



Jerzy DEC\*, Kamil CICHOSTĘPSKI\*\*

## Ocena właściwości złoża siarki na podstawie parametrów geomechanicznych wyznaczonych z danych sejsmicznych

Streszczenie: Wykorzystanie wyników sejsmicznych badań offsetowych do interpretacji złożowej jest powszechnie stosowane w poszukiwaniach złóż węglowodorów. Podstawowa interpretacja ilościowa parametrów związanych z właściwościami złożowymi oparta jest na analizach zmian amplitudy z offsetem (AVO). W tym wypadku analizowana jest amplituda sygnału odbitego od stropu złoża. Efekty anomalne obserwowane w offsetowej analizie amplitud (zmiana amplitudy z offsetem) wywołane obecnością węglowodorów powodowane są anomalną wartością współczynnika Poissona w warstwie złożowej (obecność np. gazu istotnie zaniża wartość współczynnika Poissona). Dysponując zapisem offsetowym (tzw. składowymi) można z zapisu sejsmicznego pozyskać znacznie bogatszą informację niż tylko sam efekt anomalny widoczny na przekrojach sejsmicznych. Dodatkowymi atrybutami zapisu sejsmicznego korelowanymi z właściwościami warstwy złożowej a obliczanymi na podstawie zmienności amplitud z offsetem są impedancja fali  $P$ , impedancja fali  $S$ , wskaźnik *fluid factor*, parametry geomechaniczne  $\lambda$ - $\rho$ ,  $\mu$ - $\rho$  oraz współczynnik Poissona.

W prezentowanym artykule autorzy przedstawiają wyniki pierwszej próby zastosowania szacowania parametrów geomechanicznych w aspekcie oceny właściwości złoża siarki. Do oceny tych parametrów niezbędne są informacje o parametrach petrofizycznych pozyskanych z badań geofizyki otworowej. W tym przypadku autorzy dysponowali danymi dotyczącymi porowatości, gęstości, zawartości siarki, oraz prędkości fali podłużnej  $P$  z dwóch otworów. Pomiar wartości prędkości fali poprzecznej  $S$  w warunkach produkcyjnych jest niezmiernie utrudniony i autorzy wykorzystali tu zależności opracowane na podstawie wcześniejszych badań opisanych w monografii autorstwa Jerzego Deca pt. Wysokorozdzielcze badania sejsmiczne w celu rozpoznania złoża siarki Osiek oraz określania zmian dynamicznych zachodzących w wyniku eksploatacji.

Wieloletnie badania geofizyczne wskazują, że wraz ze spadkiem porowatości obserwuje się wzrost zawartości siarki. Jednocześnie w przypadku podwyższonych koncentracji siarki szkielet wapienny złoża jest bardziej sztywny, a złożo określone jest jako zbite. Dla takich warunków petrofizycznych złożo siarki wykazywać będzie wysokie wartości impedancji fali  $P$  i  $S$ , co skutkować będzie również wzrostem właściwości geomechanicznych  $\lambda$ - $\rho$  i  $\mu$ - $\rho$ .

Uzyskane wyniki zaprezentowane są na przykładzie profilu sejsmicznego wykonanego w kopalni siarki w Osieku. Profil ten przebiegał w linii otworów, w których określono podstawowe parametry złoża na podstawie geofizycznych badań otworowych.

Słowa kluczowe: porowatość, zawartość siarki, impedancja, moduł Kirchhoffa, stała Lamègo

\* Dr hab. inż., \*\* Dr inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków.

## Evaluation of sulphur deposit properties on the basis of geomechanical parameters

**Abstract:** The usage of seismic offset data for reservoir characterization is widely used for hydrocarbon exploration. The basic quantitative interpretation of the parameters related to reservoir properties is based on the amplitude versus offset analysis (AVO). The AVO analysis utilizes the signal's amplitude reflected from the top of the reservoir. Anomalies observed in the offset domain are caused by anomalous changes in Poisson's ratio values (e.g. hydrocarbon saturation in rock results in lowering Poisson's ratio). When seismic offset data is available (pre stack CMP gathers) one can obtain more information than just the anomalous effect seen on stacked seismic sections alone. Additional attributes which correlated with the properties of the reservoir rock can be extracted from amplitude changes with offset are P-wave impedance, S-wave impedance, Fluid Factor, geomechanical parameters  $\lambda$ - $\rho$ ,  $\mu$ - $\rho$  and Poisson's ratio.

In this article, the authors present the results of the first attempt to apply the estimation of geomechanical parameters in the aspect of sulphur deposit properties evaluation. The well log data is necessary for the evaluation of these parameters. In this case, the authors had the measurements of porosity, bulk density, sulphur content and P-wave velocity from two wellbores. Shear wave measurement in the productive area is extremely difficult. Therefore, the authors used relationships developed on the basis of earlier studies described by Jerzy Dec in the monograph entitled: „High-Resolution Seismic Survey for the Recognition of the Osiek Sulphur Deposits and the Determination of Dynamic Changes Resulting from Exploitation”.

Long-term geophysical measurements indicate that an increase in sulphur content is accompanied by a decrease in porosity. At the same time, in the case of high sulphur concentrations, the limestone framework is more rigid and the deposit is defined as solid. The sulphur deposit will exhibit high values of P-wave impedance and S-wave impedance for such petrophysical conditions, which will also result in the high values of geomechanical parameters such as  $\lambda$ - $\rho$  and  $\mu$ - $\rho$ .

The obtained results are demonstrated by the example of the seismic profile recorded in the area of the Osiek Sulphur Mine. The analyzed profile went along the line of wellbores in which the basic reservoir parameters was measured.

**Keywords:** porosity, sulphur content, impedance, Kirchhoff modulus, Lamè constants

## Wprowadzenie

Od lat dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku standardową procedurą interpretacji złożowej była inwersja przekrojów sejsmicznych do przekrojów impedancji akustycznej. Uzyskany w ten sposób wynik inwersji sejsmicznej obrazuje jednak jedynie zmiany ośrodka geologicznego wywołane zmianami impedancji akustycznej przy normalnym padaniu fali sejsmicznej, natomiast nie są brane pod uwagę zmiany współczynnika Poissona czy wzajemny stosunek  $V_P/V_S$  (Cichostępski 2016; Russell 2014). Dopiero wprowadzenie od obliczeń inwersji efektu AVO widocznego na danych przed składaniem pozwoliło na dokładniejsze obrazowanie ośrodka geologicznego. Rodzaj inwersji, dzięki której na podstawie danych przed składaniem uzyskać można impedancję fali  $P$  i impedancję fali  $S$  zwany jest inwersją symultaniczną (Hampson i in. 2005). Posiadanie wyników inwersji symultanicznej umożliwia obliczenie dodatkowych parametrów geomechanicznych takich jak  $\lambda$ - $\rho$  i  $\mu$ - $\rho$ . Metody inwersji symultanicznej opracowane zostały w celu interpretacji złożowej, jednak z powodzeniem znalazły zastosowanie również dla celów określania litologii i właściwości petrofizycznych skał (Cichostępski i Kasperska 2016; Chopra i Castagna 2014).

