpretacyjnych dla każdej odmiany skały zbiornikowej zmusza do szukania innych dróg interpretacji.

W ciągu ostatnich lat obserwuje się na świecie tendencję do ograniczonego rdzeniowania. Rdzeniuje się zazwyczaj parę otworów puszkawawczych, a następnie w oparciu o uzyskane materiały pomiarowe geofizyki wiertniczej przeprowadza korelacje i szuka związków między parametrami rdzenia a danymi geofizycznymi. Na tej podstawie określa się własności zbiornikowe warstw z wszystkich otworów wykonanych na złożu, a więc i w wierconych bezrdzeniowo.

Analiza błędów i miarodajności (J. Frydecki, praca w druku) stanowi o konieczności badania i opracowywania metodyki regionalnej w postaci określenia wszystkich stałych (występujących w równaniach) wiążących parametry skał z informacjami geofizycznymi. Poczyniono już pierwsze kroki, czego dowodem są nieliczne wprawdzie publikacje geofizyków pracujących nad tymi zagadnieniami. Tym celom służą również prace nad standaryzacją sond radiometrycznych i unifikacją badań. Do czasu pełnego rozpracowania tych zagadnień ilościowe interpretacje w wielu przypadkach można praktycznie traktować jako jakościowo-wskaźnikowe.

Jednym z wielu typów szeregu modeli przybliżeń są korelacje parametrów obiektów geologicznych. Znane i stosowane są różne metody badania zależności statystycznych, najbardziej efektywna przy ocenie parametrów obiektów geologicznych okazuje się analiza regresyjna. Prowadzi ona do zbadania związku między np. porowatością  $\Phi$  a parametrami geofizyki wiertniczej oraz w efekcie do opracowania wówczas metodyki oceny  $\Phi$  wyłącznie na podstawie danych geofizyki wiertniczej. Nie należy jednakże zapominać o fakcie, że jako wzorcowe wartości współczynników porowatości przyjmuje się tu ocenę  $\Phi$  z rdzenia i wówczas geofizyczne określenie porowatości może nie być pozbawione tych braków, które ma wzorcowy rdzeń. Na przykład obniżenie wartości  $\Phi$  w zbiornikach o dobrych własnościach z uwagi na niepełny uzysk rdzenia ze skały o wysokiej porowatości sprowadzi się, oczywiście, do obniżenia geofizycznych określeń  $\Phi$ . Jeżeli założyć, że błędy ocen z rdzenia mają przypadkowy charakter, to w geofizycznych określeniach parametrów zbiornikowych błędy będą mogły być mniejsze, wskutek wzajemnego znoszenia się, dla różnych punktów przy konstruowaniu powierzchni regresji.

W przypadku badanego zbioru informacji laboratoryjnych dla utworów jury górnej z wierceń niecki mogileńskiej stwierdzono na drodze zestawień korelacyjnych dość słabe związki z danymi geofizycznymi. Przyczyna leżała głównie w niedoskonałości badań laboratoryjnych i w braku często praktycznej możliwości dowiązania punktowych pomiarów laboratoryjnych do ciągłych, całkujących profili geofizycznych. Próby uśrednień dla badań laboratoryjnych nie zdały egzaminu i należało znaleźć metodę poszukiwań modelowych niezależną od posiadanych wyników badań laboratoryjnych. Do tego celu posłużono się wynikami profilowań i sondowań oporności (PO i SO), profilowań gamma (PG) i neutron-gramma (PNG). Jako dane wyjściowe przyjęto odpowiednio oporność

właściwą warstwy  $R$  (lub jej odwrotność — przewodność właściwą  $\sigma$ ), natężenie naturalnego promieniowania gamma  $Ig$  w jednostkach umownych, wynikających ze statystycznej unifikacji (J. Frydecki, 1970, 1972), bądź względny różnicowy parametr natężenia  $dIg$ , natężenie promieniowania gamma wzbudzonego neutronami  $Ing$  w jednostkach umownych j.w. bądź jego względny parametr różnicowy  $dIng$ .

Dysponując ujednoczonymi wynikami badań radiometrycznych, można dokonać próby oceny ilościowej. Względny różnicowy parametr natężenia promieniowania gamma wzbudzonego neutronami związany jest z parametrami geologicznymi (jak porowatość  $\Phi$  i zailenie  $Ci$ ) następującą funkcją (W. W. Łarionow, 1960; M. A. Hossin, 1960; T. I. Kurtiew, 1967; J. Frydecki, 1969a, b):

$$dIng = \frac{\lg w}{\lg \frac{w}{\Phi_1}} - \frac{1}{\lg \frac{w}{\Phi_1}} \lg (\Phi + wCi). \quad (5)$$

Względny różnicowy parametr natężenia naturalnego promieniowania gamma związany jest zaś z zaileniem (W. W. Łarionow, 1960; T. I. Kurtiew, 1967; M. Wesołowska-Bała, 1969; J. Frydecki, 1969a, b):

$$k dIg = Ci^a. \quad (6)$$

Na drodze zestawienia obserwacji wartości  $dIg$  i  $dIng$  należy się spodziewać trendu ułożenia par parametrów, który może dopomóc do określenia poszczególnych stałych w równaniach (zależnościach) interpretacyjnych. Na regresję obu parametrów będzie wpływać w sposób oczywisty zarówno zailenie, jak też porowatość. W zasadzie wpływ zailenia jest określony przez  $dIg$  zależnością (6), lecz brak przede wszystkim znajomości wykładnika potęgi nie pozwala nam na ściśle wprowadzenie poprawki na zailenie. Przyjmijmy zatem uproszczone założenie, że  $\Phi = 0$ . Uwzględniając ten warunek i podstawiając równanie (6) do równania (5) otrzymamy:

$$dIng = - \frac{\lg k}{a \lg \frac{w}{\Phi_1}} - \frac{1}{a \lg \frac{w}{\Phi_1}} \lg dIg. \quad (7)$$

