

Andrzej SZYMBORSKI

Perspektywy wykorzystania metod geofizyki wiertniczej do wykrywania i oceny jakości złóż rud żelaza

WSTĘP

Analiza perspektyw wykorzystania metod geofizyki wiertniczej do wykrywania i oceny jakości złóż rud żelaza dokonana została na podstawie prac doświadczalnych przeprowadzonych w jednym z rejonów poszukiwań Polski północno-wschodniej (A. Szymborski, 1964, 1968, 1969). Wykonane badania miały na celu określenie optymalnego kompleksu metod pomiarowych, umożliwiającego wydzielenie stref okruszczenia oraz znalezienie zależności pomiędzy mierzonymi parametrami fizycznymi a wyznaczoną, na podstawie analizy rdzenia, zawartością żelaza. W przypadku, gdyby taka empiryczna zależność istniała, byłoby możliwe określenie zawartości żelaza w rudzie na podstawie wykonanych w otworze pomiarów geofizycznych.

Kompleks zastosowanych metod pomiarowych obejmował: profilowanie oporności, profilowanie potencjałów polaryzacji naturalnej, profilowanie potencjałów polaryzacji elektrodowej, profilowanie gamma, profilowanie neutron-gamma, profilowanie gamma-gamma oraz profilowanie średnicy. Jak wynika z powyższego, nie wszystkie ogólnie stosowane w geofizyce wiertniczej metody pomiarowe zostały tu użyte. Braki aparaturowe uniemożliwiły wykorzystanie takich perspektywicznych metod pomiarowych, jak profilowanie podatności magnetycznej, profilowanie gamma-gamma selektywne oraz profilowanie neutron-gamma spektrometryczne.

Przy opracowywaniu wyników badań wykorzystane zostały materiały Zakładu Złóż Rud Metali IG oraz analizy badań laboratoryjnych, wykonywane na zlecenie Instytutu Geologicznego przez Przedsiębiorstwo Poszukiwań Geofizycznych w Warszawie. W artykule omówione zostaną możliwości wykorzystania poszczególnych metod.

PROFILOWANIE OPORNOŚCI

Strefę okruszczowaną można traktować jako osłodek dwuskładnikowy, zawierający minerały skałotwórcze o wysokiej oporności i minerały przewodzące — wtrącenia rudne. Wówczas:

$$\rho = \Pi_M P_t \rho_{SM} \quad [1]$$

gdzie: ρ — oporność elektryczna skały,
 P_t — parametr temperatury,
 Π_M — parametr przewodnictwa,
 ρ_{SM} — oporność elektryczna minerałów skałotwórczych wysokiej oporności,
 a parametr przewodnictwa

$$\Pi_M = f(K_{MQM}) \quad [2]$$

gdzie: K_M — objętościowa zawartość minerałów przewodzących,
 ρ_M — oporność elektryczna minerałów przewodzących.

Analizując zależność [2] (W. N. Dachnow, 1967) można dojść do wniosku, że gdy zawartość minerałów przewodzących w skale jest duża, to $\Pi_M \ll 1$ i oporność elektryczna jest bliska 0; gdy zawartość minerałów przewodzących $K_M < 5\%$, to przy braku wilgoci w skale $\Pi_M \rightarrow 1$, a oporność elektryczna skały $\rho \rightarrow \rho_{MS}$ i praktycznie nie zależy ona od zawartości przewodzących wtrąceń rudnych.

W przeważającej ilości przypadków w przewierconych otworach mamy do czynienia z granitami oraz w mniejszym lub większym stopniu okruszczowanymi norytami i anortozytami. Granity płonne mogą być łatwo wydzielone na podstawie profilowania gamma, natomiast metoda profilowania oporności pozwala wyodrębnić noryty i anortozyty o zmiennej oporności, uzależnionej od zawartości minerałów przewodzących.

Analizując własności elektryczne skał, dokładniejsze wyniki można by uzyskać wykorzystując oporności właściwe (J. Majorowicz, 1972). Ponieważ jednak pomiary laboratoryjne tego parametru nie były prowadzone, a wyliczenie oporności właściwej na podstawie wykonanych profilowań było niemożliwe, przy zestawieniu własności elektrycznych skał posługiwano się opornościami optymalnymi, odczytanymi z sondy B2,5AO,25M i średnimi, obliczonymi z sondy M2,5AO,25B. Stała średnica otworu oraz niezmiennie własności elektryczne płuczki umożliwiły uzyskanie porównywalnych wyników.

Na fig. 1 przedstawiono zależność oporności pozornej (optymalnej, zmierzonej sondą B2,5AO,25M) od zawartości żelaza w skale. Wyniki te otrzymano na podstawie pomiarów dokonanych w pięciu otworach wiertniczych. Jak wynika z tych danych najwyższą opornością charakteryzują się anortozyty, oporność norytów $\rho_N < 700 \Omega m$. Wraz ze wzrostem zawartości minerałów przewodzących oporność skał maleje i osiąga dla $C_{Fe} > 20\%$ wartości bliskie zera. Anortozyty są na ogół płonne i dzięki temu można z dużym prawdopodobieństwem twierdzić, że w przypadku, gdy dla danej warstwy $\rho < 700 \Omega m$, to mamy do czynienia z norytami. Należy jednak zauważyć, że w przypadku, gdy występują anortozyty okruszczo-

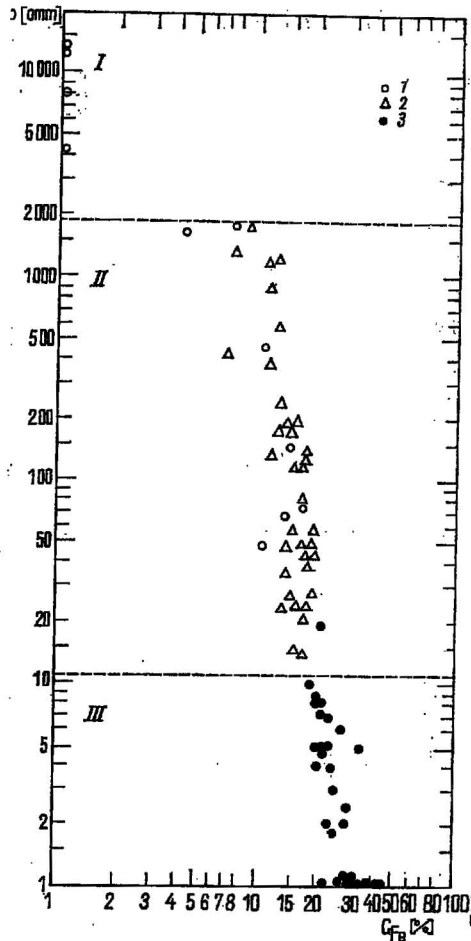
wane, ich oporność maleje i przyjęta wyżej zasada może doprowadzić do błędnych wniosków. Strefa bogato okruszczowana występuje w przedziale, w którym $\rho < 10 \Omega\text{m}$, co można stwierdzić na podstawie profilowania oporności (fig. 1). W omawianym przypadku strefa ta wiąże się z interwałem, w którym $C_{\text{Fe}} > 20\%$. Nie przesądza to jednak sprawy, że poza żelazem mogą występować tu i inne minerały przewodzące, których zawartość może być np. proporcjonalna do zawartości C_{Fe} . W dalszej

