

Anna Leginowicz

Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Analiza zaawansowanych atrybutów modułu AVO Weighted Stacks w systemie ProMAX

W artykule przeanalizowano zaawansowane atrybuty modułu AVO Weighted Stacks. Aplikacja ta używana jest do rozróżniania, czy dana anomalia „*bright spot*” spowodowana została zawartością gazu, czy zmiennością litologiczną. Przedstawiono metodę wykorzystującą zależność zmienności amplitudy z offsetem, prowadzącą do obliczenia refleksyjności fali P, refleksyjności fali S i ostatecznie uzyskania sekcji współczynnika *Fluid Factor*. Podjęto także próbę oszacowania prędkości propagacji fali poprzecznej, wykorzystując moduły AVO dostępne w systemie ProMAX. Metoda oparta jest na koncepcji „*weighted stacking*”, w której głównym założeniem jest przedstawienie różnic w odniesieniu do trendu tła (np. zawodnionego ośrodka). Atrybut, który szczególnie mocno reaguje na anomalie związane z zawartością węglowodorów to *Fluid Factor*.

Advanced attributes analysis of AVO Weighted Stacks module in ProMAX system

In this paper advanced attributes of AVO Weighted Stacks was analyzed. The application is used to discriminate between the presence of gas and lithologic variations in Bright Spot analysis. Amplitude variation versus offset analysis leads to computation of P-wave reflectivity, S-wave reflectivity and finally Fluid Factor. The trial determination of S wave velocities with ProMAX AVO application was made additionally. Method is based on the concept of „*weighted stacking*”, where the principle is to create a „*difference stack*” relative to a wet background trend. Fluid Factor is the best attribute which is related to hydrocarbon anomalies.

W niniejszej publikacji przedstawiono metodę wykorzystującą zależność zmienności amplitudy z offsetem, prowadzącą do obliczenia refleksyjności fali P, refleksyjności fali S i ostatecznie uzyskania sekcji współczynnika *Fluid Factor*. Podjęto także próbę oszacowania prędkości propagacji fali poprzecznej, wykorzystując moduły AVO dostępne w systemie ProMAX.

Smith i Gidlow [9] przedstawili koncepcję „*weighted stacking*”, w której głównym założeniem jest przedstawienie różnic w odniesieniu do trendu tła (np. zawodnionego ośrodka). Atrybut, który szczególnie mocno reaguje na anomalie związane z zawartością węglowodorów, to *Fluid Factor*. Metoda ta bazuje na równaniu Zeoppritz'a i jego aproksymacji – trójczłonowym równaniu Aki-Richards'a, które zostało uproszczone przez Smith i Gidlow do równania dwuczłonowego dzięki zastosowaniu relacji Gardnera ($V_p \sim \rho$). Następnie, dla sprecyzowanego współczynnika V_p/V_s oraz dla wybranego celu geologicznego widocznego na danych kolekcjach CMP lub CRP, wykonywane są obliczenia prowadzące do otrzymania sekcji atrybutu refleksyjności fali P i fali S. Zaproponowana metoda w efekcie końcowym pozwala na uzyskanie sekcji atrybutu *Fluid Factor*.

Technologię tę zastosowano zarówno do danych modelowych, jak i rzeczywistych danych sejsmicznych.

Dane modelowe przygotowano (mgr inż. K. Żuławiński) w systemie Norsar, a następnie wykonano sekwencje procedur przetwarzania, przygotowującą dane do analiz AVO w systemie ProMAX. Finalnie, wykorzystując wyniki modułów AVO, wykonano obliczenia przy użyciu programów autorskich (dr A. Półchłopek), w celu uzyskania sekcji prędkości fali S.

Analiza amplitudy zmiennej z offsetem, stosowana już prawie powszechnie w polskim przemyśle, niestety często ogranicza się do zaprezentowania podstawowych atrybutów AVO, na przykład sekcji: intercept, gradient lub produkt. Możliwość wykorzystania tej metody jest o wiele więcej, jednak do ich przedstawienia brakuje często doświadczenia, wiedzy lub wystarczającej ilości różnorodnych danych; między innymi pomiarów geofizyki otworowej (na przykład sondą akustyczną rejestrującą pełne pole falowe).

