

WYKORZYSTANIE SEJSMICZNYCH PRZEKROJÓW FAL PODŁUŻNYCH I PRZEMIENNYCH DO KALIBRACJI MODELU PRĘDKOŚCI FAL POPRZECZNYCH

Application of P and PS seismic sections in a calibration of S-wave velocity model

Paweł MARZEC, Kaja PIETSCH & Marcin KOBYLARSKI

*Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska,
Zakład Geofizyki; al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: marzec@geol.agh.edu.pl,
pietsch@agh.edu.pl, kobylarski@geol.agh.edu.pl*

Treść: Identyfikację sejsmicznych anomalii złożowych wspomaga metoda oparta na porównaniu rejestrowanych w strefach złożowych pól falowych: pola fal podłużnych (P) z polem fal poprzecznych (S) lub przemiennych (PS). Pierwszy w Polsce sejsmiczny profil badawczy, wzdłuż którego zarejestrowano zarówno fale P, jak i PS (2D-3C), wykonany został przez Geofizykę Kraków Sp. z o.o. (zleceniodawca PGNiG S.A.) na obszarze zapadliska przedkarpaccyckiego w rejonie Chałupki Dębnińskie. Duże zmienności parametrów fizycznych, małe rozmiary poszukiwanych obiektów oraz brak doświadczeń z interpretacją pola fal PS spowodowały, że jako metodę wspomagającą opracowanie lokalnych kryteriów złożowej interpretacji danych sejsmicznych wybrano modelowania teoretycznego pola falowego. Brak wystarczającej ilości pomiarowych danych otworowych, szczególnie w zakresie fal S, spowodował, że podstawowym problemem badawczym w toku modelowań teoretycznego pola falowego okazał się właśnie problem określenia zmienności tej prędkości z głębokością (VS), niezbędnej do konstrukcji modeli sejsmogeologicznych górotworu. W artykule zaproponowano metodę kalibracji pomierzonych lub syntetycznych krzywych VS w oparciu o rozpoznany rozkład prędkości fal podłużnych (VP) oraz zarejestrowane i teoretyczne pola falowe P i PS. Skuteczność metody potwierdziła dość dobra zgodność pól rejestrowanych P i PS z polami obliczonymi programem SeisMod (Zakład Geofizyki AGH).

Słowa kluczowe: sejsmika naftowa 3C, sejsmiczna anomalia złożowa, modelowanie sejsmiczne, sejsmogram syntetyczny, model prędkości fal P i S, kalibracja prędkości fali S

Abstract: Comparisons of P and S or converted wave (C-wave) seismic sections can improve identification of seismic reservoir anomalies. In Poland, the first experimental seismic P and C-wave survey was performed by Geofizyka Kraków Ltd (under supervision of PGNiG S.A.) in the area of Chałupki Dębnińskie (Carpathian Foredeep). High diversity of physical parameters in analyzed formations, small dimensions of geological targets and a lack of experience in C-wavefield interpretation caused theoretical wavefield modeling extremely indispensable for local reservoir interpretation. A shortage of satisfactory amount of well log data, particularly S-wave velocity information, caused a determination of S-wave changeability with depth the main problem in wavefield modeling. This paper proposes a method of calibration of measured or synthetic S-wave curves based upon both the recognized P-wave velocity distribution in the profile and the registered P and C-wavefield. An effectiveness of the proposed method was confirmed by high similarity of the registered wavefield and the wavefield computed with the use of SeisMod application (Department of Geophysics, AGH UST).

Key words: 3C reservoir seismic, reservoir seismic anomaly, seismic modeling, synthetic seismogram, P and S-wave model, S-wave velocity calibration

WSTĘP

Identyfikację sejsmicznych anomalii złożowych wspomaga metoda oparta na porównaniu rejestrowanych w strefach złożowych pól falowych: pola fal podłużnych P z polem fal poprzecznych S lub przemiennych PS. Nasylenie przestrzeni porowej gazem powoduje bowiem spadek prędkości propagacji fal P w warstwach nasyconych (nawet o 30%), co jest przyczyną powstawania anomalnego zapisu sejsmicznego. Nasylenie gazem nie wpływa natomiast na prędkość propagacji fal S – nie obserwuje się więc anomalnego pola falowego.

Pierwszy w Polsce sejsmiczny profil badawczy, wzdłuż którego zarejestrowano zarówno fale P, jak i PS (2D-3C), wykonany został przez Geofizykę Kraków Sp. z o.o. (zleceniodawca PGNiG S.A.) na obszarze zapadliska przedkarpackiego w rejonie Chałupek Dębniańskich – profil 13D-04-02K (Gruszczyk *et al.* 2002a, b). Południowo-wschodnia część zapadliska to obszar szczególnie perspektywiczny, w którym odkryto ponad 100 złóż węglowodorów zakumulowanych przede wszystkim w autochtonicznych utworach mioce-
nu (Borys & Myśliwiec 2002, Górka *et al.* 2004). Niestety, sejsmiczny obraz złóż, który jest podstawą lokalizacji wierceń poszukiwawczych, jest często niejednoznaczny, co prowadzi czasami do błędnej lokalizacji wierceń. Stąd lokalizacja właśnie w tym rejonie profilu 2D-3C.

Duża zmienność parametrów fizycznych zarówno skał zbiornikowych, jak i uszczelniających (horyzontalna i pionowa) oraz małe rozmiary poszukiwanych obiektów, co jest związane z licznymi zmianami facjalnymi (Dziadzio *et al.* 1997, Maksym *et al.* 1997, Pietsch *et al.* 1999, Dziadzio 2000, Porębski *et al.* 2004) z jednej strony, jak i brak doświadczeń z interpretacją pola fal PS – z drugiej, spowodowały, że jako metodę wspomagającą opracowanie lokalnych kryteriów złożowej interpretacji danych sejsmicznych wybrano modelowania teoretycznego pola falowego.

KONSTRUKCJA MODELI SEJSMOGEOLOGICZNYCH

Modelowania sejsmiczne pozwalają na konstrukcję teoretycznych pól falowych, obliczanych dla coraz bardziej złożonych modeli sejsmogeologicznych, aż do uzyskania zgodności z zarejestrowanym polem falowym. Dzięki temu istnieje możliwość powiązania pola falowego z wywołującymi je przyczynami. Należy jednak pamiętać, że modelowania dają jednoznaczne wyniki wtedy, gdy model sejsmogeologiczny w sposób szczegółowy odwzorowuje zmienność parametrów petrofizycznych w górotworze.

Niezbędny do modelowań teoretycznego pola falowego model sejsmogeologiczny wymaga rozpoznania geometrycznego układu granic sejsmicznych oraz znajomości parametrów petrofizycznych wydzielonych warstw, których wartości określone są na podstawie pomiarów geofizyki otworowej. Niestety, brak wystarczającej ilości danych pomiarowych, szczególnie w zakresie fal poprzecznych, spowodował, że podstawowym problemem badawczym w toku modelowań teoretycznego pola falowego okazało się właśnie określenie zmienności tej prędkości z głębokością.

Modele prędkościowe fal podłużnych i poprzecznych po korelacji z danymi sejsmicznymi

Parametry petrofizyczne warstw, przede wszystkim prędkości propagacji fal P i S, określono w oparciu o krzywe geofizyki wiertniczej pomierzone w otworach Chałupki Dębniańskie 2 i 3, leżących na profilu 13D-4-02K oraz otworu Dębno 2, zrzutowanego na profil (D2M).

Analiza zmienności prędkości propagacji fali podłużnej P (profilowania akustyczne PA) w zależności od litologii oraz nasycenia gazem wykonana m.in. dla odwiertu ChD2 pokazała, że nie dla wszystkich warstw nasyconych gazem obserwuje się oczekiwane zwiększenie czasu interwałowego. Zjawisko to, często obserwowane w południowo-wschodniej części zapadliska przedkarpackiego, może być związane z wykonaniem profilowań akustycznych krótkimi sondami, które rejestrują rozchodzenie się fali w strefie przemytej lub w strefie filtracji, a tym samym nie dają informacji o strefie nasyconej gazem (Bała & Witek 2004). Rejestracja pełnych obrazów falowych w trakcie profilowania akustycznego tylko w jednym otworze ChD3, i to w takim, w którym nie stwierdzono nasycenia, nie dawała podstaw do wyznaczenia wiarygodnego modelu prędkościowego fali poprzecznej S. W związku z powyższym dla rejonu Chałupki Dębniańskie rozkład prędkości fali podłużnej i poprzecznej z głębokością obliczono także teoretycznie, wykorzystując do tego celu pakiet programów ESTYMACJA (Bała & Cichy 2003, 2004).

Model prędkościowy 1D fal podłużnych

W wyniku interpretacji i przetworzenia prędkościowych danych otworowych uzyskano dwa różne modele prędkości:

- 1) model opracowany na podstawie profilowania akustycznego,
- 2) model zawierający obliczone prędkości teoretyczne.

Podstawową metodą sprawdzenia ich zgodności z „rzeczywistym” modelem prędkościowym ośrodka, przez który propaguje fala sejsmiczna, jest konstrukcja teoretycznego pola falowego 1D – sejsmogramy syntetyczne (SS) i sprawdzenie ich zgodności z zarejestrowanym zapisem sejsmicznym.

Sejsmogramy syntetyczne obliczone zostały w systemie GeoGraphix (Landmark Graphics Cor.), w programie LogM. Sygnały elementarne niezbędne do modelowania teoretycznego pola falowego wyznaczone zostały na podstawie ekstrakcji sygnałów z zarejestrowanych tras sejsmicznych (GeoGraphix, LogM).