Prowadzone od wielu lat na obszarze złoża Osiek badania sejsmiczne ukierunkowane są na rozpoznanie właściwości złoża siarki i na wychwycenie zmian tych właściwości zachodzących pod wpływem eksploatacji. Rozpoznanie sejsmiczne pozwala na określenie zróżnicowania złoża i wynikającej z tego zmienności pierwotnych właściwości petrofizycznych. W rejonach wydobywania siarki monitorowanie procesów dynamicznych, zachodzących

pod wpływem eksploatacji w złożu i jego nadkładzie, umożliwia prowadzenie bezpiecznej dla środowiska działalności górniczej. Zarówno w badaniach wykonywanych pod kątem rozpoznania złoża, jak i w zakresie monitorowania procesu otworowej eksploatacji siarki wykorzystywane są wysokorozdzielcze, wielokrotne profilowania refleksyjne. Umożliwiają one rozpoznanie złoża oraz jego nadkładu z dużą dokładnością w pionie i w poziomie.

Rozpoznanie pierwotnych właściwości złoża dotyczy głównie określenia porowatości i zawartości siarki. Istnieje dobrze skorelowana zależność pomiędzy porowatością złoża a zawartością siarki oraz korelacja obu tych parametrów z amplitudą refleksu rejestrowanego od stropu złoża (Dec 2008). Na tej podstawie poprzez zmiany amplitudy tego refleksu można wskazać:

- partie zbitego złoża o podwyższonej zawartości siarki,
- strefy uprzywilejowane dla przepływów technologicznych,
- obszary perspektywiczne dla efektywnej eksploatacji.

Natomiast uzyskany z badań sejsmicznych obraz strukturalny umożliwia określenie pozycji stropu i miąższości złoża, a także zaburzeń tektonicznych i facjalnych.

W trakcie rozwoju eksploatacji warstwa złoża ulega przeobrażeniu, w wyniku czego zmieniają się jej parametry fizykomechaniczne. Wykonane badania pokazują, że procesowi temu towarzyszy zmiana zapisu sejsmicznego uzyskiwanego m.in. od stropu złoża (Dec 2012). Często dochodzi do przerwania ciągłości refleksu od tej granicy, zmiany jego amplitudy, a nawet lokalnego zaniku. Obserwowane zmiany zapisu sejsmicznego umożliwiają identyfikację stref eksploatacji i określenie zasięgu jej oddziaływania.

Rejestrowane w zapisie sejsmicznym zmiany amplitud generalnie wynikają ze zmian koncentracji siarki w wapieniu, a w strefach eksploatacji ze zmiany relacji porowatość-zawartość siarki. Jednak refleksyjna sekcja sejsmiczna pozwala jedynie na interpretację jakościową i nie dostarcza informacji ilościowych o właściwościach petrofizycznych ośrodka. Zastosowanie metod inwersyjnych pozwala na lepszą ocenę właściwości ośrodka. Aby uzyskać trasy sejsmiczne odpowiednie dla celów inwersji, pewne kroki należy podjąć już na etapie akwizycji danych sejsmicznych. Należy odpowiednio zaprojektować pomiary ze względu na wielkość pokrycia oraz rozkład offsetów w celu uzyskania jak największego zakresu kątów. Nie należy również stosować grup geofonowych, gdyż ich długość wpływa na rejestrację na poszczególnych offsetach, zwłaszcza dla płytkich granic sejsmicznych (Allen i Peddy 1993). Przetwarzanie danych sejsmicznych pod kątem interpretacji złożowej jest o wiele bardziej rygorystyczne niż przetwarzanie dla celów interpretacji strukturalnej. Powinno ono zawierać estymację i usuwanie strat energii która następuje wraz z propagacją fali przez ośrodek, usuwanie zakłóceń koherentnych i niekoherentnych, usunięcie wpływu przypowierzchniowej strefy małych prędkości oraz całkowite usunięcie artefaktów spowodowanych przetwarzaniem. Stosowane procedury powinny jak najmniej ingerować w sygnał sejsmiczny. Dzięki takim zabiegom powinno się uzyskiwać kolekcje CMP wraz z zachowanymi prawdziwymi relacjami amplitud czyli prawdziwą refleksyjność ośrodka.

W warunkach występowania złoża w Osieku obserwuje się wzrost zawartości siarki wraz ze spadkiem wartości porowatości. Jednocześnie w przypadku podwyższonych koncentracji siarki szkielet wapienny złoża jest bardziej sztywny, a złożo określane jest jako zbite. Dla takich warunków petrofizycznych złożo siarki wykazywać będzie wysokie wartości impe-

dancji fali  $P$  i  $S$ , co skutkować będzie również wzrostem właściwości geomechanicznych  $\lambda$ - $\rho$  i  $\mu$ - $\rho$ . Natomiast w strefach eksploatacji wartości tych parametrów powinny ulec wyraźnemu zmniejszeniu. Zmienność tych parametrów w warunkach złoża siarki Osiek stała się przedmiotem zainteresowania autorów, a wstępne wyniki uzyskane wzdłuż profilu sejsmicznego wykonanego w rejonie, w którym wytop siarki był w fazie początkowej.

### 1. Metodyka badań i przetwarzania danych

W badaniach sejsmicznych ukierunkowanych na rozpoznanie struktury i parametrów fizycznych warstwy złoża stosowana jest metoda wielokrotnego profilowania refleksyjnego wzdłuż profilu 2D przy zastosowaniu poniższej metodyki:

- rozstaw skrajny z odsunięciem,
- liczba kanałów rejestrujących – 48,
- odległość pomiędzy kanałami – 5 m,
- odbiór – 1 geofon na kanał,
- interwał strzałowy – 5 m,
- wzbudzanie udarowe,
- składanie pionowe od trzy- do dziesięciokrotnego,
- zakres offsetów od 60 do 295 m (max 305 m),
- nominalna krotność – 24,
- czas rejestracji – 512 ms,
- krok próbkowania zapisu – 1 ms.