Fig. 1. Zależność oporności pozornej zmierzonej sondą B2,5AO,25M od zawartości żelaza w skale (na podstawie pomiarów w pięciu otworach wiertniczych)

Dependence of the apparent resistivity measured by the B2,5AO,25M probe on the iron content in the rock (based on measurements in five boreholes)

I — obszar zmienności anortozytów; II — obszar zmienności norytów, norytów okruszczowanych, anortozytów okruszczowanych; III — obszar zmienności rudy: 1 — anortozyt; 2 — noryt; 3 — ruda; ρ — oporność pozorna; C_{Fe} — zawartość żelaza w skale wg analizy chemicznej

I — anorthosites area; II — norites, ore-mineralized norites, ore-mineralized anorthosites area; III — ore area; 1 — anorthosite; 2 — norite; 3 — ore; ρ — apparent resistivity; C_{Fe} — iron content in the rock according to chemical results



części opracowania strefa bogato okruszczowana może być niekiedy nazywana „rudą”, -ale należy zaznaczyć, że pojęcie to nie ma żadnego związku z rudą rozumianą w sensie eksploatacyjnym.

Analogiczna zależność (oporności pozornej od zawartości żelaza) zestawiona została na podstawie pomiarów wykonanych sondą gradientową M2,5AO,25B w 7 otworach (fig. 2). Wartościom ρ odpowiadają tu średnie oporności wydzielonych warstw, oporność norytów $\rho_N < 2000 \Omega\text{m}$, a rudy, przy $C_{\text{Fe}} > 20\%$, $\rho < 10 \Omega\text{m}$.

Z powyższego wynika, że stosując metodę profilowania oporności możliwe jest wykrycie strefy bogato okruszczowanej oraz wydzielenie płonnych anortozytów.

Z uwagi na fakt, że na mierzoną oporność wpływa cały szereg różnych czynników (nie tylko zawartość minerałów przewodzących), zależności $\rho = f(C_{\text{Fe}})$ mogą mieć jedynie charakter wskaźnikowy. Przykład profilowania oporności przedstawiony jest na fig. 3.

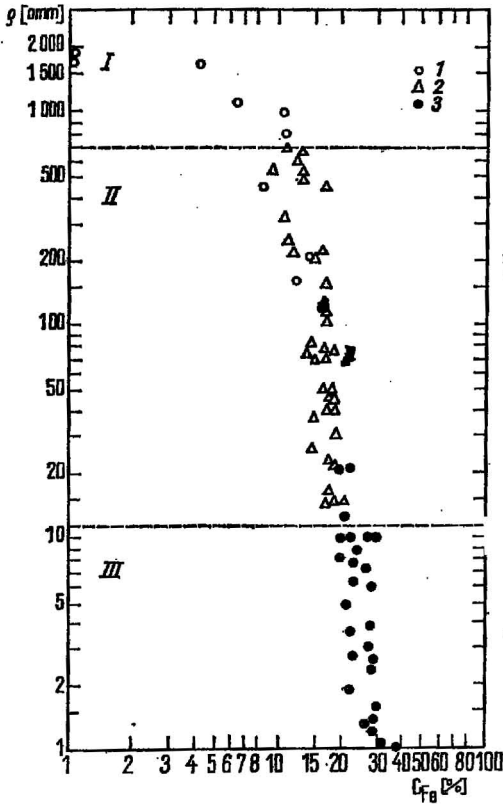


Fig. 2

Fig. 2. Zależność oporności pozornej zmierzonej sondą M2,5AO,25B od zawartości żelaza w skale (na podstawie pomiarów w siedmiu otworach wiertniczych)
 Dependence of apparent resistivity measured by the M2,5AO,25B probe on the iron content in the rock (based on measurement in seven boreholes)
 Objasnienia jak na fig. 1
 Explanations as in Fig. 1

Fig. 3. Przykład I pomiarów elektrometrii wiertniczej w strefie okruszczowanej
 Example I of well-logging in the ore-mineralized zone

C_{Fe} — zawartość żelaza w jednostkach umownych wg analizy chemicznej; PO — profilowanie oporności; PPE — profilowanie potencjałów elektrodowych; 1 — ruda; 2 — noryt; 3 — granit; 4 — anortozyt; 5 — noryto-anortozyt

C_{Fe} — iron content in conventional units according to chemical results; PO — resistivity logging; PPE — electrode potentials loggin; 1 — ore; 2 — norite; 3 — granite; 4 — anorthosite; 5 — norite-anorthosite

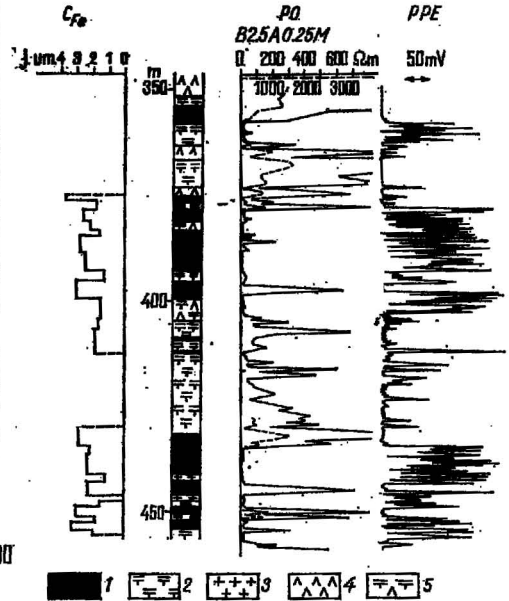


Fig. 3

PROFILOWANIE POTENCJAŁÓW POLARYZACJI NATURALNEJ

W badanym rejonie stałym składnikiem rud są siarczki, których zawartość waha się od kilku do kilkudziesięciu procent. W niektórych przypadkach rejestrowane anomalie dodatnie odpowiadają strefie okruszczowanej. Jednakże epomiary te, poza potwierdzeniem głębokości występo-