Podstawę metody AVO stanowi równanie Zeoppritz'a, którego aproksymację przedstawili w 1980 roku Aki i Richards:

$$R(\theta) = \left[\frac{1}{2}(1 + \tan^2 \theta) \right] \frac{\Delta V_p}{V_p} - \left[4 \frac{V_s}{V_p} \sin^2 \theta \right] \frac{\Delta V_s}{V_s} + \left[\frac{1}{2}(1 - 4 \frac{V_s}{V_p} \sin^2 \theta) \right] \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (1)$$

gdzie:

$$\begin{aligned}
 V_p &= (V_{p1} + V_{p2})/2 - \text{średnia prędkość fali P} \\
 \Delta V_p &= (V_{p2} - V_{p1}) \\
 V_s &= (V_{s1} + V_{s2})/2 - \text{średnia prędkość fali S} \\
 \Delta V_s &= (V_{s2} - V_{s1}) \\
 \rho &= (\rho_1 + \rho_2)/2 - \text{średnia gęstość} \\
 \Delta\rho &= (\rho_2 - \rho_1)
 \end{aligned}$$

Aproksymacja bazująca na równaniu Aki-Richards'a została zaprezentowana przez Smith'a i Gidlow'a [9]. Wykorzystali oni tę aproksymację w celu przedstawienia wagowanej sekcji składania, wykonanej na kolekcjach sejsmicznych po korekcie, na której widoczne są informacje o właściwościach złożowych skał.

Smith i Gidlow przekształcili równanie Aki-Richards'a do postaci:

$$\begin{aligned}
 R(\theta) &= \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta V_p}{V_p} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) - 2 \frac{V_s^2}{V_p^2} \left(2 \frac{\Delta V_s}{V_s} + \frac{\Delta\rho}{\rho} \right) \sin^2 \theta + \\
 &+ \frac{1}{2} \frac{\Delta V_p}{V_p} \operatorname{tg}^2 \theta
 \end{aligned} \quad (2)$$

a następnie uproszczono równanie (2) używając równania Gardnera:

$$\rho = k V_p^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

Po zróżniczkowaniu otrzymano:

$$\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{1}{4} \frac{\Delta V_p}{V_p} \quad (4)$$

Podstawiając rezultat (4) do równania (2) otrzymano:

$$R(\theta) = c \frac{\Delta V_p}{V_p} + d \frac{\Delta V_s}{V_s} \quad (5)$$

gdzie:

$$c = \frac{5}{8} - \frac{1}{2} \frac{V_s^2}{V_p^2} \sin^2 \theta + \operatorname{tg}^2 \theta$$

$$d = -4 \frac{V_s^2}{V_p^2} \sin^2 \theta$$

Równanie (5) rozwiązywane jest metodą najmniejszych kwadratów, aby dostarczyć wag, które następnie zostaną zaaplikowane do kolekcji sejsmicznych, w celu wyestymowania $\Delta V_p/V_p$ oraz $\Delta V_s/V_s$.

Smith i Gidlow wyprowadzili dwa typy sekcji ważonych: refleksyjność współczynnika pseudo Poissona

(*Pseudo-Poisson's ratio reflectivity*), zdefiniowana następująco:

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = \frac{\Delta V_p}{V_p} - \frac{\Delta V_s}{V_s} \quad (6)$$

oraz *Fluid Factor*

$$\Delta F = \frac{\Delta V_p}{V_p} - 1,16 \frac{V_s}{V_p} \frac{\Delta V_s}{V_s} \quad (7)$$

Aby otrzymać *Fluid Factor* Smith i Gidlow używają równania *Mudrock Line*, które charakteryzuje generalną zależność wodonośnych skał klastycznych.

