

# ZASTOSOWANIE METOD STATYSTYCZNYCH DO WSPOMAGANIA GEOLOGICZNEJ INTERPRETACJI PROFILOWAŃ GEOFIZYKI OTWOROWEJ

Monika Kaźmierczuk

Zakład Geofizyki, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Za perspektywiczne pod względem obecności węglowodorów, głównie gazu ziemnego, uznaje się mioceńskie utwory zapadliska przedkarpackiego [3]. Rozmieszczenie tych utworów na terenie Polski przedstawiono na rys. 1. Utwory mioceńskie zbudowane są z cienkich warstewek piaskowców, mułowców i ilowców. Miąższość takich warstewek jest rzędu centymetra, a nawet milimetrów. Jednym z zadań geofizyki otworowej jest poszukiwanie warstw porowatych nasyconych węglowodorami.



Rys. 1. Mapa lokalizacji zapadliska przedkarpackiego.

Porowatość jest jednym z podstawowych parametrów decydujących o możliwości występowania nagromadzeń węglowodorów w skale. Definiuje się ją jako objętość pustych przestrzeni pomiędzy ziarnami mineralnymi w skale. Piaskowce zwykle charakteryzują się dużą porowatością i dzięki temu może w nich dochodzić do akumulacji ropy naftowej i gazu ziemnego oraz wód mineralnych o znaczeniu przemysłowym. Specyfiką utworów mioceńskich zapadliska przedkarpackiego jest występowanie nagromadzeń węglowodorów nie zawsze w skałach piaskowcowych, ale również w mułowcach.

## 1 ŹRÓDŁA DANYCH GEOFIZYKI OTWOROWEJ

### 1.1 Profilowania geofizyki otworowej

Profilowania geofizyki otworowej są ciągłymi pomiarami parametrów petrofizycznych skał wzdłuż otworu wiertniczego (czyli w funkcji głębokości). Przedmiotem pomiaru są między innymi: naturalna promieniotwórczość ośrodka skalnego, jego oporność elektryczna (zdolność skał do przewodzenia prądu elektrycznego), gęstość i porowatość. Podstawą rozróżnienia poszczególnych typów skał jest fakt, że wspomniane parametry petrofizyczne przyjmują określone wartości dla różnych typów skał, które dodatkowo mogą być nasycone różnymi mediami złożowymi.

Oznaczenia profilowań wykorzystywanych w analizach przedstawiono w tabeli 1. W otworze J4, odwierconym na jednym z mioceńskich złóż gazu w zapadlisku przedkarpackim, nieco zróżnicowane zestawy profilowań wykonano w trzech interwałach głębokościowych (42.9-147.8 m, 156.7-894.5 m, 905.0-1828.0 m) różniących się warunkami pomiarowymi.

### 1.2 Rdzenie wiertnicze

Pobór rdzenia, czyli fragmentu skały, w czasie wiercenia otworu jest zabiegiem kosztownym, dlatego też odbywa się tylko na wyznaczonych głębokościach. Z tego względu poprawna geologiczna interpretacja profilowań geofizyki otworowej jest zagadnieniem kluczowym w przemyśle naftowym.

Tabela 1. Oznaczenia profilowań geofizyki otworowej.

OZNACZENIE (JEDNOSTKA)	OPIS PROFILOWANIA	
ILD ( $\Omega\text{m}$ )	profilowania oporności o zróżnicowanej pionowej rozdzielczości i radialnym zasięgu badania	
ILM ( $\Omega\text{m}$ )		
LL3 ( $\Omega\text{m}$ )		
LLD ( $\Omega\text{m}$ )		
LLS ( $\Omega\text{m}$ )		
MSFL ( $\Omega\text{m}$ )		
HO01 ( $\Omega\text{m}$ )		
HO02 ( $\Omega\text{m}$ )		
HO03 ( $\Omega\text{m}$ )		
HO06 ( $\Omega\text{m}$ )		
HO09 ( $\Omega\text{m}$ )		
HO12 ( $\Omega\text{m}$ )		
GR (API)	profilowanie gamma – intensywność naturalnej promieniotwórczości	profilowania radiometryczne
POTA (%)	koncentracja potasu	
URAN (ppm)	koncentracja uranu	
THOR (ppm)	koncentracja toru	
GG (API)	profilowanie gamma spektrometryczne – całkowita intensywność	
GRS (API)	profilowanie gamma spektrometryczne – intensywność po odjęciu wpływu uranu	
RHOB ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	gęstość objętościowa	
NPHI (%)	porowatość neutronowa	

### 1.3 Opróbowanie próbnikiem złoża

Celem poboru płynów złożowych jest określenie zawartości w przestrzeni porowej skały wody, ropy naftowej lub gazu ziemnego. Opróbowanie odbywa się na wcześniej wyznaczonych głębokościach i umożliwia wysunięcie wniosków na temat charakteru płynów nasycających badaną skałę.

## 2 W CZYM TKWI PROBLEM?

Sondy, które wykonują pomiar parametrów petrofizycznych w otworze wiertniczym, charakteryzują się określoną pionową rozdzielczością, znacznie mniejszą niż miąższość warstewek piaskowców, mułowców czy iłowców w utworach miocenkich. Z tego też względu interpretacja pomierzonych parametrów petrofizycznych we wspomnianych utworach nie jest zagadnieniem łatwym. Zróżnicowanie litologii i nasycenia skał znajduje także odzwierciedlenie w profilowaniach, utrudniając tym samym poprawną geologiczną interpretację. Metody statystyczne miały za zadanie przyczynić się do poprawy wyników interpretacji jakościowej i ilościowej tych profilowań.