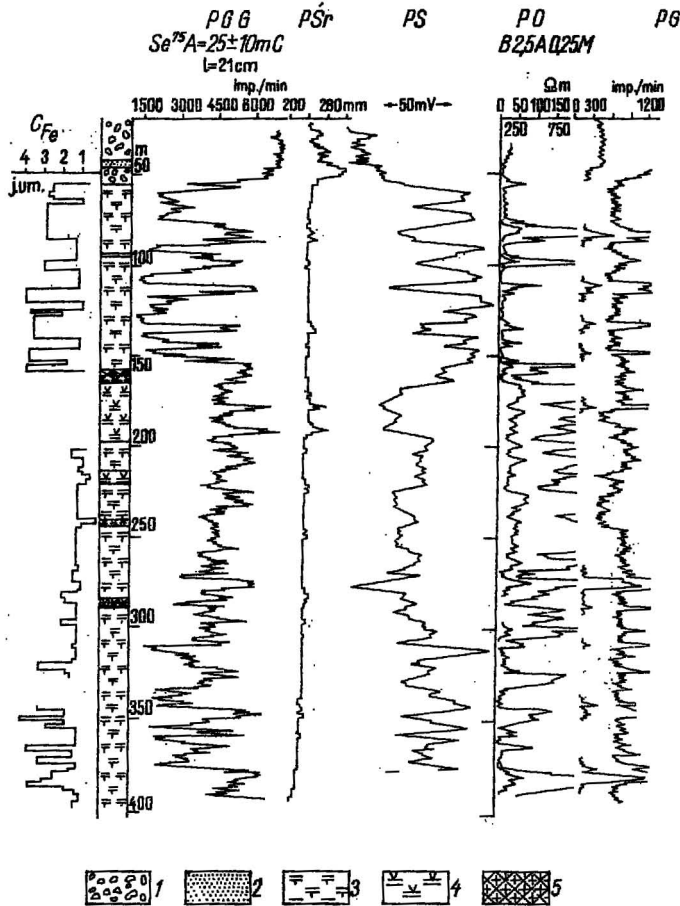


Fig. 4. Przykład II pomiarów geofizyki wiertniczej w strefie okruszczowanej

Example II of well-logging in the ore-mineralized zone

CFe — zawartość żelaza w jednostkach umownych wg analizy chemicznej; PGG — profilowanie gamma-gamma; PSr — profilowanie średnicy; PS — profilowanie potencjałów polaryzacji naturalnej; PO — profilowanie oporności; PG — profilowanie gamma; 1 — zlepnienc; 2 — piaskowiec; 3 — noryt; 4 — anortozyt; 5 — pegmatyt

CFe — iron content in conventional units according to chemical results; PGG — gamma-gamma logging; PSr — caliper logging; PS — self potential logging; PO — resistivity logging; PG — gamma ray logging; 1 — conglomerate; 2 — sandstone; 3 — norite; 4 — anorthosite; 5 — pegmatite

wania serii okruszczowanej, na ogół nie pozwalają na uzyskanie dodatkowych informacji. Niekiedy, na podstawie dodatknej anomalii PS zlokalizowanej poza strefą rudną, udaje się wydzielać strefę lokalnie pod-

wyższej koncentracji siarczków (fig. 4, głęb. 157,0—167,0 m)¹. Należy zaznaczyć, że wnioski wyciągane na podstawie profilowania PS mogą mieć jedynie charakter jakościowy.

PROFILOWANIE POTENCJAŁÓW POLARYZACJI ELEKTRODOWEJ

Profilowanie potencjałów polaryzacji elektrodowej jest metodą o dużej czułości i dużej zdolności rozdzielczej (fig. 3, 5). Wydzielenie cienkich przewarstwień rudnych ograniczone jest praktycznie jedynie możliwością odczytu granic z diagramu pomiarowego i minimalną prędkością pomiaru. Przy stosowaniu np. głębokościowej skali zapisu 1:20 istnieje możliwość wydzielenia przewarstwień o miąższościach $h = 2-5$ cm.

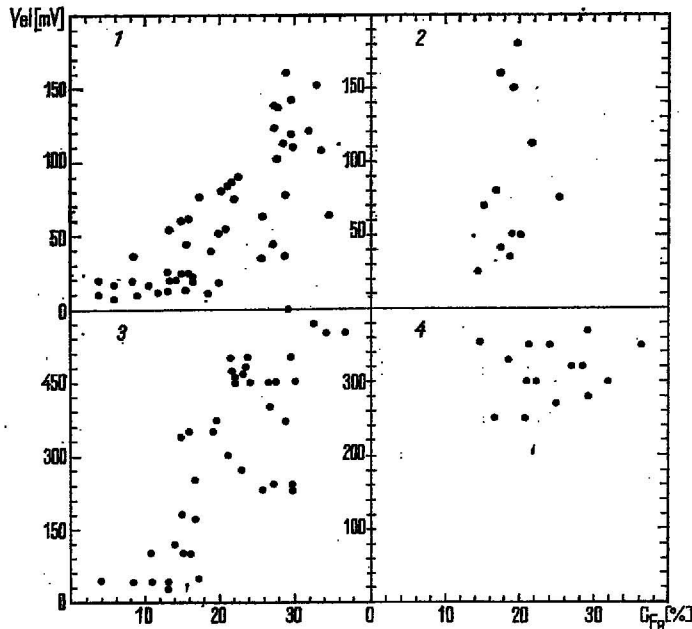


Fig. 5. Zależność potencjałów elektrodowych od zawartości żelaza w skale (dla czterech otworów wiertniczych)

Dependence of the electrode potentials on the iron content in the rock (for four boreholes)

V_{el} — potencjał elektrodowy; C_{Fe} — zawartość żelaza w skale wg analizy chemicznej

V_{el} — electrode potential; C_{Fe} — iron content in the rock according to chemical results

Na fig. 5 zestawiono zależność $V_{el} = f(C_{Fe})$ dla 4 otworów wiertniczych. Wynika z niej, że strefa okruszczowana charakteryzuje się anomalią, której wielkość nie świadczy jednakże o jakości złoża. Aczkolwiek często wzrost amplitudy anomalii odpowiada wzrostowi zawartości ze-

¹ Głębokość mierzona od poziomu umownego.

laza, to jednak w wielu przypadkach w rudzie rejestrowane są anomalie o niewielkiej amplitudzie.

Reasumując można stwierdzić, że na podstawie omawianej metody pomiarowej możliwe jest: 1 — wykrycie oraz wyznaczenie granic i miąższości strefy okruszcowanej; 2 — zbadanie struktury złoża.

