

UJĘCIE ZWIĄZKÓW MIĘDZY WSKAZANIAMI METÓD NEUTRON-GAMMA ORAZ GAMMA-GAMMA A PROCENTOWĄ ZAWARTOŚCIĄ ŻELAZA

UKID [550.835.54+550.835.4].05:553.91

Związki między parametrami fizycznymi, mierzo-
nymi przy wykonywaniu profilowań geofizycznych
w otworach, a procentową zawartością żelaza stano-
wią podstawę wydzielenia stref okruszczonych, jak
również określania granic bilansowości. Zależności ta-
kie możliwe są do uzyskania za pomocą korelacji
parametru fizycznego, z odpowiadającą mu wielko-
ścią procentowej zawartości metalu. Istnieją już takie
związki ustalone poprzez stosowanie metody staty-
stycznej analizy korelacyjnej dwuwymiarowej (1, 2).

W artykule autor postawił sobie za zadanie powią-
zanie trzech parametrów w jeden związek poprzez
stosowanie analizy korelacyjnej wielowymiarowej.
Jako parametry fizyczne przeanalizowano wskazania
metody neutron-gamma oraz gamma-gamma w stre-
fach okruszczonych związkami żelaza. Metody karo-
tażu jądrowego gamma-gamma ($\gamma\gamma$) oraz neutron-
gamma są efektywne w zastosowaniu do zagadnień
geofizycznego rozpoznania rud in situ w otworach
wiertniczych. Jest to wynikiem zależności liniowych
między wskazaniami $I_{n\gamma}$ oraz $I_{\gamma\gamma}$, a procentową za-
wartością żelaza C_{Fe} . Przypomnieć należy, że naj-
popularniejsze metody stosowane w tego typu zagad-
nieniach, metody opornościowe dają nam parametr
zależny w sposób logarytmiczny od zawartości Fe (1).
Efektywność metody $\gamma\gamma$ oraz $n-\gamma$ jest przede wszyst-
kim wynikiem podstaw fizycznych tych praktycznych
zastosowań fizyki jądrowej. Metoda gamma-gamma
w wersji gęstościowej opiera się na pomiarze rozpro-
szonego promieniowania gamma, będącego wynikiem
przede wszystkim efektu oddziaływania Comptona
(rozproszenie gamma kwantów na elektronowych obo-
łokach atomowych). Prawdopodobieństwo lub przekrój
czynny na zajęcie efektu Comptona jest proporcjonal-
ne do gęstości elektronowej

$$n_e = \rho N_0 \sum P_i (Z_i/A_i)$$

gdzie ρ — gęstość, N_0 — liczba Avogadry, P_i — pro-
cent wagowy elementu, mającego liczbę masową A_i
oraz liczbę atomową Z_i . Z przytoczonego związku wi-
dać, że istnieje możliwość pomiaru gęstości ρ (g/cm^3)
Dla skał w większości przypadków mamy:

$$\sum P_i (Z_i/A_i) \cong 0,5$$

Rejestracja rozproszonego promieniowania gamma
o energii powyżej 200 eV pozwala na uzyskanie pro-
mieniowania, którego intensywność jest proporcjonalna
do gęstości ρ . Z faktu tego wynika duża użyteczność
profilowań gamma-gamma w zagadnieniach rud żela-
za. Stwierdzono bowiem zależność między procentową
zawartością Fe, a gęstością skały okruszczowanej. Stąd
 $I_{\gamma\gamma} \propto \rho \rightarrow I_{\gamma\gamma} = I_{\gamma\gamma} (C_{Fe})$. Na ryc. 1 przedstawiono
zależność korelacyjną między intensywnością natężenia
rozproszonego promieniowania gamma-gamma,

a procentową zawartością żelaza w skale. Wartościom
wskazań gamma-gamma przyporządkowano wyniki
analiz chemicznych. Wylczono do zestawienia zależ-
ności korelacyjnej te wartości procentowej zawartości
żelaza w skale, które zostały otrzymane na podstawie
badań chemicznych odcinków rdzenia, o uzysku prze-
kraczącym 90%. Zapis radiacji $\gamma\gamma$ dokonany był
sondą o długości 40 cm ze źródłem Co^{60} (kobalt 60).
Sonda dociskana była do ściany odwiertu decentrali-
zátorem sprężynowym. Szukano zależności między
wskazaniami gamma-gamma $I_{\gamma\gamma}$, a procentową za-
wartością żelaza. Dla tej to zależności $I_{\gamma\gamma} = I_{\gamma\gamma} (C_{Fe})$
otrzymano następującą wielkość współczynnika kore-
lacji:

$$r_{\tau\tau} = -0,91$$

Tak wysoka wartość r (r zawiera się w przedziale
-1, 1, gdzie wartości 1 oraz -1 świadczą o korelacji
zupełnej) jest wynikiem ścisłych związków, które za-
chodzą między skorelowanymi parametrami. Błąd
określenia r , σr wynosi:

$$\sigma r = \frac{1 - r^2}{\sqrt{28}} = 0,0324$$

$$\frac{|r|}{\sigma r} = 28,03$$

Zachodzenie związku między $I_{\gamma\gamma}$, a C_{Fe} przekracza
prawdopodobieństwo $P = 0,99$. Wylczone wartości
średnich odchyłań standardowych wyniosły:

$$\sigma C_{Fe} = 9,7 \quad \sigma I_{\gamma\gamma} = 3,36$$

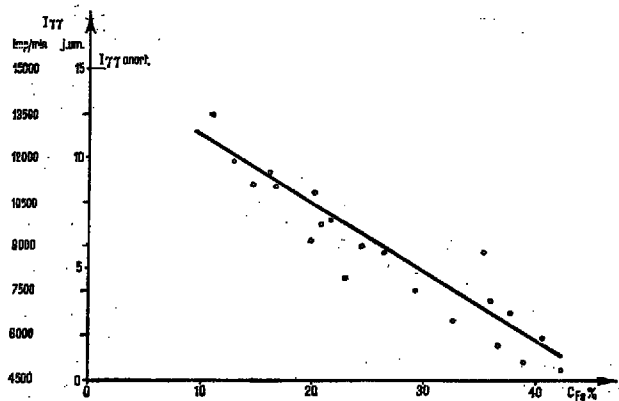
stąd wielkość bezwzględnego błędu popełnionego przy
określaniu procentowej zawartości żelaza metodą gamma-
gamma wynosi:

odchylenie standardowe regresji $-\sigma = 4,1\%$.
Równanie regresji jest typu:

$$(I_{\gamma\gamma} - \bar{I}_{\gamma\gamma}) = \frac{\sigma I_{\gamma\gamma}}{\sigma C_{Fe}} (\bar{C}_{Fe} - C_{Fe})$$

gdzie $\bar{I}_{\gamma\gamma}$ oraz \bar{C}_{Fe} — wartości średnie. Zależność tę
graficznie pokazano na ryc. 1; na osi rzędnych zazna-
czono poziom $I_{\gamma\gamma}$ dla anortozytów bezrudnych.

Jak widać poziom ten jest bardzo bliski wskaza-
niom zerowej zawartości żelaza uzyskanej z ekstrapo-
lacji zależności $I_{\gamma\gamma} = I_{\gamma\gamma} (C_{Fe})$. Fakt ten świadczy
o słuszności uzyskanych wyników. Wpływ procento-
wej zawartości żelaza na wskazania sondy neutron-
gamma ma podstawy w fakcie dużego przekroju
czynnego na rozpraszanie, $\sigma r = 11$ barnów oraz na
pochłanianie $\sigma a = 25$ barnów, dla żelaza w porówna-
niu z innymi pierwiastkami, wchodzącymi w skład



Ryc. 1. Zależność korelacyjna między wskazaniami profilowania gamma-gamma gęstościowego a procentową zawartością żelaza $I_{\gamma\gamma} = I_{\gamma\gamma}(C_{Fe})$, $I_{\gamma\gamma A}$ — poziom gamma-gamma dla anortozytów bezrudnych.

Fig. 1. Correlative relationship between indices of gamma-gamma logging and percentage of iron. $I_{\gamma\gamma} = I_{\gamma\gamma}(C_{Fe})$, $I_{\gamma\gamma A}$ — horizon gamma-gamma for anorthozites devoided of iron ores.

