



## Modelowania sekcji pseudoimpedancji akustycznej z włączeniem procedury dekonwolucji minimum entropii MED, jako ilustracja możliwości detekcji wtrąceń anhydrytu

### Modelling of pseudo-acoustic impedance section with the procedure of minimum entropy deconvolution (MED) for the demonstration of anhydrite inclusion detection capabilities

Dr inż. Ewa Kawalec-Latała<sup>\*)</sup>

**Treść:** Rozpoznanie niejednorodności wewnętrznej budowy złóż soli kamiennej jest warunkiem powodzenia zagospodarowania złoża jako podziemnego zbiornika. Pozyskanie tej wiedzy poprzez interpretację sekcji pseudoimpedancji akustycznej jest relatywnie tanie i nieinwazyjne dla środowiska. Wiarygodność rozpoznania zależy od jakości interpretowanych sekcji. Prezentowane w artykule syntetyczne sekcje pseudoimpedancji akustycznej stanowią ilustrację wzrostu rozdzielczości w wyniku włączenia na etapie przetwarzania danych procedury dekonwolucji minimum entropii MED.

**Abstract:** Identification of inhomogeneity of the inner structure of rock-salt deposits is crucial for the successful management of deposit as a underground storage. Obtaining knowledge of this kind, by interpretation of the pseudo-acoustic impedance section, is relatively inexpensive and non-invasive for the environment. The identification reliability depends on the quality of the interpreted sections. The pseudo-acoustic impedance sections, briefly presented in this paper, demonstrate the increase in the resolving power by adding a procedure of minimum entropy deconvolution (MED).

#### Słowa kluczowe:

*inwersja, pseudoimpedancja akustyczna, podziemne zbiorniki, złoża soli kamiennej, anhydryty*

#### Key words:

*inversion, pseudo-acoustic impedance, underground storage, rock-salt deposits, anhydrites*

## 1. Wprowadzenie

Podziemne zbiorniki ropy naftowej i gazu ziemnego, prócz korzyści ekonomicznych, stanowią pierwsze zabezpieczenie przed przerwaniem dostaw surowców energetycznych, co zwiększa stabilność strategiczną i polityczną. Mogą być też przeznaczone do długoterminowego składowania dwutlenku węgla CO<sub>2</sub> i odpadów o wysokim stopniu radioaktywności HLW. Składowanie w złożach soli jest optymalne mimo relatywnie wysokich kosztów budowy zbiornika. Pokładowe złoża soli kamiennej w partiach o jednorodnej wewnętrznej strukturze i poziomym lub prawie poziomym warstwowaniu stwarzają korzystne warunki do magazynowania ropy oraz innych ciekłych i gazowych węglowodorów. Zagospodarowanie złoża jako podziemnego zbiornika wymaga dokładnego rozpoznania wszystkich niejednorodności jego wewnętrznej budowy. Praca koncentruje się nad oceną niejednorodności wewnętrznej budowy pokładowych złóż soli kamiennej spowodowanej przez obecność anhydrytów.

W Polsce, jako perspektywiczne w aspekcie budowy podziemnych zbiorników są cechsztyńskie złoża soli w rejonie Zatoki Puckiej i monokliny przedsudeckiej oraz kompleksy cechsztyńskich soli kamiennych w wydajach solnych [5]. Sole kamienne Monokliny Przedsudeckiej zostały najlepiej

rozpoznane w granicach Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego. W roku 1990 udokumentowano złożo soli kamiennej „Sieroszowice”, w następnych latach „Bytom Odrzański”, a później wiele kolejnych złóż obszaru LGOM. Pokładowe złoża soli kamiennej LGOM spełniają wymagania, minimalnej miąższości. Jednakże występujące tam wtrącenia anhydrytów i lokalny wzrost ich miąższości stanowią duży problem technologiczny. Wskazane jest więc uzyskanie dodatkowych danych o obecności tych soli w pokładzie soli kamiennej.

