

*Włodzimierz Figiel**, *Ewa Kawalec-Latała***

ASPEKTY INTERPRETACJI OBRAZÓW PSEUDOIMPEDANCJI AKUSTYCZNEJ OŚRODKA SKALNEGO***

1. Wprowadzenie — identyfikacja zmian litologicznych metodami sejsmiki powierzchniowej i jej symulacja

Inwersja sekcji sejsmicznych, w wyniku której otrzymuje się tzw. sekcje pseudoimpedancji akustycznej ułatwia interpretacje tam, gdzie zmiany litologii bądź facji powodują zróżnicowanie impedancji akustycznej. Metoda ta stosowana jest dla rozpoznawania złóż węglowodorów, ale może być zaadaptowana do oceny jednorodności pokładowych złóż soli. Ocena ta jest szczególnie ważna w rejonach perspektywicznych dla budowy podziemnych zbiorników węglowodorów. Niski stosunek sygnału użytecznego do szumu S/N może powodować, że wizualna interpretacja będzie trudna. W artykule przedstawiono sposób wspomnienia interpretacji poprzez analizę obrazów. Testy wykonano na danych syntetycznych sekcji pseudoimpedancji akustycznej generowanych dla teoretycznego sejsmogeologicznego modelu ośrodka przybliżającego budowę pokładu soli kamiennej.

Do modelowania syntetycznych sekcji pseudoimpedancji akustycznej wykorzystano program INWERS [2, 4]. Składa się on z dwóch głównych części wchodzących w skład jednego programu tj. z części modelującej trasy i syntetyczne sekcje oraz z części przeznaczonej do graficznego przedstawienia wyników modelowania. Część graficzna w obecnym opracowaniu służyła tylko jako materiał pomocniczy. Algorytm modelowania sekcji pseudoimpedancji akustycznej obejmował następujące etapy:

- wczytanie modelu sejsmogeologicznego ośrodka,
- obliczenie odpowiedzi impulsowych dla zadanego modelu,
- obliczenie sejsmogramów syntetycznych dla ustalonego sygnału sejsmicznego,

* Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

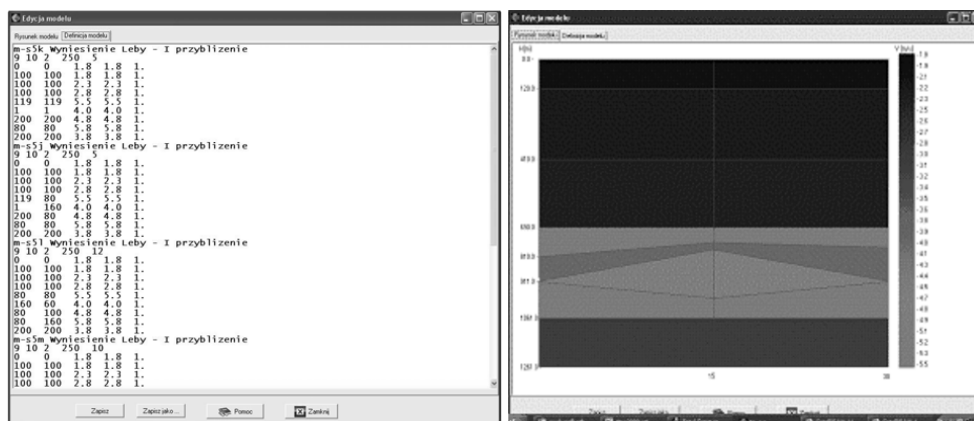
** Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

*** Praca współfinansowana z działalności statutowej Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH

- przetworzenie sejsmogramów syntetycznych — nałożenie szumu,
- obliczenie tras pseudoimpedancji akustycznej.

Model sejsmogeologiczny ośrodka znajduje się na płaszczyźnie XZ , gdzie Z — współrzędna głębokościowa, X — współrzędna pozioma na płaszczyźnie odniesienia (powierzchnia ziemi). Model składa się z warstw o różnej oporności akustycznej. Dla każdej warstwy modelu podaje się jej miąższość, gęstość oraz prędkość rozchodzenia się fali sejsmicznej.