W wyniku zastosowania tak dobranych parametrów rejestracji uzyskuje się rejestracje polowe o dobrym stosunku sygnału do zakłócenia. W przypadku zastosowania rozstawu z odsunięciem zakłócenia koherentne w postaci fali powierzchniowej i akustycznej układają się na czasach większych niż czas wstąpienia refleksów od granic złoża (stropu i spągu). W wyniku tego zabiegu amplitudy refleksów nie są zaburzone poprzez zakłócenia koherentne. Nie ma więc potrzeby usuwania ich poprzez stosowanie procedur filtracji, które prowadzić mogą do przekłamań rzeczywistej amplitudy sygnału.

Dane pomiarowe poddawane są przetwarzaniu umożliwiającym zwiększenie rozdzielczości zapisu i dalszą, znaczną redukcję zakłóceń. Dane przetworzone zostały przy zastosowaniu następujących procedur:

- korekta przebiegów (tras) – eliminacja błędów, kontrola polaryzacji,
- przyjęcie zmiennego poziomu odniesienia *floating datum* (powierzchnia terenu),
- wprowadzenie polowych poprawek statycznych (redukcja pomiarów do *floating datum*),
- *muting*,
- powierzchniowo zgodne normowanie tras,
- filtracja formująca rekordów pomiarowych,
- powierzchniowo zgodna dekonwolucja typu *spike*,
- filtracja częstotliwościowa rekordów pomiarowych (20/40-150/180Hz),
- analiza prędkości na rekordach CMP,

- wprowadzenie poprawek kinematycznych NMO,
- automatyczna korekta statyki na rekordach CMP po NMO,
- przetwarzanie dla potrzeb inwersji (opisane w pkt. 4),
- sumowanie tras CMP, filtracja częstotliwościowa sumy (20/40-150/180Hz), filtracja FX sumy w celu eliminacji zakłóceń niekoherentnych.

W kopalni siarki Osiek poziomem odniesienia jest powierzchnia terenu. Wszystkie dane otworowe podawane są względem tej powierzchni. Z tego względu oraz z uwagi na niewielkie deniwelacje terenu w obrębie profili sejsmicznych, dane sejsmiczne redukowane są do zmiennego poziomu odniesienia (*floating datum*) jakim jest „wygładzona” powierzchnia terenu.

## 2. Procedury inwersyjne

Inwersja sejsmiczna jest modelowaniem odwrotnym w sejsmice. W szerokim rozumieniu tego terminu jest to proces odwzorowania struktury i właściwości wglębnych ośrodka geologicznego na podstawie powierzchniowych pomiarów sejsmicznych (Kasina 1998). Metoda ta, korzystając z danych sejsmicznych, geofizyki otworowej i danych geologicznych umożliwia przejście z domeny refleksyjności do domeny impedancji tj. właściwości, która umożliwia ilościową interpretację właściwości ośrodka (Latimer i in. 2000; Pendrel 2006). Na podstawie obliczonego rozkładu impedancji można ocenić zmiany litologii, porowatości oraz rodzaj nasycenia przestrzeni porowej. Inwersja sejsmiczna po składaniu bazuje na spłotowym modelu trasy sejsmicznej, w którym trasa sejsmiczna ma postać:

$$S(t) = W(t) \cdot R(t) + N(t) \quad (1)$$

gdzie:

- $S(t)$  – trasa sejsmiczna w funkcji czasu,
- $W(t)$  – sygnał źródła,
- $R(t)$  – rozkład współczynników odbicia w domenie czasu,
- $N(t)$  – szum addytywny.

Współczynnik odbicia (refleksyjność) jest definiowany jako kontrast wartości impedancji akustycznej (impedancji fali  $P$ ) pomiędzy dwoma warstwami ośrodka:

$$r_{Pi} = \frac{\rho_{i+1}V_{Pi+1} - \rho_iV_{Pi}}{\rho_{i+1}V_{Pi+1} + \rho_iV_{Pi}} = \frac{Z_{Pi+1} - Z_{Pi}}{Z_{Pi+1} + Z_{Pi}} \quad (2)$$

gdzie:

- $r_{pi}$  – współczynnik odbicia przy normalnym padaniu fali na  $i$ -tą granicę rozdziału,
- $\rho$  – gęstość objętościowa,
- $V_P$  – prędkość fali  $P$ ,
- $Z_{Pi}$  – impedancja fali  $P$ .

Sygnal źródła potrzebny do procesu inwersji ekstrahowany jest z danych sejsmicznych  $S(t)$  opisanych wzorem 1. Tak uzyskany estymator sygnału jest aplikowany w procesie dekonwolucji. Proces ten przybliża trasę sejsmiczną  $S(t)$  do rozkładu współczynników odbicia  $R(t)$ . Impedancja fali  $P$  może być wówczas obliczona na podstawie rekursywnej zależności podanej przez Lindseth (1979) w postaci dyskretnej:

$$Z_{P_{i+1}} = Z_{P_i} \left[ \frac{1+r_{P_i}}{1-r_{P_i}} \right] \quad (3)$$

Sekcje sejsmiczne są przybliżeniem zero-offsetowej odpowiedzi ośrodka, w związku z tym inwersja sejsmiczna przeprowadzona standardowo na danych po składaniu (przekrojach sejsmicznych) pozwala uzyskać jedynie rozkład impedancji fali  $P$ , gdyż ta zależy jedynie od zerowego kąta padania fali na granicę. Przy obliczeniach nie są brane pod uwagę zmiany współczynnika  $V_P/V_S$  i wywołane nimi efekty AVO. W celu dokładniejszego określania parametrów sprężystych ośrodka wymagana jest również znajomość impedancji fali  $S$ . Jednak bezpośrednia metoda otrzymania impedancji fali  $S$  może być przeprowadzona jedynie na przekrojach sejsmicznych fali  $S$ . Inwersja przeprowadzona osobno na przekrojach fal  $P$  i  $S$  ignoruje fakt, że dla skał istnieją liniowe zależności pomiędzy prędkościami fal  $P$  i  $S$  (Castagna i in. 1985) jak i pomiędzy prędkością fali  $P$  oraz gęstością (Gardner i in. 1974). W celu uwzględnienia tych zależności proponuje się stosowanie uogólnionej wersji inwersji sejsmicznej zwanej inwersją symultaniczną (Hampson i in. 2005).