Uzupełnienie rozpoznania złoża na podstawie pomiarów sejsmicznych wykonywanych na powierzchni jest metodą relatywnie taną i nieinwazyjną dla środowiska. Zakres tego rozpoznania obejmuje metodę sejsmiki refleksyjnej polegającą na inwersji sekcji sejsmicznych w wariancie przetwarzania prowadzącym do otrzymania sekcji pseudoimpedancji akustycznej [2].

Impedancja akustyczna jest jedną z podstawowych cech charakteryzujących własności fizyczne skał. Zmiany impedancji akustycznej są dobrym wskaźnikiem rozpoznawania niejednorodności litologiczno-facjalnych w ośrodku geologicznym.

Odpowiednio wysokie wartości współczynników odbicia na kontakcie soli kamiennej i anhydrytu wynikające z relatywnie dużego kontrastu właściwości sprężystych obu typów soli generują silne refleksy. To powoduje, że są one dobrze widoczne na sekcjach pseudoimpedancji akustycznej. Rozpoznanie

<sup>\*)</sup> AGH w Krakowie.

obecności anhydrytów w złożu soli poprzez interpretację sekcji pseudoimpedancji akustycznej jest jednoznaczne i wiarygodne [3]. Większy problem interpretacyjny stanowi obecność soli wtórnie przeobrażonych. Kontrast właściwości sprężystych soli kamiennej i soli wtórnie przeobrażonych jest niewielki. Wiarygodność ich interpretacji zależy w znacznym stopniu od jakości źródłowych danych sejsmicznych. Przede wszystkim zależy od parametrów sygnału sejsmicznego oraz zakłóceń spowodowanych szumem przypadkowym [4]. W każdym przypadku precyzja interpretacji wzrasta w miarę rozszerzenia się zakresu częstotliwości i wzrostu częstotliwości dominującej sygnału [1]. Dla długich sygnałów o wąskim paśmie częstotliwości wyraźną poprawę uzyskuje się po zastosowaniu dekonwolucji tras sejsmicznych [3].

Modelowania prezentowane w niniejszej pracy są rodzajem testu na efektywność dekonwolucji minimum entropii MED na jakość odwzorowywania się zmian lito-facjalnych i geometrycznych spowodowanych obecnością anhydrytu w złożu soli kamiennej na syntetycznych sekcjach pseudoimpedancji akustycznej.

## 2. Dekonwolucja tras sejsmicznych

W ujęciu matematycznym celem procedury dekonwolucji jest znalezienie rozwiązania równania splotu postaci

$$r(t) \cdot w(t) = x(t) \quad (1)$$

która dla opisu pomiarów rzeczywistych przyjmuje postać

$$r(t) \cdot w(t) + n(t) = x(t) \quad (2)$$

$r(t)$  zawiera informacje o budowie geologicznej i jest pożądanym rozwiązaniem równania.

Przyjęcie założenia o braku szumu  $n(t)$  w rzeczywistych rejestracjach prowadzi do niepoprawnej estymacji  $w(t)$ , a w konsekwencji do niepoprawnej estymacji  $r(t)$ . W praktyce rejestrowane, dyskretne dane mają ograniczoną długość w czasie i ograniczone widmo w domenie częstotliwości. Zawsze obecny jest szum. Niski stosunek sygnału do zakłóceń S/N pogarsza wynik. Jest to powodem, dla którego zwykła filtracja odwrotna nie jest dobrym rozwiązaniem.

Jeśli dane rzeczywiste spełniają odpowiednie założenia można poprawić jakość aproksymacji. W praktyce wybór efektywnej metody dekonwolucji powinien obok modelowań być weryfikowany empirycznie. W systemie INVERS [2] są dostępne dwie procedury dekonwolucji: predykcyjna (spikowa) i minimum entropii MED.