Poniżej przedstawiono równanie *Mudrock Line*:

$$V_p = 1360 + 1,16 \cdot V_s \quad (8)$$

Po zróżniczkowaniu otrzymano:

$$\Delta V_p = 1,16 \cdot \Delta V_s \quad (9)$$

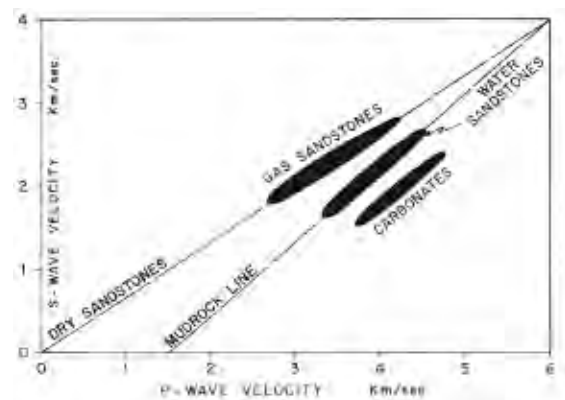
Równanie (9) można wyrazić też w formie:

$$\frac{\Delta V_p}{V_p} = 1,16 \cdot \frac{V_s}{V_p} \cdot \frac{\Delta V_s}{V_s} \quad (10)$$

Castagna J.P., et al. [1] zdefiniował *Mudrock Line* – linię prostą łączącą w układzie prędkość fali S/prędkość fali P, w pobliżu której leżą próbki skał wykazujące własności zawodnionej skały klastycznej.

Gazonośny piaskowiec leży powyżej linii *Mudrock*, a skały węglanowe leżą poniżej linii *Mudrock* (rysunek 2), na wykresie prędkości V_p i V_s pomierzonych z danych otworowych.

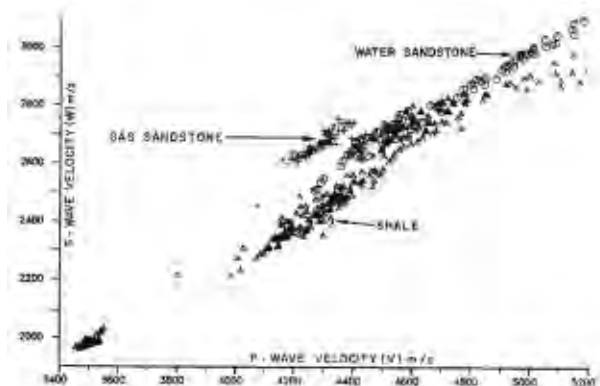
Na wykresie prędkości V_p i V_s pomierzonych z otworu produktywnego (zgazowany piaskowiec) zgrupowane wartości charakteryzują daną litologię, a co ważniejsze



Rys. 1. *Mudrock Line* – linia charakteryzująca zawodnione skały klastyczne oraz (powyżej niej) położenie gazonośnych piaskowców, na wykresie zależności prędkości fali P od prędkości fali S [1]

– widać rozróżnienie pomiędzy piaskowcami zgazowanymi, a piaskowcami zawodnionymi oraz łupkami.

Praktyczne zastosowanie tej metody związane jest z określeniem trendu tła z pomiarów otworowych (np.



Rys. 2. Wykres zależności V_p od V_s dla pomiarów z otworu związanego ze złożem gazowym [2]

sondą dalekiego zasięgu) oraz przygotowaniem danych sejsmicznych pod kątem analizy AVO.

Smith i Gidlow przedstawili koncepcję „weighted stacking” – ważonej sekcji sumowania. W tej technice głównym założeniem jest przedstawienie różnic w odniesieniu do trendu tła (np. zawodnionego ośrodka). Atrybut, który szczególnie mocno reaguje na anomalie związane z zawartością węglowodorów to *Fluid Factor*.