Inwersja symultaniczna obliczana jest na danych przed składaniem (dla fal  $PP$  bądź fal przemiennych  $PS$ ), co pozwala na jednoczesne obliczenie impedancji fal  $P$ ,  $S$  i gęstości zachowując przy tym wzajemne relacje pomiędzy nimi. Inwersja symultaniczna bazuje na aproksymacji równań Zeoprittza (1919) przedstawionej przez Fattiego i in. (1994):

$$R_P(\theta) \approx \left(1 + \tan^2\theta\right) R_P - 8\left(\frac{V_S}{V_P}\right)^2 \sin^2\theta R_S - \left(\frac{1}{2}\tan^2\theta - 2\frac{V_S^2}{V_P^2}\sin^2\theta\right) R_D \quad (4)$$

gdzie:

$$R_P = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta V_P}{V_P} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z_P}{Z_P} \quad (5)$$

$$R_S = \frac{1}{2} \left( \frac{\Delta V_S}{V_S} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \right) = \frac{1}{2} \frac{\Delta Z_S}{Z_S} \quad (6)$$

$$R_D = \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (7)$$

Aproksymacja ta wiąże zmiany współczynników odbicia (amplitud) w funkcji kąta padania ze zmianami prędkości fali  $P$ , prędkości fali  $S$  i gęstości na granicy rozdziału. Atrybuty  $R_P$ ,  $R_S$  i  $R_D$  są odpowiednio refleksyjnością fali  $P$ , refleksyjnością fali  $S$  i refleksyjnością gęstości obliczonych dla normalnego padania promienia sejsmicznego na granicę rozdziału.

Natomiast  $Z_P$  i  $Z_S$  są odpowiednio impedancją fali  $P$  i impedancją fali  $S$ . Pierwszy człon równania zależy od bliskich kątów padania fali, drugi od średnich, natomiast trzeci człon zależy od kątów padania bliskim kątom krytycznym ( $<45^\circ$ ).

Inwersja symultaniczna jest inwersją bazującą na modelu sejsmogeologicznym (*model based inversion*). Ten rodzaj inwersji polega na konstrukcji modelu sejsmogeologicznego poprzez wykorzystanie danych geofizyki wiertniczej (prędkości i gęstości) i interpretacji sejsmicznej (Russell 1988). Na podstawie modelu obliczane są syntetyczne składowe CMP, które jest porównywane ze składowymi rzeczywistymi. Następnie wartości prędkości i gęstości modelu są iteracyjnie modyfikowane aż do momentu uzyskania zgodności kolekcji syntetycznych, stworzonych na jego podstawie, do kolekcji polowych. Wyniki inwersji symultanicznej w postaci impedancji fali  $P$ , impedancji fali  $S$  oraz gęstości są podstawowymi właściwościami skał które mogą być obliczone na podstawie danych sejsmicznych. W wyniku inwersji można również uzyskać stosunek  $V_P/V_S$ . Obliczoną gęstość rzadko wykorzystuje się w interpretacji ze względu na jej silną zależność od dużych kątów padania (dalekich offsetów).

Kolejnym sposobem wyrażenia zmian parametrów petrofizycznych ośrodka geologicznego jest obliczenie właściwości geomechanicznych. Dzięki nim możliwe staje się rozróżnienie mediów nasycających przestrzeń porową oraz zmiany litologii. Zastosowanie metody Lambda-Mu-Rho (LMR) (Goodway i in. 1997, 2010) pozwala na określenie zmian stałej Lamégo  $\lambda$  i modułu odkształcenia postaci  $\mu$  w funkcji gęstości. Stała Lamégo jest najbardziej czuła na zmiany nasycenia przestrzeni porowej. Jest miarą nieściśliwości materiału. Natomiast moduł odkształcenia postaci jest miarą sztywności materiału, nie zależy od nasycenia przestrzeni porowej. Poprzez analizę zmian tych stałych można stwierdzić obecność nasycenia węglowodorami oraz zmiany litologii. Atrybuty metody LMR obliczane są ze wzorów:

$$\lambda \cdot \rho = Z_P^2 - 2Z_S^2 \quad (8)$$

$$\mu \cdot \rho = Z_S^2 \quad (9)$$

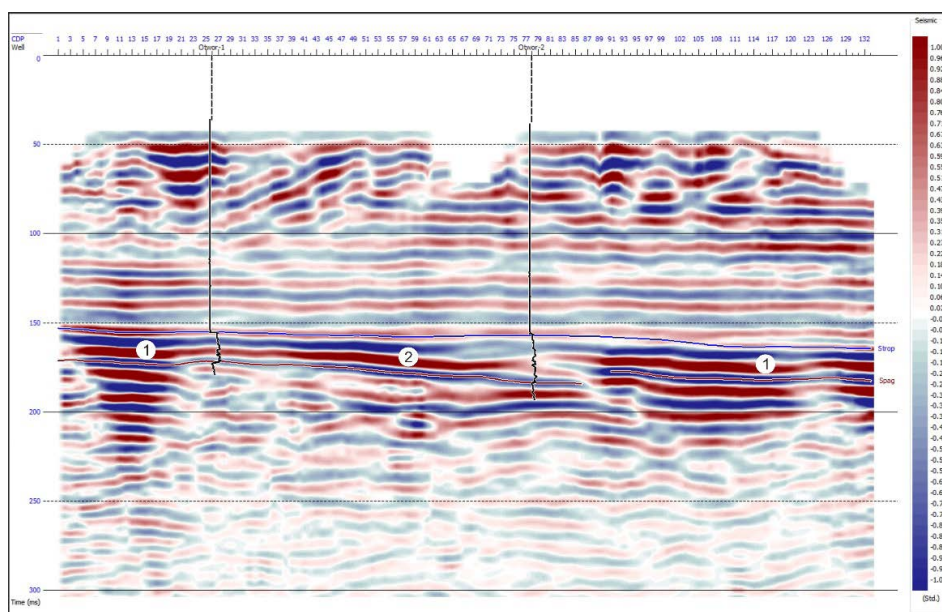
Metoda ta nie pozwala na bezpośrednie obliczenie wartości  $\lambda$  i  $\mu$ , jedynie ich iloczynów z gęstością. Jest to spowodowane trudnością w rozdzieleniu składowej gęstościowej i składowej prędkościowej z obliczonych impedancji. Parametr  $\lambda \cdot \rho$  zwany jest wskaźnikiem nasycenia przestrzeni porowej lub nieściśliwością. Skały nasycone węglowodorami będą charakteryzować się małymi wartościami. Parametr  $\mu \cdot \rho$  zwany jest wskaźnikiem litologii. Skały zbudowane z kwarcu będą charakteryzować się dużymi wartościami, natomiast skały zbudowane z minerałów ilastych będą przyjmować małe wartości. Skały węglanowe natomiast będą przyjmować wartości największe. Nieściśliwość będzie się więc zmieniać wraz ze zmianami rodzaju nasycenia przestrzeni porowej, podczas gdy sztywność powinna zależeć tylko od szkieletu skalnego.