Zestawienie dla odwiertu ChD2 sejsmogramów syntetycznych, obliczonych dla modelu prędkościowego opartego na skalibrowanych prędkościach z PA (TVD DT-popr2) z rejestrowanym polem falowym pokazuje, że tylko część najgłębszych horyzontów sejsmicznych można dowiązać do konkretnych granic litologicznych (Pietsch *et al.* 2004). Zestawienie SS, do których obliczania wykorzystano natomiast teoretyczną krzywą prędkości (TVD DT DPEQ), z rejestrowanym polem falowym i przyjętym do obliczeń modelem litologicznym pokazuje dość dobrą zgodność zapisu sejsmicznego z granicami prędkościowymi. Różnice widoczne są przede wszystkim dla górnej części przekroju, i to głównie w amplitu-

dach sygnałów teoretycznych i rejestrowanych. Brak na SS wyraźnego wzrostu amplitudy dla warstw nasyconych jest zdecydowanie niekorzystny (bright spoty są jednym z ważniejszych bezpośrednich wskaźników węglowodorowości) i świadczy o niepełnym dopasowaniu modelu prędkościowego (Pietsch *et al.* 2004).

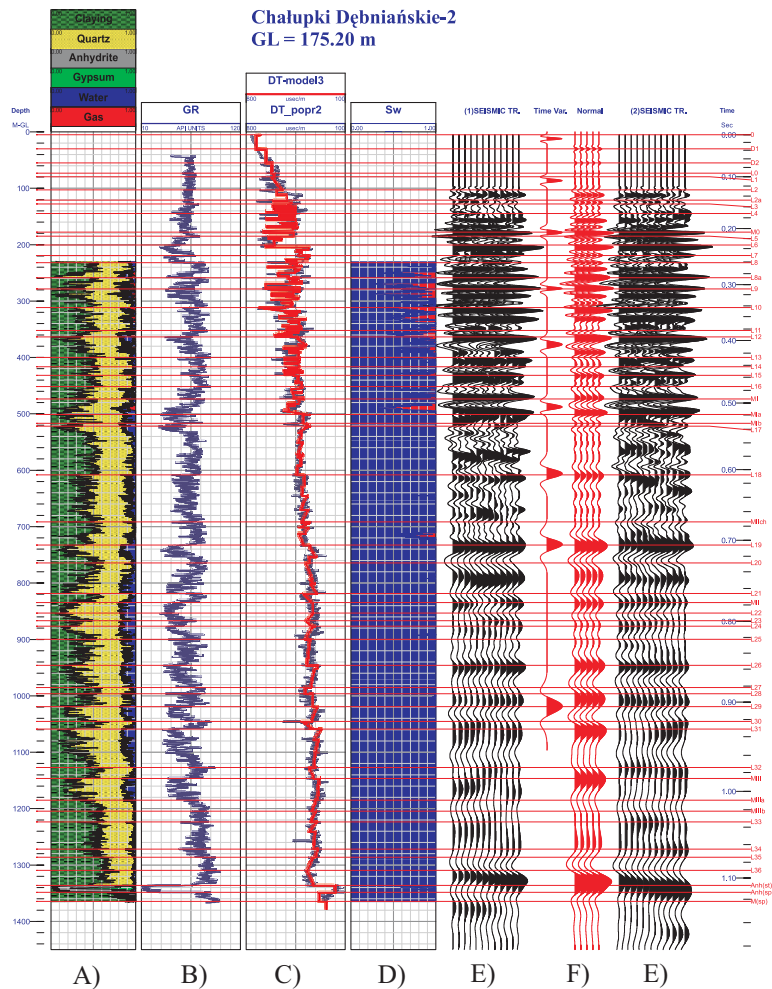


Fig. 1. Odwiert ChD2 – geologiczne dowiązanie pola fal P: A) rozwiązanie litologiczne; B) krzywa GR; C) model prędkościowy (VP): krzywa DT_popr2 (pomierzona i skalibrowana), DT – model3 – wykorzystana do obliczenia sejsmogramów syntetycznych P; D) S_w – współczynnik nasycenia wodą; E) zarejestrowane trasy sejsmiczne; F) sygnał elementarny Ricker'a o zmiennej częstotliwości oraz sejsmogram syntetyczny (SS)

Fig. 1. ChD2 well – geological calibration of P-wavefield: A) lithological solution; B) GR – natural gamma-ray log; C) velocity model (VP): transit interval time DT_popr2 (measured and calibrated), DT-model3 – used for calculation of P synthetic seismogram; D) S_w – water saturation; E) recorded seismic traces; F) Ricker variable frequency wavelet and synthetic seismicogram (SS)

Końcową korektę krzywej prędkości dla odwiertu ChD2 wykonano w sposób iteracyjny, zmieniając kolejno warstwowy model prędkości aż do uzyskania zgodności sejsmogramu syntetycznego z rejestrowanym zapisem sejsmicznym (Fig. 1), tak pod względem czasowym, jak i amplitudowym, dzięki czemu w teoretycznym zapisie sejsmicznym odwzorowane są kolejne warstwy złożowe

Jednoznaczna korelacja zarejestrowanych refleksów sejsmicznych z refleksami występującymi w zapisie teoretycznym umożliwia nie tylko geologiczną interpretację zarejestrowanego przekroju sejsmicznego, ale również pozwala na przyjęcie uzyskanego modelu prędkościowego (TVD DT-model3) jako obowiązującego dla odwiertu ChD2 przy konstrukcji sejsmogeologicznego modelu 2D.

W analogiczny sposób obliczone zostały krzywe prędkości propagacji fali P dla odwiertów ChD3 (Fig. 2) i otworu teoretycznego D2M.

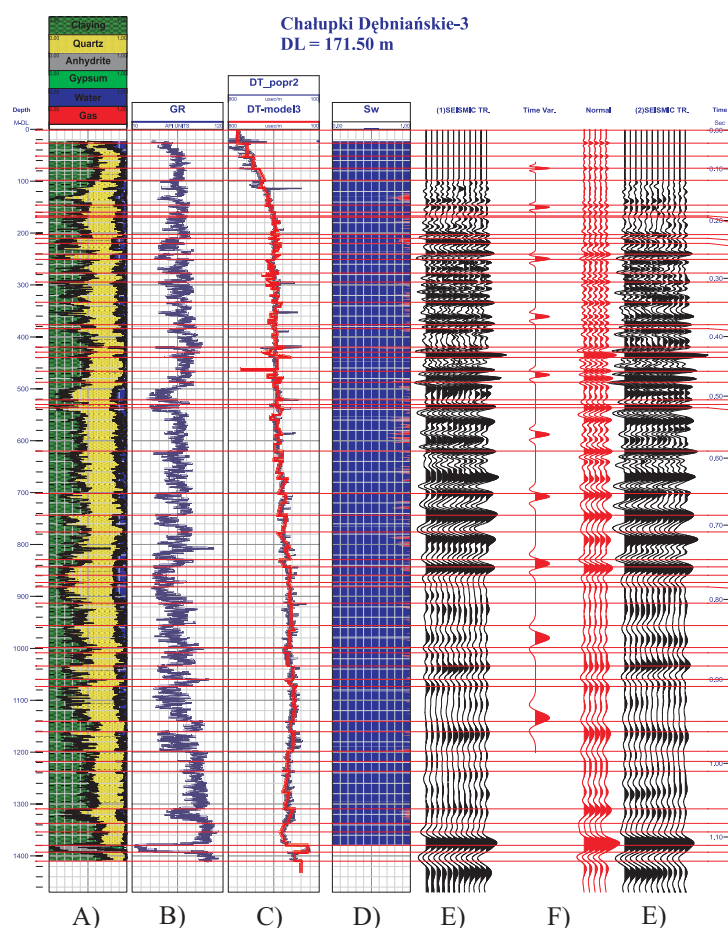


Fig. 2. Odwiert ChD3 – geologiczne dowiązanie pola fal P; oznaczenia jak na figurze 1

Fig. 2. ChD3 well – geological calibration of P-wavefield; descriptions like in Figure 1

Model prędkościowy 1D fal poprzecznych

Sprawdzenie zgodności modelu prędkościowego opracowanego na podstawie pomiarów geofizyki otworowej z modelem prędkościowym ośrodka, przez który propaguje fala sejsmiczna, jest dla przypadku fal poprzecznych zagadnieniem znacznie trudniejszym. Związane jest to zarówno z posiadaniem tylko jednego pomiaru prędkości fali S, i to dopiero od głębokości 620 m do spodu otworu (odwiert ChD3), jak i z koniecznością konstrukcji teoretycznego pola 1D dla fal przemiennych PS, bo te właśnie fale rejestrowane są na profilu 2D-3C (13D-04-02K) oraz w pomiarach pionowego profilowania sejsmicznego PPS – 3C. Sejsmogramy syntetyczne, czyli teoretyczne pole falowe 1D przy założeniu normalnego padania promienia sejsmicznego, mogą być obliczone dla fal podłużnych oraz fal poprzecznych. Przy kącie padania fali = 0° fala przemienna nie powstaje.

W tej sytuacji sprawdzenie wiarygodności pola prędkości fal S wykonano, wykorzystując moduł AVO/AVA z programu LogM (GeoGraphix) do obliczenia pseudosejsmogramów syntetycznych PS.

Danymi wejściowymi do obliczeń teoretycznego pola falowego PS dla otworu ChD3 były model prędkości fal P (TVD DT-model3), rozkład współczynników Poissona, do których obliczenia niezbędny jest model prędkości fal S (TVD VS-model3 – teoretyczna krzywa obliczona programem ESTYMACJA) oraz krzywa gęstościowa.

Niestety porównanie pseudo-SS PS z rejestrowanym polem PS pokazuje, że czas występowania reperowego odbicia od anhydrytu jest na SS PS aż o około 0.3 s krótszy (Pietsch *et al.* 2004).

O założeniu poprawnego modelu prędkościowego fal podłużnych świadczy zgodność zapisu rejestrowanego i pola teoretycznego (Fig. 1 i 2). Brak takiej zgodności dla fal przemiennych wskazuje na przyjęcie niewłaściwych (zawyżonych) prędkości propagacji fal poprzecznych. Prowadzi to do wniosku, że w celu uzyskania zgodności rejestrowanego pola fal przemiennych z polem teoretycznym niezbędna jest kalibracja przyjętej krzywej prędkości fali S.