Z podstawowego równania AVO obliczone zostają wartości: intercept – R_p oraz gradient – G , następnie według Smith i Gidlow różnica pomiędzy R_p i G może być przybliżona przez stosunek różnicy prędkości V_s na granicy ośrodków, do średniej wartości prędkości V_s w warstwie powyżej i poniżej granicy sejsmicznej [11].

$$\Delta V_s/V_s = \sim R_p - G \quad (11)$$

gdzie:

$$\Delta V_s = (V_{s2} - V_{s1})$$

$$V_s = (V_{s1} + V_{s2})/2$$

w połączeniu z relacją Gardnera (3) oraz równaniem (4)

$$R_p = \frac{1}{2}(\Delta V_p/V_p + \Delta\rho/\rho) \quad (12)$$

gdzie:

$$\Delta\rho = (\rho_2 - \rho_1)$$

$$\rho = (\rho_2 + \rho_1)/2$$

$$\Delta V_p = (V_{p2} + V_{p1})$$

$$V_p = (V_{p2} + V_{p1})/2$$

otrzymujemy następujące przybliżenie $\Delta V_p/V_p$

$$\Delta V_p/V_p = \sim 8 R_p/5 \quad (13)$$

Używając *Mudrock Line* [1] otrzymujemy:

$$\Delta V_p = 1,16\Delta V_s$$

lub
$$\Delta V_p/V_p = 1,16(V_s/V_p)(\Delta V_s/V_s)$$

Powyzsza zależność obowiązuje tylko w przypadku nasyconych wodą złożową utworów klastycznych (piaskowce, ilowce, mułowce), zatem dla nasyconych węglowodorami skał *Fluid Factor* – ΔF jest definiowany jako różnica pomiędzy obserwowaną wartością $\Delta V_p/V_p$ (z równania 13) i $\Delta V_p/V_p$ prognozowaną z $\Delta V_s/V_s$ (11).

$$\Delta F = \Delta V_p/V_p = 1,16(v\Delta V_s/V_s) \quad (14)$$

gdzie:

v – to współczynnik V_s/V_p , który może być prognozowany dzięki zastosowaniu *Mudrock Line* do oceny prędkości interwałowych otrzymanych z konwencjonalnej analizy prędkości.

Fatti J.L., et al. [2] przeddefiniował *Fluid Factor* pod kątem refleksyjności fali P i refleksyjności fali S

$$\Delta F = R_p - 1,16(V_s/V_p)R_s \quad (15)$$

Jeśli wartość ΔF jest bliska zeru, oznacza to, że mamy do czynienia ze skałą zawodnioną, jeśli natomiast w ośrodku występuje zgazowany piaskowiec, to atrybut *Fluid Factor* – ΔF będzie negatywny w stropie, a pozytywny w spągu skały złożowej [9].

Ponadto przedstawiono alternatywną drogę spojrzenia na równanie (15), w której *Fluid Factor* jest różnicą pomiędzy rzeczywistym współczynnikiem odbicia fali P – R_p , a wyliczonym R_p dla tego samego, ale zawodnionego piaskowca.

Obliczony R_p jest wyprowadzony (pochodzi) od współczynnika odbicia fali S – R_s przy użyciu zależności linii Mudrock.

Równanie (15) przybiera postać:

$$\Delta F(t) = R_p(t) - g(t)R_s(t) \quad (16)$$

gdzie:

t – jest podwójnym czasem przebiegu – $2T$,
 $R_p(t)$ – trasą refleksyjności fali P,
 $R_s(t)$ – trasą refleksyjności fali S,
 $g(t)$ – funkcja zależności szerokości okna od czasu (*slowly time-varying gain function*).

Ta funkcja szerokości okna (bramki) wyraża się następująco:

$$g(t) = M(V_s/V_p) \quad (17)$$

gdzie:

M – jest wartością zależną od kąta nachylenia linii Mudrock.

Fatti J.L., et al. [2] sugeruje, że wartość ta powinna być raczej wyekstrahowana (uzyskana) lokalnie, niż tak jak przedstawia ją Castagna J.P., et al. [1].