### 3. Przeprowadzenie procesu inwersji

Jak już wcześniej wspomniano, autorzy zastosowali inwersję symultaniczną, dzięki której z danych przed składaniem uzyskano impedancję fali  $P$  i impedancję fali  $S$  oraz wartości parametrów geomechanicznych  $\lambda \cdot \rho$  i  $\mu \cdot \rho$ .

Próby inwersyjne zostały wykonane wzdłuż profilu usytuowanego w linii przebiegającej koło otworów, w których określono podstawowe parametry złoża na podstawie geofizycznych badań otworowych. Wzdłuż wybranego profilu autorzy dysponowali danymi z dwóch otworów, a dane te obejmują informacje o porowatości i gęstości złoża, zawartości siarki, oraz prędkości fali podłużnej  $P$  (w złożu i nadkładzie). Pomiar wartości prędkości fali poprzecznej  $S$  w otworach, w warunkach produkcyjnych jest niezmiernie utrudniony i autorzy wykorzystali tu zależności opracowane na podstawie wcześniejszych badań (Dec 2012). Otwór-1 znajduje się w strefie nienaruszonego złoża, natomiast Otwór-2 znajduje się w strefie początkowego oddziaływania wytopu siarki.

Czasowy przekrój sejsmiczny na którym wykonano próby inwersji przedstawia rysunek 1 a położenie widocznych na rysunku krzywych prędkości odpowiada pozycjom otworów. W otoczeniu otworu 1 widoczne jest pozorne, czasowe ugięcie granicy spągu złoża tzw. *time sag*, który zwykle wywołany jest spadkiem wartości prędkości fali  $P$ . W tym przypadku widoczne ugięcie wynika z przejścia siarki w stan płynny i zastąpienia przestrzeni porowej częściowo przez wodę. Jest to jednak tylko wskaźnik jakościowy, opisywany w kilku wcześniejszych publikacjach (Dec 2008, 2012), pozwalający zidentyfikować strefę wytopu.



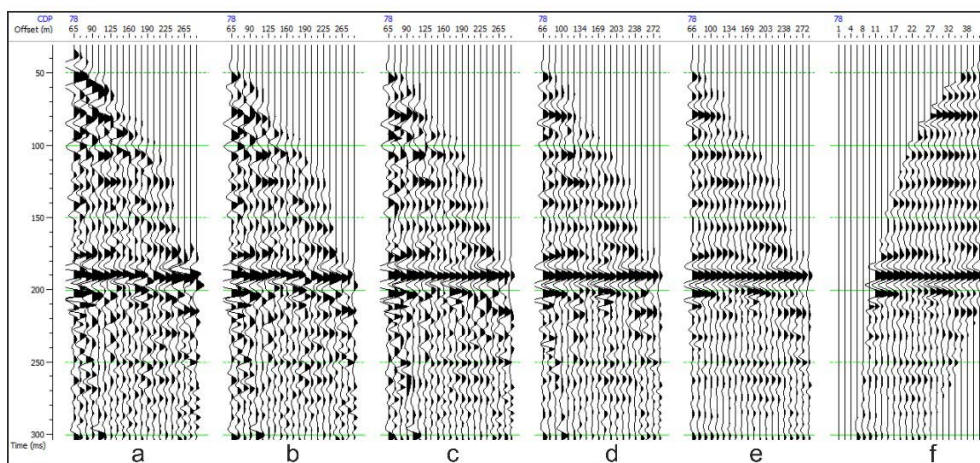
Rys. 1. Czasowy przekrój sejsmiczny przechodzący przez Otwór-1 i Otwór-2. Linie: niebieska – strop, brązowa – spąg złoża, czarne – krzywe prędkości, 1 – strefa nieeksploatowana, 2 – strefa wytopu

Fig. 1. Seismic time profile along Otwór-1 and Otwór-2 wellbores, lines: blue – top, brown – bottom of the deposit, red – velocity logs, 1 – not exploited zone, 2 – melting zone



Danymi wejściowymi do obliczenia inwersji symultanicznej były składowe CMP z zaaplikowaną statyką i poprawkami kinematycznymi (rys. 2a). Przed przystąpieniem do obliczeń, w celu podniesienia stosunku  $S/N$  dane przed składaniem zostały poddane dodatkowym procedurom przetwarzania:

- filtracja pasmowa 20/40–150/180Hz (rys. 2b),
- statyka reszkowa dla końcowego wyprostowania osi fazowych fal odbitych; zastosowano okna o długości 40 ms w kroku co 20 ms; maksymalne dopuszczalne przesunięcie czasowe wynosiło 8 ms (rys. 4.2c),
- utworzenie kolekcji superskładowych w celu podniesienia wiarygodności zapisu sejsmicznego poprzez sumowanie tras dla tych samych offsetów; zastosowano sumowanie 3 sąsiednich CMP (rys. 4.2d),
- paraboliczna Transformacja Radona w celu usunięcia szumu przypadkowego (rys. 4.2e),
- stworzenie kolekcji kątowych na podstawie wygładzonego pola prędkości zbudowanego na podstawie krzywych profilowań czasów interwałowych w otworach (Otwór-1 i Otwór-2); uzyskano maksymalne kąty padania wynoszące  $42^\circ$  (rys. 4.2f).