Zabieg taki można wykonać pod warunkiem, że poprawnie zostaną zidentyfikowane te same horyzonty na sekcji fali P i PS. Można wtedy skorzystać ze wzoru wyprowadzonego w oparciu o stosunek VP/VS dla horyzontów sejsmicznych

$$t_0PS = \frac{t_0P + t_0S}{2} \quad (1)$$

gdzie t_0 są to pionowe czasy podwójne horyzontów na sekcji fali PS, P oraz hipotetycznej sekcji fali S.

Po przekształceniu

$$t_0S = 2t_0PS - t_0P \quad (2)$$

Do identyfikacji horyzontów na sekcjach P i odpowiadających im refleksów na sekcji PS wykorzystano przekonwertowane do domeny głębokości fragmenty sekcji P i PS.

Zgodność zarejestrowanego pola fal P z polem teoretycznym i jednoznaczne dowiązanie horyzontów sejsmicznych do granic geologicznych, zidentyfikowanych na podstawie danych otworowych (sejsmogramy syntetyczne – Fig. 1 i 2), pozwala na opisanie każdej granicy w czasie (czas przyścia fali P) oraz głębokości, dzięki czemu uzyskuje się jednoznaczny krzywą VP do konwersji czas/głębokość (krzywa TVD DT-model3 – Fig. 1 i 2).

Model wejściowy do transformacji sekcji PS do domeny głębokości (Fig. 3) otrzymano poprzez zblokowanie, dla wcześniej założonych interwałów, wejściowych krzywych prędkości VP i VS (VP-model3, VS-model3) oraz uśrednienie zblokowanego modelu prędkości fali P (CSVel_VP_model3) i założonego modelu wejściowego prędkości fali S (CSVel_VS_model3) z wykorzystaniem wzoru

$$VPS = \frac{2}{\frac{1}{VS} + \frac{1}{VP}} \quad (3)$$

gdzie:

VS, VP – prędkości fali S i P,

VPS – prędkość konwersji czasowo-głębokościowej fali PS, przy założeniu że

$$t_{0PS} = \frac{2h}{VPS} \quad (4)$$

W wyniku otrzymuje się krzywą prędkości fali PS – (CSVel_VPS_model3) oraz stosunek prędkości VP/VS (krzywa VP/VS_model3).

Porównanie sekcji P i PS w domenie głębokości dla modelu wejściowego odwiertu ChD3 pokazane jest na figurze 4. W celu uzyskania zgodności głębokości występowania refleksu, zidentyfikowanego jako odbicie od anhydrytu, niezbędne było wprowadzenie przed konwersją przesunięcia czasowego dla sekcji PS o ok. –350 ms. Dzięki zabiegowi porównywania sekcji P i PS w domenie głębokości unika się efektu rozciągnięcia sygnału na sekcji PS, spowodowanego małą prędkością fali S i niedogodności porównywania obrazów falowych o różnej długości czasowej.

Konstrukcję poprawnego modelu zmienności prędkości fal S z głębokością wykonano, stosując następującą procedurę. Po zidentyfikowaniu horyzontu kalibracyjnego w zapisie fali PS i usunięciu przesunięcia czasowego dla sekcji PS wprowadzana jest poprawka w modelu kalibracyjnym, polegająca na obliczeniu prędkości konwersji czasowo-głębokościowej fali PS dla uaktualnionego czasu horyzontu, obliczany jest średni stosunek VP/VS dla horyzontu kalibracyjnego oraz stosunki prędkości interwałowych względem granic wcześniej zidentyfikowanych i skalibrowanych. Następnie oceniane jest prawdopodobieństwo poprawności średniego stosunku VP/VS dla danej głębokości oraz poprawności stosunków prędkości interwałowych VP/VS dla warstw leżących powyżej i poniżej rozpatrywanej granicy. Uzyskanie niezadowolających wartości świadczy o niepoprawnej identyfikacji horyzontu na sekcji fali PS. W analogiczny sposób postępuje się przy identyfikacji kolejnych granic (granice od Anh(st) do L2 – Fig. 4), uzyskując po dowiązaniu wszystkich granic nowy, poprawiony głębokościowy model rozkładu prędkości fali S.

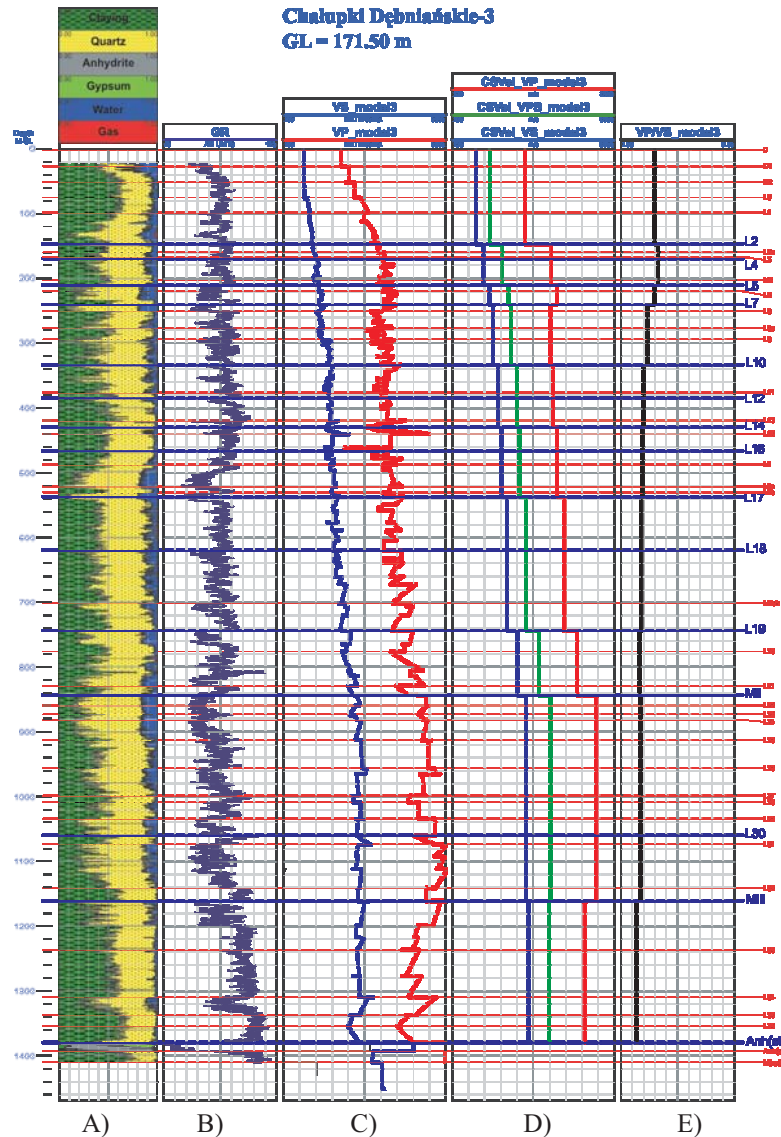


Fig. 3. Odwiert ChD3 – zestawienie krzywych prędkości fal P, S i PS wykorzystanych do obliczeń: A) rozwiązanie litologiczne; B) krzywa GR; C) krzywe prędkości: VP_model3 – fala P, VS_model3 – fala S; D) wejściowe interwałowe krzywe kalibracyjne: CSVel_VP_model3 – fala P, CSVel_VS_model3 – fala S, CSVel_VPS_model3 – fala PS; E) stosunek prędkości fali P do S – VP/Vs_model3 obliczony na podstawie krzywych kalibracyjnych

Fig. 3. ChD3 well – P, S, PS-wave velocity logs used in calculations: A) lithological solution; B) GR – natural gamma-ray log; C) velocity curves: VP_model3 – P-wave, VS_model3 – S-wave; D) input interval calibration curves: CSVel_VP_model3 – P-wave, CSVel_VS_model3 – S-wave, CSVel_VPS_model3 – PS-wave; E) Vp/Vs ratio – VP/Vs_model3 calculated on the basis of calibration curves