Pierwszą warstwą modelu jest górną półprzestrzeń, dla której zadaje się miąższość równą zero, a prędkość i gęstość takie same, jak w pierwszej warstwie ośrodka skalnego w celu uniknięcia odbicia od powierzchni ośrodka. Jako dolną półprzestrzeń przyjmuje się najniższą warstwę, od stropu której uwzględnia się odbicie promienia sejsmicznego. W systemie przyjęto długość modelu w dziedzinie czasu równą maksymalnemu czasowi $2T_0$ w pierwszej części modelu. Szczegóły dotyczące modelu zawiera praca [1] a jego parametrami są: ilość warstw wraz z górną i dolną półprzestrzenią, ilość próbek w dziedzinie czasu, interwał próbowania w dziedzinie czasu w [ms], maksymalna częstotliwość widma w [Hz] oraz ilość punktów rejestracji. Ponadto rekordy zawierają: miąższości warstwy na brzegach modelu w [m], prędkości fali sejsmicznej na brzegach modelu w [km/s], oraz gęstość warstwy w [g/cm³]. Edycja modelu jest możliwa jako zwykłego pliku tekstowego i tak był on wykorzystywany do przetwarzania obrazów modelu w programach Matlab. Przykład modelu wizualizowany przez system INWERS przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Reprezentacja tekstowa i graficzna przykładowego modelu HMSGS-1

Program INWERS pozwala na nałożenie szumu na trasy sejsmogramów syntetycznych. Szum jest tworzony za pomocą generatora liczb pseudolosowych i nakładany na sejsmogramy syntetyczne. Parametrami szumu jest jego poziom wyrażony w [%]. Szum generowany w systemie jest formowany w dziedzinie częstotliwości filtrem trapezowym powodującym korelację pasma szumu z pasmem sygnału sejsmicznego. Program zapisuje obliczone

sejsmogramy syntetyczne w pliku binarnym. Sejsmogramy syntetyczne poddawane są dalszemu przetwarzaniu w celu otrzymania tras i sekcji pseudoimpedancji akustycznej.

Trasy pseudoimpedancji akustycznej są generowane na podstawie tras sejsmogramów syntetycznych z nałożonym szumem lub bez szumu (w zależności od wyboru programów).

2. Przekształcenia kontekstowe i adaptacyjne obrazów sekcji impedancji akustycznej (filtry medianowe i wg algorytmu Wienera)

Najważniejszymi przekształceniami geometrycznymi obrazu w technice komputerowej są przekształcenia punktowe, kontekstowe, widmowe i morfologiczne. Przekształcenia kontekstowe polegają na modyfikacji poszczególnych elementów obrazu w zależności od stanu ich samych i ich otoczenia. Operacje te mają charakter kontekstowy co oznacza, że dla wyznaczenia parametrów jednego punktu obrazu przekształconego należy wykonać obliczenia na bazie wielu punktów obrazu źródłowego. Tego typu działania są opisywane funkcjami splotu. Pikselowa reprezentacja obrazu w komputerowej analizie powoduje, że dziedziną funkcji $D(m, n)$ jest dwuwymiarowa i dyskretna. Splot funkcji dla funkcji ciągłych upraszcza się do formuły konwolucji dla dwuwymiarowego dyskretnego obrazu podanego niżej.

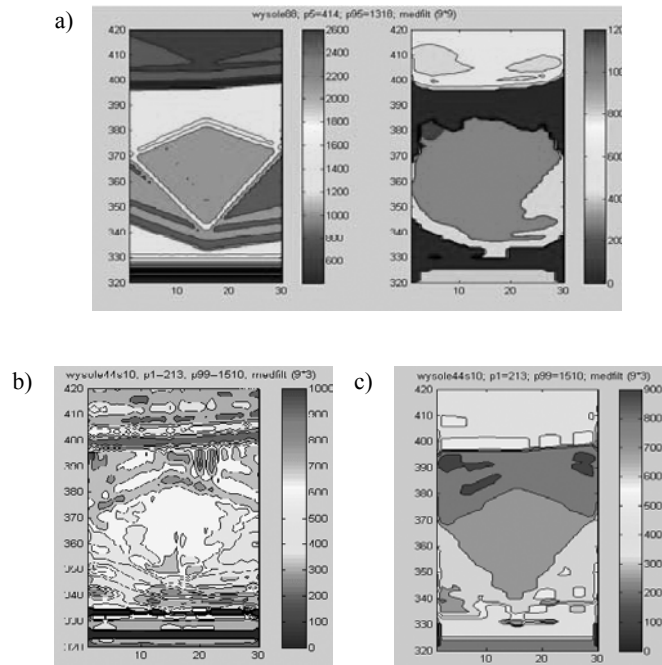
$$g(x) = f(x) \cdot h(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x-t)h(t)dt, \quad (1)$$

$$D'(m, n) = W(m, n) \cdot D(m, n) = \sum_{i, j \in K} D(m-i, n-j)W(i, j). \quad (2)$$

