

**Doc. dr hab. inż. Urszula Woźnicka¹⁾, dr hab. inż. Jadwiga Jarzyna, prof. AGH²⁾,
dr inż. Ewa Krynicka¹⁾**

¹⁾Institut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego PAN
31-342 Kraków, ul. Radzikowskiego 152

²⁾Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Zakład Geofizyki,
30-059 Kraków, Al. Mickiewicza 30

METODA WIELOKROTNYCH POWTÓRZEŃ W ZASTOSOWANIU DO OCENY DOKŁADNOŚCI INTERPRETACJI W GEOFIZYCE OTWOROWEJ

Streszczenie

Metoda wielokrotnych powtórzeń w omawianym przypadku polegała na wykonaniu serii komputerowych symulacji profilowań geofizyki otworowej, *GR*, *RHOB* i *DT*, w celu uzyskania wielu realizacji rzeczywistego pomiaru. Wyniki symulacji i profilowania otworowe wykorzystano do przeprowadzenia kompleksowej interpretacji dla wyznaczenia składu mineralnego, porowatości oraz nasycenia przestrzeni porowej skał. Na podstawie tych wyników obliczono wartości średnie parametrów geologicznych, *PHI*, *VSAND*, *VCL* i *SX0*, oraz ich średnie względne odchylenia standardowe, które uznano za miarę dokładności wyznaczenia wielkości będących wynikami interpretacji.

Wstęp

Wykorzystanie metod optymalizacyjnych do rozwiązania układu równań w kompleksowej interpretacji w geofizyce otworowej powoduje, że nie jest możliwe obliczenie dokładności wyznaczenia pojedynczych parametrów metodą różniczki zupełnej. Ze względów technicznych i ekonomicznych nie jest także możliwe wielokrotne profilowanie tego samego rodzaju w otworze w celu oszacowania dokładności wyników interpretacji na podstawie jej wielokrotnego wykonania z użyciem powtórzonych pomiarów (Theys 1999). Dlatego wykorzystano wielokrotne symulacje profilowań oparte na rzeczywistym pomiarze i zadanym względnym odchyleniu standardowym (błędzie pomiarowym) i wielokrotnie przeprowadzono interpretację, a następnie obliczono dokładności parametrów geologicznych z wykorzystaniem formuł statystycznych.

Symulacje profilowań

Statystyczna metoda wielokrotnych powtórzeń (Agterberg 1974, Czubek 1989, Krynicka 1994) pozwala zastąpić *I*-krotne powtórzenia serii pomiarowej ich symulacją komputerową.

Podstawę do symulacji stanowią wyniki wykonanych pomiarów, x_{0j}^P , wraz z ich odchyleniami standardowymi, $\sigma(x_{0j}^P)$, tworzące tzw. zbiór danych bazowych. Założono, że

każdy wynik pomiaru na głębokości j x_{0j}^P posiada względne odchylenie standardowe

$\sigma(x_{0j}^P)/x_{0j}^P = \sigma_R(x_0^P) = 2,5; 5$ lub 10% , stałe w całym interwale głębokości. Wykonano

serie po 20 symulacji dla $\sigma_R(x_0^P) = 2,5$ i 5% oraz serię 40 symulacji dla $\sigma_R(x_0^P) = 10\%$.

Analizę otrzymanych wyników dla $2,5; 5$ i 10% względnych odchyleń standardowych profilowań naturalnej promieniotwórczości, *GR*, gęstości objętościowej, *RHOB* i *DT* – czasu

interwałowego, przeprowadzono na bazie 20 symulacji. Serię 40 symulacji wykorzystano tylko w obliczeniach kontrolnych.