Przeprowadzone analizy statystyczne dotyczyły profilowań geofizyki otworowej wykonanych w otworze J4. Analizy wykonano oddzielnie dla trzech interwałów głębokościowych różniących się warunkami pomiarowymi i zestawem wykonanych profilowań.

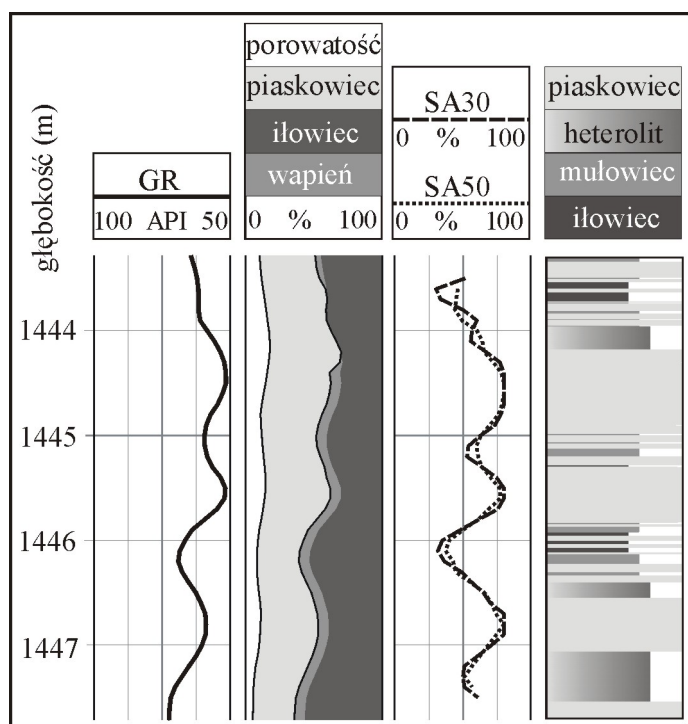
Wykorzystanie metod statystycznych w dobie dostępnych profesjonalnych i przyjaznych dla użytkownika programów (*STATISTICA*) jest łatwe i niekosztowne. Analizy statystyczne okazują się skutecznym narzędziem efektywnie wspierającym interpretację profilowań geofizyki otworowej, niewymagającym praktycznie żadnych dodatkowych nakładów.

## 3 INTEGRACJA DANYCH RDZENIOWYCH Z WYNIKAMI PROFILOWAŃ GEOFIZYCZNYCH

Źródłem informacji o parametrach petrofizycznych ośrodka skalnego są zarówno rdzenie wiertnicze, jak i profilowania geofizyki otworowej. W trakcie badań laboratoryjnych, prowadzonych na rdzeniach wiertniczych, otrzymuje się zbiór wartości parametrów petrofizycznych. Jednak parametry uzyskane na podstawie pomiarów laboratoryjnych na małych próbkach skalnych dotyczą innej skali niż parametry uzyskane z profilowań geofizycznych *in situ*. Fakt ten należy uwzględnić podczas porównywania własności petrofizycznych ośrodka uzyskanych z tych dwóch różnych źródeł [1]. Należy również wziąć pod uwagę, że profilowania geofizyki otworowej nie pozwalają na tak szczegółową ocenę litologii ośrodka skalnego, jaką uzyskuje się z analizy rdzeni wiertniczych.

Do integracji danych rdzeniowych (litologicznych opisów rdzeni wiertniczych) z wynikami profilowań geofizyki otworowej wybrano profilowanie naturalnej promieniotwórczości (GR). Wskazania tego profilowania zależą głównie od składu litologicznego badanego ośrodka, a nie od nasycenia. W pierwszym kroku na podstawie litologicznych opisów rdzeni wiertniczych zbudowano dwie krzywe zawartości substancji piaszczystej, tak by odzwierciedlały one pionowe rozdzielczości sond do profilowania GR. Krzywą piaskowcową SA50 skonstruowano z pionową rozdzielczością równą 50 cm, a krzywą SA30 – z pionową rozdzielczością 30 cm [4]. Przy budowie krzywych piaskowcowych uwzględniono zróżnicowaną zawartość

substancji piaszczystej (kwarcu) w poszczególnych typach litologicznych wchodzących w skład rdzenia wiertniczego. Tak skonstruowane krzywe zestawiono z profilowaniem GR. Rys. 2 przedstawia schematyczny obraz rdzenia wiertniczego (po stronie prawej), zbudowane na jego podstawie syntetyczne krzywe zawartości składnika piaszczystego (kwarcu), rozwiązanie porowatościowo-litologiczne uzyskane w wyniku kompleksowej interpretacji profilowań geofizyki otworowej oraz profilowanie naturalnej promieniotwórczości. Obserwuje się podobieństwo profilowania GR oraz SA50 i SA30.



Rys. 2. Syntetyczne krzywe zawartości składnika piaszczystego wraz z rozwiązaniem porowatościowo-litologicznym i schematycznymi obrazami rdzenia wiertniczych w otworze J4 [4].

#### 4 REDUKCJA WYMIARU PRZESTRZENI PROFILOWAŃ OTWOROWYCH

Profilowania geofizyki otworowej dostarczają wielowymiarowego obrazu ośrodka skalnego wzdłuż otworu wiertniczego. Wiele z tych profilowań niesie podobną informację o ośrodku skalnym. Powtarzalność informacji można zredukować poprzez zastosowanie analizy głównych składowych [2, 5, 6]. Celem jej jest porządkowanie zbioru danych i zastąpienie pomierzonych kilkunastu profilowań kilkoma składowymi głównymi, które stanowią kombinacje liniowe wejściowych profilowań [4].