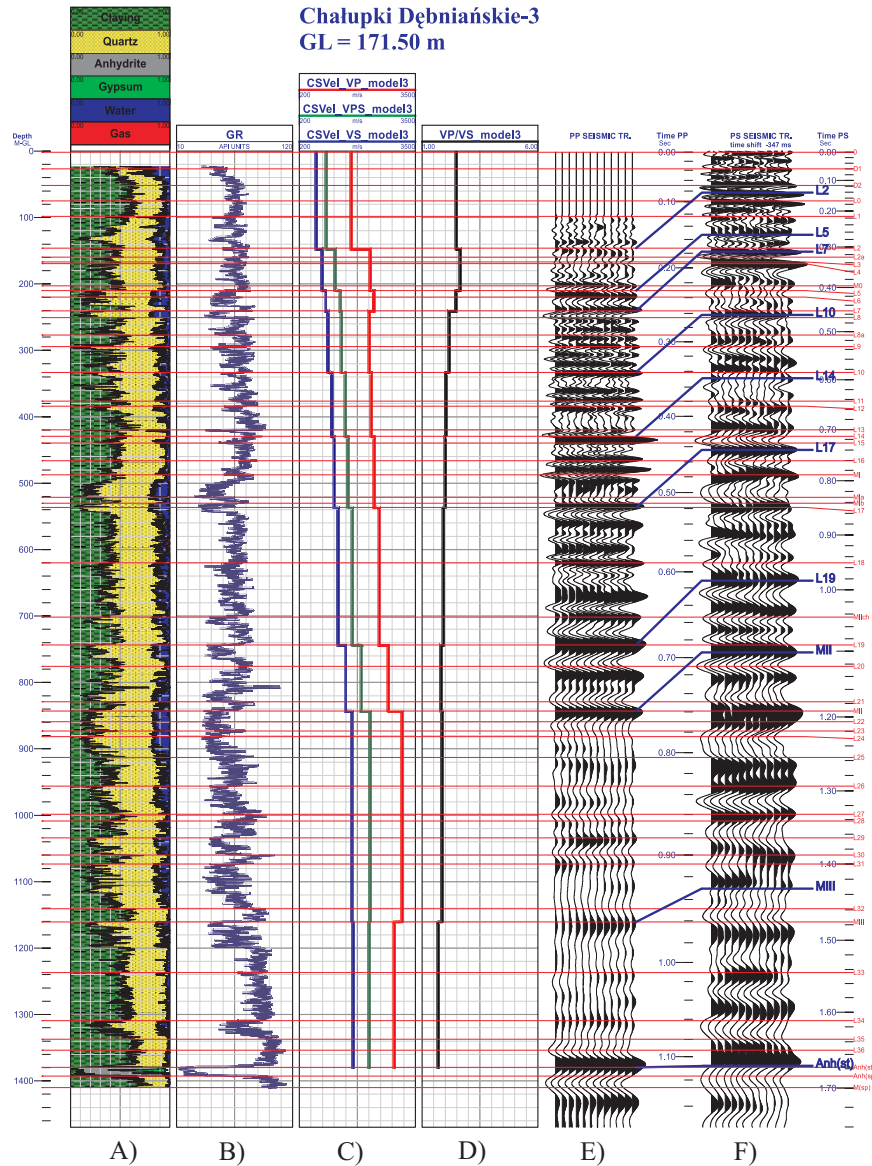


Fig. 4. Odwiert ChD3 – zestawienie przekonwertowanych do domeny głębokości i skorelowanych z granicami litologicznymi zapisów fal P i PS oraz wejściowych kalibracyjnych krzywych prędkości fali P, S i PS: A) rozwiązanie litologiczne; B) krzywa GR; C) wejściowe interwałowe krzywe kalibracyjne – jak figurze 3D; D) stosunek prędkości fali P do S – jak na figurze 3E; E) fragment profilu sejsmicznego fali P; F) fragment profilu sejsmicznego fali PS

Fig. 4. ChD3 well – lithologically correlated P and PS-wave sections in depth domain and input P, S, PS – wave velocity calibration curves: A) lithological solution; B) GR – natural gamma-ray log; C) input interval calibration curves – like in Figure 3D; D) VP/VS ratio – like in Figure 3E; E) fragment of P-wave section; F) fragment of PS-wave section

Poprawność tak skonstruowanego modelu (model7) sprawdzana jest poprzez ocenę zgodności obrazów falowych P i PS po konwersji do domeny głębokości (Fig. 5). Taki sposób postępowania pozwala wyjść z dowolnego modelu kalibracyjnego składającego się nawet z dwóch warstw i jednej zidentyfikowanej (np. takiej, co do której nie mamy wątpliwości) na sekcji P i PS granicy sejsmicznej i w miarę postępów interpretacji uszczegółwiać ten model.

Operację tę należy prowadzić równoległe we wszystkich otworach w obszarze badań, aby poprzez analizę estymowanych parametrów (Fig. 6) i sensowną korelację refleksów pomiędzy otworami potwierdzić poprawność uzyskanych krzywych kalibracyjnych fali S. W tym wypadku obecność wielopokładowego złoża gazu w otworze ChD2 manifestuje się obniżeniem prędkości fali P i stosunku VP/VS na krzywych kalibracyjnych w tym otworze.

Z powodu braku sejsmicznych pomiarów fal poprzecznych metodą weryfikacji (oprócz wizualnego podobieństwa refleksów, wyklinowań, granic sejsmostratygraficznych, kanałów erozyjnych, uskoków itp.) jest także wykorzystanie uzyskanego modelu prędkościowego fali P i PS do transformacji PPS/WPG przy offsetowych pomiarach PPS-3C. Kryterium poprawności jest stopień wyprostowania (w przypadku płaskich granic odbijających) i dopasowania „wyprostowanych” horyzontów po transformacji do sekcji PS. Na figurze 7 zestawione są wyniki transformacji PPS/WPG, które uzyskano, stosując prędkości z modelu7. Mankamentem zaproponowanego sposobu jest założenie, że czas t_0 horyzontu na zsumowanej sekcji P lub PS równa się czasowi t_0 tego samego horyzontu na rekordzie połowym. Stąd może wynikać np. niedopasowanie modelu fali P uzyskanego poprzez dopasowanie SS do sejsmiki z modelem fali P uzyskanym z PPS (zwłaszcza offsetowym). Dlatego też czasami lepsze efekty daje weryfikacja wykonana nie w oparciu o modele kalibracyjne fali P i S, lecz o ich stosunek i prędkości VP uzyskane z PPS.

W celu lepszego dopasowania zapisu fal P i PS wprowadzono do modelu7 dodatkowe horyzonty kalibracyjne, powtórzono procedurę kalibracyjną dla odwiertu ChD3, otrzymując końcowy model kalibracyjny (model8). Uzyskane syntetyczne „check shoty” fali S wykorzystane zostały do kalibracji syntetycznych czy też pomierzonych krzywych otworowych. Na ich podstawie zbudowano końcowy model prędkości propagacji fali poprzecznej, a jego poprawność sprawdzano poprzez porównanie zgodności sejsmogramów syntetycznych AVO obliczonych dla fali PS z sekcją PS (Fig. 8).

Zaproponowany iteracyjny sposób opracowania modelu zmiany prędkości fali poprzecznej z głębokością, bazujący na dopasowaniu obrazu falowego reperiowych granic sejsmicznych w rejestrowanym polu fal podłużnych i przemiennych, jest żmudny i czasochłonny. Niestety przy małej liczbie pomiarów prędkości propagacji fal poprzecznych, szczególnie dla płytkiej części odwiertu, a ten przypadek ma miejsce w tej części zapadliska przedkarpackiego, przyjęta procedura doboru prędkości wydaje się w pełni uzasadniona. Wiarygodność uzyskanego modelu prędkości propagacji fal poprzecznych jest ściśle związana tak z jakością zarejestrowanych przekrojów sejsmicznych (P i PS), jak i występowaniem charakterystycznych układów granic sejsmicznych (granice erozyjne, kanały rzeczne, strefy wyklinowań, granice o dużym kontraście twardości akustycznych), które w sposób identyczny odwzorowują się w zapisie fal P i PS, dzięki czemu możliwe jest jednoznaczne powiązanie czasowe granic na obu przekrojach.

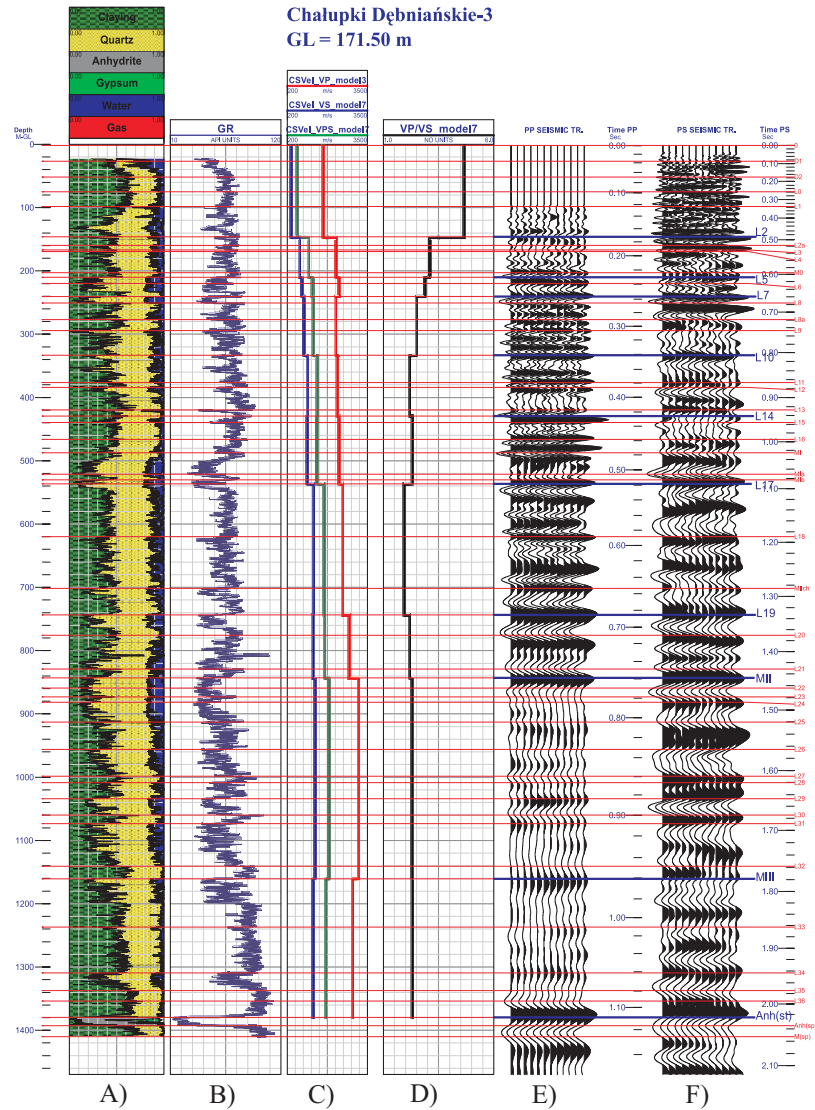


Fig. 5. Odwiert ChD3 – zestawienie przekonwertowanych do domeny głębokości i skorelowanych z granicami litologicznymi zapisów fal P i PS oraz obliczonych kalibracyjnych krzywych prędkości fali P, S i PS: A) rozwiązanie litologiczne; B) krzywa GR; C) poprawione interwałowe krzywe kalibracyjne: CSVel_VP_model3 – fala P, CSVel_VS_model7 – fala S, CSVel_VPS_model7 – fala PS; D) stosunek prędkości fali P do S – VP/VS obliczony na podstawie krzywych kalibracyjnych; E) fragment profilu sejsmicznego fali P; F) fragment profilu sejsmicznego fali PS