PROFILOWANIE NEUTRON-GAMMA

Aczkolwiek profilowanie neutron-gamma termiczne i profilowanie neutron-gamma spektrometryczne umożliwiają uzyskanie pozytywnych rezultatów na złożu rud żelaza (duży przekrój czynny Fe na wychwyty neutronów termicznych i wysoka energia kwantów gamma z wychwyty radiacyjnego), to jednak wyniki standardowego profilowania neutron-gamma nie upoważniają do kontynuowania tej metody dla tych celów.

Otrzymane rezultaty nie wnoszą nic nowego w porównaniu z wynikami uzyskanymi na podstawie innych metod pomiarowych. Zarówno duży rozrzut punktów, jak i niewielkie zróżnicowanie zależności wskazań sondy neutron-gamma od zawartości żelaza w skale uniemożliwiają wykorzystanie wyników tego profilowania przy wykrywaniu i ocenie jakości strefy okruszcowanej.

PROFILOWANIE GAMMA-GAMMA

Zarówno profilowanie gamma-gamma selektywne, jak i gęstościowe, jak wynika z literatury, znajdują zastosowanie przy wykrywaniu i ocenie jakości złóż rud żelaza. (W. A. Arcybaszew, 1972; W. N. Dachnow, 1962; E. M. Filippow, 1973; W. A. Mejer, 1960; G. M. Woskobochnikow, 1962). Ponieważ jednak metody te opierają się na różnych zjawiskach fizycznych, możliwość wykorzystania ich przy wykrywaniu złóż rud żelaza zostanie omówiona oddzielnie.

PROFILOWANIE GAMMA-GAMMA SELEKTYWNE

Uzyskanie wyników uzależnionych wyłącznie lub głównie od efektywnej wartości liczby atomowej (Z_{ef}) jest z punktu widzenia techniki pomiarowej rzeczą skomplikowaną. Niemniej jednak, ideą metody jest uzyskanie zależności

$$I_{\gamma\gamma} = f(Z_{ef}) \quad [3]$$

i dlatego, omawiając możliwość wyznaczenia zawartości żelaza, należy przeanalizować zależność:

$$Z_{ef} = f(C_{Fe}) \quad [4]$$

Metoda określania Z_{ef} skał opracowana przez J. A. Czubka (J. A. Czubek, 1965a, 1965b; J. A. Czubek, A. Tarnowiecki, 1965) pozwala wyznaczyć tę wartość z nomogramu przedstawiającego zależność

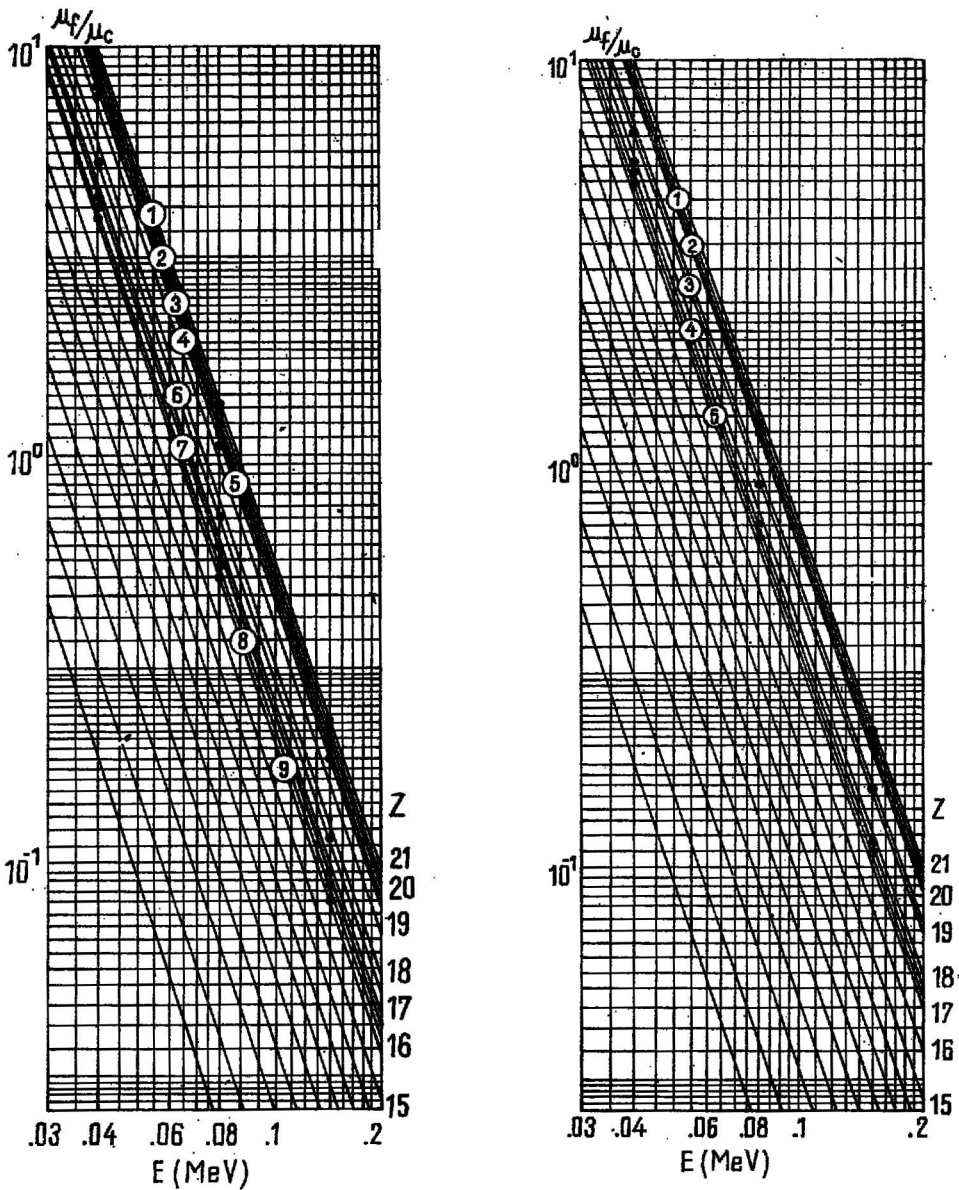


Fig. 6. Zależność wartości $\frac{\mu_f}{\mu_c}$ od energii fotonu gamma obliczona dla dziewięciu analiz chemicznych rud żelaza (otwór wiertniczy A-1)

Dependence of the $\frac{\mu_f}{\mu_c}$ value on the gamma photon energy calculated for nine chemical analyses of iron ores (borehole A-1)

1-9 — numery analiz chemicznych; μ_f — fotoelektryczny współczynnik absorpcji; μ_c — komptonowski współczynnik rozpraszania dla ośrodków jednopierwiastkowych o różnej wartości Z ; Z — liczba atomowa; E — energia fotonu gamma
 1-9 — chemical analysis numbers; μ_f — photoelectric coefficient of absorption; μ_c — Compton scattering coefficient for one-element media of different Z value; Z — atomic number; E — gamma photon energy

$$\frac{\mu_f}{\mu_c} = f(E) \quad [5]$$

gdzie: μ_f — fotoelektryczny współczynnik absorpcji,
 μ_c — komptonowski współczynnik rozpraszania dla ośrodków
 jednopierwiastkowych o różnej wartości Z .