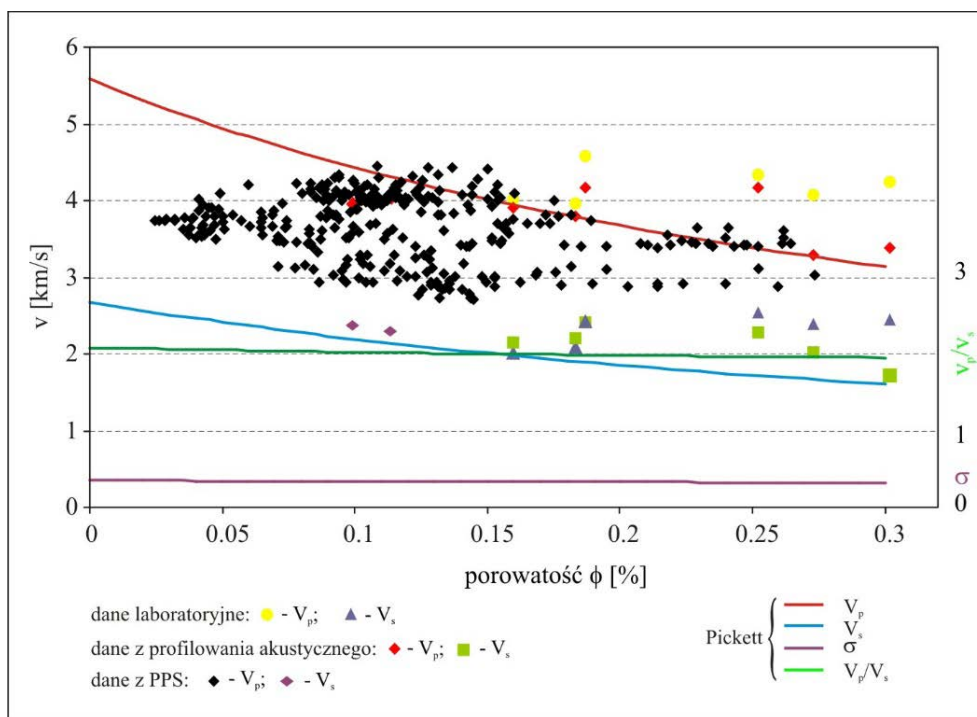


Rys. 2. Zestawienie wyników kolejnych etapów przetwarzania dla celów inwersji sejsmicznej: a) kolekcja CMP, b) filtracja pasmowa, c) statyka reszkowa, d) super kolekcja, e) transformacja Radona, f) kolekcja kątowna

Fig. 2. Data conditioning for the inversion process: a) CMP gather, b) bandpass filter, c) trim statics, d) super gather, e) radon transform, f) angle gather

Model sejsmogeologiczny dla potrzeb inwersji zbudowano na podstawie krzywych geofizyki wiertniczej (prędkości fali  $P$  i  $S$  oraz gęstość objętościowa) z otworów 1 i 2. W otworach nie dysponowano pomiarami prędkości fali  $S$ , która jest niezbędna do obliczenia inwersji symultanicznej. Prędkości fali poprzecznej obliczone zostały więc na podstawie prędkości fali  $P$  przy zastosowaniu opracowanych wcześniej zależności oraz doświadczenia autorów z rejonu badań (Cichostępski 2016; Dec 2012). Dla nadkładu złoża (iły krakowiec-kie) przyjęto stosunek  $V_P/V_S$  równy 3.0, dla wapienia siarkonośnego przyjęto stosunek  $V_P/V_S$

równy 2.0, natomiast dla warstw podścielających (warstwy baranowskich) przyjęto stosunek  $V_p/V_s$  równy 2.2. Stosunek  $V_p/V_s$  dla złoże oparto na wartości wynikającej z formuły Picketta, która najlepiej odpowiada relacjom pomiędzy tymi prędkościami stwierdzonym na podstawie danych otworowych (rys. 3).



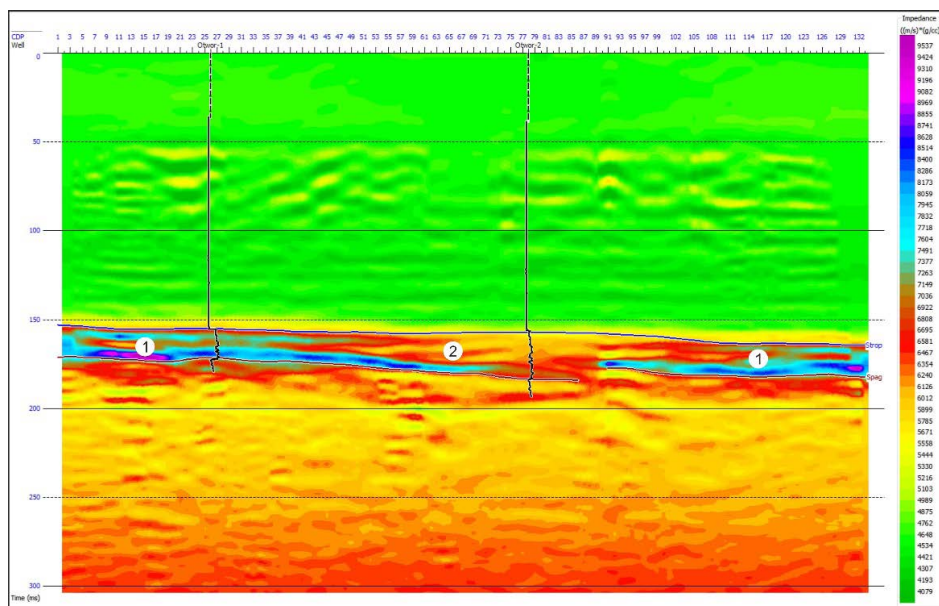
Rys. 3. Zestawienie zależności pomiędzy parametrami petrofizycznymi złoże siarki według formuły Picketta z danymi różnych metod pomiarowych

Fig. 3. Juxtaposition of relationships between the sulphur deposit's petrophysical parameters given by the Pickett formula, with parameters measured by different methods

Wyniki inwersji symultanicznej w postaci rozkładu impedancji fali  $P$  i impedancji fali  $S$  przedstawiają odpowiednio rysunku 4 i 5. Natomiast atrybuty  $\lambda\cdot\rho$  i  $\mu\cdot\rho$  przedstawiane są na rysunkach 6 i 7.

Widoczny na rysunku 4 rozkład impedancji fali  $P$  pokazuje, że atrybut ten znakomicie wydziela warstwę złoże jako interwał o podwyższonych wartościach impedancji. Zarazem występująca w otoczeniu otworu 2 strefa oddziaływania wytopu (prowadzonego w sąsiedniej linii otworów) zaznacza się w formie soczewki o nieregularnych kształtach i obniżonych wartościach tego atrybutu. Obraz taki jest zgodny z doświadczeniami górnictwymi, które wskazują na nieregularne często formy stref wytopu.

Podobnie jak impedancja fali  $P$ , tak i impedancja fali  $S$  (rys. 5) konturuje warstwę złoże jako interwał o podwyższonych wartościach impedancji. Jednak na granicy spągu złoże kontrast impedancji w stosunku do atrybutu dla fali  $P$  jest tu nieco mniejszy i miejscami rozmyty.