Fig. 5. ChD3 well – lithologically correlated P and PS-wave sections in depth domain and calculated P, S, PS – wave velocity calibration curves: A) lithological solution; B) GR - natural gamma-ray log; C) correlated interval calibration curves: CSVel_VP_model3 – P-wave, CSVel_VS_model7 – S-wave, CSVel_VPS_model7 – PS-wave; D) VP/VS ratio calculated on the basis of calibration curves; E) fragment of P-wave section; F) fragment of PS-wave section

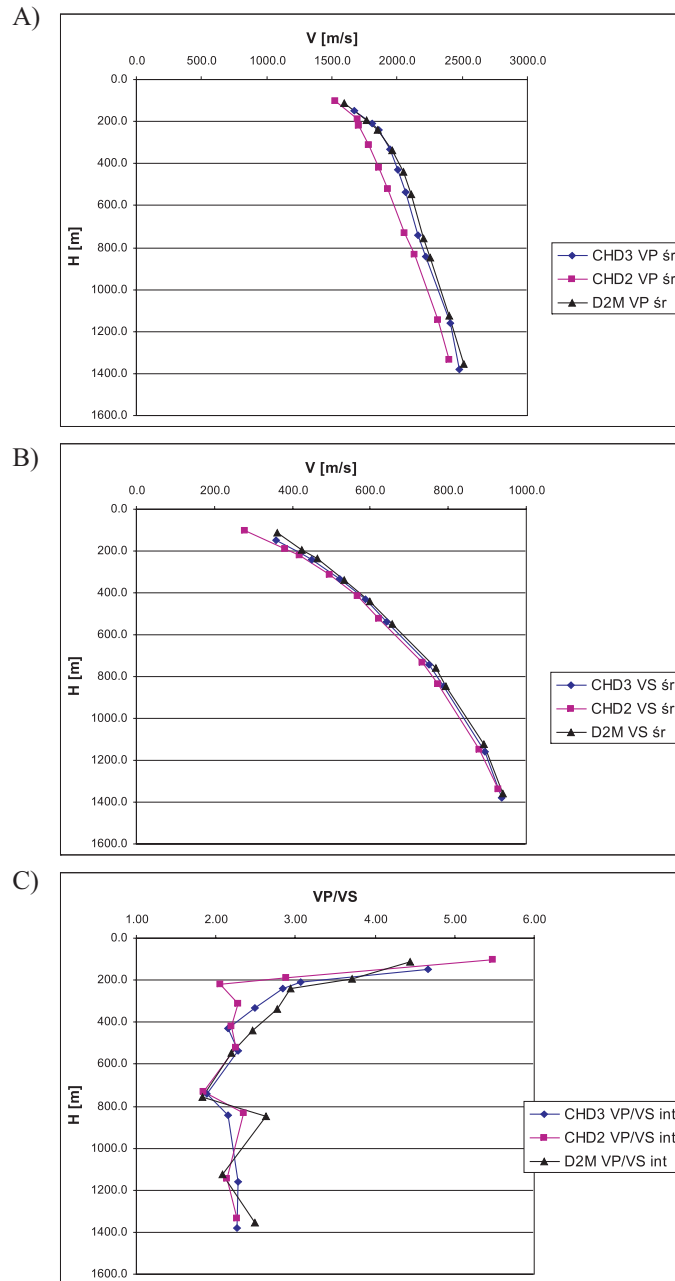


Fig. 6. Wykresy kalibracyjne dla odwiertów ChD2, ChD3 i D2M: A) prędkość średnia fali P – VP \acute{s} r; B) prędkość średnia fali S – VS \acute{s} r; C) stosunek VP/VS w interwałach kalibracyjnych

Fig. 6. Calibration plots for ChD2, ChD3 and D2M wells: A) check shot P-wave velocity – VP \acute{s} r; B) check shot S-wave velocity – VS \acute{s} r; C) VP/VS ratio in calibration intervals

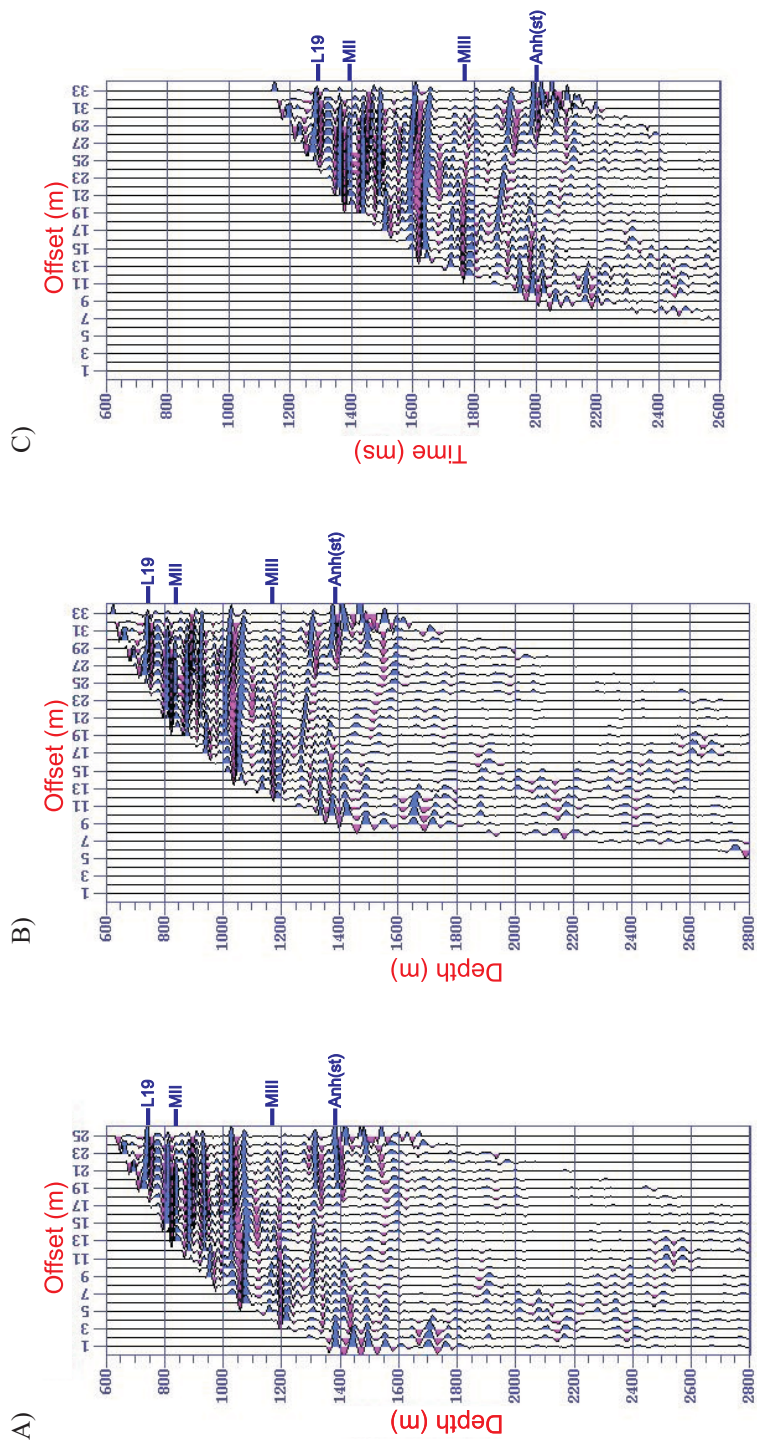


Fig. 7. Odwiert ChD3 – transformacja PPS/WPG: A) wg danych PPS (H); B) wg krzywej model7 Vint (T)

Fig. 7. ChD3 well – VSP/CDP transformation: A) according to VSP data (H); B) according to model7 Vint (T)