Kompleksowa interpretacja profilowań geofizyki otworowej

Wykorzystano aplikację Interlog w systemie GeoWin[®] (Jarzyna et al. 2002) do przeprowadzenia kompleksowej interpretacji pomiarów i wyników symulacji w celu wyznaczenia litologii, porowatości i nasycenia wodą w utworach piaskowcowo-iłowcowych sarmatu w otworze RW7 we wschodniej części przedgórza Karpat. Użyto następujące profilowania: porowatości neutronowej, *NPHI*, średnicy, *CAL* i oporności, *ILM* oraz wyniki symulacji *GR*, *RHOB* i *DT* w różnych kombinacjach przedstawionych w tabeli 1.

Tabela 1 Kombinacje profilowań *GR*, *RHOB* i *DT* użytych do interpretacji przy założonych różnych względnych odchyleniach standardowych $\sigma_R(x_0^P)$

	A	B	C	D	
1	[<i>GR</i> ₁₀ <i>RHOB</i> ₁₀ <i>DT</i> ₁₀]	[<i>GR</i> ₁₀]	[<i>RHOB</i> ₁₀]	[<i>DT</i> ₁₀]	$\sigma_R(x_0^{GR})$
	10 %	10 %	0 %	0 %	$\sigma_R(x_0^{RHOB})$
	10 %	0 %	10 %	0 %	$\sigma_R(x_0^{DT})$
	10 %	0 %	0 %	10 %	
2	[<i>GR</i> ₅ <i>RHOB</i> ₅ <i>DT</i> ₅]	[<i>GR</i> ₅]	[<i>RHOB</i> ₅]	[<i>DT</i> ₅]	$\sigma_R(x_0^{GR})$
	5 %	5 %	0 %	0 %	$\sigma_R(x_0^{RHOB})$
	5 %	0 %	5 %	0 %	$\sigma_R(x_0^{DT})$
	5 %	0 %	0 %	5 %	
3	[<i>GR</i> _{2.5} <i>RHOB</i> _{2.5} <i>DT</i> _{2.5}]	[<i>GR</i> _{2.5}]	[<i>RHOB</i> _{2.5}]	[<i>DT</i> _{2.5}]	$\sigma_R(x_0^{GR})$
	2,5 %	2,5 %	0 %	0 %	$\sigma_R(x_0^{RHOB})$
	2,5 %	0 %	2,5 %	0 %	$\sigma_R(x_0^{DT})$
	2,5 %	0 %	0 %	2,5 %	

W przypadkach od **(1÷3)A** do interpretacji kompleksowej brano kolejno wysymulowane dane pomiarowe $\{x_{ij}^{GR}, x_{ij}^{RHOB}, x_{ij}^{DT}\}$, a w przypadkach pozostałych wykorzystano każdorazowo do interpretacji odpowiednie zestawy trzech profilowań, z których tylko jedno było wynikiem symulacji, x_{ij}^P , a pozostałe dwa, były profilowaniami oryginalnymi, x_{0j}^P . I tak dla przypadków **(1÷3)B** brano dane pomiarowe $\{[GR]_{10}, [GR]_5, [GR]_{2.5}\}$, dla **(1÷3)C** brano dane pomiarowe $\{[RHOB]_{10}, [RHOB]_5, [RHOB]_{2.5}\}$, a dla **(1÷3)D** – dane $\{[DT]_{10}, [DT]_5, [DT]_{2.5}\}$. W wyniku kompleksowej interpretacji każdorazowo otrzymano $I = 20$ wartości parametrów geologicznych W , z których można wyznaczyć wartość średnią, \bar{y}_j^W , i względne odchylenie standardowe, Δ_j^W , jako miarę dokładności parametru W dla każdej j -tej głębokości. Dla analizowanego interwału obliczono średnie wartości względnych odchylen standardowych dla wszystkich parametrów geologicznych, Δ^W .