Rezultatem analizy głównych składowych była redukcja wymiaru z dziewięciu (w interwale 42.9–147.8 m), piętnastu (w interwale 156.7–894.5 m) bądź dwudziestu (w interwale 905.0–1828.0 m) profilowań do dwóch głównych składowych (pierwsza główna składowa – PC1, druga główna składowa – PC2) (tabela 2).

Tabela 2. Ładunki czynnikowe dla zrotowanego („varimax”) rozwiązania dwuczynnikowego w otworze J4.

Profilowanie	42.9–147.8 m		156.7–894.5 m		905.0–1828.0 m	
	PC1	PC2	PC1	PC2	PC1	PC2
GR	-0.26	<b>0.91</b>	-0.36	<b>-0.84</b>	0.35	<b>0.91</b>
GG					0.41	<b>0.88</b>
GRS					0.36	<b>0.91</b>
POTA					0.31	<b>0.85</b>
THOR					0.31	<b>0.80</b>
URAN					0.34	0.30
NPHI	0.38	0.66	-0.29	-0.26	-0.31	<b>0.76</b>
RHOB	-0.26	<b>0.88</b>	-0.27	<b>-0.80</b>	0.51	0.59
ILD	<b>0.97</b>	-0.15	<b>0.89</b>	0.33	<b>0.84</b>	0.45
ILM	<b>0.97</b>	-0.19	<b>0.93</b>	0.20	<b>0.87</b>	0.43
LL3	<b>0.97</b>	-0.07	<b>0.94</b>	0.11	<b>0.77</b>	0.24
LLD	<b>0.93</b>	0.03	<b>0.93</b>	0.24	<b>0.89</b>	0.36
LLS	<b>0.99</b>	-0.07	<b>0.94</b>	0.12	<b>0.91</b>	0.36
MSFL	<b>0.75</b>	-0.56	0.43	-0.70	0.50	-0.07
HO12			<b>0.92</b>	0.29	<b>0.89</b>	0.35
HO09			<b>0.93</b>	0.27	<b>0.89</b>	0.40
HO06			<b>0.93</b>	0.25	<b>0.89</b>	0.39
HO03			<b>0.94</b>	0.18	<b>0.90</b>	0.38
HO02			<b>0.96</b>	0.04	<b>0.93</b>	0.33
HO01			<b>0.73</b>	-0.27	<b>0.84</b>	0.01
wyjaśniana wariancja (%)	64.98	23.15	67.76	13.05	65.95	13.91
	88.13		80.81		79.85	

Te dwie składowe wyjaśniają ok. 80% zmienności w zbiorze danych. Profilowania dostarczające tę samą, bądź podobną informację o ośrodku skalnym wchodzą do jednej głównej składowej. Jedna składowa związana jest z profilowaniami oporności, a druga z profilowaniami radiometrycznymi. Jedynie profilowanie MSFL wyłamuje się spod tej reguły. We wszystkich trzech odcinkach głębokościowych MSFL ma dodatni ładunek czynnikowy dla PC1, jednak nie zawsze przyjmuje wartości większe od 0.7 (tabela 2). W dwóch przypadkach profilowanie MSFL odgrywa ważną rolę w drugiej głównej składowej, z którą jest skorelowane ujemnie. Pomiar MSFL jest bardzo czuły na zmianę średnicy otworu wiertniczego, co powoduje, że MSFL dostarcza troszkę inną informację niż pozostałe profilowania oporności.

Druga składowa najsilniej skorelowana jest z profilowaniami radiometrycznymi (dodatnio

w odcinkach 42.9–147.8 m i 905.0–1828.0 m, a ujemnie w interwale 156.7–894.5 m). Powodem takiego zachowania może być odmienne wykształcenie litologiczne utworów w odcinku środkowym (156.7–894.5 m). Odcinek ten zawiera więcej składników ilastych niż dwa pozostałe interwały, które pod tym względem są podobne.

Składowa związana z profilowaniami oporności (PC1) niesie informację o nasyceniu przestrzeni porowej skał i o litologii, zaś składowa związana z profilowaniami jądrowymi ośrodka (PC2) niesie przede wszystkim informację o wykształceniu litologicznym.

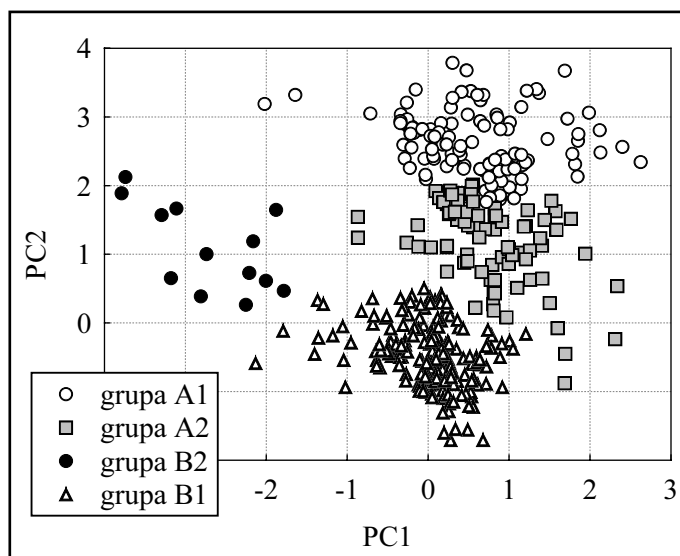
## 5 ANALIZA SKUPIEŃ

Analiza skupień przeprowadzona bezpośrednio na głównych składowych, a pośrednio na profilowaniach geofizyki otworowej, pozwala odpowiedzieć na pytanie, na ile sensownych grup, uwzględniających zróżnicowaną litologię i nasycenie, można podzielić zbiór danych, oraz czy taki podział na grupy pokrywa się z informacją uzyskaną z rdzeni wiertniczych.