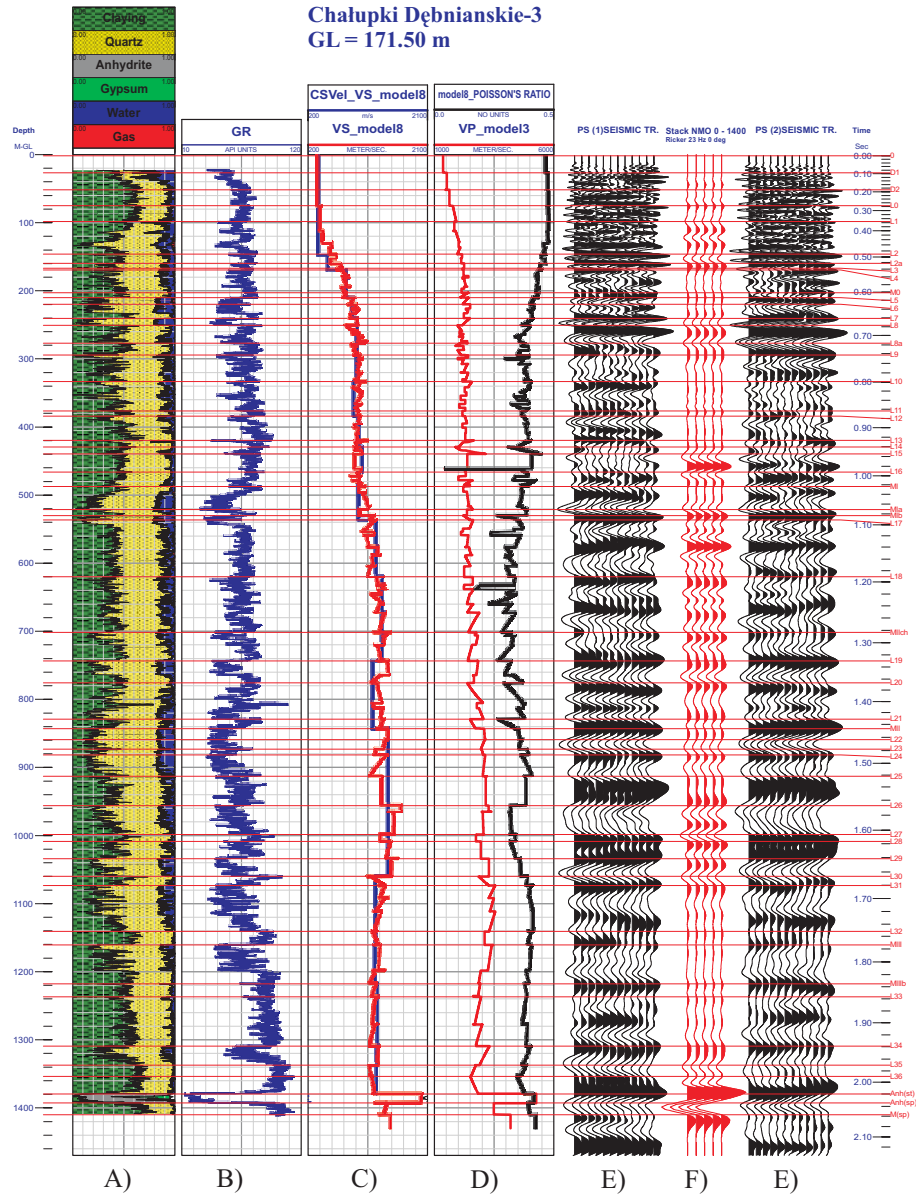


Fig. 8. Odwrt ChD3 – geologiczne dowiązanie pola fal PS: A) rozwiązanie litologiczne; B) krzywa GR; C) końcowy model prędkości fali S – VS_model8; końcowa krzywa kalibracyjna – CSVel_VS_model8; D) końcowy model prędkości fali P – VP_model3 oraz współczynnik Poissona dla modelu końcowego; E) fragment profilu sejsmicznego fali PS; F) pseudosejsmogram syntetyczny fali PS

Fig. 8. ChD3 well – geological calibration of PS-wavefield: A) lithological solution; B) GR – natural gamma-ray log; C) final S-wave velocity model – VS_model8; final calibration curve – CSVel_VS_model8; D) final P-wave velocity model – VP_model3 oraz Poisson's ratio in final model; E) fragment of PS-wave section; F) synthetic PS pseudoseismogram

Skonstruowane, wg omówionej powyżej procedury, wykresy zmienności prędkości propagacji fal poprzecznych z głębokością dla odwiertów ChD3, ChD2 i otworu teoretycznego D2M stanowiły podstawę do opracowania dwuwymiarowego modelu rozkładu prędkości fali poprzecznej.

Dwuwymiarowe modele prędkościowe

Dwuwymiarowe modele prędkościowe wzdłuż profilu 13D-04-02K skonstruowano w systemie GeoGraphix, wykorzystując do tego celu program STRUCT.

Danymi wejściowymi były:

- geometryczny rozkład granic sejsmicznych uzyskany na podstawie geologicznej interpretacji przekroju sejsmicznego 13D-04-02K (wersja fal podłużnych); obecność warstw nasyconych gazem, a tym samym ugięcia czasowe granic sejsmicznych spowodowane obniżeniem prędkości w warstwach nasyconych były kompensowane z wykorzystaniem rzeczywistego, głębokościowego rozkładu warstw;
- skonstruowane dla odwiertów ChD2, ChD3 i D2M krzywe prędkości propagacji fal podłużnych (krzywe VP_model3) oraz fal poprzecznych (krzywe VS_model8).

Wszystkim wydzielonym na profilu sejsmicznym warstwom, w miejscu lokalizacji głębokich odwiertów, przypisano prędkości określone dla tych warstw w oparciu o dopasowane do sejsmiki krzywe prędkości. Prędkości warstwowe pomiędzy odwiertami były interpolowane automatycznie w programie STRUCT, dzięki czemu w warstwach założono poziomy gradient prędkości, odpowiadający zmieniającej się horyzontalnie litologii.

Uzyskany w powyższy sposób model prędkościowy 2D fal podłużnych przedstawiony jest w skali głębokościowej na figurze 9. Model ten stanowił podstawę do modelowania teoretycznego pola fal podłużnych programem SeisMod.

Dwuwymiarowy model prędkości fal poprzecznych skonstruowano w analogiczny sposób (Fig. 10). Niestety zdecydowanie mniejsza ilość danych prędkościowych, konieczność ich korekty w oparciu o zarejestrowany przekrój PS, a nie fal poprzecznych, oraz ich nie najlepsze dopasowanie do geologicznego układu warstw (pseudosejsmogramy syntetyczne – Fig. 8) powodują, że wyznaczony model prędkości fali poprzecznej jest na pewno mniej wiarygodny aniżeli model prędkościowy fali podłużnej. Z powodu braku bardziej szczegółowych danych dotyczących prędkości fali S stanowił on jednak podstawę do modelowania teoretycznego pola fal przemiennych programem SeisMod.

OCENA PRAWIDŁOWOŚCI OPRACOWANYCH MODELI PRĘDKOŚCIOWYCH

Sprawdzenie poprawności opracowanych dwuwymiarowych modeli prędkościowych fali podłużnej P i poprzecznej S wykonano poprzez porównanie, obliczonych w oparciu o te modele, pól teoretycznych fal P oraz PS z zarejestrowanymi zapisami. Zgodność pól świadczy o opracowaniu poprawnych modeli prędkościowych, które, przy określonej rozdzielczości metod sejsmicznych, dobrze aproksymują badany górotwór.

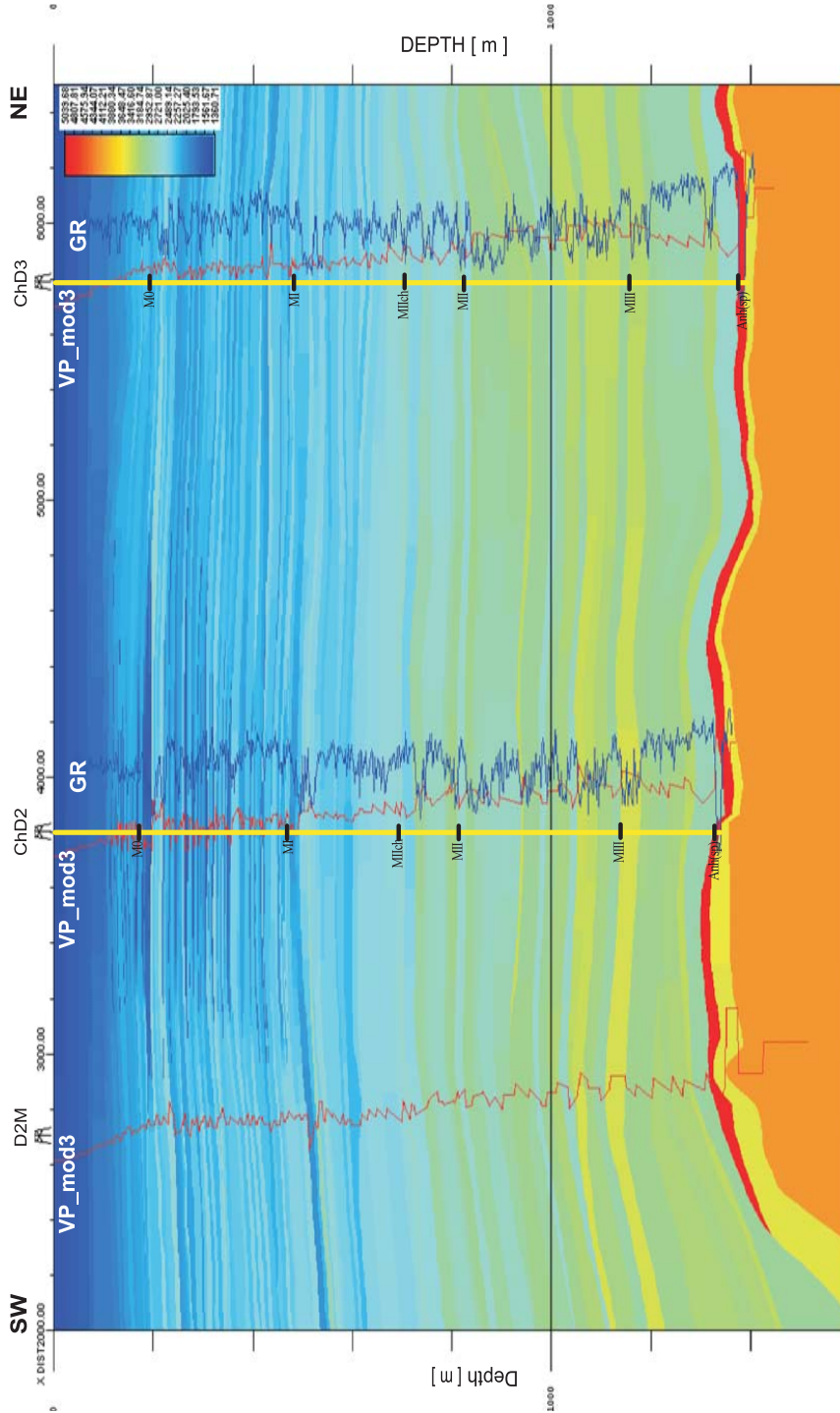


Fig. 9. Głębokościowy model prędkościowy fal podłużnych: GR – krzywa GR, VP_mod3 – krzywa prędkości fali P, M0 ... – horyzonty przewodnie
Fig. 9. P-wave velocity depth model: GR – natural gamma-ray log, VP_mod3 – P-wave velocity log, M0 ... – major correlative horizons