Identyczną funkcję można obliczyć dla ośrodka złożonego (np. dla skały), wówczas:

$$\frac{\mu_f}{\mu_c} = \frac{\sum_i p_i \frac{\sigma_{fi}(E)}{A_i}}{\beta \sigma_c(E)} \quad [6]$$

gdzie: $\sigma_{fi}(E)$ — przekrój czynny (liczony na atom) dla efektu fotoelektrycznego i -tego pierwiastka,
 $\sigma_c(E)$ — całkowity komptonowski przekrój czynny (liczony na elektron);
 p_i — procentowa zawartość (wagowa) i -tego pierwiastka w badanym ośrodku;
 A_i — ciężar atomowy i -tego pierwiastka;
 Z_i — liczba atomowa i -tego pierwiastka;

$$\beta = \sum_i p_i \frac{Z_i}{A_i}$$

Z_{ef} badanej skały można określić nanosząc na nomogram (paletka) krzywe obliczone ze wzoru [6].

Zależność [4] przeanalizowano na podstawie danych uzyskanych z otworów A-1 i A-8. Zależność wartości $\frac{\mu_f}{\mu_c}$ od energii fotonu gamma, obliczoną dla dziewięciu analiz chemicznych z otworu A-1, przedstawioną na fig. 6, a analogiczną zależność dla otworu A-8 na fig. 7. Odczytane z rysunków 6 i 7 wartości Z_{ef} zestawiono z wynikami analiz chemicznych i przedstawiono w postaci zależności efektywnej wartości liczby atomowej od procentowej zawartości żelaza w skale (fig. 8).

Jak wynika z figury 8, zależność $Z_{ef} = f(C_{Fe})$ istnieje i może być podstawą wyznaczania zawartości żelaza w rudzie. W chwili obecnej

Fig. 7. Zależność wartości $\frac{\mu_f}{\mu_c}$ od energii fotonu gamma obliczona dla pięciu analiz chemicznych rud żelaza (otwór A-8)

Dependence of the $\frac{\mu_f}{\mu_c}$ value on the gamma photon energy calculated for five chemical analyses of iron ores (borehole A-8)

Objaśnienia jak na fig. 6
 Explanations see Fig. 6

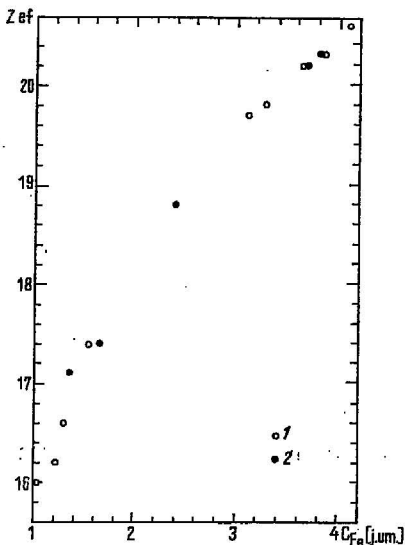


Fig. 8. Zależność efektywnej wartości liczby atomowej od procentowej zawartości żelaza w rudzie

Dependence of the effective atomic number on the iron percentage in ore

1 — otwór A-1; 2 — otwór A-8; Z_{ef} — efektywna wartość liczby atomowej; C_{Fe} — zawartość żelaza według analizy chemicznej

1 — borehole A-1; 2 — borehole A-8; Z_{ef} — effective atomic number; C_{Fe} — iron content according to chemical results

trudno jest jednakże określić dokładność wyznaczenia zawartości żelaza w skale w warunkach *in situ*, ponieważ decydować o niej będzie zarówno rodzaj aparatury pomiarowej, jak również skład chemiczny rudy.

Jeżeli w rudzie żelaza występować będzie inny metal, wyznaczenie zawartości żelaza będzie możliwe w przypadku, gdy: 1 — będzie ono składnikiem dominującym; 2 — gdy zawartość jego będzie proporcjonalna do zawartości innych składników rudy.

Profilowanie gamma-gamma selektywne (w ścisłym znaczeniu tego słowa) nie było wykonywane z powodu braku aparatury własnej konstrukcji oraz niemożliwości zakupienia jej z importu. Fig. 4 przedstawia wyniki profilowania gamma-gamma uzyskane sondą pomiarową ze źródłem ^{75}Se .

PROFILOWANIE GAMMA-GAMMA GĘSTOŚCIOWE

Wykonując profilowanie gamma-gamma gęstościowe sondą rejestrującą promieniowanie o odpowiednio dużej energii, możliwe jest uzyskanie wyników, dla których słuszna będzie zależność:

$$I_{\gamma\gamma} = f(\delta) \quad [7]$$

Jeżeli więc będzie istniała odpowiednio ścisła zależność:

$$\delta = f(C_{Fe}) \quad [8]$$

możliwe będzie określenie zawartości żelaza w rudzie na podstawie profilowania gamma-gamma. W celu sprawdzenia istnienia zależności [8] zestawiono wyniki badań laboratoryjnych rdzeni wiertniczych. Ponieważ zawartość żelaza wyznaczana była na podstawie próbek bruzdowych, a ciężar objętościowy skały określany był punktowo, każdej analizie