Przyjmując:

$$- \frac{\lg k}{a \lg \frac{w}{\Phi_1}} = a, \quad (8)$$

$$- \frac{1}{a \lg \frac{w}{\Phi_1}} = b \quad (9)$$

otrzymamy równanie regresji liniowej:

$$dIng = a + b \lg dIg, \quad (10)$$

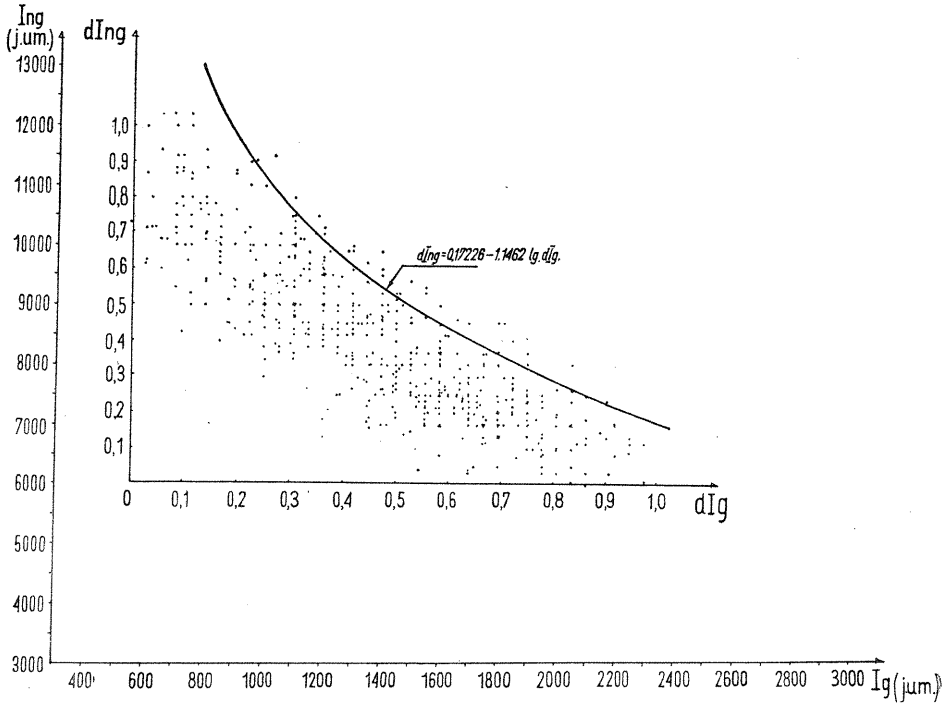


Fig. 1. Korelacja  $Ing = f(Ig)$   
Correlation  $Ing = f(Ig)$

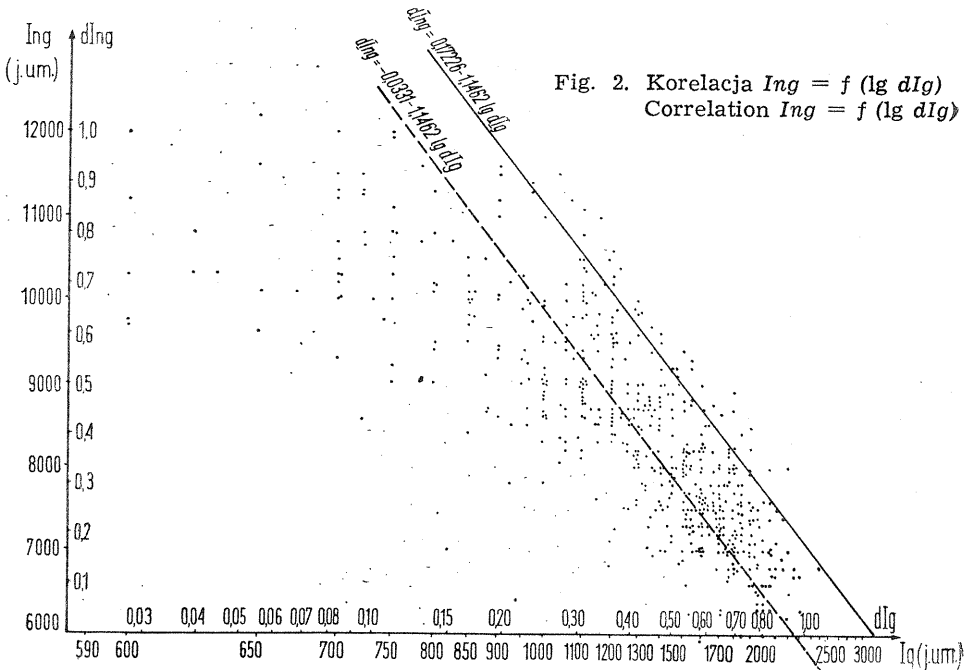


Fig. 2. Korelacja  $Ing = f(\lg dIg)$   
Correlation  $Ing = f(\lg dIg)$

Należy pamiętać o przyjętym założeniu, że porowatość jest zerowa. Wiadomo jednak, że obecność porowatości będzie jedynie obniżyć położenie prostej (10) w dół wartości  $dIng$ , natomiast nie zmieni jej nachylenia do osi układu współrzędnych. Przy odpowiednio dużej liczbie obserwacji uzyska się na zestawieniu pas punktów o ściśle określonym trendzie nachylenia, zaś jego szerokość wyrażona przez odchylenie standardowe będzie obrazować zmiany (przesunięcia) prostych w miarę zmian porowatości. Prosta ograniczająca ten zbiór od góry będzie stanowić przypadek najmniejszej porowatości, tj. praktycznie zerowej.

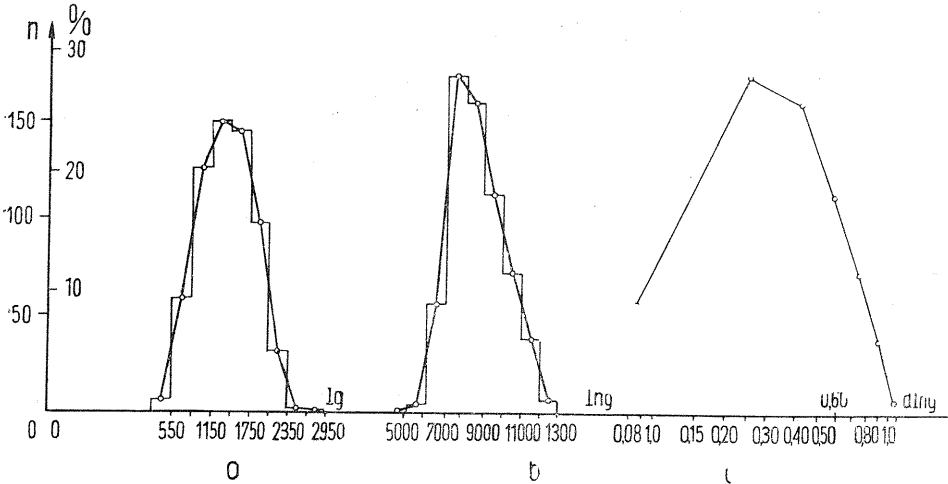


Fig. 3. Histogramy zbiorów  $I_g$  oraz  $I_{ng}$

Histograms of classes  $I_g$  and  $I_{ng}$

a — krzywa wariacyjna zbioru  $I_g$ ; b — krzywa wariacyjna zbioru  $I_{ng}$ ; c — krzywa wariacyjna zbioru  $dI_{ng}$  w skali logarytmicznej

a — variation curve of class  $I_g$ ; b — variation curve of class  $I_{ng}$ ; c — variation curve of class  $dI_{ng}$  logarithmic scale