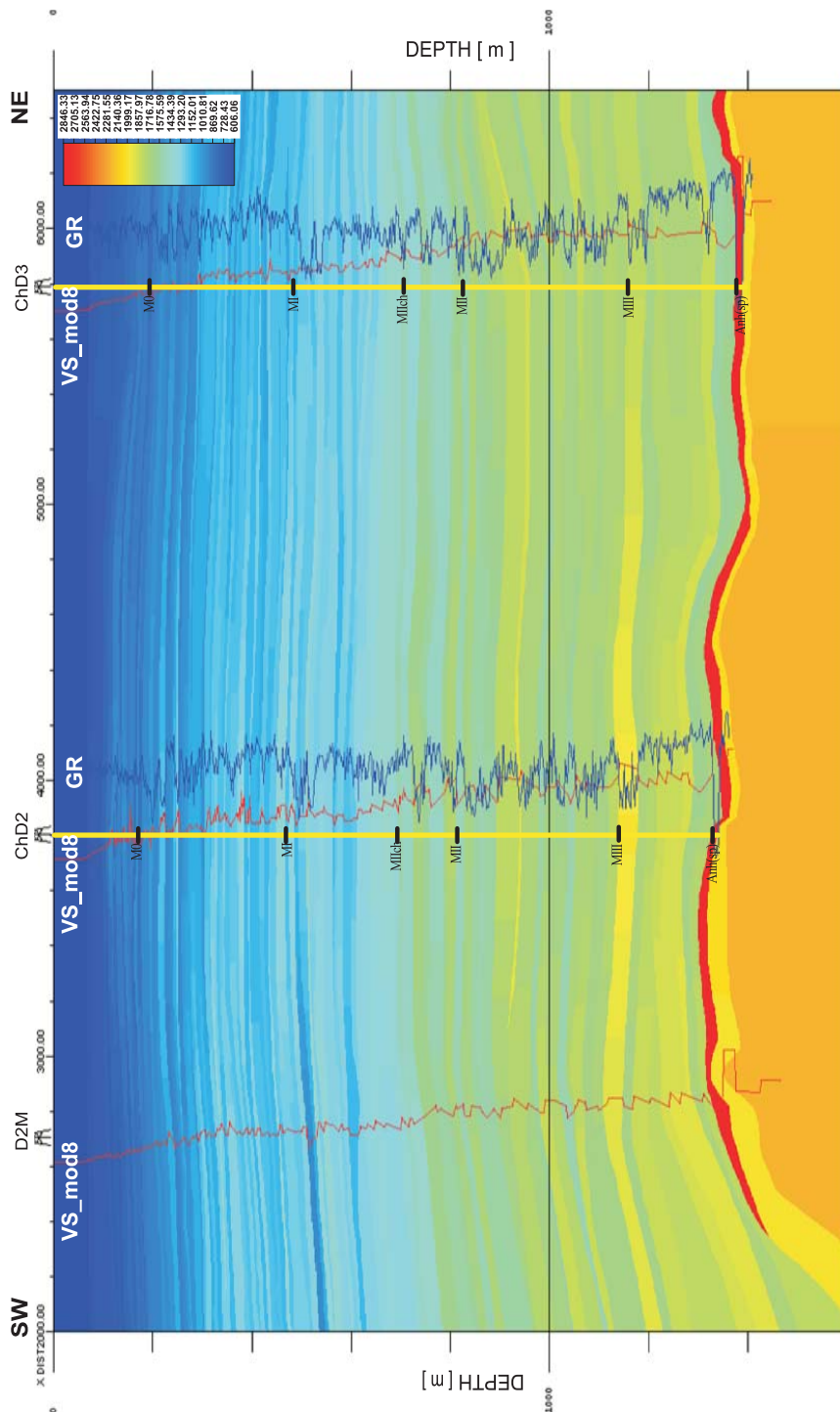


Fig. 10. Głębokościowy model prędkościowy fal poprzecznych: GR – krzywa GR, VS_mod8 – krzywa prędkości fali S, M0 ... – horyzonty przewodnie
Fig. 10. S-wave velocity depth model: GR – natural gamma-ray log, VS_mod8 – S-wave velocity log, M0 ... – major correlative horizons

Do konstrukcji teoretycznego zapisu sejsmicznego zastosowano program SeisMod, opracowany w Zakładzie Geofizyki Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie (Danek 2004, Danek & Franczyk 2004). Program SeisMod umożliwia obliczanie pełnego pola falowego w oparciu o metodę różnic skończonych dla równania akustycznego i równań ruchu (Alford *et al.* 1974, Kelly *et al.* 1976, Graves 1996, Yang *et al.* 2002). Pozwala na obliczenie i obrazowanie propagującego pełnego pola falowego (wszystkie rodzaje fal podłużnych, poprzecznych i przemiennych) w postaci wieloskładnikowych seismogramów, obrazów pola falowego oraz animacji przedstawiających zmiany pola falowego w czasie i przestrzeni. W programie istnieje możliwość modelowania pola falowego w ośrodkach o dowolnie skomplikowanej geometrii (parametry mogą być określone w węzłach siatki obliczeniowej oraz poprzez edycję plików definiujących budowę ośrodka (Open Works, GeoGraphix)) oraz dla dowolnie zaprojektowanej metodyki badań terenowych (powierzchniowych o dowolnych typach rozstawów sejsmicznych, pionowych profilowań sejsmicznych (VSP), prześwieleń sejsmicznych). Źródłem fal może być dowolny sygnał, ale o stałej częstotliwości dominującej. Modelowanie teoretycznego pola fal P i PS wykonano w wersji offsetowej, stosując identyczne parametry rozstawu jak w pomiarach sejsmicznych wzdłuż profilu 13D-04-02K.

Obliczone programem SeisMod pole falowe w wersji pojedynczych tras sejsmicznych zostało przetworzone w Zakładzie Geofizyki AGH w systemie OMEGA SPS (WesternGeco). Przetwarzanie wymodelowanych pól falowych, oprócz zastosowania podstawowych procedur niezbędnych przy składaniu danych, wymagało także dodatkowych procedur, uwzględniających specyfikę przetwarzania fal przemiennych oraz wymogi związane z syntetycznym polem falowym (rotacja danych, sortowanie według wspólnego punktu konwersji oraz analizy prędkości uwzględniające specyficzny charakter pola).

Ponieważ w zastosowanej wersji programu SeisMod nie było możliwości wprowadzenia tłumienia, w celu uzyskania efektu zmniejszenia częstotliwości sygnałów wraz ze wzrostem głębokości, przekroje sejsmiczne poddano filtracji pasmowej, która niestety nie odwzorowuje w pełni zjawiska tłumienia, umożliwiła jednak lepsze dopasowanie częstotliwości teoretycznego pola falowego do częstotliwości rejestrowanych w zdjęciu sejsmicznym.

Zestawienie zarejestrowanego na profilu 13D-04-02K zapisu fal podłużnych z profilem teoretycznym (Fig. 11) pokazuje ich bardzo dużą zgodność zarówno pod względem czasów i geometrii śledzonych granic sejsmicznych, jak i amplitud. Sejsmiczny zapis złoża ChD2 na obu przekrojach jest prawie identyczny. Istniejące różnice, widoczne w dolnej części przekroju, spowodowane są koniecznością przyjęcia w modelowaniach sygnału sejsmicznego o stałej częstotliwości (60 Hz), która jest zbyt wysoka dla odbić od głębokich granic, w tym anhydrytu.

Pola fal przemiennych, teoretyczne i rejestrowane (Fig. 12), nie są niestety tak podobne do siebie jak pola fal podłużnych. Porównując pola fal PS, obserwuje się w miarę dobrą zgodność geometrycznego układu granic sejsmicznych, średnią zgodność rozkładu amplitud oraz wyraźnie mniejszą zgodność częstotliwości i dynamiki refleksów. Sejsmiczny obraz strefy złożowej ChD2 w obu zapisach jest zbliżony, podobnie jak i układ strukturalny podłoża.

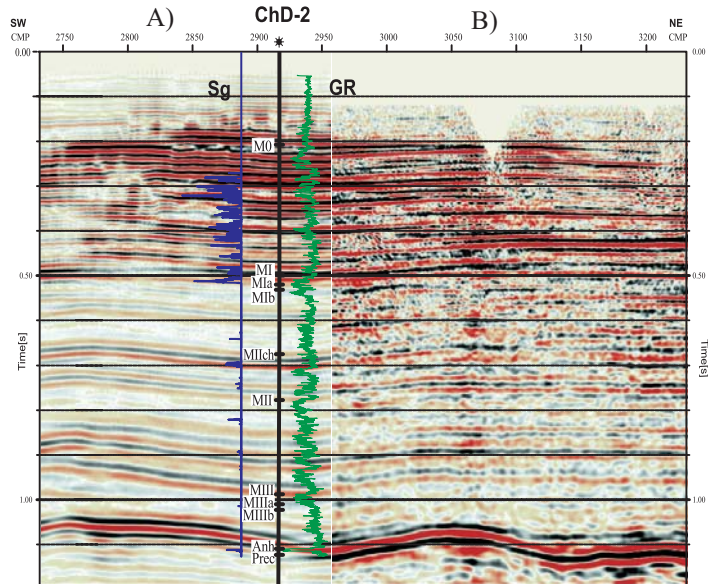


Fig. 11. Zestawienie teoretycznego (A) i rejestrowanego (B) przekroju fal P: GR – krzywa GR, Sg – nasycenie gazem, M0 ... – horyzonty przewodnie

Fig. 11. Combination of P-wave theoretical (A) with recorded (B) section: GR – natural gamma-ray log, Sg – gas saturation, M0 ... – major correlative horizons