W celu przeanalizowania możliwości oszacowania prędkości fali S przygotowano (mgr inż. Krzysztof Żuławiński) modelowe dane sejsmiczne w systemie Norsar, w oparciu o przedstawiony poniżej model geologiczny (rysunek 3). Uzyskane w ten sposób pliki w formacie .sgy zostały wprowadzone do systemu ProMAX i w nim poddane processingowi, koniecznemu do wykonania analiz AVO.

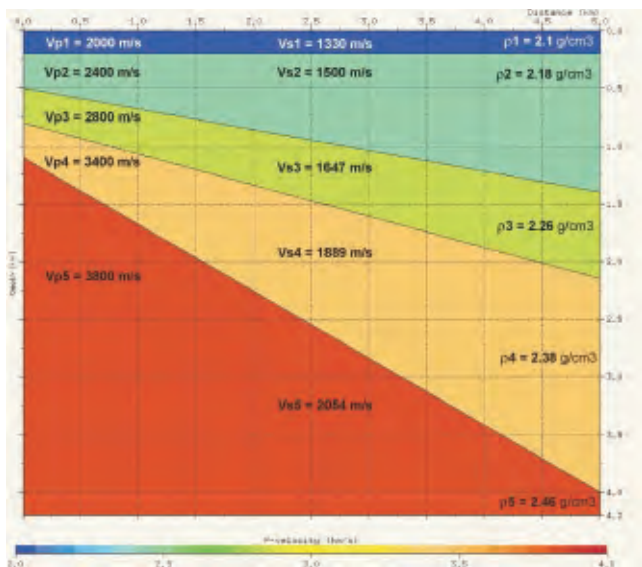
Na rysunku 3 przedstawiono model geometryczno-prędkościowy ośrodka o granicach nachylonych, w którym założono niezmienność parametrów we-

wnątrz poszczególnych warstw. Parametry modelu przedstawiono w tabelcy 1.

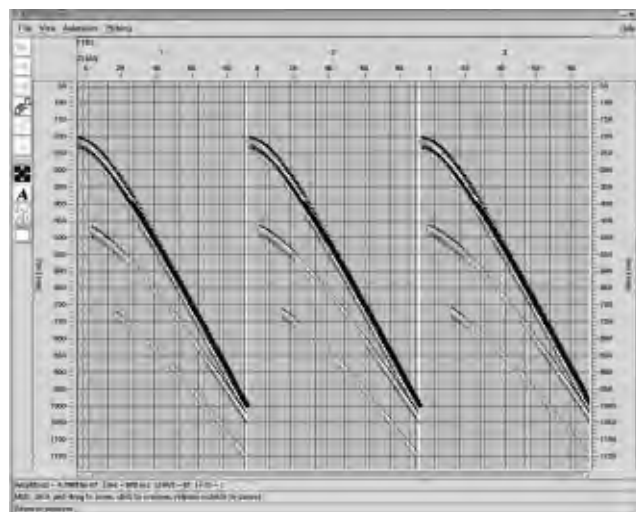
Parametry geometrii danych modelowych są następujące:

- rozstaw niesymetryczny – 96 kanałów,
 - odległość pomiędzy kanałami = 20 m,
 - $offset_{min} = 20$ m, $offset_{max} = 1920$ m,
 - odległość pomiędzy punktami odbioru $\Delta PO = 20$ m ($PO_1 = 20$ m, $PO_2 = 40$ m, ..., $PO_{ostatni} = 4920$ m),
 - odległość pomiędzy punktami wzbudzenia (strzałowymi) $\Delta PS = 20$ m ($PW_1 = 0$ m, $PW_2 = 20$ m, ..., $PW_{ostatni} = 4000$ m),
 - ilość punktów wzbudzenia = 201,
 - długość rejestracji = 3000 ms,
 - krok próbkowania $\Delta T = 2$ ms
- $\Delta CDP = 10$ m.