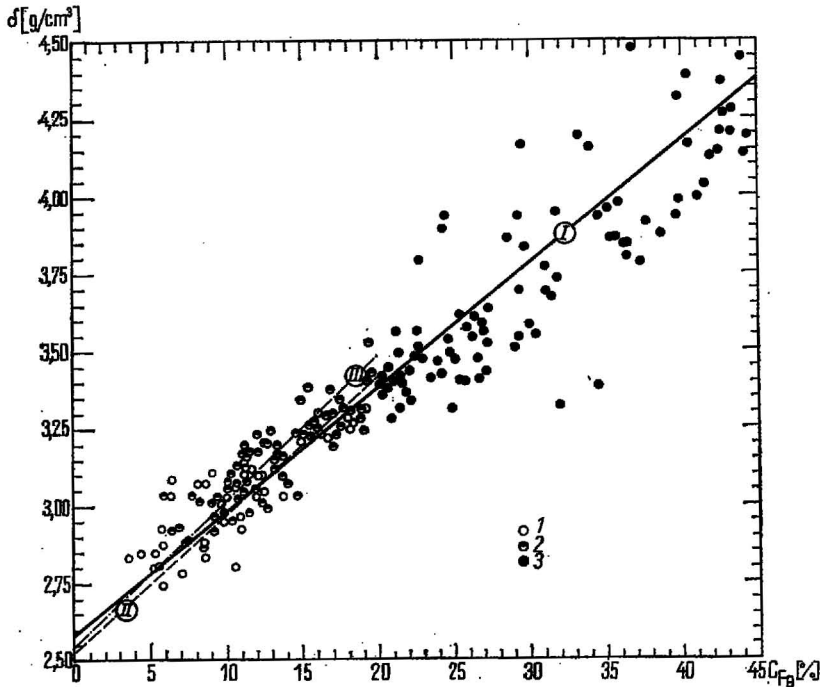


Fig. 9. Zależność ciężaru objętościowego od zawartości żelaza w skałe wg badań laboratoryjnych

Dependence of the density on the iron content in the rocks based on laboratory tests

I — zależność dla anortozytów, norytów i rudy; II — zależność dla anortozytów; III — zależność dla norytów; 1 — anortozyt; 2 — noryt; 3 — ruda; δ — ciężar objętościowy; C_{Fe} — zawartość żelaza

I — dependence for anorthosites, norites, and ore; II — dependence for anorthosites; III — dependence for norites; 1 — anorthosite; 2 — norite; 3 — ore; δ — density; C_{Fe} — iron content

chemicznej przyporządkowana została uśredniona wartość ciężaru objętościowego. Zależność ciężaru objętościowego od zawartości żelaza w skałe przedstawiona została na fig. 9.

Uśredniając uzyskane rezultaty metodą najmniejszych kwadratów otrzymano zależność:

$$\delta = 0,04 C_{Fe} + 2,58 \quad [9]$$

Dla anortozytów zależność [8] wyraża się wzorem:

$$\delta_A = 0,04 C_{Fe} + 2,53 \quad [10]$$

a dla norytów:

$$\delta_N = 0,047 C_{Fe} + 2,55 \quad [11]$$

Powyzsze rezultaty są bardzo zbliżone do wyników podanych w pracy M. Subiety (materiały rękopiśmienne). Rozrzut punktów widoczny na

fig. 9 spowodowany został najprawdopodobniej faktem określania δ i C_{Fe} z różnych próbek rdzeni i punktowym wyznaczaniem ciężaru objętościowego.

Można zatem stwierdzić, że dla badanego złoża zależność [8] istnieje i profilowanie gamma-gamma gęstościowe może być podstawą wyznaczania zawartości żelaza w skale.

Chcąc praktycznie znaleźć w warunkach *in situ* zależność wskazań sondy gamma-gamma od zawartości żelaza w skale, należy profilowanie to wykonywać w jednostkach porównywalnych. Możliwe jest to do przeprowadzenia albo przez standaryzację sond pomiarowych, albo też przez znalezienie w badanym rejonie warstwy referowej.

Ponieważ standaryzacja wykonywana przed pomiarami przy pomocy standaryzatora płaskiego nie dała pozytywnego rezultatu, wskazania sondy gamma-gamma określano w jednostkach anortozytów. (Występujące w kompleksie skał krystalicznych anortozyty nie są na ogół okruszcowane, a wskazania sondy gamma wykluczają granity, przyjmując dla nich wartości maksymalne). W takich warunkach możliwe było określenie wskazań sondy dla „linii anortozytów” i przyjęcie za jednostkę rejestrowanego wychylenia.

Na fig. 10 przedstawiona jest zależność wskazań sondy gamma-gamma od zawartości żelaza w skale, otrzymana na podstawie pomiarów sondą ze źródłem ^{60}Co (o długości $l = 40$ cm) z trzech otworów (A-19, A-21, A-23). Przed zestawieniem wyników analiz chemicznych i danych geofizycznych przeprowadzono korelację głębokościową wykresów pomiaro-

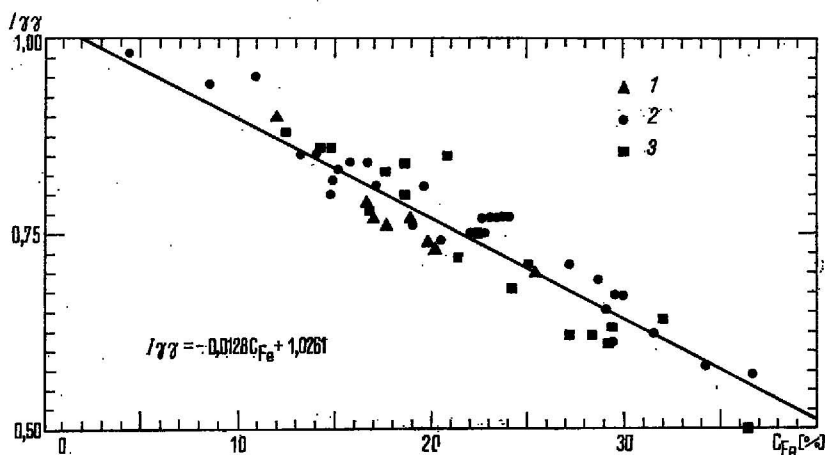


Fig. 10. Zależność wskazań sondy gamma-gamma (w jednostkach względnych) od zawartości żelaza w skale

Dependence of the readings of the gamma-gamma probe (in relative units) on the iron content in the rock

1 — otwór A-19; 2 — otwór A-21; 3 — otwór A-23; $I_{\gamma\gamma}$ — wskazania sondy gamma-gamma; C_{Fe} — zawartość żelaza wg analizy chemicznej

1 — borehole A-19; 2 — borehole A-21; 3 — borehole A-23; $I_{\gamma\gamma}$ — readings of the gamma-gamma probe; C_{Fe} — iron content according to chemical results

wych i danych wiertniczych. Każdej bruzdowej analizie chemicznej przyporządkowano zarejestrowaną anomalię geofizyczną. Dla anomalii o symetrycznym kształcie wskazania sondy utożsamiano z wartością minimalną. W przypadku występowania anomalii złożonych (pakiet rudny), wskazania sondy określano drogą geometrycznego uśredniania. Ponieważ w omawianym przypadku zarejestrowane anomalie były na ogół anomaliami o dużej miąższości, zrezygnowano ze zmiany anomalii dynamicznej na statyczną.