Spośród różnych metod wiązania wybrano metodę Warda [7], która wykorzystuje podejście analizy wariancji. Aby grupy wyłonione w analizie skupień, reprezentowały cały zróżnicowany pod względem litologii i nasycenia ośrodek skalny wzdłuż otworu wiertniczego oraz by nie tracić informacji uzyskanych z rdzenia, należy odpowiednio przygotować zbiór danych [4]. W tym celu do zbioru wartości pochodzących z głębokości poboru rdzenia dołączono dane z pozostałych losowo wybranych głębokości. Analizę skupień przeprowadzono dla zredukowanego wymiaru przestrzeni danych, czyli dla głównych składowych.

### 5.1 Interwał 156.7–894.5 m

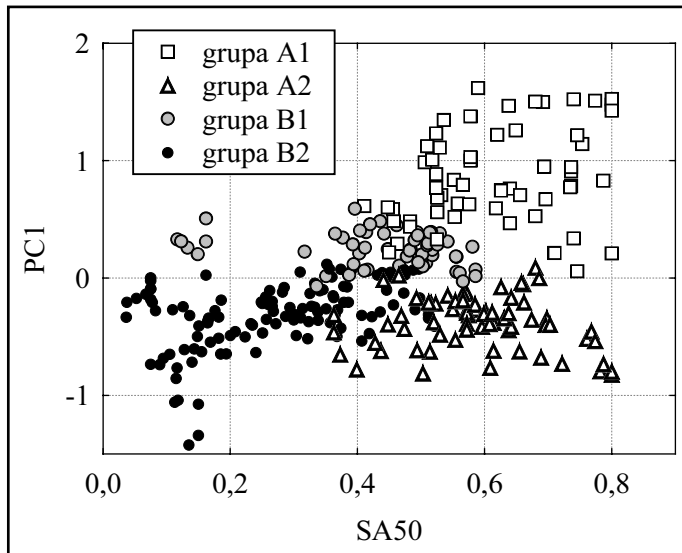
W efekcie przeprowadzonej analizy skupień wyróżniono cztery grupy, które różnią się co do wartości dwóch składowych (rys. 3). Grupę oznaczoną jako A1 nazwano piaskowcą, A2 – piaskowcą o obniżonej zawartości piaskowca, B1 – iłowcą o podwyższonej zawartości piaskowca i B2 – iłowcą. Nazwy te nadano po zbadaniu związku wyróżnionych grup z danymi rdzeniowymi (syntetycznymi krzywymi piaskowcowymi).



Rys. 3. Wykres rozrzutu dla głównych składowych w interwale 156.7–894.5 m w otworze J4.

### 5.2 Interwał 905.0–1828.0 m

Efektom analizy skupień przeprowadzonej dla głównych składowych są cztery grupy, które porównano (tam, gdzie to było możliwe) z informacją geologiczną. W tym interwale informację taką stanowiły litologiczne opisy rdzeni wiertniczych oraz wyniki opróbowania złoże. Grupy oznaczone jako A1 i A2 są grupami o podwyższonej zawartości substancji piaszczystej (rys. 4). Pomiędzy sobą różnią się wartościami pierwszej głównej składowej. PC1 jest silnie dodatnio skorelowana z większością profilowań oporności (tabela 2). Przekłada się to na liczbę obserwacji pochodzących z poziomów nasyconych gazem w poszczególnych grupach. W grupie A1 takie obserwacje stanowią ok. 65% spośród wszystkich danych w tej grupie. Grupa A2 obejmuje 21% danych pochodzących z poziomów nasyconych gazem. Grupy oznaczone jako B1 i B2 charakteryzują się mniejszym zapiaszczeniem niż grupy A1 i A2 (rys. 4). Skupienie B2 przyjmuje większe wartości dla PC2 i mniejsze dla PC1. Wiąże się to z mniejszą zawartością składnika piaszczystego i mniejszym nasyceniem gazem w grupie B2. Grupa B2 jest bardziej iłowcowa i obejmuje 12% obserwacji pochodzących z poziomów nasyconych gazem. Grupa B1, jako bardziej piaskowcowa w porównaniu z B2, zawiera 56% danych pochodzących z poziomów nasyconych gazem.



Rys. 4. Wykres rozrzutu dla pierwszej głównej składowej i zawartości składnika piaszczystego dla danych z interwału 905.0–1828.0 m w otworze J4.

## 6 ANALIZA DYSKRYMINACYJNA

W pierwszym etapie analiza dyskryminacyjna została wykorzystana do wydzielenia zmiennych (głównych składowych) najlepiej identyfikujących grupy różniące się litologią lub nasyceniem. Następnie zmienne te zostały wykorzystane do klasyfikacji obserwacji do poszczególnych grup. W tym celu wyróżniono zbiory treningowy i testowy, które składały się z danych o znanej przynależności do konkretnej grupy. Funkcje dyskryminacyjne i klasyfikacyjne zostały wyznaczone na zbiorze danych treningowych, a skuteczność analizy sprawdzono na zbiorze testowym. Przed przystąpieniem do analizy dyskryminacyjnej sprawdzono, czy zmienne spełniają jej założenia. Do analizy włączono zmienne, które w obrębie poszczególnych grup charakteryzowały się rozkładem normalnym lub wykazywały tylko niewielkie odstępstwa od tego rozkładu. Dodatkowo zidentyfikowano i usunięto obserwacje odstające w grupach.