Na rysunku 4 zaprezentowano kolekcje modelowe, dane z pliku model_NORSAR.dat – pierwsze rekordy.



Rys. 3. Model geometryczno-prędkościowy ośrodka o warstwach zapadających; parametry modelu V_p , V_s , ρ



Rys. 4. Kolekcje danych modelowych – tzw. surowe dane z pliku model_NORSAR.dat

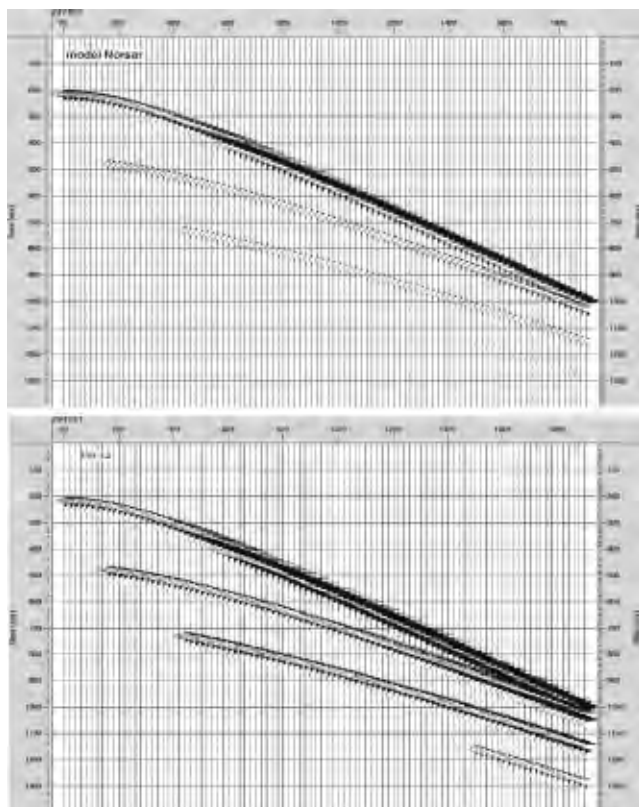
Następnym etapem jest processing – przetwarzanie pod kątem analiz AVO, w którym zastosowano niżej opisane procedury:

Tabela 1. Parametry modelu geometryczno-prędkościowego ośrodka o granicach nachylonych

| Warstwa | Spąg warstwy [m] | | V_p [m/s] | $\gamma = V_p/V_s$ | V_s [m/s] | Gęstość [g/cm ³] $\rho = 1,7 + 0,2 V_p$ |
|---------|------------------|------------------|-------------|--------------------|-------------|--|
| | dla $x = 0$ m | dla $x = 5000$ m | | | | |
| 1 | 200 | 200 | 2000 | 1,5 | 1330 | 2,1 |
| 2 | 500 | 1400 | 2400 | 1,6 | 1500 | 2,18 |
| 3 | 800 | 2150 | 2800 | 1,7 | 1647 | 2,26 |
| 4 | 1100 | 4000 | 3400 | 1,8 | 1889 | 2,38 |
| 5 | 4200 | 4200 | 3800 | 1,85 | 2054 | 2,46 |

► TAR – odzyskiwanie rzeczywistych amplitud (*True Amplitud Recovery*)

Proces ten stosuje czasowo zmienną funkcję wzmocnienia na trasach, w celu skompensowania utraty energii fali sejsmicznej z głębokością (a tym samym zmniejszania się amplitudy z głębokością), do której dochodzi z powodu sferycznego rozwierania się frontu falowego (rysunek 5).