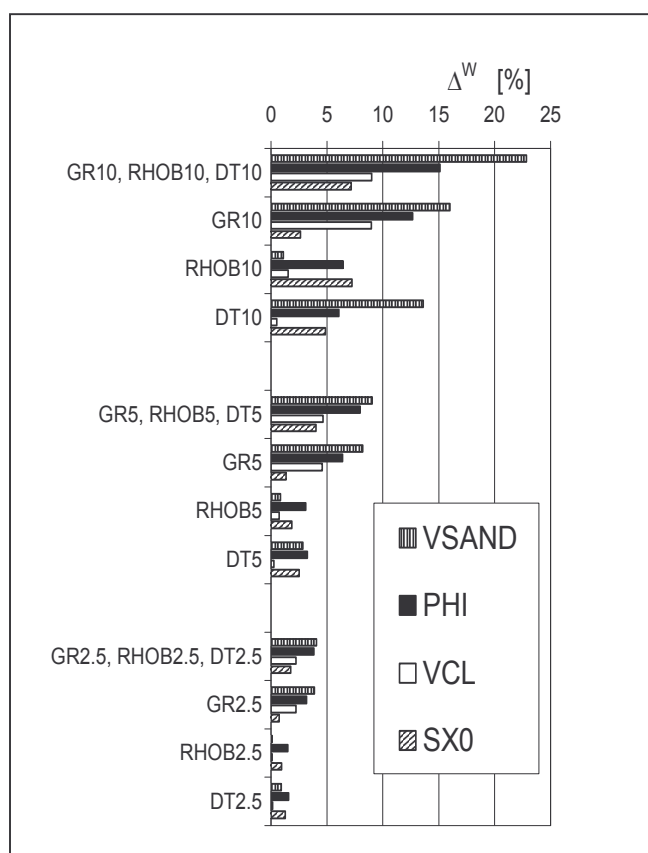
Porównanie wariantów **(1÷3)A** pozwoliło na dyskusję wpływu wartości błędów pomiarów wszystkich wielkości P na dokładność wyznaczenia parametru W . Analiza wariantów **1B÷1D** pozwoliła na stwierdzenie, który z błędów (*GR*, *RHOB*, czy *DT*, na poziomie 10 %) ma znaczenie dominujące przy wyznaczaniu dokładności parametru W .

Warianty **2B÷2D** i **3B÷3D** posłużyły do dyskusji tego zagadnienia na poziomie względnych odchyłeń standardowych 5 % i 2,5 %.

Sprawdzono, czy otrzymane wartości parametrów geologicznych y_{ij}^W dla danej głębokości j charakteryzują się rozkładami normalnymi. Przeprowadzono kilkakrotnie (dla różnych przedziałów) zredukowany test $\bar{\chi}^2$ dla $I = 20$ wyników interpretacji dla kombinacji profilowań **1A** w całym interwale głębokości. W tabeli 2 zestawiono jeden z wyników w postaci minimalnych, maksymalnych oraz średnich wartości $\bar{\chi}^2(y_{ij}^W)$ dla wszystkich parametrów W . Na podstawie przeprowadzonych testów nie należy odrzucać hipotezy o zgodności wyników z rozkładem normalnym (Taylor 1995). Wyniki te wskazują także, że seria 20 symulacji tworzy już przypadek asymptotyczny i jest wystarczająca dla dalszej analizy dokładności parametrów otrzymanych na podstawie pomiarów wysymulowanych.

Tabela 2 Wyniki zredukowanego testu $\bar{\chi}^2(y_{ij}^W)$ dla parametrów W obliczonych z wykorzystaniem $I = 20$ profilowań wysymulowanych (kombinacja 1A). Podano wartość średnią, minimalną i maksymalną dla całego interwału głębokości ($J = 401$)

Parametr W	$\bar{\chi}^2(y_{ij}^W)$			Liczba wyników >1
	Min	Max	Średnia	
<i>VCL</i>	0,011	8,426	0,128	1,2 %
<i>VSAND</i>	0,001	1,881	0,158	2,5 %
<i>PHI</i>	0,012	6,022	0,109	0,7 %
<i>SX0</i>	0,010	1,260	0,148	2,5 %