W przedstawianych modelowniach, opcjonalnie, przed inwersją wykonywano dekonwolucję predykcyjną (spikową) lub dekonwolucję minimum entropii MED. Jest to typ dekonwolucji zaproponowany przez Wiggins (1978) [7]. W oryginalnym przedstawieniu termin minimum entropii traktowany jest jako synonim maksymalnego „uporządkowania” i w tym zawiera się istota różnicy względem klasycznych metod. Dekonwolucja spikowa – predykcyjna (Robinson and Treitel 1980) [6] prowadzi do „wybielenia” widma, co jest równoważne z minimalnym „uporządkowaniem”. Dekonwolucja minimum entropii MED dąży do uzyskania rozwiązania o najmniejszej liczby odbić. W wyniku wykonanej procedury powinny pozostać silne refleksy, teoretycznie reprezentowane poprzez izolowane delty Diraca  $\delta(t)$ . Dekonwolucja minimum entropii MED w oryginalnym podejściu polega na maksymalizacji normy *Varimax* [7] postaci:

$$V(\mathbf{r}) = \sum_i \left( \frac{r_i}{\|\mathbf{r}\|} \right)^4 \quad (3)$$

gdzie  $\mathbf{r}$  jest wektorem sekwencji współczynników odbicia o długości  $N$ .

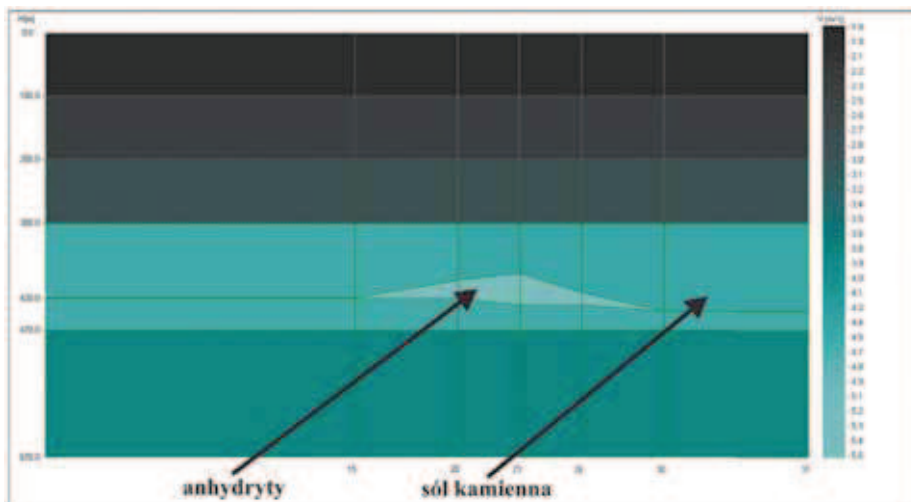
Maksymalizacja normy *Varimax* stanowiąca podstawę dekonwolucji minimum entropii MED, prowadzi właśnie do minimalizacji entropii, co w praktyce oznacza wzrost silnych współczynników odbicia, a osłabienie małych. Właściwość ta może stanowić wadę lub zaletę w zależności od celu geologicznego. Osłabianie małych współczynników może zmniejszyć wrażliwość metody na obecność szumu, przynajmniej przy odwzorowaniu silnych odbić. Własności sprężyste utworów cechsztynu generują relatywnie duże wartości współczynników odbicia na kontakcie anhydrytów i soli kamiennej. Predykcja występowania anhydrytów w złożu soli kamiennej jest podstawowym celem rozpoznawania niejednorodności budowy złoża. Tym podyktowany był wybór metody dekonwolucji MED jako drugiej, obok metody dekonwolucji predykcyjnej, w systemie INVERS opracowanym przede wszystkim dla modelowań sekcji pseudoimpedancji akustycznej dla warunków sejsmogeologicznych typowych dla pokładowych złóż soli kamiennej.