### 6.1 Interwał 156.7–894.5 m

Dane treningowe objęły 93 obserwacje w grupie A1, 59 w grupie A2, 138 w B1 i 11 w grupie B2. Spośród danych treningowych usunięto 2 odstające obserwacje należące do grupy A1. Analiza dyskryminacyjna została przeprowadzona na głównych składowych dla czterech grup (A1, A2, B1 i B2) wyłonionych w analizie skupień. Otrzymano dwie istotne funkcje dyskryminacyjne.

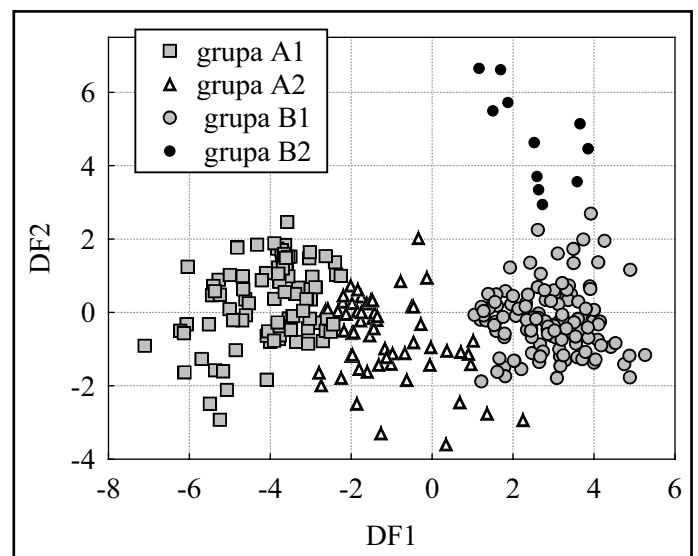
Największy wkład do ogólnej dyskryminacji wnosi PC2, o czym świadczy wartość cząstkowej Lambdy Wilksa (im bliższa zeru, tym większa moc dyskryminacyjna), duże wartości statystyki F i wartości tolerancji (gdyby zmienna była redundantna, wartość tolerancji dla tej zmiennej zbliżyłaby się do zera) (tabela 3).

Tabela 3. Podsumowanie analizy funkcji dyskryminacyjnej. Otwór J4, interwał 156.7–894.5 m.

N=	Lambda Wilksa	Cząstk. Wilksa	F usun. (3.29)	Poziom p	Toler.	1-Toler. (R-kwad)
299						
PC1	0.12	0.39	152.08	0.00	0.89	0.11
PC2	0.42	0.11	764.53	0.00	0.89	0.11

Tabela 4. Standaryzowane współczynniki funkcji dyskryminacyjnych. Otwór J4, interwał 156.7–894.5 m.

Zmienna	DF1	DF2
PC1	-0.56	-0.90
PC2	-1.04	0.22
skumulowany %	0.91	1.00



Rys. 5. Wykres rozrzutu dla funkcji dyskryminacyjnych. Otwór J4, interwał 156.7–894.5 m.

Na pierwszą funkcję dyskryminacyjną (DF1) przypada 91% całej mocy dyskryminacyjnej (tabela 4). Najmocniej waży w niej druga główna składowa (PC2). Pozostała wariancja przypada na drugą funkcję dyskryminacyjną (DF2), która zależy głównie od PC1. Pierwsza funkcja DF1 dyskryminuje grupy A1, A2 i łącznie grupy B1 i B2 (rys. 5). Druga funkcja (DF2) różnicuje grupę B2 i B1. Dla obserwacji z grupy B1 i B2 wartości średnie pierwszej funkcji dyskryminacyjnej są zbliżone. Grupy te

różnią się natomiast wartościami drugiej funkcji dyskryminacyjnej (rys. 5).

Tabela 5. Funkcje klasyfikacyjne. Otwór J4, interwał 156.7-894.5 m.

Zmienna	A2 p=0.25	B2 p=0.25	B1 p=0.25	A1 p=0.25
PC1	4.04	-7.66	-0.46	5.33
PC2	6.12	1.06	-1.98	12.50
stała	-6.58	-12.70	-1.83	-19.67

Tabela 6. Macierz klasyfikacji dla danych treningowych. Otwór J4, interwał 156.7-894.5 m.

Grupa	Wiersze: obserwowana klasyfikacja Kolumny: przewidywana klasyfikacja				
	% poprawne	A1 p=0.25	A2 p=0.25	B1 p=0.25	B2 p=0.25
A1	95.60	87	4	0	0
A2	91.53	2	54	3	0
B1	99.28	0	0	137	1
B2	100.00	0	0	0	11
razem	96.66	89	58	140	12

Tabela 7. Macierz klasyfikacji dla danych testowych. Otwór J4, interwał 156.7-894.5 m.