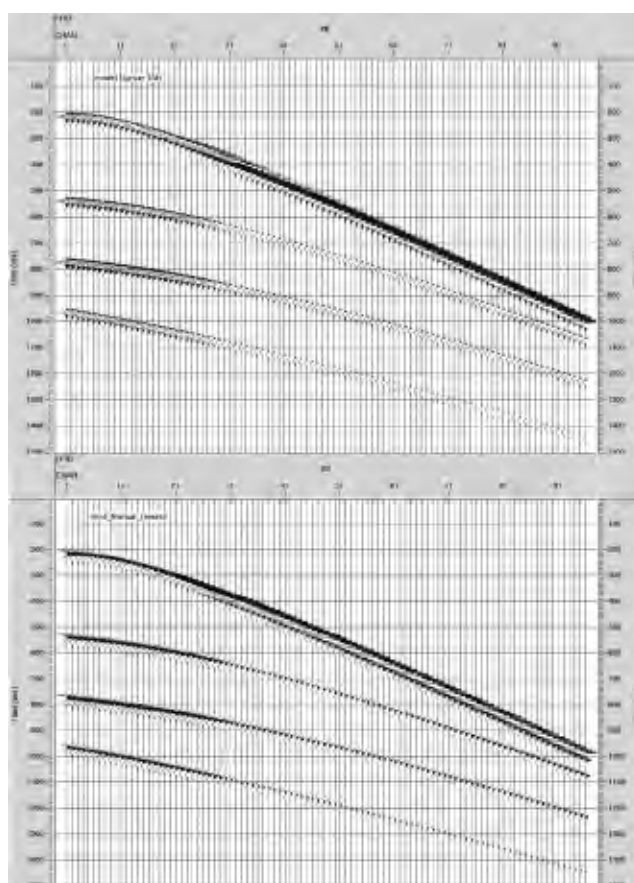


Rys. 5. Kolekcja danych modelowych po zastosowaniu aplikacji TAR (odzyskiwania rzeczywistych amplitud)

► Trace Reverse – odwrócenie polaryzacji

Ponieważ system Norsar generuje odwrotną polaryzację, zgodną ze standardem amerykańskim, w module *Trace Reverse* dokonano odwrócenia polaryzacji, aby dopasować dane modelowe do standardu danych sejsmicznych, czyli zgodnie z konwencją: dodatnie amplitudy trasy sejsmicznej w przypadku dodatnich współczynników odbicia (rysunek 6).

Ponieważ przetwarzanie dotyczy danych modelowych, nie było konieczne zastosowanie zaawansowanych procedur przetwarzania, należało jednak zwrócić uwagę, aby zastosowane procedury nie ingerowały i nie zakłóciły relacji amplitudowych, dlatego na każdym etapie przetwarzania wnikliwie analizowano efekt każdej procedury. Z uwagi na powyższe oraz zgodnie



Rys. 6. Odwrócenie polaryzacji : PRZED i PO zastosowaniu modułu *Trace Reverse*

z zasadą przetwarzania dla potrzeb AVO unika się indywidualnego wyrównywania tras, a skalowania typu AGC są wykluczone.

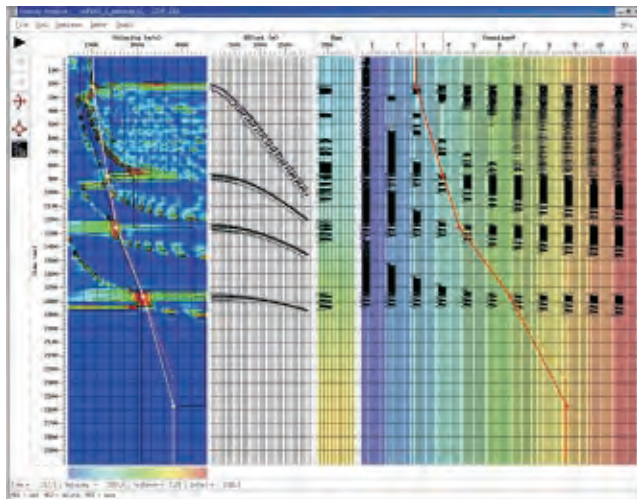
► Velocity Analysis

Dokładna analiza prędkości, często powtarzana kilkakrotnie w celu uzyskania najlepszego modelu prędkościowego, jest bardzo ważnym etapem sekwencji przetwarzania do celów AVO. Analiza prędkości jest interaktywnym narzędziem służącym do uzyskania prędkości sumowania (V_{CDP}) (V_{RMS}). Prędkość ta nie posiada sensu fizycznego, ale zapewnia najlepszy efekt składania. Otrzymaną prędkość stosujemy do obliczania poprawek kinematycznych (NMO – *Normal Moveout*).