Na przykładzie otworów A-19, A-21, A-23 stwierdzono, że istnieje zależność pomiędzy wskazaniami sondy gamma-gamma i zawartością żelaza w skale.

Współczynnik korelacji $K = -0,9534$, a przedział ufności dla współczynnika korelacji — obliczony z prawdopodobieństwem 0,95 — wynosi $-0,9774 < K < -0,9295$. Omawiana zależność wyraża się wzorem:

$$I_{\gamma\gamma} = -0,0128 C_{Fe} + 1,0261 \quad [12]$$

gdzie: $I_{\gamma\gamma}$ — wskazania sondy gamma-gamma w jednostkach względnych;

C_{Fe} — procentowa zawartość żelaza w skale;
przeciętny błąd wyznaczania C_{Fe} wynosi $\pm 3,4\%$.

Wzór [12] świadczy również o prawidłowości przyjęcia za reper „linii anortozytów”. Jeśli $C_{Fe} = 0$, to $I_{\gamma\gamma} = 1,0261$, a więc różni się od przyjętego założenia jedynie o 2,6%.

PROFILOWANIE PODATNOŚCI MAGNETYCZNEJ

Warunkiem wykorzystania profilowania podatności magnetycznej przy wyznaczaniu procentowej zawartości żelaza w rudzie jest istnienie w badanym rejonie zależności:

$$\kappa = f(C_{Fe}) \quad [13]$$

Powyższa funkcja zachodzić może oczywiście tylko wówczas, gdy występować będzie zależność całkowitej zawartości żelaza od zawartości frakcji magnetycznej (C_{Fm}):

$$C_{Fe} = f(C_{Fm}) \quad [14]$$

W przypadku, gdyby badane złożo nie było monomineralne, tzn. gdyby w skład rudy wchodziło kilka minerałów magnetycznych i niemagnetycznych oraz nie byłaby spełniona zależność [14], na podstawie profilowania podatności magnetycznej możliwe byłoby wyznaczenie jedynie zawartości żelaza magnetycznego, natomiast określenie C_{Fe} byłoby możliwe tylko na podstawie metod z zakresu radiometrii wiertniczej.

W celu sprawdzenia zależności [13] na podstawie wyników badań ²

² Badania wykonano w I Pracowni Parametrów Fizycznych Skal PPG oraz w IG.

zestawiono zależność podatności magnetycznej rdzeni wiertniczych od całkowitej zawartości żelaza w skale. Ponieważ do analiz chemicznych próbki pobierane były bruzdowo, a podatność magnetyczną określano punktowo, każdej wartości określającej zawartość żelaza przyporządkowano uśrednioną z analizowanego odcinka wartość κ (fig. 11).

Jak wynika z fig. 11, zależność [13] istnieje i dla badanego złoża przyjmuje postać:

$$\kappa = 0,41 C_{Fe}^{1,65} \cdot 10^3 \quad [15]$$

Wzór [15] obliczony został z wartości uśrednionych przedziałami metodą najmniejszych kwadratów.

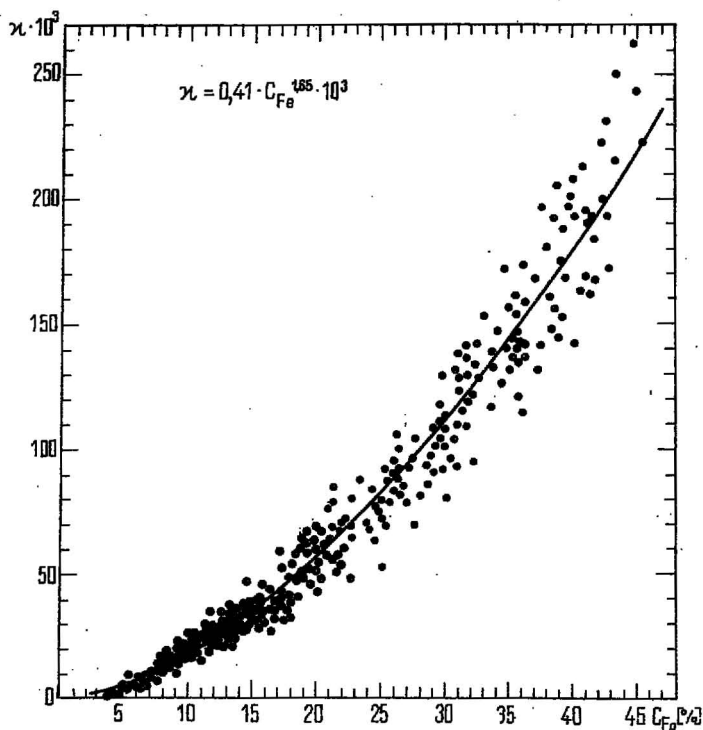


Fig. 11. Zależność podatności magnetycznej od procentowej zawartości żelaza w skale

Dependence of the magnetic susceptibility on the iron content in the rock

κ — podatność magnetyczna; C_{Fe} — zawartość żelaza według analizy chemicznej

κ — magnetic susceptibility; C_{Fe} — iron content according to chemical results

Analiza własności magnetycznych skał na podstawie zależności [13] pozwala stwierdzić, że dla badanego rejonu profilowanie podatności magnetycznej jest metodą perspektywiczną, umożliwiającą: a — wydzielenie

oraz wyznaczenie granic i miąższości strefy okruszcowanej; b — określenie procentowej zawartości żelaza w rudzie.

Profilowanie podatności magnetycznej wraz z profilowaniem gamma-gamma mogłyby znaleźć ponadto zastosowanie przy — proponowanym przez J. Majorowicza (1973) — wyznaczeniu zawartości żelaza na podstawie wielowymiarowej analizy korelacyjnej.

WNIOSKI

Pomiary z zakresu geofizyki wiertniczej umożliwiają w badanym rejonie otrzymanie danych niezbędnych przy dokumentowaniu złoża. Aczkolwiek dane te mogą być również uzyskane na podstawie wierceń, to jednak z uwagi na niepełny uzysk rdzenia, ewentualne błędy przy jego układaniu, samą technikę prac wiertniczych oraz pomyłki przy sporządzaniu profilu wiertniczego, wyniki interpretacji geofizycznej dokładniej odtwarzają warunki naturalnego występowania złoża.