Grupa	Wiersze: obserwowana klasyfikacja Kolumny: przewidywana klasyfikacja				
	% poprawne	A1	A2	B1	B2
A1	95.83	23	1	0	0
A2	95.45	1	21	0	0
B1	97.92	0	0	47	1
B2	100.00	0	0	0	2
razem	96.88	24	22	47	3

Do obliczenia funkcji klasyfikacyjnych (tabela 5) przyjęto takie same wartości prawdopodobieństwa klasyfikacyjnego *a priori* dla każdej grupy. Dla tak wyznaczonych funkcji klasyfikacyjnych poprawność klasyfikacji jest bliska 97% (tabela 6). Największa poprawność klasyfikacji (100%) charakterystyczna jest dla danych z grupy B2, ale ta grupa jest najmniej liczna. Kolejną grupą co do procentu poprawnie zaklasyfikowanych obserwacji w zbiorze treningowym (ok. 99%), jest grupa B1. Najmniejszy procent poprawnej klasyfikacji dotyczy danych z grupy A2. Poprawność klasyfikacji dla zbioru danych testowych jest bardzo podobna (tabela 7).

## 6.2 Interwał 905.0–1828.0 m

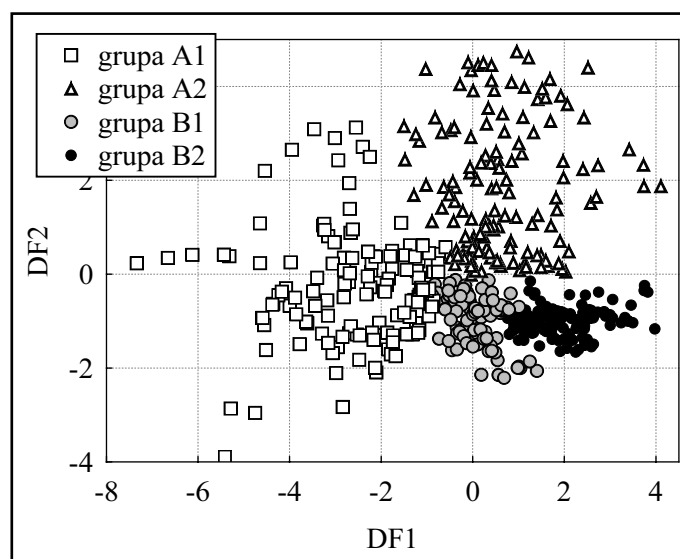
Analiza dyskryminacyjna przeprowadzona w odcinku 905.0–1828.0 m dla dwóch głównych

składowych uwzględniała podział danych na cztery grupy wyłonione w analizie skupień. Podział na grupy dla tego interwału uwzględniał zróżnicowanie pod względem litologii i nasycenia. Po usunięciu 13 obserwacji odstających w zbiorze danych treningowych w grupie A1 znalazły się 132 obserwacje, w A2 – 135, w B1 – 93, a w B2 – 126. Obydwie główne składowe mają podobny wkład w dyskryminację. Otrzymano dwie istotne statystycznie funkcje dyskryminacyjne. Na pierwszą funkcję (DF1), która wyjaśnia 67% wariacji, największy wpływ ma pierwsza główna składowa (tabela 8). Druga główna składowa ma największy wpływ na drugą funkcję dyskryminacyjną (DF2) wyjaśniającą pozostałą wariację (33%).

Grupa A1 różni się od pozostałych grup wartościami pierwszej funkcji dyskryminacyjnej (rys. 6). Podobnie sprawa ma się dla grup B1 i B2, które są rozróżnialne przez DF1. Grupa A2 przyjmuje podobne wartości dla pierwszej funkcji dyskryminacyjnej oraz dla grup ilowcowych (B1 i B2 łącznie). Natomiast wyróżnia się od nich wartościami DF2, zajmując obszar dodatnich wartości (rys. 6).

Tabela 8. Standaryzowane współczynniki funkcji dyskryminacyjnych. Otwór J4, interwał 905.0-1828.0 m.

Zmienna	DF1	DF2
PC1	-0.76	-0.65
PC2	0.69	-0.73
Skumulowany procent	0.67	1.00



Rys. 6. Wykres rozrzutu dla funkcji dyskryminacyjnych. Otwór J4, interwał 905.0–1828.0 m.

Funkcje klasyfikacyjne zostały obliczone przy założeniu takiego samego prawdopodobieństwa klasyfikacyjnego *a priori* dla każdej grupy. Poprawność klasyfikacji dla wszystkich grup łącznie w zbiorze danych treningowych wynosi ok. 86% (tabela 9). Największy odsetek poprawnie zaklasyfikowanych obserwacji w zbiorze treningowym zaobserwowano dla grupy B1 (ok. 96%), następnie dla B2 (ok. 90%), A1 (ok. 84%) i A2 (ok. 77%). Podobne wartości otrzymano dla mniej licznych zbiorów danych testowych (tabela 10). Część obserwacji należących do grupy piaskowcowej o zwiększonej ilości danych pochodzących z poziomów nasyconych gazem (A1) została błędnie zaklasyfikowana do grupy iłowcowo-piaskowcowej, również o zwiększonej ilości danych pochodzących z poziomów nasyconych gazem (B1), i to zarówno w obrębie zbioru treningowego, jak i testowego (tabela 9 i 10). Z kolei część obserwacji z grupy A2 weszła do grupy B1 i B2, a z B1 do B2 i z B2 do B1. Nie ma natomiast przejść z grupy piaskowcowej nasyconej gazem do grupy iłowcowej bez nasycenia gazowego czy odwrotnie. Otrzymane wyniki nie wykazują więc większych błędów w klasyfikacji, a odsetek poprawnie zaklasyfikowanych obserwacji w zbiorze treningowym i testowym jest zadowalający.

Tabela 9. Macierz klasyfikacji dla danych treningowych. Otwór J4, interwał 905.0-1828.0 m.