Zestawiono 620 par wartości  $I_g$  i  $I_{ng}$  z 16 otworów wiertniczych (w ujednoliconych umownych jednostkach), które wykorzystano do obliczeń parametrów regresji dla równania (10) metodą najmniejszych kwadratów. Zestawienie  $I_g$  i  $I_{ng}$  w skali liniowej przedstawia fig. 1, zaś w skali logarytmicznej, odpowiadającej zależności (10) — fig. 2. Z wariacyjnej ilustracji zbiorów  $I_g$  i  $I_{ng}$  (fig. 3) wynika niezła symetria dla zbioru  $I_g$  (3a) oraz brak symetrii dla zbioru  $I_{ng}$  (3b). Ten brak symetrii, a więc pozornie brak gaussowskiego rozkładu normalnego należy objaśnić właśnie normalnym gaussowskim rozkładem porowatości i zailenia, co widać w przypadku fig. 3c, gdzie przedstawiono rozkład wartości  $dI_{ng}$  w skali logarytmicznej, a więc zbliżonej do skali porowatości i zailień. Dla regresji (10) uzyskano następujące wyniki:

odchylenia standardowe:

$$S_{dI_{ng}} = 0,2054,$$

$$S_{I_g \ dI_{ng}} = 0,2306$$

współczynnik korelacji  $r = -0,7771$   
 błąd współczynnika korelacji  $S_r = 0,0168$

$$\frac{|r|}{S_r} = 46,3$$

a stąd wniosek, po porównaniu ostatniej wartości z tablicami całki prawdopodobieństwa, że korelacja istnieje z prawdopodobieństwem większym niż 0,999.

Uzyskano równanie regresji:

$$dIng = -0,0331 - 1,1462 \lg dIg. \quad (11)$$

Uwzględniając założenie zerowej porowatości oraz wykorzystanie do obliczeń obserwacji o różnych porowatościach, regresję (11) przesunięto w górę wartości  $Ing$  ( $dIng$ ) o wielkość odchylenia standardowego  $S_{dIng}$  i uzyskano równanie ograniczające zbiór od góry:

$$dIng = 0,17226 - 1,1462 \lg dIg. \quad (12)$$

Wpływ zailenia na rejestrowane wartości oporności (przewodności) właściwej można przyjąć jako liniowy (M. A. Hossin, 1960; W. W. Łarionow, 1963; B. J. Wendelsztejn, W. W. Łarionow, 1964; A. M. Nieczaj, N. D. Gusakow, 1964).

Zagadnienie rozmieszczenia cząstek ilastych (formy zailenia) można rozpatrywać analogicznie do rozmieszczenia szczelin i pęknięć skały. W obu przypadkach reżim przewodnictwa elektrycznego i zależności będą analogiczne. Można zatem przyjąć za A. M. Nieczajem (1960, 1964), że w przypadku izotropowego rozkładu szczelin lub materiału ilastego zależność dla przewodności właściwej przyjmie formę, której istotnie znaczący człon, niezależny od porowatości a wyłącznie od zailenia  $C_i$ , będzie miał charakter liniowy:

$$\sigma = \frac{2}{3} \sigma_i C_i + \frac{3 - 2C_i}{3 - C_i} \sigma_w \Phi^m. \quad (13)$$

W przypadku rozkładu anizotropowego forma liniowa jest oczywista i dlatego autor przyjął model (przy uwzględnieniu porowatości i przewodnictwa szkieletu skały) funkcji zmian przewodności właściwej:

$$\sigma = Sk \sigma_s + \beta C_i \sigma_i + \gamma \Phi^m \sigma_w \quad (13')$$

gdzie:  $\sigma = 1/R$  — przewodność właściwa skały,  $Sk$  — względna objętość szkieletu budującego skałę,  $\sigma_s$  — przewodność właściwa szkieletu,  $\sigma_i$  — przewodność właściwa materiału ilastego,  $\sigma_w$  — przewodność właściwa medium nasycającego przestrzeń porową skały,  $\beta, \gamma$  — współczynniki proporcjonalności.

Przyjmując analogicznie do rozważań przedstawionych wyżej, że  $\Phi = 0$  oraz, że przewodność właściwa szkieletu dąży do zera i uwzględniając zależność (6) otrzymano w miejsce równania (13')

$$\lg \sigma = \frac{1}{a} \lg k + \lg \sigma_i + \lg \beta + \frac{1}{a} \lg dIg. \quad (14)$$

Oznaczając:

$$\frac{1}{a} \lg k + \lg \sigma_i + \lg \beta = c, \quad (15)$$

$$\frac{1}{a} = d \quad (16)$$

otrzymamy równanie regresji liniowej:

$$\lg \sigma = c + d \lg dI g. \quad (17)$$

Podobnie jak dla zależności (10) przyjęte założenie o zerowej porowatości spowoduje w zestawieniu powstanie „pasa” prostych z trendem kierunkowym opisanym przez regresję (17), a jedynie poprzesuwanym względem siebie wzdłuż osi przewodności. Zestawiono zatem zbiory wartości  $R$ ,  $\sigma$  i  $I g$  wykorzystane do obliczeń (261 obserwacji z 13 otworów wiertniczych). Zestawienie wartości  $R$  i  $I g$  w skali liniowej ilustruje fig. 4, zestawienie wartości  $\sigma$  i  $I g$  w skali liniowej — fig. 5, a w skali logarytmicznej — fig. 6. Wariacyjną ilustrację zbiorów  $\sigma$  i  $I g$  przedstawia fig. 7. Fig. 7a i 7b ilustrują zbiory liniowe, zaś 7c i 7d ilustrują zbiory logarytmiczne dla  $\sigma$  i  $I g$  (lub  $\ln g$ ) odpowiednio.