## 3. Syntetyczne sekcje pseudoimpedancji akustycznej

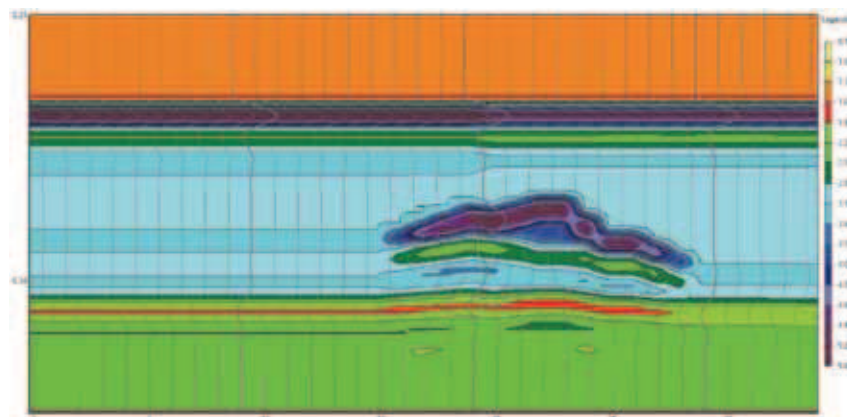
Przedstawione sekcje pseudoimpedancji akustycznej generowano dla jednego modelu sejsmogeologicznego złoża w różnych wariantach metodycznych przetwarzania i dla różnych parametrów sygnału sejsmicznego. W systemie INVERS [2] są dostępne dwie procedury dekonwolucji: predykcyjna i minimum entropii MED. Testowano zależność wzrostu dokładności inwersji w wyniku zastosowania dekonwolucji minimum entropii MED. Sekcje pseudoimpedancji akustycznej generowane z włączoną procedurą dekonwolucji minimum entropii MED zestawiono z analogicznymi, ale generowanymi z włączoną procedurą dekonwolucji predykcyjnej [3].

Dane wejściowe stanowi sejsmogeologiczny model ośrodka skalnego. Graficzna prezentacja sejsmogeologicznego modelu przedstawiona jest na rysunku 1. Skala po prawej stronie rysunku charakteryzuje cechy sprężyste utworów skalnych. Po lewej stronie rysunku jest skala głębokościowa.

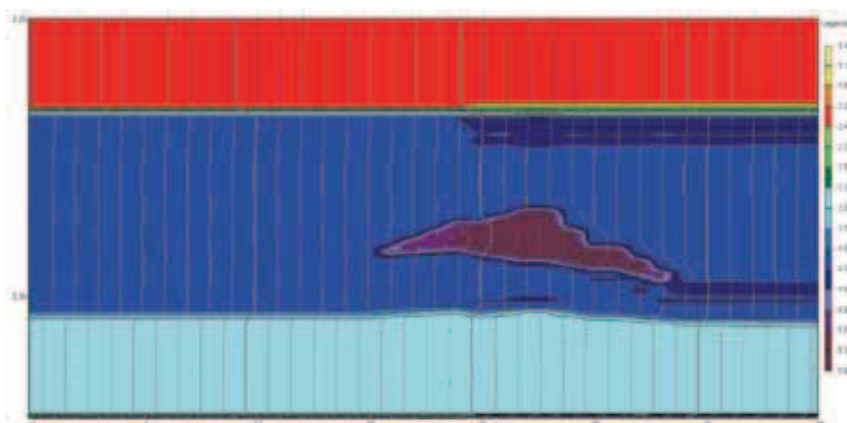
W centralnej części modelu w pokładzie soli kamiennej widoczna jest soczewka anhydrytu. Celem wykonanych modelowań jest ocena możliwości detekcji tej zmiany i przetestowanie wpływu dekonwolucji na rozdzielczość sekcji pseudoimpedancji akustycznej. Trasy pseudoimpedancji akustycznej są generowane na podstawie inwersji tras sejsmogramów syntetycznych. Sejsmogramy syntetyczne obliczono dla sygnału sejsmicznego o częstotliwości dominującej sygnału 60 Hz, dla długich i krótkich sygnałów sejsmicznych. Fragmenty sekcji pseudoimpedancji akustycznej obejmujące formację solną generowane dla krótkiego sygnału o częstotliwości dominującej  $f_0=60$  Hz przedstawione są na rysunkach 2, 3, 4. Na rysunku 2 przedstawiony jest fragment sekcji pseudoimpedancji akustycznej generowanej bez procedury dekonwolucji poprzedzającej inwersję. Na rysunku 3 przedstawiony jest fragment sekcji pseudoimpedancji akustycznej generowanej z wykonaną procedurą dekonwolucji minimum entropii MED poprzedzającą inwersję. Na rysunku 4 przedstawiony jest fragment sekcji pseudoimpedancji akustycznej generowanej z wykonaną procedurą dekonwolucji predykcyjnej poprzedzającą inwersję.