Pomiary geofizyczne nie dostarczają jednak wszystkich danych niezbędnych przy dokumentowaniu złoża i z tego też względu całkowite wyeliminowanie rdzeniowania nie jest możliwe. Wydaje się, że w takiej sytuacji optymalnym rozwiązaniem będzie udokumentowanie złoża na podstawie profiliw geologiczno-geofizycznych, w których zostaną skorelowane dane geofizyczne i wiertnicze, granice stref okruszczonych i rudnych wyznaczone na podstawie odpowiednio zdetalizowanych badań geofizycznych, a procentowa zawartość metali w rudzie wyznaczona na podstawie analizy chemicznej rdzeni wiertniczych. W przypadku mniejszego uzysku rdzenia w strefie okruszcowanej celowe jest również — z uwagi na niereprezentatywność materiału poddanego analizie — porównanie procentowej zawartości żelaza otrzymanej drogą pomiarów geofizycznych i analiz chemicznych.

Optymalny kompleks metod pomiarowych w badanym rejonie winien obejmować: profilowanie gamma, profilowanie gamma-gamma, profilowanie oporności, profilowanie PS, profilowanie potencjałów polaryzacji elektrodowej oraz profilowanie średnicy.

Na podstawie tych metod możliwe jest: a — wyznaczenie granic i miąższości strefy okruszcowanej oraz bogato okruszcowanej (strefy rudnej); b — wyznaczenie cienkich, kilkucentymetrowych, płonnych i okruszczonych przewarstwień; c — wyznaczenie procentowej zawartości żelaza w rudzie z przeciętnym błędem $\pm 3,4\%$; d — wytypowanie odcinków rdzeni do analiz chemicznych.

Wyżej wymieniony kompleks metod pomiarowych winien być uzupełniony profilowaniem podatności magnetycznej.

*

Autor pragnie podziękować drowi Marianowi Subiecie, pracownikowi Zakładu Złóż Rud Metali IG, za wykazanie zainteresowania tematem niniejszego artykułu i udostępnienie wszelkich niezbędnych do opraco-

wania materiałów. Autor dziękuje również pracownikom I Zespołu Geofizyki Wiertniczej PPG za wykonanie pomiarów doświadczalnych oraz pracownikom Zakładu Geofizyki Wiertniczej PPG za pomoc przy opracowaniu niniejszego tematu.

Zakład Geofizyki
Instytutu Geologicznego
Warszawa, ul. Rakowiecka 4
Nadesłano dnia 4 lutego 1974 r.

PIŚMIENNICTWO

- CZUBEK J. A. (1965a) — Physical possibilities of gamma-gamma logging. Symposium on Radioisotope Instruments in Industry and Geophysics (mat. konf.). Warszawa.
- CZUBEK J. A. (1965b) — Zasada podobieństwa w zastosowaniu do pomiarów gamma-gamma gęstości skał. Geofiz. i Geol. naft. nr 4, p. 121—133. Kraków.
- CZUBEK J. A., TARNOWIECKI A. (1965) — Wpływ składu chemicznego skał przy określaniu ich gęstości metodą gamma-gamma. Geofiz. i Geol. naft., nr 1—3, p. 36—41. Kraków.
- MAJOROWICZ J. (1972) — Analiza korelacyjna związków statystycznych między wielkościami oporności R i procentowej zawartości żelaza C_F . Prz. geol., 20, p. 30—32, nr 1. Warszawa.
- MAJOROWICZ J. (1973) — Ujęcie związków między wskazaniami metod neutron-gamma oraz gamma-gamma a procentową zawartością żelaza. Prz. geol., 21, p. 34—36, nr 1. Warszawa.
- SZYMBORSKI A. (1964) — Wydzielenie i przemysłowa ocena złóż rud żelaza. Arch. PPG (maszynopis). Warszawa.
- SZYMBORSKI A. (1968) — Wykrywanie złóż surowców stałych metodami geofizyki wiertniczej. Nukleonika, 13, p. 561—570, nr 4—5. Warszawa.
- SZYMBORSKI A. (1969) — Wydzielenie i ocena jakości złóż rud żelaza. Arch. PPG (maszynopis). Warszawa.
- АРЦИБАШЕВ В. А. (1972) — Ядерногеофизическая разведка. Атомиздат. Москва.
- ДАХНОВ В. Н. (1967) — Электрические и магнитные методы исследования скважин. Изд. Недра. Москва.
- ДАХНОВ В. Н. (1962) — Интерпретация результатов геофизических исследований разрезов скважин. Гостоптехиздат. Москва.
- ФИЛИППОВ Е. М. (1973) — Ядерная геофизика. Изд. Наука, Сибирское Отделение. Новосибирск.
- МЕЙЕР В. А. (1960) — Картаж скважин при разведке полиметаллических месторождений. Изд. Ленингр. Универс.
- ВОСКОБОЙНИКОВ Г. М. (1962) — К вопросу о количественных определениях содержания тяжелых металлов в руде по данным селективного каротажа. Геофизич. Сб. № 3. Свердловск.

Анджей ШИМБОРСКИ

**ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДОВ ПРОМЫСЛОВОЙ ГЕОФИЗИКИ
ДЛЯ ОТКРЫТИЯ И ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЖЕЛЕЗНЫХ РУД**

Резюме

Анализ использования методов промышленной геофизики для обнаружения и оценки качества месторождений железных руд произведен на основе экспериментальных работ, выполненных в одном из поисковых районов на СВ Польши. Проанализированы возможности использования каротажа сопротивлений, PS, метода электродных потенциалов, нейтрон-гамма и гамма-гамма каротажа. Проведенные измерения показали возможность выделения зоны оруденения по данным глубинного электрокаротажа и определения содержания железа в породе по данным гамма-гамма каротажа. Для трех буровых скважин, при помощи сравнительных единиц, определено содержание железа в породе с ошибкой $\pm 3,4\%$. На основе теоретических подсчетов показана перспективность применения селективного гамма-гамма каротажа. Путем анализа результатов лабораторных исследований, установлена зависимость магнитной восприимчивости от содержания железа в породе. Определен оптимальный комплекс исследований для поискового района.

Andrzej SZYMBORSKI

**PROSPECTS TO USE WELL-LOGGING METHODS TO DISCOVER
AND EVALUATE IRON ORE DEPOSITS**

Summary

The feasibility of well-logging methods to discover and evaluate iron ore deposits has been studied on the basis of an experimental survey completed in one of the work areas in NE Poland. The possible utilization of resistivity logging, self potential logging, electrode potentials logging, neutron-gamma and gamma-gamma logging has been considered. Electrical well-logging methods proved effective in tracing out ore-mineralized zones, and the iron content could be determined by gamma-gamma logging. Using relative units the iron content has been determined in three boreholes with an error of $\pm 3.4\%$. Theoretical calculations indicate the feasibility to apply selective gamma-gamma logging in the near future. Laboratory tests revealed the dependence of the magnetic susceptibility on the iron content in the rocks. A set of the most effective surveys for the work area has been defined.