Dla regresji (17) uzyskano następujące wyniki:

$$S_{I g \sigma} = 0,3468,$$

$$S_{I g dI g} = 0,2348,$$

$$r = 0,7765,$$

$$S_r = 0,0261,$$

$$\frac{|r|}{S_r} = 29,8,$$

a stąd wniosek, po porównaniu ostatniej wartości z tablicami całki prawdopodobieństwa, że korelacja istnieje z prawdopodobieństwem znacznie większym niż 0,999. Uzyskano równanie regresji:

$$\lg \sigma = -0,440 + 1,477 \lg dI g. \quad (18)$$

Uwzględniając przyjęcie zerowej porowatości, przesunięto (j.w.) równanie (18) o wartość  $S_{I g \sigma}$  w dół, wzdłuż osi  $\sigma$  i uzyskano równanie ograniczające zbiór od dołu:

$$\lg \sigma = -0,7868 + 1,477 \lg dI g. \quad (19)$$

Można zatem przyjąć, że zmianom przewodności właściwej ze względu na zailenie towarzyszą zmiany natężenia naturalnego promieniowania gamma wg zależności:

$$\sigma = 0,1634 dI g^{1,477}, \quad (19')$$

zaś zmiany oporności właściwej są związane z  $dI g$  przy wyłącznym wpływie zailenia na  $R$  wzorem:

$$R = 6,12 dI g^{-1,477}. \quad (19'')$$



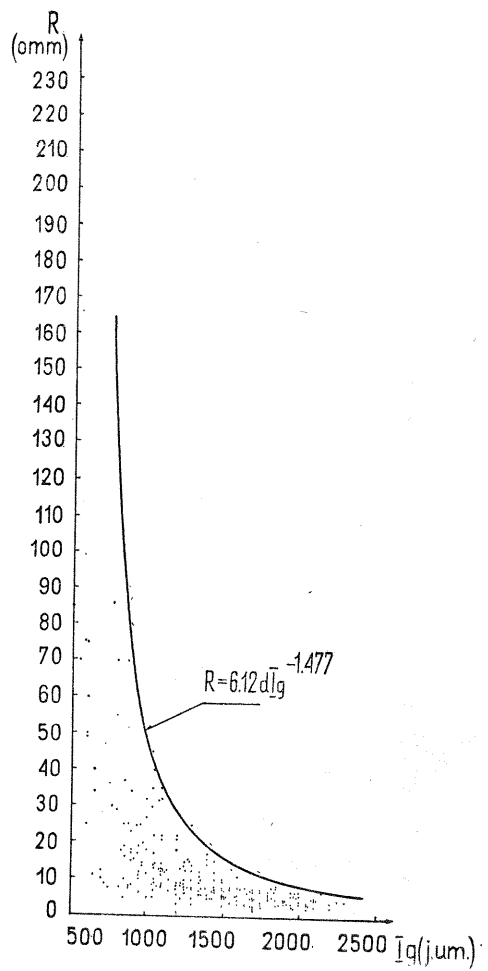


Fig. 4. Korelacija  $R = f(I_q)$   
Correlation  $R = f(I_q)$

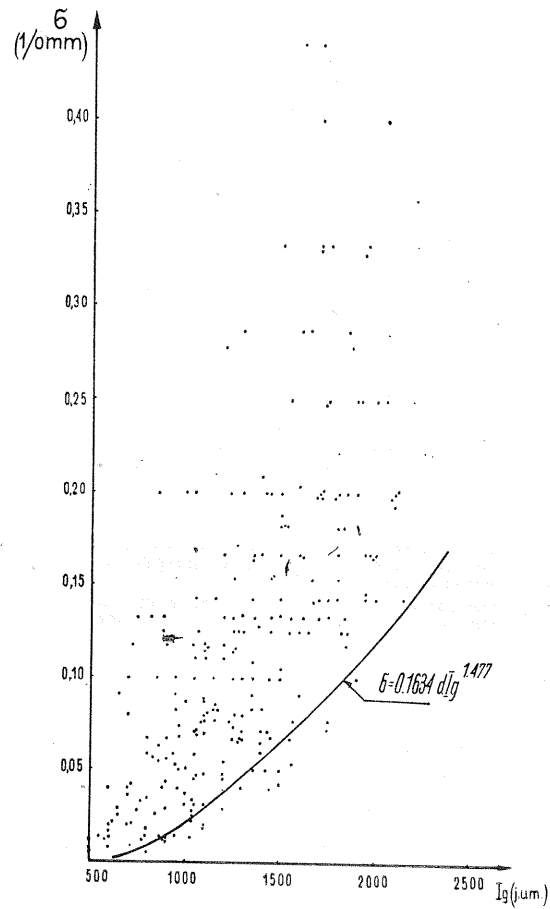


Fig. 5. Korelacija  $\sigma = f(I_q)$   
Correlation  $\sigma = f(I_q)$

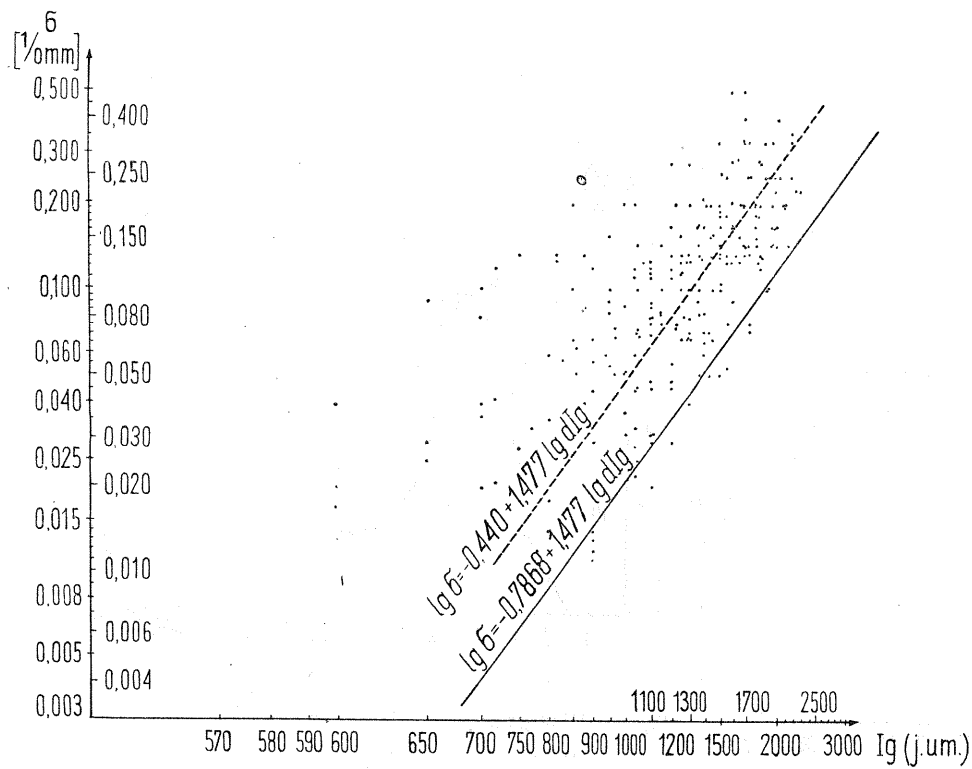


Fig. 6. Korelacija  $\lg \sigma = f(\lg d I_q)$   
Correlation  $\lg \sigma = f(\lg d I_q)$