Aby filtracja usuwając zakłócenia nie niszczyła krawędzi przetwarzanych obrazów oraz drobnych jego szczegółów stosujemy filtrację nieliniową jaką jest filtr medianowy. Mediana z próby jest miarą tendencji centralnej, dla której połowa obserwacji (50%) leży powyżej, a druga połowa poniżej jej wartości. Wynik przekształcenia jest uzależniony od wielkości przyjętego otoczenia (obszaru liczenia mediany) i w naszych badaniach był dobierany eksperymentalnie [2, 3]. W analizowanych obrazach w przypadku dobrego obrazu źródłowego i zbyt dużego obszaru mediany, przekształcony obraz traci właściwe kontury. Przykład takiej sytuacji pokazano na rysunku 2.

Interesujące zakresy impedancji akustycznej są schowane między charakterystycznymi dwoma warstwami leżącymi powyżej i poniżej warstwy nas interesującej. Na rysunku 2 i następnych będą wizualizowane tylko obszary antracytu, soli kamiennej i soli wtórnych dla dużego [9*9], małego [3*3] i optymalnego [9*3] otoczenia.

Dla przypadków o niskiej częstotliwości podstawowej sygnału sejsmicznego, małym współczynniku tłumienia i wystąpieniu zakłóceń obraz oryginału staje się szczególnie mało czytelny. Jakość interpretacji poprawia filtracja medianowa o optymalnych dla tych warunków parametrach. Efekty działania przedstawione są na rysunku 2c.



Rys. 2. a) Obrazy wzorcowego modelu WS88 (HMSGs-1) sekcji impedancji akustycznej i obrazu przekształconego z filtracją medianową o zbyt dużym otoczeniu;
 b) modelu WS63 z efektem drobnej filtracji medianowej;
 c) modelu WS44s10 i przekształcenia z efektem optymalnej filtracji medianowej

W rzeczywistych pomiarach sejsmograficznych, dane obrazujące stan rzeczywisty są złożoną formą danych niosących informacje i różnych zakłóceń. Zniekształcony obraz może być aproksymowany równaniem:

$$g = H \cdot f + n, \quad (3)$$

gdzie:

g — nieostry obraz;

H — operator zniekształcenia, często nazywany operatorem funkcji rozmycia punktu (PSF — point spread function). Funkcja PSF jest Odwrotną Transformacją Fouriera funkcji transferu (przejścia) obrazu (OTF). W dziedzinie częstotliwości, OTF opisuje odpowiedź liniowego, pozycyjnie niezmiennego systemu (position invariant system) na impuls. OTF jest transformacją Fouriera funkcji rozmycia punktu (PSF). Operator zniekształcenia H , wprowadzony do opisu obrazu, tworzy zniekształcenie. Zniekształcenie to, spowodowane przez operator funkcji rozmycia (PSF), jest tylko jednym z wielu typów rozmycia obrazu;

f — oryginalny, hipotetycznie prawdziwy obraz;

n — dodatkowy szum, wprowadzony w trakcie pozyskiwania obrazu, który go psuje.

Należy podkreślić fakt, że obraz prawdziwy f nie istnieje gdyż jego pozyskanie musiałoby nastąpić w idealnych, nieistniejących warunkach.

Założenia do modelu rozmycia (PSF) sugerują proces wyostrażania obrazu jako odwrócenie procesu zniekształceń opisany funkcją zniekształceń PSF. Proces ten nazywamy dekonwolucją (ang. *deconvolution*) i jest procesem odwrotnym do efektów zniekształceń — konwolucji. Jakość ostrości odzyskiwanego obrazu zależy głównie od znajomości operatora H funkcji rozmycia (PSF). Funkcja PSF w matematyce definiowana jest przez długość rozmazania punktu oraz kąt „ciągnięcia” podawany w stopniach.