Rys. 4. Przekrój sejsmiczny w wersji impedancji fali  $P$ . Linie: niebieska – strop, brązowa – spąg złoża, czarne – krzywe prędkości, 1 – strefa nieeksploatowana, 2 – strefa wytopu

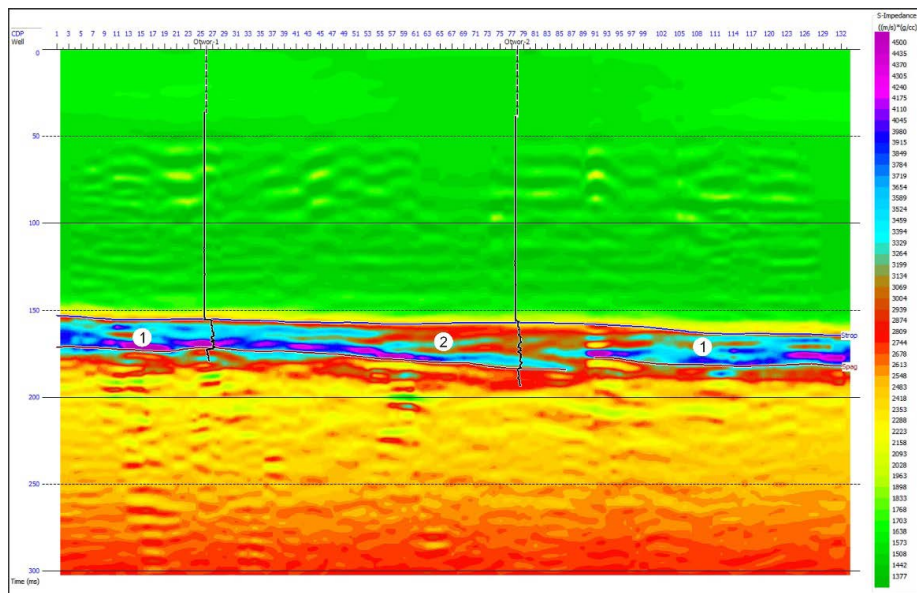
Fig. 4. Seismic profile in the  $P$ -wave impedance domain. Lines: blue – top, brown – bottom of the deposit, red – velocity logs, 1 – not exploited zone, 2 – melting zone

Występująca w otoczeniu otworu 2 strefa oddziaływania wytopu (prowadzonego w sąsiedniej linii otworów) zaznacza się tu wyraźnie tylko w partii przy stropie złoża. Jest to też cenna informacja ilościowa, która dobrze koreluje z doświadczeniami górniczymi i założeniami teoretycznymi. Obniżenie bowiem wartości prędkości fali  $S$  związane jest tak z powiększaniem się przestrzeni porowej (wskutek wytopu), jak i przeobrażeniem szkieletu wapiennego w wyniku eksploatacji. W początkowej fazie wytopu ma to najczęściej miejsce w partiach przystropowych.

Atrybut  $\lambda\text{-}\rho$  (rys. 6) w stosunku do rozkładu impedancji fali  $P$  nie wnosi istotnych informacji. Generalnie poza drobnymi szczegółami jest powieleniem obrazu impedancji.

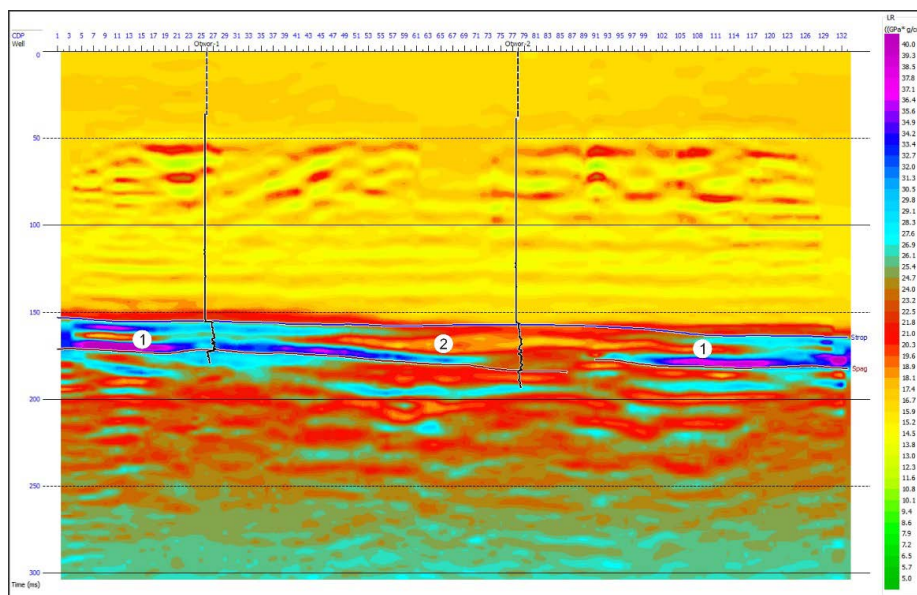
Atrybut  $\mu\text{-}\rho$  (rys. 7), podobnie jak impedancja fali  $S$ , manifestuje obecność anomalnych swych wartości tylko w partii przy stropie złoża. Genezę tej anomalii omówiono już wcześniej przy impedancji fali  $S$ .

Natomiast atrybut ten jest miarą sztywności ośrodka i jego relatywnie zwiększone wartości odpowiadają skale o zwięzłej strukturze i niskiej porowatości. W tym przypadku, poprzez swe wyraźne różnicowanie, wydziela on w obrębie warstwy złoża pionowe interwały o zmiennych właściwościach. Poszczególne interwały korelują z poziomami o różnym stopniu osiarkowania i porowatości. Zasadniczo wzrost wartości atrybutu odpowiada interwałom zbitego wapienia o podwyższonej zawartości siarki.



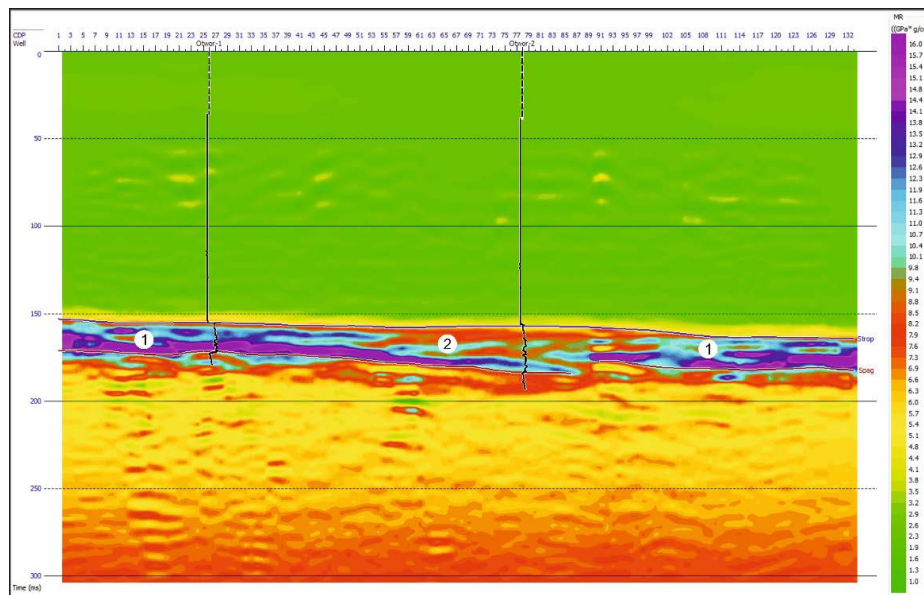
Rys. 5. Przekrój sejsmiczny w wersji impedancji fali S. Linie: niebieska – strop, brązowa – spąg złoża, czarne – krzywe prędkości, 1 – strefa nieeksploatowana, 2 – strefa wytopu