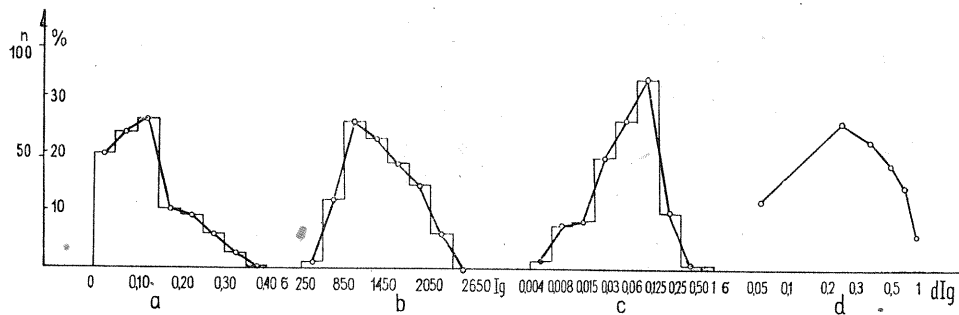


Fig. 7. Histogramy zbiorów  $\sigma$  oraz  $Ig$   
 Histograms of classes  $\sigma$  and  $Ig$   
 a — krzywa wariacyjna zbioru  $\sigma$  w skali liniowej; b — krzywa wariacyjna zbioru  $Ig$  w skali liniowej; c — krzywa wariacyjna zbioru  $\sigma$  w skali logarytmicznej; d — krzywa wariacyjna zbioru  $dIg$  w skali logarytmicznej  
 a — variation curve of class  $\sigma$  in linear scale, b — variations curve of class  $Ig$  in linear scale, c — variation curve of class  $\sigma$  in logarithmic scale, d — variation curve of class  $dIg$  in logarithmic scale