Dla potrzeb naszego opracowania, sugeruje się wykorzystanie funkcji wiener2 Matlaba w programach transformujących obrazy. Przy jej pomocy można przeprowadzić adaptacyjną, dwuwymiarową filtrację usuwającą szum. Działanie polega na zastosowaniu filtru dolno-przepustowego kontrastu obrazu w warunkach obecności stałej wartości mocy szumu. Metoda bazuje na algorytmie Wienera — statystycznej estymacji parametrów szumu dla lokalnego sąsiedztwa każdego punktu obrazu. Algorytm działa w trzech krokach:

- wylicza dla otoczenia każdego piksela obrazu wartość średnią (4) oraz wariancję wg zależności (5)

$$\mu = \frac{1}{NM} \sum_{n_1, n_2 \in \eta} a(n_1, n_2), \quad (4)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{NM} \sum_{n_1, n_2 \in \eta} a^2(n_1, n_2) - \mu^2, \quad (5)$$

gdzie $n_1, n_2 \in \eta$ — jest N^*M elementowym sąsiedztwem każdego punktu (piksela) obrazu;

- określa kwadrat wariancji szumu v^2 dla zidentyfikowanych przebiegów szumu lub przy braku danych oblicza kwadrat średniej wariancji ze wszystkich lokalnych otoczeń pikseli filtrowanego obrazu;
- wylicza nową wartość piksela z zależności (6)

$$b(n_1, n_2) = \mu + \frac{\sigma^2 - v^2}{\sigma^2} (a(n_1, n_2) - \mu). \quad (6)$$

Filtr adaptacyjny dopasowuje się do lokalnej wariancji obrazu i wykorzystuje opisany powyżej algorytm Wienera. W lokalnych regionach obrazu, gdzie wariancja jest duża, filtr wygładza tylko nieznacznie (przyjmując, że zmiany są istotą obrazu). W odwrotnym przypadku tj. w regionach o małej zmienności (wariancja jest mała) wygładzanie filtru jest mocniejsze. Takie podejście daje lepsze rezultaty niż działanie filtru liniowego. Filtr adaptacyjny jest bardziej selektywny w porównaniu z filtrem liniowym, zachowując ostrość krawędzi i części obrazu o dużej różnicy wartości pikseli. Filtry te wymagają większych mocy obliczeniowych dla efektywnego przetwarzania dużych obrazów.

W przypadku obecności w obrazie oryginalnym znanego (wcześniej określonego) szumu „białego” (o stałej mocy), filtry adaptacyjne są szczególnie efektywne. Przykładową formą takiego szumu jest np. szum o rozkładzie Gaussa, śrutowy Poissona lub wymnażalny plamkowy.

Efekty praktyczne zastosowania ww. metody są przedmiotem eksperymentów dla gromadzenia doświadczeń i opracowania wyników publikowanych w prezentowanym opracowaniu.

3. Algorytmy obliczeń wyników symulacji systemu INWERS dla wizualizacji wyników filtracji Med/Wie2

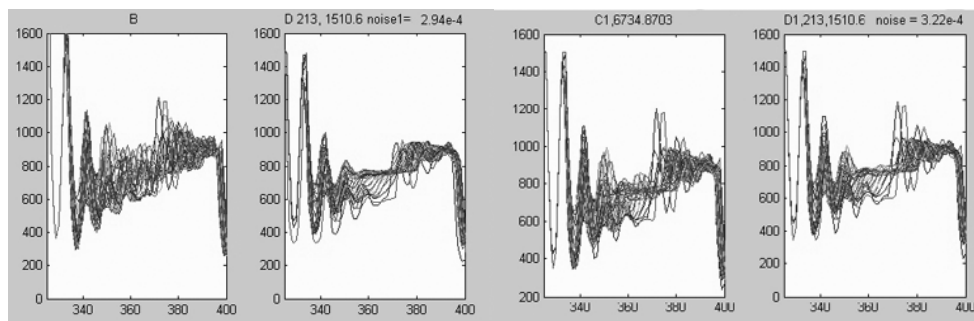
Wyniki generowane przez system INWERS (opisany w cytowanych publikacjach) były przekształcane na postać tekstową w postaci macierzy 461*30 elementowe. Dla wyznaczenia wartości percentyli i filtracji medianowej wczytywano cyklicznie odpowiednie macierze badanych modeli i przeliczano przy pomocy procedur zapisanych w języku Matlab. Wizualizacja miała charakter wykresów przebiegów 2D dla poszczególnych 30 przekrojów nakładanych na siebie jednocześnie. Pozwalała na wyznaczenie obszarów interesujących zakresów między stropem i spągiem analizowanego złoża soli kamiennej. Obrazy utworów nadległe w stosunku do analizowanej warstwy i poniżej leżące eliminowano z wizualizacji końcowej.