Rys. 1. Graficzna prezentacja modelu.  
 Fig. 1. Graphic presentation of the model



Rys. 2. Fragment syntetycznej sekcji pseudo-impedancji akustycznej generowanej dla krótkiego sygnału bez procedury dekonwolucji.  
 Fig. 2. Fragment of the synthetic section of pseudo-acoustic impedance generated for a short signal without deconvolution



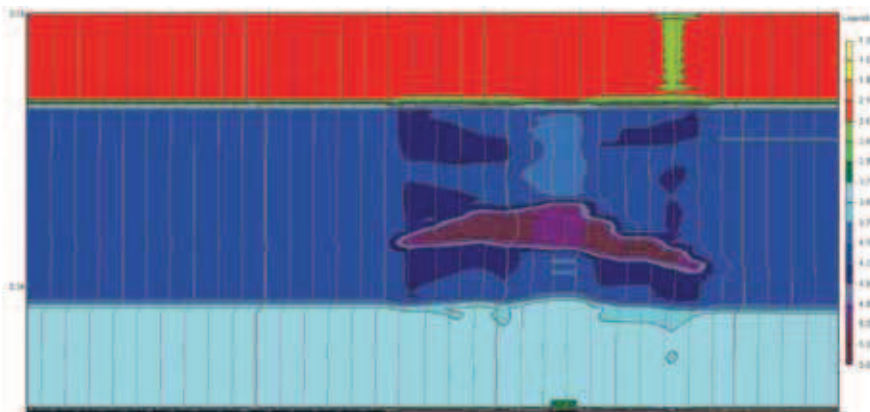
Rys. 3. Fragment syntetycznej sekcji pseudo-impedancji akustycznej generowanej dla krótkiego sygnału z wykonaną procedurą dekonwolucji minimum entropi MED  
 Fig. 3. Fragment of the synthetic section of pseudo-acoustic impedance generated for a short signal with the minimum entropy deconvolution MED

Na rysunkach 5, 6, 7 przedstawione są analogiczne, jak wyżej, fragmenty sekcji pseudoimpedancji akustycznej generowane dla długiego sygnału o tej samej częstotliwości dominującej, tj. 60 Hz. Na rysunku 5 przedstawiony jest frag-

ment sekcji pseudoimpedancji akustycznej generowanej bez procedury dekonwolucji poprzedzającej inwersję.

Na rysunku 6 przedstawiony jest fragment sekcji pseudoimpedancji akustycznej generowanej z wykonaną proce-





Rys. 4. Fragment syntetycznej sekcji pseudo-impedancji akustycznej generowanej dla krótkiego sygnału z wykonaną procedurą dekonwolucji predykcyjnej

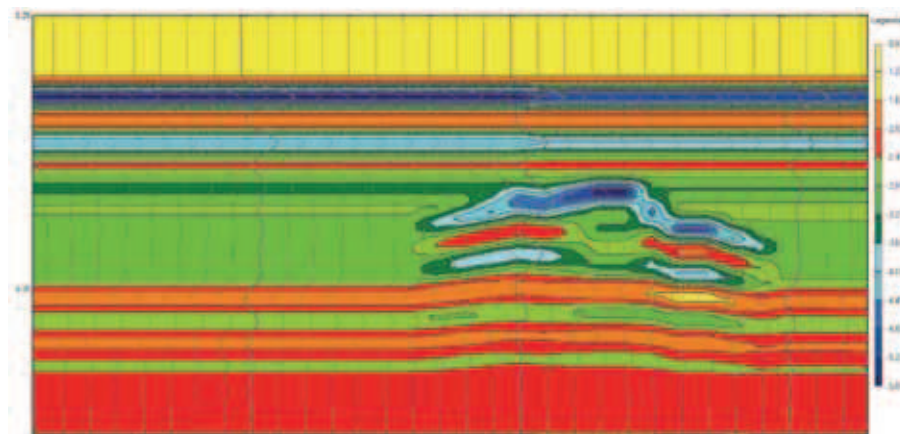
Fig. 4. Fragment of the synthetic section of pseudo-acoustic impedance generated for a short signal with predictive deconvolution

durą dekonwolucji minimum entropii MED poprzedzającej inwersję. Na rysunku 7 przedstawiony jest fragment sekcji pseudoimpedancji akustycznej generowanej z wykonaną procedurą dekonwolucji predykcyjną poprzedzającą inwersję.