Fig. 5. Seismic profile in the S-wave impedance domain. Lines: blue – top, brown – bottom of the deposit, red – velocity logs, 1 – not exploited zone, 2 – melting zone



Rys. 6. Przekrój sejsmiczny w wersji atrybutu  $\lambda$ - $\rho$ . Linie: niebieska – strop, brązowa – spąg złoża, czarne – krzywe prędkości, 1 – strefa nieeksploatowana, 2 strefa wytopu

Fig. 6. Seismic profile in the  $\lambda$ - $\rho$  domain. Lines: blue – top, brown – bottom of the deposit, red – velocity logs, 1 – not exploited zone, 2 – melting zone



Rys. 7. Przekrój sejsmiczny w wersji atrybutu  $\mu\text{-}\rho$ . Linie: niebieska – strop, brązowa – spąg złoża, czarne – krzywe prędkości, 1 – strefa nieeksploatowana, 2 – strefa wytopu

Fig. 7. Seismic profile in the  $\mu\text{-}\rho$  domain. Lines: blue – top, brown – bottom of the deposit, red – velocity logs, 1 – not exploited zone, 2 – melting zone

## Podsumowanie

Przeprowadzone próby inwersyjne jednoznacznie wskazują na celowość stosowania parametrów geomechanicznych do rozpoznania właściwości złoża. Według autorów najlepszymi atrybutami są impedancja fali  $P$  oraz parametr  $\mu\text{-}\rho$ .

Impedancja fali  $P$  jednoznacznie konturuje warstwę złoża, wydziela strefy złoża związłego, a zarazem pokazuje poziomy i pionowy zasięg wytopu.

Atrybut  $\mu\text{-}\rho$  będący miarą sztywności ośrodka wydziela w obrębie warstwy złoża pionowe interwały o zmiennych właściwościach, a wzrost wartości atrybutu koreluje z interwałami zbitego wapienia o podwyższonej zawartości siarki.

Przedstawione w artykule wyniki są rezultatem badań prowadzonych w Katedrze Geofizyki AGH w ramach prac statutowych nr 11.11.140.645.

## Literatura

- Allen, J.L. i Peddy, C.P. 1993. Amplitude variation with offset: gulf coast case studies. *SEG Geophysical Developments Series 4*.
- Castagna i in. 1985 – Castagna, J.P., Batzle, M.L. i Eastwood, R.L. 1985. Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks. *Geophysics* 50, s. 571–581.

- Chopra, S. i Castagna, J.P. 2014. AVO. Investigations in Geophysics, No. 16, Society of Exploration Geophysics, Tulsa.
- Cichostępski, K. 2016. *Analiza zmian zapisu sejsmicznego z offsetem jako narzędzie do identyfikacji stref akumulacji gazu ziemnego w cienkwarstwowych utworach Zapadliska Przedkarpackiego*. AGH, Kraków (praca doktorska).
- Cichostępski, K. i Kasperska, M. 2016. Geomechanical properties of shale gas reservoirs in Poland Baltic Basin using AVO analysis and inversion. *78th EAGE Conference & Exhibition*, Extended Abstract, Vienna.
- Dec, J. 2008. Sejsmiczny monitoring otworowej eksploatacji złoża siarki. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 24, z. 2/3, s. 199–213.
- Dec, J. 2012. Wysokorozdzielcze badania sejsmiczne w celu rozpoznania złoża siarki Osiek oraz określania zmian dynamicznych zachodzących w wyniku eksploatacji. *Rozprawy Monografie 257*. Kraków: Wyd. AGH, ISBN 978-83-7464-528-7.
- Fatti i in. 1994 – Fatti, J.L., Smith, G.C., Vail, P.J., Strauss, P.J. i Levitt, P.R. 1994. Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: a 3-D seismic case history using the Geostack technique. *Geophysics* 59, s. 1362–1376.
- Gardner i in. 1974 – Gardner, G.H.F., Gardner, L.W. i Gregory, A.R. 1974. Formation velocity and density – The diagnostic basic for stratigraphic traps. *Geophysics* 39, s. 770–780.
- Goodway i in. 1997 – Goodway, B., Chen, T. i Downton, J. 1997. Improved AVO fluid detection and lithology discrimination using Lamé petrophysical parameters: “ $\lambda\rho$ ”, “ $\mu\rho$ ”, & “ $\lambda/\mu$  fluid stack” from P and S inversions. [W:] *67th Annual International Meeting*, SEG Expanded Abstract, s. 183–186.
- Goodway i in. 2010 – Goodway, B., Perez, M., Varsek, J. i Abaco, C. 2010. Seismic petrophysics and isotropic-anisotropic AVO methods for unconventional gas exploration. *The Leading Edge* 29, 12, s. 1500–1508.
- Hampson i in. 2005 – Hampson, D.P., Russell, B.H. i Bankhead, B. 2005. Simultaneous Inversion of Pre-stack Seismic Data. *75th Annual International Meeting*, SEG, Expanded Abstracts, s. 1633–1637.
- Kasina, Z. 1998. *Przetwarzanie danych sejsmicznych*. Wyd. Centrum PPGSMiE PAN, Kraków.
- Latimer i in. 2000 – Latimer, R.B., Davison, R., i Van Riel, P. 2000. An interpreter guide to understanding and working with seismic derived acoustic impedance data. *The Leading Edge* 19, s. 242–256.
- Pendrel, J. 2006. Seismic inversion – still the best tool for reservoir characterization. *CSEG Recorder*, s. 5–12.
- Russell, B. 1988. Introduction to seismic inversion methods. *Course Notes Series 2*, Society of Exploration Geophysicists.
- Zoeppritz, K. 1919. Erdbebenwellen VIII B, Uber Reflexion und durchgang seismischer wellen duch unstetigkeitsflächen. *Gottinger Nachr.* 1, s. 66–84.