Algorytm obliczeń dla wizualizacji wyników symulacji systemu INWERS składał się następujących kroków:

- Wczytanie danych tekstowych z symulacji wybranego modelu dla różnych poziomów zakłóceń warunków pomiaru pseudoimpedancji akustycznej;
- Obliczenia odpowiednich wartości percentylowych i przekształcenia oryginalnych macierzy w macierz o znormalizowanych wartościach [1, 2];
- Obliczenia przekształcające znormalizowane percentylowo macierze do formy odpowiadającej filtracji medianowej;
- Obliczenia przekształcające znormalizowane percentylowo macierze do formy odpowiadającej filtracji według algorytmu Wienera;
- Obliczenia przekształcające macierze po filtracji medianowej do formy odpowiadającej filtracji według algorytmu Wienera dla określonego wcześniej poziomu szumu;
- Wizualizacja wartości między stropem a spągiem dla poszczególnych przypadków wykresów 2D skumulowanych wykresów wartości pseudoimpedancji akustycznej dla:
 - oryginalnej macierzy wyników symulacji pomiarów,
 - po filtracji medianowej wyników symulacji,
 - po filtracji wg algorytmu Wienera i powtórnej filtracji Wienera po filtracji medianowej;
- Wizualizacja wartości między stropem a spągiem dla poszczególnych przypadków obrazów konturowych 2D wartości pseudoimpedancji akustycznej dla przypadków opisanych w powyższym kroku.

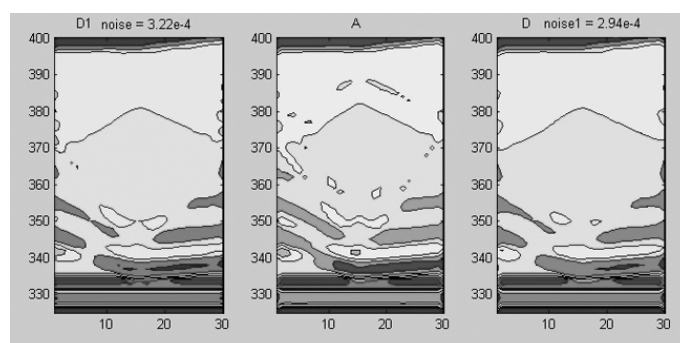
4. Przykłady obrazów macierzy prędkości akustycznych dla wybranych modeli, po normalizacji i filtracji

Przykłady obrazów wygenerowane dla wybranych modeli i przypadków były analizowane i oceniane a przykład etapów tego procesu dla modelu WYSOLE44s10N zamieszczono na rysunkach 3–6. Prezentowane próbki obrazów dotyczą przypadku normalizacji percentylowej 1-99 oraz 5-95 oraz postaci oryginalnej macierzy B , po filtracji medianowej macierzy A , po filtracji Wienera macierzy $D1$ i filtracji medianowo — Wienerowskiej macierzy D . Obraz macierzy $C1$ reprezentuje postać po normalizacji percentylowej i zmianach filtracji Wienera i liczbowego określania poziomu szumu.