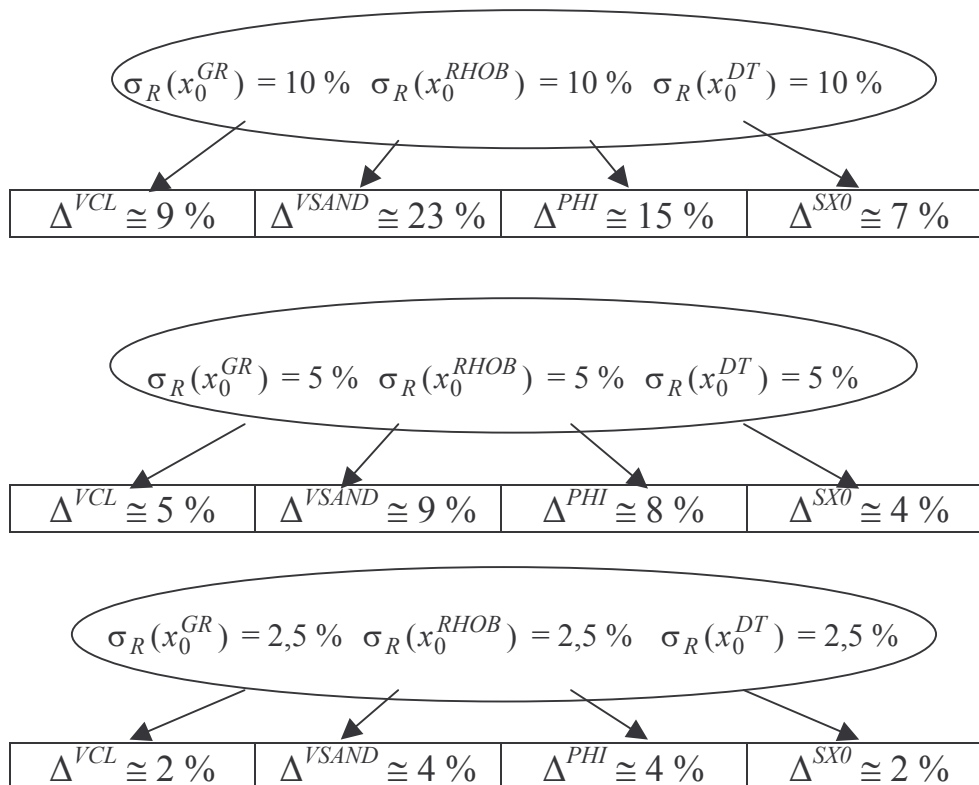
Dokładności, w postaci średnich względnych odchyłeń standardowych Δ^W (uśrednionych w całym interwale głębokości), dla wszystkich parametrów geologicznych W dla różnych założonych względnych odchyłeń standardowych pomiaru przedstawiono w tabeli 3 i na rysunku 1. Wyniki wskazują na wzajemną zależność między niepewnością pomiaru a niepewnością wyznaczenia parametrów. Przedstawione wyniki pozwalają przeanalizować wpływ dokładności każdego z osobna profilowania (*GR*, *RHOB*, *DT*) na wyznaczenie każdego parametru (*VCL*, *VSAND*, *PHI*, *SX0*).

Rys. 1 Średnie względne odchylenia standardowe Δ^W (uśrednione w całym interwale głębokości), dla wszystkich parametrów geologicznych W dla różnych założonych względnych odchyłeń standardowych pomiaru

Tabela 3 Względne odchylenia standardowe, Δ^W , geologicznych parametrów W dla różnych kombinacji względnych odchyłeń standardowych profilowań GR , $RHOB$ i DT