Grupa	Wiersze: obserwowana klasyfikacja Kolumny: przewidywana klasyfikacja				
	% poprawne	A1 p=0.25	A2 p=0.25	B1 p=0.25	B2 p=0.25
A1	84.09	111	0	21	0
A2	77.04	0	104	19	12
B1	95.70	0	0	89	4
B2	89.68	0	0	13	113
razem	85.80	111	104	142	129

Tabela 10. Macierz klasyfikacji dla danych testowych. Otwór J4, interwał 905.0-1828.0 m.

Grupa	Wiersze: obserwowana klasyfikacja Kolumny: przewidywana klasyfikacja				
	% poprawne	A1	A2	B1	B2
A1	80.65	25	0	6	0
A2	78.79	0	26	3	4
B1	97.78	0	0	44	1
B2	93.18	0	0	3	44
razem	88.89	25	26	56	49

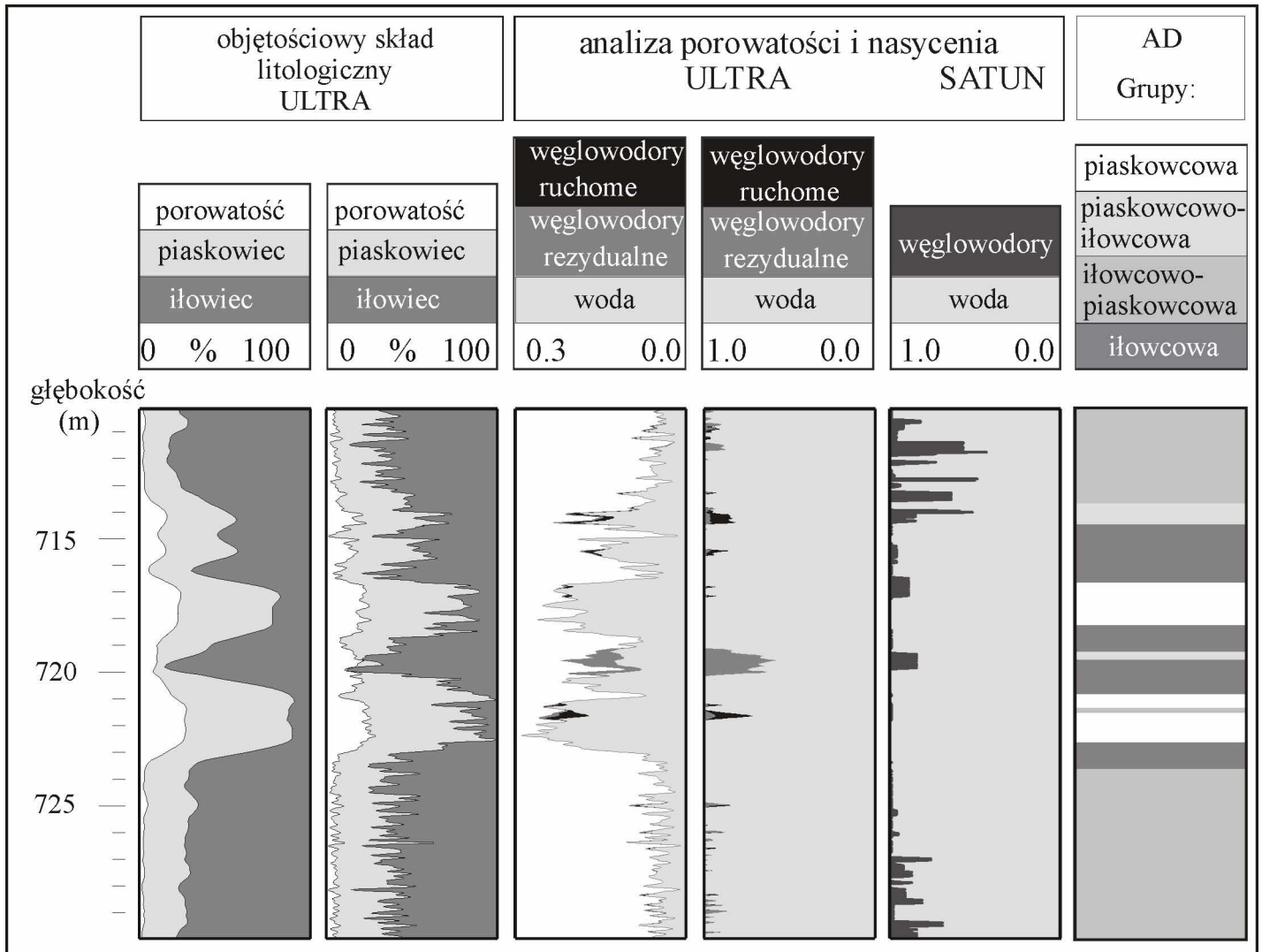
Rezultaty przeprowadzonej analizy dyskryminacyjnej porównano z tradycyjnymi wynikami interpretacji profilowań geofizyki otworowej. Grupy wyróżnione w analizie skupień i następnie poszukiwane wzdłuż otworu wiertniczego w analizie dyskryminacyjnej w interwale głębokościowym 156.7–894.5 m uwzględniały zmiany litologiczne. Grupy rozpatrywane w kolejnym interwale głębokościowym 905.0–1828.0 m uwzględniały nie tylko zmiany litologiczne, ale także nasycenie ośrodka skalnego gazem. Na rys. 7 przedstawiono wyniki analizy dyskryminacyjnej (AD) dla głównych składowych wraz z rozwiązaniem porowatościowo–litologiczno–nasyceńowym uzyskanym w programie ULTRA i współczynnikiem nasycenia wodą z programu SATUN dla wybranego interwału głębokościowego 710.0–730.0 m w otworze J4. Wyniki otrzymane przy użyciu metod statystycznych są zbieżne z wynikami tradycyjnej interpretacji profilowań geofizyki otworowej.