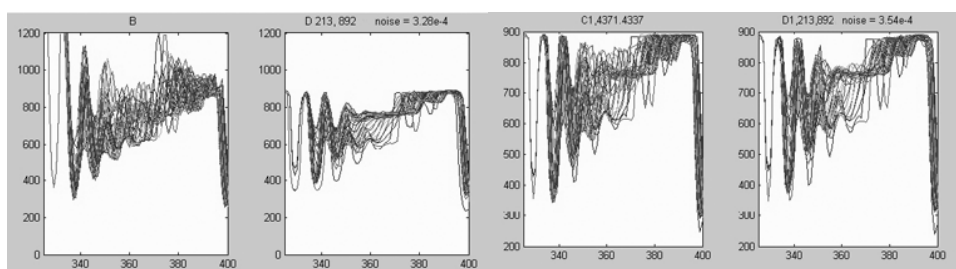
Rys. 3. Obrazy prędkości akustycznej (oś pionowa) dla modelu WYSOLE44s10N: normalizacja perceptylowa 1-99; przedział głębokości strop — spąg (335-400 — oś pozioma); dla macierzy B , D , $C1$, $D1$

Wartości prędkości akustycznych odcieć perceptylowych 1-99 był równe odpowiednio 213 i 1510,6 a wyliczone wartości szumu odpowiednio: $3,22E-4$ dla macierzy $D1$ i $2,94E-4$ dla macierzy D .

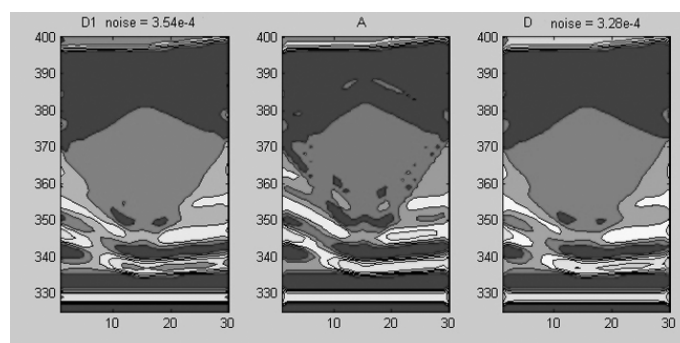


Rys. 4. Obrazy konturowe dla filtracji Wienera $D1$; dla filtracji medianowej A i dla filtracji medianowej/Wienera D

Dla odcień przy perceptylowych 5-95 równych odpowiednio 213 i 892 wygenerowano obrazy macierzy B , D , $C1$, $D1$ oraz obrazy konturowe dla wyznaczonych wartości szumu tj. $3,54E-4$ dla macierzy $D1$ i $3,28E-4$ dla macierzy D .



Rys. 5. Obrazy prędkości akustycznej (oś pionowa) dla modelu WYSOLE44s10N: normalizacja perceptylowa 5-95; przedział głębokości strop — spąg (335-400 oś pozioma); dla macierzy B , D , $C1$, $D1$



Rys. 6. Obrazy konturowe dla filtracji Wienera $D1$; dla filtracji medianowej A i dla filtracji medianowej/Wienera D ; percentyl 5-95

5. Omówienie procedury analizy obrazów i cech wskaźnika oceny poprawy interpretacyjnej

Niedoskonałość tworzonych obrazów macierzy prędkości akustycznej lub jej fragmentów, przy zmiennych warunkach generowania źródłowych danych oraz procesów i parametrów filtracji wymaga oceny przydatności ich stosowania. Przeprowadzone analizy i porównania pozwalają stwierdzić obszerność zbiorów wynikowych obrazów, licznosc kryteriów ich oceny i wiążącą się z tym trudność wyrażenia jednoznacznej oceny. Intuicyjnie oczekiwana ocena powinna mieć charakter ilościowy (choć nieskomplikowany charakter jakościowy też jest do przyjęcia) i najlepiej być pojedynczym parametrem. Ponieważ czytelność obrazów sekcji pseudoimpedancji akustycznej jest uzależniona od wielu parametrów (np.

stopniem komplikacji geomorfologicznej, poziomem szumów naturalnie występujących i generowanych w trakcie pomiarów geosejsmicznych, itp.) i ich ocena przydatności dla poprawnej interpretacji może przybierać tak ilościowy jak i jakościowy charakter, zagadnienie wymaga nowatorskiego podejścia. Wstępne poszukiwania i badania pozwalają na sugestie opracowania funkcji F_p w przestrzeni wielowymiarowej p_i (parametrów oceny przydatności interpretacyjnej) o dobieranych dla konkretnych zastosowań, współczynników wagowych a_i .