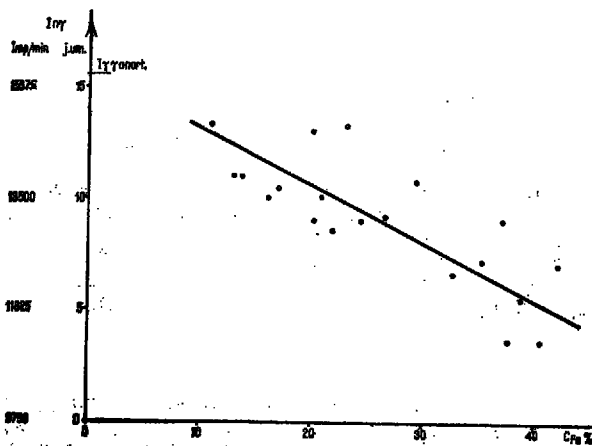
skali krystalicznych. Oczywiście zależności $I_{\gamma\gamma} = I_{\gamma\gamma}(C_{Fe})$ nie można szukać mechanicznie, należy bowiem odróżniać anomalie natężenia neutron-gamma wywołane spękaniami, np. w strefach występowania granitów, od anomalii wywołanych podwyższoną zawartością żelaza. Możliwe jest odróżnienie takich przypadków poprzez korelację geofizyczną z innymi metodami (PG, PO, PGG). Skorelowano wartości procentowej zawartości żelaza ze wskazaniami wtórnego promieniowania gamma wywołanego strumieniem szybkich neutronów płynących ze źródła polon — beryl (Po-Be). Otrzymano liniową zależność typu $I_{n\gamma} = I_{n\gamma}(C_{Fe})$ (patrz ryc. 2).

Współczynnik korelacji dla tej metody wyniósł $r = -0,89$. Wyliczono średnie odchylenia standardowe regresji, będące jednocześnie wielkością błędów popełnianego na podstawie metody $n-\gamma_0 = \pm 4,46\%$ — błąd bezwzględny określania zawartości żelaza C_{Fe} . Wielkość ta jest wyższa od uzyskiwanych błędów metodą gamma-gamma, niższy jest także współczynnik korelacji.

Wynikałoby więc z analizy błędów, które popełniamy przy zastosowaniu jednej, czy drugiej metody, że profilowanie $\gamma\gamma$ przewyższa metodę $n\gamma$ i stąd należałoby opierać się na wskazaniach tej pierwszej. Okazuje się jednak, że powiązanie wskazań jednocześnie obu metod w funkcji procentowej zawartości żelaza może dać nieporównywalnie lepsze efekty. Autor przeprowadził analizę korelacyjną trójwymiarową. Korzystając z korelacji i dwuwymiarowych między $I_{n\gamma}$ a C_{Fe} ($r_{yz} = -0,89$), $I_{\gamma\gamma}$ a C_{Fe} ($r_{xz} = -0,91$) oraz znajdując związek między natężeniem wtórnego promieniowania gamma $I_{n\gamma}$ a rozproszonym promieniowaniem gamma $I_{\gamma\gamma}$ znaleziono związek wiążący jednocześnie między $I_{\gamma\gamma}$, $I_{n\gamma}$ oraz C_{Fe} . Korelacja dwuwymiarowa między $I_{\gamma\gamma}$ a $I_{n\gamma}$ zachodzi (patrz ryc. 3), a współczynnik korelacji $r_{xy} = 0,75$. Wyliczono równanie wiążące $I_{\gamma\gamma}$ i $I_{n\gamma}$ oraz C_{Fe} . Współczynnik takiej trójwymiarowej korelacji wynosi:

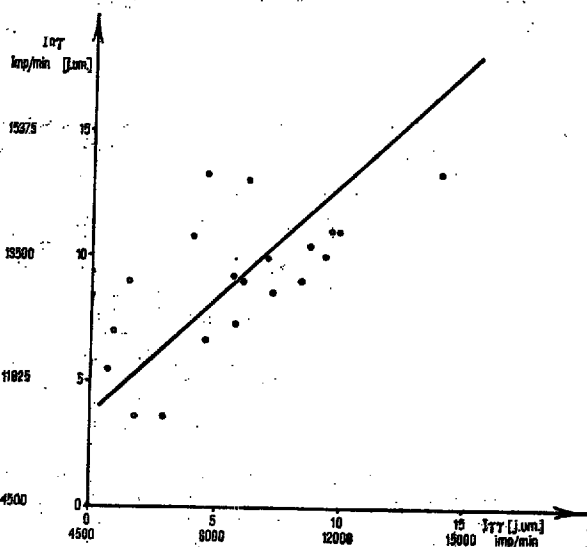
$$r = \sqrt{\frac{r_{xz}^2 - r_{yz}^2 - 2r_{xy}r_{xz}r_{yz}}{1 - r_{xy}^2}} = 0,974$$