Wyraźną poprawę w efekcie zastosowania dekonwolucji tras sejsmicznych obserwuje się gdy sygnał sejsmiczny jest

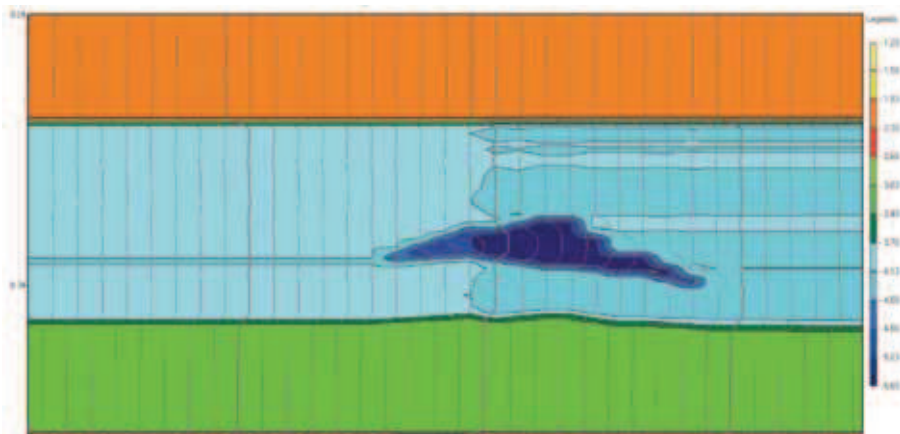
długi. Ma to istotne znaczenie, ponieważ rozdzielczość maleje w miarę wzrostu czasu trwania sygnału, który zależy od warunków geologicznych i jedynie w pewnym zakresie może być sterowany wyborem metodyki akwizycji danych.

Wizualna analiza przedstawionych sekcji pseudoimpedancji akustycznej wskazuje na lepsze wyniki wykonania



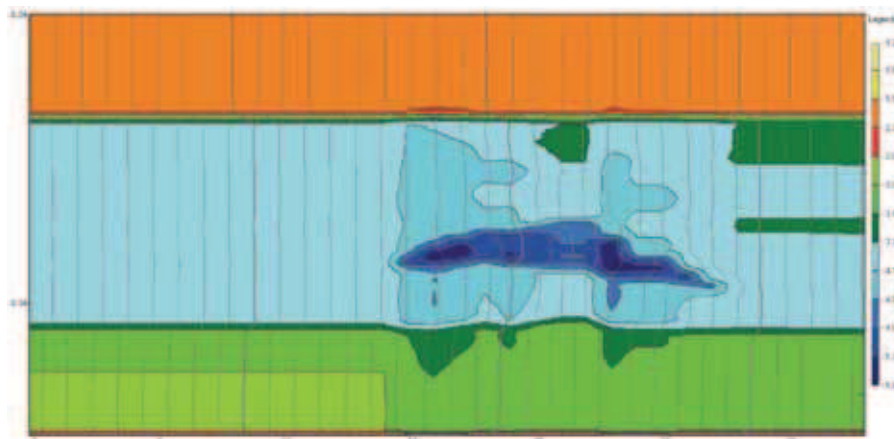
Rys. 5 Fragment syntetycznej sekcji pseudo-impedancji akustycznej generowanej dla długiego sygnału bez procedury dekonwolucji

Fig. 5. Fragment of the synthetic section of pseudo-acoustic impedance generated for a long signal without deconvolution



Rys. 6. Fragment syntetycznej sekcji pseudo-impedancji akustycznej generowanej dla długiego sygnału z wykonaną procedurą dekonwolucji minimum entropii MED

Fig. 6. Fragment of the synthetic section of pseudo-acoustic impedance generated for a long signal with the minimum entropy deconvolution MED