## 7 WNIOSKI

Przeprowadzone analizy statystyczne okazały się efektywnym narzędziem wspomagającym interpretację profilowań geofizyki otworowej w cienkwarstwowych utworach miocenu. Przy ich wykorzystaniu dokonano podziału piaskowcowo-iłowcowo-mułowcowych utworów na grupy zróżnicowane pod względem litologicznym. Podział ten uzupełniono klasyfikacją opartą o nasycenie gazem. Przedstawiono metodykę umożliwiającą poprawę wstępnej interpretacji, która często jest podstawą do typowania horyzontów złożowych przeznaczonych do opróbowania.

Utworzenie syntetycznych profilowań niosących informację geologiczną w postaci opisów rdzeni o dużym stopniu szczegółowości oraz włączenie ich do zbiorów danych obok pomiarów geofizyki otworowej stanowiło unikatowe zespolenie danych pomierzonych w różnej skali.

Analiza głównych składowych okazała się efektywnym narzędziem do redukcji liczby profilowań. Pierwsza główna składowa wyjaśniająca największą zmienność, najsilniej związana była z profilowaniami oporności, druga zaś z profilowaniami radiometrycznymi.



Rys. 7. Wyniki analizy dyskryminacyjnej (AD) dla głównych składowych oraz rozwiązanie porowatościowo litologiczno-nasyceniowe wykonane w programach ULTRA i SATUN w otworze J4. Interwał 710.0-730.0 m.

Obecność profilowań oporności, gamma i gęstościowego (RHOB) w składowych głównych wskazuje, że niosą one informację najbardziej przydatną w opisie zmienności ośrodka skalnego pod względem litologii i nasycenia gazem. Wejście do PC1 wyników pomiarów oporności realizowanych sondami o zróżnicowanym zasięgu radialnym i pionowej rozdzielczości jest dodatkowym sygnałem o przydatności takich pomiarów. Udział profilowania gamma i gęstościowego w konstrukcji PC2 wskazuje, że informacja o naturalnej promieniotwórczości i gęstości jest na drugim miejscu w opisie skał miocénskich budujących złożę gazu.

Analiza dyskryminacyjna została wykorzystana do wyznaczenia zmiennych najlepiej różniących wcześniej wydzielone grupy w zbiorze danych. Wykonano ją dla głównych składowych, wykorzystując podział na grupy będący rezultatem analizy skupień. W zbiorach danych

treningowym i testowym odsetek poprawnie zaklasyfikowanych danych był wysoki.

Porównanie wyników uzyskanych w standardowej interpretacji programami ULTRA i SATUN z wynikami uzyskanymi metodami statystycznymi (rys. 7) wskazuje, że potwierdzają one wysokorozdzielczą interpretację. Zatem wykonanie wybranych procedur przetwarzania statystycznego (analizy głównych składowych, analizy skupień i analizy dyskryminacyjnej) na wynikach pomiarów otworowych daje uzupełniającą informację zwiększającą wiarygodność interpretacji jakościowej i ilościowej profilowań geofizycznych. Jako wniosek płynący z przetwarzania danych geofizyki otworowej należy także podkreślić konieczność starannego doboru zestawu profilowań geofizyki otworowej planowanych do wykonania w rejonie o określonej budowie geologicznej. Przedstawiony przykład wskazuje, że dobry wynik uzyskany dla zbioru

danych z otworu J4 był także skutkiem starannie dobranego zestawu pomiarowego.

Opracowana efektywna metodyka włączenia analiz statystycznych do przetwarzania danych geofizyki otworowej może być potraktowana jako wzorcowa i zalecana do podniesienia efektywności jakościowej i ilościowej interpretacji w geofizyce wiertniczej. Praca z programem *STATISTICA* przyniosła oczekiwane wyniki wspierające pracę interpretatora.

## BIBLIOGRAFIA

- 1) Corbett, P.W.M., Jensen, J.L., Sorbie, K.S. (1998). A review of up-scaling and cross-scaling issues in core and log data interpretation and prediction. In: Harvey, P.K., Lovell, M.A., Core-Log Integration, Geological Society, London, Special Publications, 136, 9-16.
- 2) Dobosz, M. (2004). Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 452.
- 3) Karnkowski, P. (1993). Złoża gazu ziemnego i ropy naftowej w Polsce. Karpaty i zapadlisko przedkarpackie. Towarzystwo Geosynoptyków „Geos” AGH, Kraków, t. 2, 256, 113-220.
- 4) Kaźmierczuk, M. (2006). Podwyższenie efektywności geologicznej interpretacji profilowań geofizyki wiertniczej przy wykorzystaniu metod statystycznych. Praca doktorska. Biblioteka Główna AGH.
- 5) Morrison, D.F. (1990). Wielowymiarowa analiza statystyczna. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa (z angielskiego przełożył W. Zieliński, Multivariate statistical methods. Mc-Graw-Hill Book Company, 1967, 1976).
- 6) Moss, B., Seheult, A. (1987). Does principal components analysis have a role in the interpretation of petrophysical data? Paper TT, in 28<sup>th</sup> Annual Logging Symposium Transactions: Society of Professional Well Log Analysts, TT1-25.
- 7) Ward, J.H. (1963). Hierarchical grouping an objective function. Journal of the American Statistical Association, vol. 58, 236-244.