Wielkość ta jest bliska 1, mamy więc do czynienia z bardzo ścisłą zależnością. Można wyraźnie zauważyć, że otrzymany współczynnik korelacji przewyższa bezwzględne wartości korelacji dwuwymiarowych.



Ryc. 2. Zależność korelacyjna między wskazaniami profilowania neutron-gamma a procentową zawartością żelaza $I_{n\gamma} = I_{n\gamma}(C_{Fe})$, $I_{n\gamma A}$ — poziom neutron-gamma dla anortozytów bezrudnych.

Fig. 2. Correlative relationship between indices of neutron-gamma logging and percentage of iron. $I_{n\gamma} = I_{n\gamma}(C_{Fe})$, $I_{n\gamma A}$ — neutron-gamma horizon for anorthozites devoided of iron ores.



Ryc. 3. Zależność korelacyjna między wskazaniami profilowania neutron-gamma a profilowaniem gamma-gamma gęstościowego w strefach skał krystalicznych okruszczonych związkami żelaza.

Fig. 3. Correlative relationship between indices of neutron-gamma logging and gamma-gamma density logging in zones of crystalline rocks mineralized with iron compounds.

$$0,974 > |r_{xz}| > |r_{yz}| > |r_{xy}|$$

Stąd więc na podstawie dwóch metod stosowanych jednocześnie możemy przy powiązaniu ich związkami korelacji wielowymiarowej wyraźnie zwiększyć, jak to wyliczono, efektywność określenia (C_{Fe}). Ma to bardzo duże znaczenie praktyczne. Wyliczone równanie wiążące parametry $I_{\gamma\gamma}$, $I_{n\gamma}$ C_{Fe} jest typu

$$C_{Fe} - \bar{C}_{Fe} = A(I_{n\gamma} - \bar{I}_{n\gamma}) + B(I_{\gamma\gamma} - \bar{I}_{\gamma\gamma})$$

Współczynnik A, B wyliczono następująco:

$$A = \frac{r_{xz} - r_{yz}r_{xy}}{1 - r_{xy}^2} \cdot \frac{\sigma C_{Fe}}{\sigma I_{n\gamma}} = -1,52$$

$$B = \frac{r_{yz} - r_{zx} r_{xy}}{1 - r_{xy}^2} \cdot \frac{\sigma C_{Fe}}{\sigma I_{\gamma\gamma}} = -1,37$$

stąd równanie

$$C_{Fe} = -1,52 I_{n\gamma} - 1,37 I_{\gamma\gamma} + 48,1$$

Powiązania kilku niezależnych od siebie wielkości fizycznych można także dokonywać i w innych przypadkach. Zaprezentowana tu metoda działania może doprowadzić do korelacji wiążących bardzo ściśle kilka parametrów na podstawie gorszych zbieżności uzyskiwanych z korelacji dwuwymiarowych.

UWAGI KOŃCOWE

1. Uzyskiwane na podstawie związku funkcyjnego $I_{n\gamma} = I_{\gamma\gamma} (C_{Fe})$ wartości błędu bezwzględnego wynoszą $\pm 4,1\%$. Dla przykładu dla odczytanej z zależności przedstawionej na ryc. 1 wartości procentowej zawartości żelaza 25%, wartość prawdziwa będzie z największym prawdopodobieństwem zawierała się w przedziale 20,9% — 29,1%.

2. Uzyskiwane na podstawie metody neutron-gamma błędy bezwzględne dla omawianego przypadku wynoszą, jak to wykazano z analizy statystycznej, $\pm 4,46\%$.