$$F_p = f([p_i], [a_i])_{i=1 \rightarrow n}. \quad (7)$$

Macierze wartości parametrów oceny $[p_i]$ oraz współczynników wagi $[a_i]$, dobierane są dla ocenianych modeli i parametrów przekształceń kontekstowych. O przydatności danego modelu decydowałaby wartość wyliczona funkcji F_p i jej położenie w przestrzeni względem granicznej powierzchni przydatności. Graniczna powierzchnia staje się wzorcowym idealizowanym wariantem kombinacji parametrów oceny, do którego porównywane są następnie wszystkie analizowane warianty rzeczywiste. Graniczna powierzchnia posiada ekstremalne oceny użytych kryteriów, wybrane spośród wariantów oszacowanych ocen wariantów rzeczywistych. Stosując metodę wymuszonych decyzji [5] wyznacza się wskaźniki wagi (a_j) wszystkich uwzględnionych mieszanych kryteriów ocen. Kolejnymi krokami są: wyznaczenie wartości oceny wariantów i ich względnych procentowych oszacowań oraz wyznaczenie względnych procentowych wartości krytycznych (K_{kri}) dla każdego z wariantów. Proponowane procedury są w trakcie opracowywania i sprawdzania, a obecnie są sygnalizowane jako rokujące pozytywne rezultaty.

6. Podsumowanie i wnioski

Analizy i prezentowane wyniki w niniejszym opracowaniu wykonano w oparciu o modele syntetyczne sekcji pseudoimpedancji akustycznej dla modelu sejsmogeologicznym HMSGS-1 wzorowanym na spotykanych złożach soli kamiennej.

Modele syntetycznych sekcji, wykonane dla rozważanej konfiguracji geologicznej złoża soli z uwzględnieniem wtrąceń anhydrytu i soli wtórnych były studyjnym materiałem do doboru parametrów obróbki obrazów syntetycznych sekcji pseudoimpedancji akustycznych. W badaniach wykonywano w różnych konfiguracjach operacje normalizacji procentylowej, filtracji medialnej i wg algorytmu Wienera oraz wizualizacji wykresów przekrojów i kształtów powierzchni w postaci obrazów konturowych.

Zdobyte doświadczenia potwierdzają przydatność komputerowej analizy i przetwarzania obrazów dla poprawiania czytelności i jakości interpretacji generowanych obrazów w systemie INWERS (-T12B04027). Uświadamiają jednocześnie niedostatek narzędzi dla precyzyjnej (ilościowej) oceny skutków wprowadzanych filtracji.

Wycinkowy i eksperymentalny charakter zdobytych doświadczeń wymaga dalszych badań dla rozszerzenia rozpoznania w zakresie innych konfiguracji złoża i formacji geologicznych.

Wprowadzane w modelu zakłócenia (generowane w systemie INWERS) pogarszające warunki identyfikacji zmian litologicznych powinny podlegać rozpoznaniu i uwzględnieniu ich parametrów w budowie ilościowego wskaźnika oceny poprawy interpretacji.

Powiązanie danych symulacyjnych z pomiarami terenowymi (wymagającymi odpowiednich nakładów finansowych) pozwoliłoby na pełniejszą weryfikację przydatności i stopnia skuteczności sugerowanej metody.

LITERATURA

- [1] *Figiel W., Kawalec-Latała E.*: Zastosowanie analizy i przetwarzania obrazów do interpretacji syntetycznych sekcji pseudoimpedancji akustycznej. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 24, z. 2/3, s. 371–385, 2008
- [2] *Figiel W., Kawalec-Latała E.*: Analiza obrazów sekcji pseudo impedancji akustycznej. *Górnictwo i Geoinżynieria*, t. 32, z. 1 s. 65–72, 2008
- [3] *Kawalec-Latała E.*: The influence of seismic wavelet on the resolution of pseudo impedance section for construction of underground storage. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, t. 24, z. 2/3, s. 387–397, 2008
- [4] *Kawalec-Latała E.*: Modelowanie syntetycznych sekcji pseudo impedancji akustycznej dla złoża gazu z rejonu Radlina. *Geologia, kwartalnik AGH*, t. 29, z. 1–2, s. 25–31, 2003
- [5] *Szybka J., Pilch R.*: APEKS — metoda wspomagająca ocenę jakości działań — Niekonwencjonalne metody oceny trwałości i niezawodności: XXXIV Zimowa Szkoła Niezawodności, Szczyrk 2006. Polska Akademia Nauk, Radom, Wydawnictwo i Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji ITE, s. 315–323, 2006