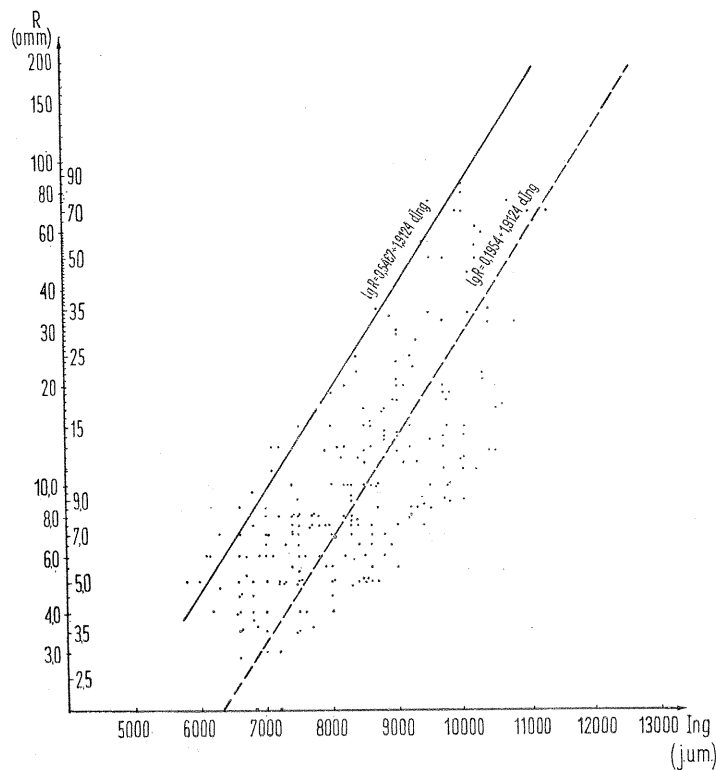


Fig. 9. Korelacja  $\lg R = f(Ing)$   
 Correlation  $\lg R = f(Ing)$

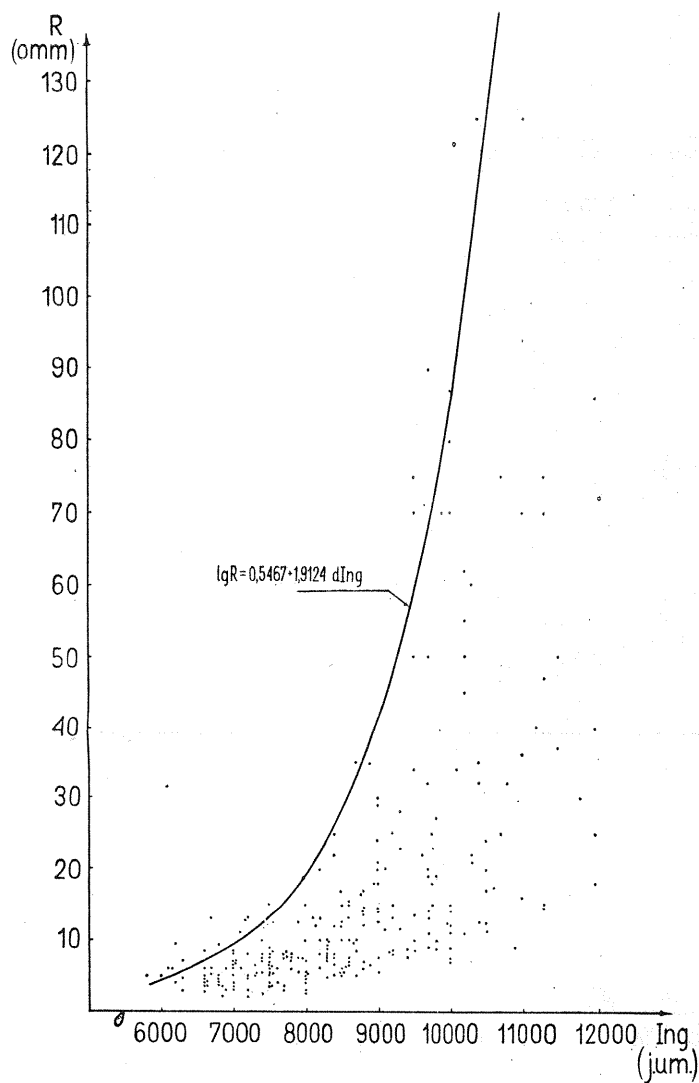


Fig. 8. Korelacja  $R = f(Ing)$   
 Correlation  $R = f(Ing)$

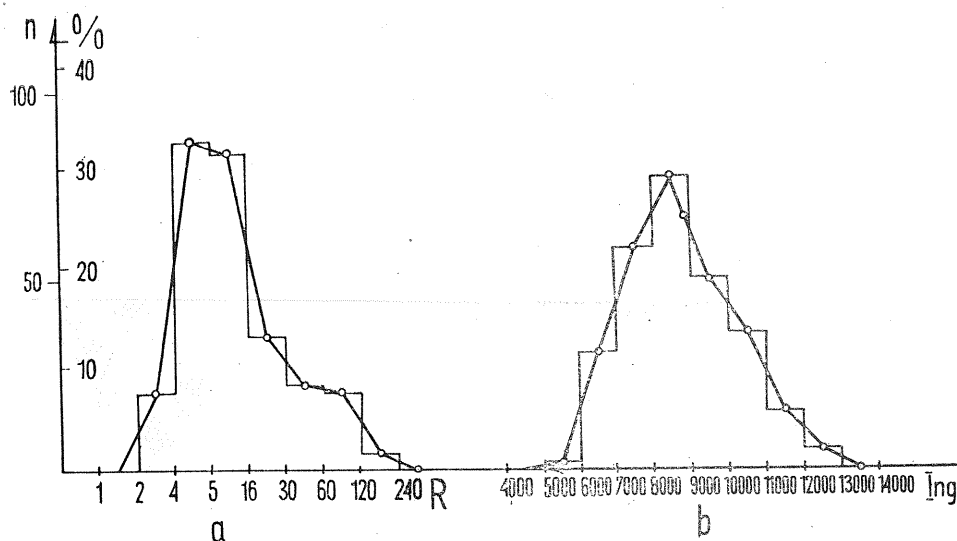


Fig. 10. Histogramy zbiorów  $R$  oraz  $Ing$   
 Histograms of classes  $R$  and  $Ing$   
 a — krzywa wariacyjna zbioru  $R$  w skali logarytmicznej; b — krzywa wariacyjna zbioru  $Ing$  w skali liniowej  
 a — variation curve of class  $R$  in logarithmic scale, b — variation curve of class  $Ing$  in linear scale

Analogicznie do przeprowadzonych wyżej operacji wykonano zestawienie wartości  $R$  i  $dIng$ . Przy kolejnym założeniu, że  $Sw = 1$ ,  $C_i = 0$ , korzystając z równań (5) i (13) otrzymano:

$$\lg R = \lg R_w - m \lg w + m dIng \lg \frac{w}{\Phi_1}. \quad (20)$$

Oznaczając:

$$\lg R_w - m \lg w = e, \quad (21)$$

$$m \lg \frac{w}{\Phi_1} = f, \quad (22)$$

otrzymamy równanie regresji liniowej:

$$\lg R = e + f dIng. \quad (23)$$

Zarówno założenie  $C_i = 0$ , jak też „ciche” założenie w równaniu (21), że  $R_w = \text{const.}$ , spowodują podobnie do poprzednich przypadków powstanie „pasa” regresji, których współczynnik kierunkowy (szukany trend) będzie identyczny, a to zależy jedynie od wartości  $m$  i stosunku wielkości  $w$  i  $\Phi_1$ . Zestawiono zatem zbiory 267 par wartości  $R$  i  $Ing$  z 13 otworów wiertniczych. Fig. 8 przedstawia zestawienie wartości  $R$  i  $Ing$  w skali liniowej, zaś fig. 9 — w skali logarytmicznej. Wariacyjną ilustrację zbiorów  $R$  i  $Ing$  przedstawia fig. 10.

Dla regresji (23) uzyskano następujące wyniki:

$$S_{\lg R} = 0,3513,$$

$$S_{dIng} = 0,2420,$$

$$r = +0,7597,$$

$$S_r = 0,0258,$$

$$\frac{|r|}{S_r} = 29,5,$$

a stąd wniosek, po porównaniu ostatniej wartości z tablicami całki prawdopodobieństwa, że korelacja istnieje z prawdopodobieństwem znacznie większym niż 0,999. Uzyskano równanie regresji:

$$\lg R = 0,1954 + 1,9124 dIng. \quad (24)$$

Uwzględniając przyjęte wcześniej zerowe zailenie, przesunięto (j.w.) regresję (24) o wartość  $S_{\lg R}$  w górę, wzdłuż osi  $R$ , i uzyskano równanie ograniczające zbiór od góry:

$$\lg R = 0,5467 + 1,9124 dIng. \quad (25)$$

Wykorzystując zależności (9), (16), (22) można uzyskać następujące związki:

$$a = \frac{1}{d}, \quad (26)$$

$$\frac{w}{\Phi_1} = \exp_{10} \left( -\frac{d}{b} \right), \quad (27)$$

$$m = \frac{-bf}{d}. \quad (28)$$

Związki podane wyżej prowadzą, jak widać, do określenia podstawowych parametrów form analitycznych, wiążących geologiczne własności zbiornikowe z rejestrowanymi geofizycznie własnościami fizycznymi. Jak pokazano, wartości współczynników kierunkowych uzyskanych regresji nie zależą od warunków pomiarowych, od wartości zailenia przyjętych reperów do względnych różnicowych natężeń, od porowatości badanych warstw, od mineralizacji wód złożowych, a więc od tych wszystkich czynników, które przy metodach tradycyjnych wpływają na wynik badań. W przedstawionej metodzie wykorzystuje się jedynie obserwację trendu zmian w sposób względny i stąd ta niezależność od naturalnych czynników pomiarowych. Jeśli chodzi o błędy określeń (26), (27), (28), to wynikają one w sposób bezpośredni z uzyskiwanych wartości współczynników korelacji liniowej  $r$ . Jak wiadomo, współczynnik korelacji liniowej  $r$  pomiędzy  $x$  i  $y$  wyraża się wzorem:

$$r = \frac{\overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}}{S_x \cdot S_y}. \quad (29)$$

Zmienia się on w granicach  $-1 \leq r \leq 1$  i świadczy o sile związków statystycznych między danymi. Przy  $r = 0$  brak jest korelacji liniowej, co nie wyklucza innego typu korelacji. Gdy  $r = \pm 1$  — korelacja jest zupełna. Sens współczynnika korelacji polega na porównaniu parametrów kątowych nachylenia regresji:

$$y = a + bx, \quad (30')$$

z korelacją odwrotną:

$$x = a' + b'y, \quad (30'')$$

a ściślej:

$$r = \sqrt{b \cdot b'} = \sqrt{\frac{b}{b_1}} \quad (31)$$

gdzie:  $b_1$  stanowi współczynnik kierunkowy dla wzoru (30') wyliczony z (30''). W przypadku korelacji zupełnej, tj. gdy  $r = \pm 1$ ,  $b = 1/b' = b_1$ . Opierając się na wzorze (31) można zapisać błąd względny średniej wartości współczynnika kierunkowego  $b$  jako:

$$\frac{|\Delta b|}{\bar{b}} = \frac{1-r^2}{2|r|\sqrt{n}} = \left| \frac{1}{2r} \right| S_r \quad (32)$$

gdzie:  $\bar{b}$  — wartość średnia współczynnika kierunkowego  $b$ , liczona jako średnia geometryczna wielkości  $b$  i  $b_1$ ;  $S_r$  — błąd określenia współczynnika korelacji  $r$  wyrażony wzorem:

$$S_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{n}}. \quad (33)$$

Błąd względny dla  $n$  obserwacji jest  $\sqrt{n}$  razy mniejszy dla wartości średniej niż dla pojedynczej obserwacji.