3. Określenie procentowej zawartości żelaza, na podstawie związków uzyskanych dla konkretnego rejonu badań według podanej w artykule metody, daje

SUMMARY

In this article, the author presents the possibility of a complex utilization of radiometric logging methods, neutron-gamma profiling and gamma-gamma density logging for determining percentage of iron and establishing geophysical possibilities of identifying zones of economically profitable ores in borehole profiles. Figures 1—3 present the correlations between indices of neutron-gamma and gamma-gamma logging methods and the percentage of iron, as well as the correlation of neutron-gamma and gamma-gamma indices for zones mineralized with iron ores. The article presents the correlational analyses of the results; the correlational coefficients are given as well as total error in determining iron content on the basis of each of the methods described. Next, a multidimensional statistical analysis is carried out on the results obtained. On the basis of the two-dimensional correlational coefficients calculated and the average standard deviation, an equation of linear regression was formulated, simultaneously involving three parameters — the indices of neutron-gamma and gamma-gamma logging and the percentage of iron. The multiple correlation coefficient obtained markedly exceeds the two-dimensional correlation coefficient ($r = 0,974 > r_{zx} > r_{yz} > r_{xy}$).

The given method of utilizing multidimensional statistics in borehole geophysics for identifying iron ores is an efficient one. On the basis of several relationships among independent variables which are less obvious (smaller values of correlational coefficient), it is possible to obtain a single distinct relationship involving all variables simultaneously.

rezultaty i stąd istnieje możliwość geofizycznego wytypowania stref okruszczonych do dokładnych badań laboratoryjnych.

4. Wykorzystanie dwóch metod opartych na pomiarach niezależnych własności fizycznych, jednocześnie do określania procentowej zawartości żelaza daje lepsze efekty. Współczynnik korelacji rośnie i jest wyższy od wartości uzyskiwanych na podstawie analizy korelacyjnej dwuwymiarowej, a błędy maleją. Jednocześnie powiązanie w związek funkcyjny wskazań metody gamma-gamma, neutron-gamma oraz procentowej zawartości żelaza daje błędy określenia C_{Fe} rzędu $\pm 3\%$.

5. Uzyskanie zależności według wskazanej metody postępowania powinno stanowić podstawę interpretacji geofizycznej w odwiertach rudnych w każdym nowym rejonie. Za warunek podstawowy takiej interpretacji należy przyjąć uprzednio oszacowane popełnione błędy bezwzględne w określaniu procentowej zawartości żelaza.

LITERATURA

1. Majorowicz J. — Analiza korelacyjna związków statystycznych między wielkościami oporności R i procentowej zawartości żelaza C_{Fe} . Prz. geol. 1972, nr 1.
2. Szymborski A. — Wydzielanie złoża oraz wyznaczenie procentowej zawartości żelaza w rudzie ilmenitowo-magnetytowej w rejonie NE Polski metodami geofizyki wiertniczej. IG, 1970.

РЕЗЮМЕ

В статье описана возможность комплексного применения методов ядерного каротажа — нейтронного гамма-профилирования и гамма-гамма-профилирования — для определения процентного содержания железа и геофизического оконтуривания промышленных рудных тел в разрезах буровых скважин. На рисунках 1, 2, 3 показаны корреляционные зависимости между показаниями методов нейтронного гамма-профилирования и гамма-гамма-профилирования и содержанием железа, а также корреляции данных этих методов в зонах железорудных появлений. В статье представлен корреляционный анализ полученных результатов, указаны величины коэффициентов корреляции и абсолютных ошибок определения содержания железа каждым из представленных методов, а затем проведен многомерный статистический анализ полученных данных. На основании вычисленных коэффициентов двойной корреляции и средних стандартных отклонений составлено уравнение линейной регрессии, связывающее три параметра: показания нейтронного гамма-профилирования, гамма-гамма-профилирования и процентное содержание железа. Полученный коэффициент многосторонней корреляции явно превышает коэффициент двусторонней корреляции ($r = 0,974$ $r_{zx} > r_{yz} > r_{xy}$).

Представленная методика применения многомерной статистики в геофизических исследованиях железорудных месторождений дает положительные результаты. Исходя из нескольких, менее четко выраженных (меньшие значения коэффициента корреляции) зависимостей, можно получить одну четкую зависимость, связывающую все исследуемые параметры.