Wariant	Δ^W [%]			
	VCL	$VSAND$	PHI	$SX0$
1A [GR_{10} $RHOB_{10}$ DT_{10}]	9,00	22,83	15,11	7,18
1B [GR_{10}]	8,96	16,00	12,66	2,64
1C [$RHOB_{10}$]	1,55	1,10	6,44	7,25
1D [DT_{10}]	0,53	13,63	6,07	4,88
2A [GR_5 $RHOB_5$ DT_5]	4,63	9,05	7,98	4,02
2B [GR_5]	4,56	8,21	6,42	1,35
2C [$RHOB_5$]	0,72	0,82	3,12	1,88
2D [DT_5]	0,26	2,86	3,25	2,51
3A [$GR_{2,5}$ $RHOB_{2,5}$ $DT_{2,5}$]	2,25	4,07	3,84	1,75
3B [$GR_{2,5}$]	2,22	3,89	3,18	0,73
3C [$RHOB_{2,5}$]	0,12	0,12	1,49	0,93
3D [$DT_{2,5}$]	0,13	0,90	1,58	1,28

Korzystając z diagramu (Rys.2) można przeprowadzić następującą analizę otrzymanych wyników: w przypadku wyznaczenia zailenia, VCL założone 10, 5 lub 2,5 % względne odchylenia standardowe zmierzonych wielkości GR , $RHOB$ i DT przenoszą się konsekwentnie na ten sam poziom względnych odchyłeń standardowych VCL .



Rys. 2 Wpływ dokładności profilowań GR , $RHOB$ i DT na dokładność wyników interpretacji VCL , $VSAND$, PHI i $SX0$

W przypadku współczynnika nasycenia wodą, $SX0$ – otrzymujemy niższy poziom względnych odchyłeń standardowych – odpowiednio 7, 4 i 2 %. Z kolei dla porowatości, PHI

otrzymany poziom względnych odchyłeń standardowych jest wyższy niż założony dla *GR*, *RHOB* i *DT* – odpowiednio 15, 8 i 4 %. Może to wskazywać, że procedura optymalizacyjna stosowana w kompleksowej interpretacji w przypadku wyznaczania *SX0* w pewnym stopniu niweluje błędy pomiarowe profilowań, natomiast w przypadku *PHI* wykazuje silną wrażliwość na błąd pomiaru.

Wnioski

Przedstawiona metoda statystyczna pozwala ominąć trudności związane z wyznaczaniem błędów bezwzględnych przy interpretacji wyników w geofizyce otworowej. Umożliwia wyliczenie dokładności wyników interpretacji w postaci względnego odchylenia standardowego każdego rozważanego parametru geologicznego niezależnie. Metoda nie wymaga znajomości *explicite* formuły określającej związek między poszczególnymi wielkościami, czy ich błędami, jest efektywna, a jej użycie nie generuje dodatkowych kosztów. Przeprowadzone testy dotyczące charakteru statystycznych rozkładów analizowanych parametrów geologicznych potwierdzają wiarygodność wyników uzyskanych na drodze symulacji komputerowej w odniesieniu do wyników dla rzeczywistych danych geologicznych.

Bibliografia

- Agterberg F.P. (1974): *Geomathematics*. Elsevier Sci. Pub. Co., Amsterdam, London, New York.
- Czubek J.A. (1989): *Confidence Belt for the Rock Thermal Neutron Parameters. Neroth32.bas Program*. INP Report No 1448/AP, Institute of Nuclear Physics, Kraków.
- Jarzyna J. (red.), Bała M., Cichy A., Gądek W., Gąsior I., Karczewski J., Marzencki K., Stadtmüller M., Twaróg W., Zorski T. (2002): *Przetwarzanie i interpretacja profilowań geofizyki wiertniczej – system GeoWin*. Arbor. Kraków.
- Krynicka E. (1994): *Statistical Analysis of a Correlation Method for Thermal Neutron Absorption Cross Section Determination*. Nucl. Geophys. **8**, No.5, 433-441.
- Taylor J.R. (1995): *Wstęp do analizy błęd pomiarowego*. PWN, Warszawa.
- Theys Ph. (1999): *Log Data Acquisition and Quality Control*. Editions Technip. Paris.