Błędy względne dla wielkości  $a$ ,  $w/\Phi_1$ ,  $m$ , uzyskanych przy pomocy wzorów (26), (27), (28), liczone metodą różniczki zupełnej uzyskają odpowiednio postaci:

$$\frac{\Delta a}{a} = \left| \frac{\Delta d}{d} \right| \quad (\text{tu } 1,68\%), \quad (34)$$

$$\frac{\Delta w/\Phi_1}{w/\Phi_1} = \left| \frac{\Delta d}{d} \right| + \left| \frac{d}{b} \cdot \frac{\Delta b}{b} \right| \quad (\text{tu } 3,07\%), \quad (35)$$

$$\frac{\Delta m}{m} = \left| \frac{\Delta b}{b} \right| + \left| \frac{\Delta d}{d} \right| + \left| \frac{\Delta f}{f} \right| \quad (\text{tu } 4,46\%). \quad (36)$$

Jak widać, błędy są bardzo niskie, a podkreślić przy tym należy, że dla związków (27), (28) są liczone jako błędy maksymalne i praktycznie można się spodziewać ich redukcji w wyniku znoszenia się poszczególnych składników. Tak więc w oparciu o uzyskane parametry regresji i przedstawione zależności wyliczono dla osadów jury górnej niecki mogileńskiej parametry przybliżeń modeli geologicznych dla własności fizycznych:

$$a = 0,677 \pm 0,0115 \quad (37)$$

$$w/\Phi_1 = 19,44 \pm 0,597 \quad (38)$$

$$m = 1,484 \pm 0,0662 \quad (39)$$

Otrzymane wyniki są — jak przedstawiono w przypadku poszczególnych regresji — prawdziwe, z prawdopodobieństwem większym niż 0,999, a wielkości błędów są bardzo niewielkie. Tak więc zaproponowana na przykładzie rejonu niecki mogileńskiej metoda poszukiwania właściwych przybliżeń na drodze określania parametrów i współczynników do związków liczbowych dla ilościowej interpretacji danych geofizycznych jest wielce efektywna i zdecydowanie konkurencyjna w stosunku do korelacji informacji geofizycznych z laboratoryjnymi. Na tę konkurencyjność i zalety podanej metodyki wpływają czynniki:

— częsty brak możliwości głębokościowego dowiązania danych laboratoryjnych do profili geofizycznych;

— częsty brak miarodajnych danych laboratoryjnych dla wielu wierceń;

— wpływy czasu, wysychania i zmian mechanicznych w wyniku procesu wiercenia i procesu pobierania rdzeni i próbek na badane później własności zbiornikowe skały w laboratorium, prowadzące w sumie do fałszowania obiektywnego informacji laboratoryjnych;

— określenie poszukiwanych parametrów w warunkach *in situ* wykluczające w ten sposób wszelkie zmiany czasowe i mechaniczne;

— wielka dokładność określania parametrów poszukiwanych związków, wynikająca z dużej ilości obserwacji i wykorzystywania wyłącznie trendów kierunkowych regresji;

— niezależność podanej metody od medium nasycającego skałę, od jej zailenia i innych czynników mających istotne znaczenie przy tradycyjnej metodzie analizy regresyjnej;

— wielka ilość materiałów pomiarowych geofizyki wiertniczej, dotychczas nie opracowanych w sensie regionalnym i nie mających większych szans opracowania, głównie z uwagi na brak standaryzacji badań radiometrycznych;

— możliwość wykorzystania aktualnie wykonywanych odcinkowych badań geofizycznych i przeprowadzania interpretacji ilościowych na bieżąco.

Zakład Geofizyki  
Instytutu Geologicznego  
Warszawa, ul. Rakowiecka 4  
Nadesłano dnia 1 lipca 1971 r.

#### PIŚMIENNICTWO

- BURKE J. A., CAMPBELL R. L., SCHMIDT A. W. (1969) — The Litho- Porosity cross plot — a method of determining rock characteristics for computation of log data. SPWLA Tenth Annual Logging Symposium, 25—28. 05. 1969. Texas.
- BURKE J. A., CURTIS M. R., COX J. P. (1967) — Computer Processing of Log Data Enables Better Production in Chaveroo Field. Jour. Pet. Techn., July.
- FRYDECKI J. (1968) — Oznaczenia w geofizyce wiertniczej. Prz. geol., 16, p. 391—394, nr 8. Warszawa.
- FRYDECKI J. (1969a) — Przyczynki metodyczne z zakresu geofizyki wiertniczej w aspekcie poszukiwań złóż bituminów. Prz. geol., 17, p. 197—201, nr 4. Warszawa.
- FRYDECKI J. (1969b) — Wykorzystanie metody PNG do określania porowatości wapieni jurajskich synklinorium warszawskiego. Geofizyka i Geologia Naftowa, nr 10—11, (154—155), p. 324—330. Kraków.
- FRYDECKI J. (1970) — Geofizyczne zależności określone dla parametrów skał izolujących w synklinorium mogiłęńskim. Kwart. geol., 14, p. 495—505, nr 3. Warszawa.
- FRYDECKI J. (w druku) — Problemy interpretacji i wykorzystania materiałów geofizyki wiertniczej. Prz. geol. Warszawa.
- FRYDECKI J. (1972) — Wyniki unifikacji badań radiometrycznych wykonanych w otworach wiertniczych niecki mogiłęńskiej. Kwart. geol., 16, p. 373—382, nr 2. Warszawa.
- HOSSIN M. A. (1960) — Calcul des saturation en eau par la methode du ciment argileux (formule d'Archie generalise). Bull. de l'Association Française des Techniciens du Petrole, Mars., p. 237—242. Paris.
- SAVRE W. C. (1963) — Determination of more Accurate Porosity and Mineral Composition in Complex Lithologies with the Use of the Sonic, Neutron and Density Surveys. Jour. Pet. Tech., Sept.
- SHERIFF R. E. (1970) — Glossary of terms in well logging. Geophysics, 35, p. 1116—1139, nr 6.