**Rys. 7. Fragment syntetycznej sekcji pseudo-impedancji akustycznej generowanej dla długiego sygnału z wykonaną procedurą dekonwolucji predykcyjną**

**Fig. 7. Fragment of the synthetic section of pseudo-acoustic impedance generated for a long signal with predictive deconvolution**

dekonwolucji minimum entropii MED, zwłaszcza dla detekcji anhydrytów, co jest spójne z założeniami teoretycznymi MED i wynika ze znacznego kontrastu własności sprężystych soli kamiennej i soli siarczanowych (anhydrytów). Efekty wykonanej dekonwolucji w każdym przypadku obniża wysoki poziom szumu.

Przedstawione w pracy wnioski i uogólnienia oparte są na większej liczbie danych, z których część zawarta jest w pracach autora [2]. Skuteczność dekonwolucji predykcyjnej ilustrują sekcje przedstawione w pracy [3]. Możliwość detekcji zaburzeń wynikających z obecności soli wtórnie przeobrażonych ilustrują sekcje przedstawione w pracy [4].

#### 4. Podsumowanie

Lokalne wtrącenia anhydrytów i zmiany ich miąższości występujące w pokładowych złożach soli kamiennej, perspektywicznych dla budowy podziemnych zbiorników, stanowią duży problem technologiczny. Ich obecność w złożu wymaga szczegółowego rozpoznania. Wskazane jest więc uzupełnienie danych z otworów wiertniczych o rozpoznanie złoża za pomocą pomiarów sejsmicznych, wykonywanych na powierzchni. Zakres tego rozpoznania obejmuje metodę sejsmiki refleksyjnej w wariancie przetwarzania prowadzącym do otrzymania sekcji pseudoimpedancji akustycznej. Precyzja interpretacji wzrasta w miarę ich rozdzielczości. Efektywną poprawę uzyskuje się po zastosowaniu dekonwolucji tras sejsmicznych. Wizualna analiza przedstawionych sekcji pseudoimpedancji akustycznej wskazuje na lepsze wyniki wykonania dekonwolucji minimum entropii MED, zwłaszcza dla detekcji anhydrytów. Wynika to ze znacznego kontrastu

własności sprężystych soli kamiennej i soli siarczanowych (anhydrytów) i jest spójne z założeniami teoretycznymi MED.

**Praca współfinansowana z działalności statutowej Katedry Geofizyki AGH nr. 11.11.140.769**

#### Literatura

1. *Kawalec-Latala E.*: The influence of seismic wavelet on the resolution of pseudoimpedance section for construction of underground storage — Wpływ sygnału sejsmicznego na rozdzielczość sekcji pseudoimpedancji akustycznej w rejonie budowy podziemnych magazynów Gospodarka Surowcami Mineralnymi Mineral Resources Management 2008 t. 24 z. 2/3 s. 387÷397
2. *Kawalec E.*: „Inwersja sejsmiczna w rozpoznawaniu niejednorodności złóż soli perspektywicznych dla budowy podziemnych zbiorników” Wydawnictwa AGH Kraków, seria Rozprawy Monografie nr. 201, ISSN 0867-6631 2009.
3. *Kawalec-Latala E.*: Detection of Salts Deposits Geometry Variation, AGH Journal of Mining and Geoengineering; vol. 36 (2012) No. 2 p. 161÷169.
4. *Kawalec-Latala E.*: Detekcja soli wtórnie przeobrażonych w pokładowych złożach soli kamiennej na podstawie sekcji pseudoimpedancji akustycznej, Przegląd Górniczy; t. 69 nr 3 2013, s. 57÷63.
5. *Pieńkowski G., Wagner R.*: Magazynowanie węglowodorów w strukturach solnych PROJECT NATO – CCMS – oferta dla Polski, Europy i NATO, Konferencja Paliwowo-Naftowa, Uniwersytet Warszawski 2006.
6. *Robinson E.*: A. Seismic Inversion and Deconvolution, Geophisica Press, London-Amsterdam 1984.
7. *Wiggins R.*: A. Minimum Entropy Deconvolution, Geoexploration, vol.16, 1978 pp. 21÷35.