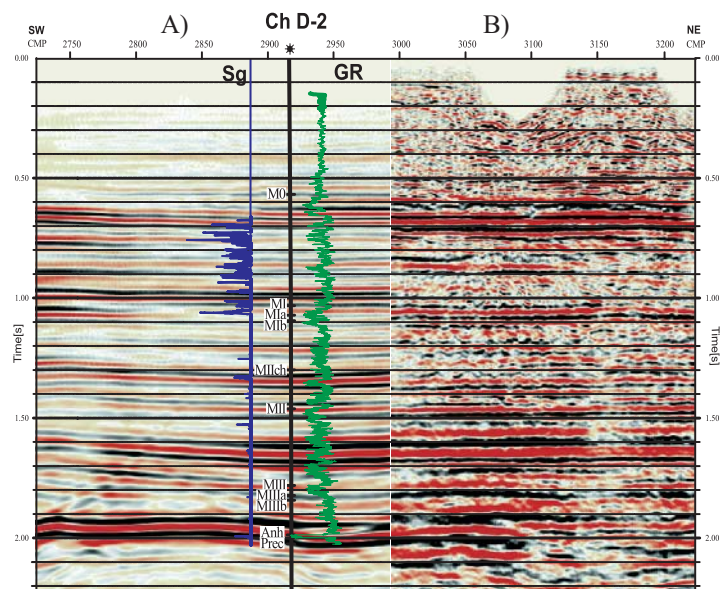


Fig. 12. Zestawienie teoretycznego (A) i rejestrowanego (B) przekroju fal PS; oznaczenia jak na figurze 11

Fig. 12. Combination of PS-wave theoretical (A) with recorded (B) section; descriptions like in Figure 11

Zdecydowanie lepsze dopasowanie zapisów, widoczne dla dolnej części przekroju, związane jest ze znacznie prostszym modelem budowy tej części pionowego profilu (grube warstwy, brak wyklinowań, niewielka horyzontalna zmienność warstw) oraz z dostępnością pomiarów akustycznych z rejestracją pełnego pola falowego dla dolnej części otworu ChD3. Obserwowane niezgodności dla górnej części profilu są najprawdopodobniej spowodowane przyjęciem do konstrukcji dwuwymiarowego modelu prędkościowego fal S tylko krzywych syntetycznych, które nie w pełni oddają rzeczywistą zmienności prędkości w górotworze. Strefy o podwyższonych wartościach współczynnika VP/VS, co wynika z dopasowania horyzontów sejsmicznych w zapisach fali P i PS (Fig. 8), mogą bowiem być związane zarówno z anizotropią, jak i z zawadnieniem luźnych utworów występujących w płytkiej części przekroju. Niestety te czynniki nie są uwzględniane ani w procesie kalibracji, ani obliczania teoretycznych wartości prędkości.

Obserwowana w miarę dobra zgodność teoretycznych i rejestrowanych pól falowych PS, widoczna przede wszystkim dla strefy złożowej, wskazuje, że opracowany model zmienności z głębokością prędkości fal poprzecznych jest zbliżony do rzeczywistego. Zaproponowana powyżej metoda obliczania prędkości fali poprzecznej wydaje się więc skutecznym narzędziem obliczania prędkości przy braku wiarygodnych danych otworowych.

Stwarza to możliwość pełniejszego wykorzystywania sejsmicznych pomiarów 3C do opracowania, w oparciu o teoretyczne pole falowe, kryteriów złożowej interpretacji przekrojów sejsmicznych oraz weryfikacji anomalii złożowych stwierdzanych w rejestracjach fal podłużnych.

Praca została wykonana w ramach prac własnych (nr 10.10.140.148) Zakładu Geofizyki Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie oraz projektu celowego KBN 6T12 2003C/6006.

Autorzy pragną podziękować PGNiG S.A. oraz Geofizyce Kraków Sp. z o.o. za udostępnienie niezbędnych do pracy materiałów geofizycznych.

Praca była prezentowana na VI Konferencji Naukowo-Technicznej „Geofizyka w Geologii, Górnictwie i Ochronie Środowiska” w dniu 27 października 2006 r. na WGGiOŚ AGH w Krakowie.

LITERATURA

- Alford R.M., Kelly K.R. & Boore D.M., 1974. Accuracy of finite-difference modeling of the acoustic wave equation. *Geophysics*, 39.
- Bała M. & Cichy A., 2003. Estymacja prędkości fal podłużnych i poprzecznych przy wykorzystaniu modeli teoretycznych oraz danych geofizyki wiertniczej. *Przeg. Geol.*, 51, 1058–1063.
- Bała M. & Cichy A., 2006. *Metody obliczania prędkości fal P i S na podstawie modeli teoretycznych i danych geofizyki otworowej – program ESTYMACJA*. UWND AGH, Kraków, 89.

- Bała M. & Witek K., 2004. Opracowanie rozkładu prędkości fal podłużnych i poprzecznych na podstawie modeli teoretycznych i danych geofizyki otworowej – program ESTYMACJA. *Konferencja GEOPETROL 2004, Prace INiG*, 130, 255–260.
- Borys Z. & Myśliwiec M., 2002. Perspektywy poszukiwań węglowodorów w Karpatach i zapadlisku przedkarpackim. *Nafta-Gaz*, 9, 447–456.
- Danek T. & Franczyk A., 2004. Parallel and distributed seismic wavefield modeling. *TASK Quarterly*, 51, 3, 307–322.
- Danek T., 2004. *Modelowania numeryczne pola falowego w ośrodkach niejednorodnych w zastosowaniu do poszukiwań węglowodorów*. Biblioteka Główna AGH, Kraków, 1–71 (rozprawa doktorska).
- Dziedzio P., Liszka B., Maksym A., Masłowski E. & Staryszak G., 1997. Środowisko sedymentacji utworów miocenu autochtonicznego w brzeżnej strefie Karpat a interpretacja geologiczno-złożowa w obszarze Husów-Albigowa-Krasne. *Mat. Konf. „Zespolona analiza geologiczna źródłem postępu w poszukiwaniach naftowych”*, 157–170.
- Dziedzio P., 2000. Sekwencje depozycyjne w utworach badenu i sarmatu w SE części zapadliska przedkarpackiego. *Przeg. Geol.*, 48, 12, 1124–1138
- Górka A., Madej K., Maksym A. & Gliniak P., 2004. Główne kierunki poszukiwań węglowodorów na południu Polski. *Mat. Konf. GEOPETROL 2004, Prace INiG*, 130, 55–58.
- Graves R.W., 1996. Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered – Grid Finite – Differences. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86, 1091–1106.
- Gruszczak E., Misiaczek P. & Trzeźniowski Z., 2002a. Analiza skuteczności stosowania sejsmiki 2D-3C w detekcji złóż gazu ziemnego w basenie mioceńskim. *Nafta-Gaz*, 9, 477–485.
- Gruszczak E., Misiaczek P., Kwaśny G. & Trzeźniowski Z., 2002b. Multicomponent Seismic Case History – Carpathian Foredeep Area. *Zbornik prednasok*, Technicka Univerzita v Kosicach, 42–47.
- Kelly K.R., Ward R.W., Treitel S. & Alford R.M., 1976. Synthetic seismograms: A finite difference approach. *Geophysics*, 41, 2–27.
- Maksym A., Liszka B., Staryszak G. & Dziedzio P., 1997. Model sedymentacyjny badeńsko-sarmackich utworów piaskowcowych (miocen autochtoniczny, obszar Husów-Albigowa-Krasne). *Mat. Konf. „Zespolona analiza geologiczna źródłem postępu w poszukiwaniach naftowych”*, 171–174.
- Pietsch K., Porębski S. & Hodiak R., 1999. Seismic Representation of a Miocene Deep-Marine Depositional System in the Carpathian Foredeep, SE Poland. *Proceeding of EAGE 61st. Conf.*, Helsinki, 5–52.
- Pietsch K., Danek T., Kobylarski M. & Marzec P., 2004. Kryteria identyfikacji sejsmicznych anomalii złożowych w oparciu o teoretyczne pole fal podłużnych (PP) i fal powierzchniowych (PS). *Konferencja GEOPETROL 2004, Prace INiG*, 130, 195–202.

- Porębski S., Pietsch K. & Frankowicz E., 2004. Seismic Expression of Craton-Fed Turbidite Gas – Reservoirs in the Carpathian Foredeep (Miocene, Poland). *Proceedings of EAGE 66th Conf.*, Paris, P124.
- Yang D.H., Liu E., Zhang Z.J. & Teng J., 2002. Finite-difference modeling in two-dimensional anisotropic media using a flux-corrected transport technique. *Geophysical Journal International*, 148, 320–328.

Summary

The first seismic experimental profile in Poland with full P and converted wave (C-wave) acquisition was performed by Geofizyka Kraków Ltd. in the area of Chałupki Dębniańskie (Carpathian Foredeep). The survey allowed to verify reservoir anomalies clearly observed on P-wave sections. High diversity of physical parameters, small dimensions of potential hydrocarbon traps and lack of essential experience in C-wave interpretation caused theoretical wavefield modelings to be indispensable in establishing of local interpretational criteria. Information about geometry of beds and P and S-wave velocities is needed to a construction of a seismogeological subsurface model. One dimensional P-wave velocity models were constructed on the basis of sonic logs (P-wave) from wells ChD2, ChD3 and D2M tied to the seismic sections with the use of synthetic seismograms (Figs 1, 2). Because S-wave logging was performed only in one well, it was necessary to work out a special method of obtaining S-wave velocity information on the basis of P-wave velocities and registered and modeled P and C-wavefields (Figs 3–6 and 8). Correctness of the obtained S-wave curve in the case of ChD3 well was confirmed by a three component vertical seismic profiling (VSP-3C) in this well (Fig. 7).

P-wave logs from ChD2, ChD3, D2M wells were fundamental data in a construction of two dimensional P-wave and S-wave velocity models (Figs 9, 10). They were prepared with the use of STRUCT application (the part of GeoGraphix system Landmark Graphics Cor.).

Verification of correctness of the two dimensional P and S-wave velocity models was performed comparing the theoretical wavefields calculated with the use of SeisMod application, Department of Geophysics, AGH UST to registered data (Figs 11, 12). A similarity of the compared wavefields shows that the proposed velocity models, for a given seismic resolution, approximate correctly a seismic velocity distribution in the profile.

The proposed above method concerning S-wave velocity evaluation seems to be efficient when reliable well log data is lacking. Thereby it allows to use 3C seismic registrations and full wavefield modelings to determine some criteria for reservoir interpretation and to verify anomalies on P-wave sections.