- WESOŁOWSKA-BAŁA M. (1969) — Określanie zailenia skał na podstawie metody profilowania gamma. *Prz. geol.*, 17, p. 508—511, nr 10. Warszawa.
- ВЕНДЕЛЬШТЕЙН Б. Ю., ЛАРИОНОВ В. В. (1964) — Использование данных промысловой геофизики при подсчёте запасов нефти и газа. Изд. Недра. Москва.
- КУРТЕВ Т. И. (1967) — Количественная интерпретация результатов радиометрических исследований глинистых песчаников. *Разведочная Геофизика*, вып. 23, стр. 89—93, Изд. Недра. Москва.
- ЛАРИОНОВ В. В. (1960) — Опыт использования данных радиометрии скважин для оценки коллекторских свойств пластов при поисках объектов для подземного хранения газа в районе Калуги. Промысловые и разведочные геофизические исследования. Труды МИНХ и ГП, вып. 31, стр. 3—15. Гостоптехиздат. Москва.
- ЛАРИОНОВ В. В. (1963) — Ядерная геология и геофизика. Гостоптехиздат. Москва.
- НЕЧАЙ А. М. (1960) — Оценка продуктивности и коллекторских свойств трещиноватых карбонатных пород. *Прикладная Геофизика*, вып. 26, стр. 149—185. Гостоптехиздат. Москва.
- НЕЧАЙ А. М. (1964) — Вопросы количественной оценки вторичной пористости трещиноватых коллекторов нефти и газа. *Прикладная Геофизика*, вып. 38, стр. 201—212. Гостоптехиздат. Москва.
- НЕЧАЙ А. М., ГУСАКОВ Н. Д. (1964) — К оценке нефтегазоносности глинистых песчаников. *Разведочная Геофизика*, вып. 1, стр. 79—92. Изд. Недра. Москва.

Януш ФРИДЕЦКИ

## ВВЕДЕНИЕ К ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОЦЕНКЕ КОЛЛЕКТОРОВ ВЕРХНЕЙ ЮРЫ МОГИЛЬНЕНСКОЙ ВПАДИНЫ

### Резюме

Широко применяющиеся методы количественной интерпретации материалов промысловой геофизики не позволяют производить удовлетворительную оценку коллекторских свойств пород, из-за неточного изображения геологических моделей пород, на которые опираются эти методы. Поиски более эффективной модели при корреляции результатов исследований кернов с геофизическими данными не могли производиться из-за низкого качества лабораторных данных. Пользуясь результатами каротажа сопротивлений (удельное сопротивление и проводимость пород), гамма каротажа (интенсивность радиации и его сравнительный дифференциальный параметр) и нейтрон-гамма каротажа, произведен регрессионный анализ этих параметров, с одновременным выводом функциональной зависимости между ними, и коллекторскими свойствами пород. Используя большое количество наблюдений, сделаны выводы из наблюдавшихся трендов направленного расположения регрессии.

Опираясь на направленные коэффициенты регрессии для верхней юры Могильненской впадины, откуда был взят материал для наблюдений, определены величины следующих коэффициентов аналитических форм, связывающих геофизические параметры с коллекторскими:

- 1) коэффициент плотности (цементации) „ $m$ ” для уравнения Арчи;
- 2) показатель степени „ $\alpha$ ” функции, связывающей глинистость породы с интенсивностью естественного гамма излучения;

3) соотношение (частное) экспериментальных „нейтронных карбонатных пористостей”, являющихся основанием степени функции, связывающей интенсивность гамма излучения, возбужденного нейтронами, с пористостью.

Полученные регрессии характеризуются высокими значениями коэффициентов корреляции, причем вероятность корреляции значительно превышает величину 0,999. Работа проводилась методом наименьших квадратов с использованием электронно-вычислительных машин.

Представленная и выведенная автором методика поисков моделей приближений изменений физических свойств пород в функции изменений коллекторских параметров пород, позволяет использовать для методических целей значительное количество каротажных материалов, собранных в течение многих лет в отдельных районах, без необходимости обращения к не всегда точным результатам лабораторных исследований кернов.

Полученные материалы отягощены очень низкими ошибками, соответственно: 4,46%, 1,68%, 3,07%. Это является следствием использования в вычислениях направленных трендов регрессии для большого количества наблюдений. Методика может быть полностью использована для текущей интерпретации при применении дигитализации и электронно-вычислительных машин.

Janusz FRYDECKI

## INTRODUCTION TO GEOPHYSICAL EVALUATION OF THE UPPER JURASSIC DEPOSITS IN THE MOGILNO TROUGH

### Summary

The generally used quantitative interpretation methods of geophysical materials in drillings do not allow the reservoir properties of rocks to be evaluated satisfactorily, mainly due to an insufficient representation of geological models of rocks on which these methods are based. Searching for a more effective model, by correlating the results of core examinations with geophysical data, was not possible, mainly on account of a considerably low authoritativeness of laboratory information. On the basis of the results obtained from resistivity logging (resistivity and specific conductivity of rocks), gamma-ray logging (intensity of radiation and its relative differential parameter), and neutron-gamma-ray logging (as above), a regression analysis has been made of these parameters, with a simultaneous introduction of functional dependences between these parameters and the reservoir properties of rocks. By means of a large amount of observations, some conclusions have been drawn from the trends of the directional arrangement of the regression.

On the basis of the directional coefficient of regression there are determined, for the Upper Jurassic of the Mogilno trough, the provenance of the material in study, and the values of the following coefficients of the analytical forms that bind the geophysical parameters with the reservoir ones:

- 1) cementation coefficient "m" for Archie's formula,
- 2) exponent "α" of the function binding the clay content in rocks with the intensity of natural gamma radiation,



3) ratio (quotient) of extremal "neutron carbonate porosities" making the base number of the function that connects the gamma radiation intensity, induced by neutrons, with porosity.

The regressions obtained in this way are characterized by high values of correlation coefficients, and the probability of correlation considerably exceeds the value 0.999. The works carried on by means of the least square method have been based on electronic computers.

The method of searching for approximation models of changes in physical properties of rocks in function of changes of reservoir parameters of rocks, worked out and presented by the author, allows us to use for methodical purposes a lot of logging materials, accumulated for many years in various regions, without necessity of using not always certain information from the laboratory examinations of drill cores.

The results obtained are burdened with very low errors: 4.46%, 1.68%, 3.07%, respectively. This is due to using in calculations only the direction trends of regressions for considerable amount of observations. This method can successfully be adapted in current interpretations when using digital computers.