Przeprowadzono analizę prędkości metodą stałych prędkości (CVS – *Constant Velocity Scan*) w zakresie $V_p = 1500-4500$ m/s (rysunek 7).

W tym przypadku wykonano trzy iteracje analiz prędkości. Ostateczna analiza prędkości została wykonana z krokiem co 10 CDP (100 m). Zaaplikowanie korekty NMO oraz uzyskanie „płaskiego” wybranego horyzontu (celu poszukiwawczego) stanowi bardzo

ważny etap przygotowania danych do AVO. Efektem końcowym jest pole prędkości sumowania. Aby sprawdzić jego poprawność należy wykonać sumowanie w module CDP/*Ensamble Stack*.



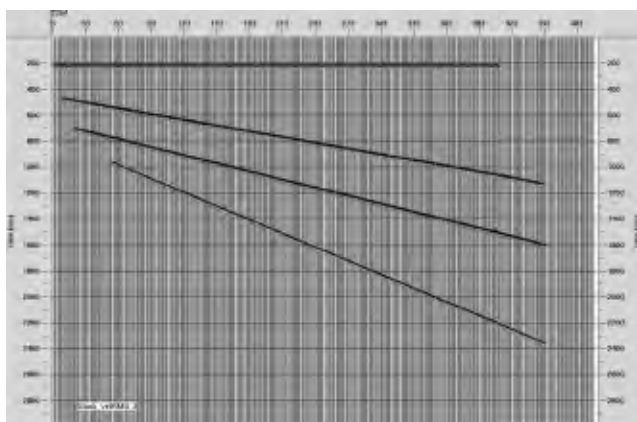
Rys. 7. Trzecia iteracja analiz prędkości wykonywana z gęstością co 10 CDP. Analiza prędkości metodą stałych prędkości (CVS – *Constant Velocity Scan*) CDP = 283.

► **CDP/Ensemble Stack**

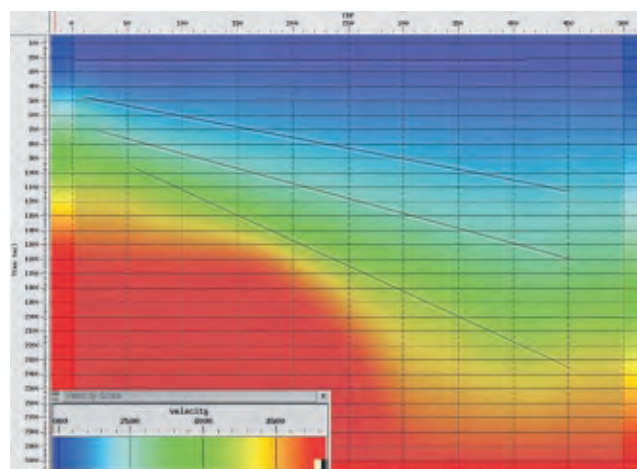
Wykonano składanie za pomocą modułu CDP/*Ensemble Stack*, którego efektem jest sekcja sumowana danych modelowych Stack_velRMS_3 (rysunek 8).

W module *Normal Moveout Correction* wykorzystano model prędkości vel RMS_3 (rysunek 9).

W module *Volume Viewer/Editor*, służącym między innymi do wizualizacji pola prędkości, sprawdzono poprawność wyliczonego pola prędkości. Na rysunku 9 pokazano sekcję sumowaną (Stack velRMS_3) na tle pola prędkości velRMS_3 – otrzymanego w wyniku analiz prędkości.



Rys. 8. Sekcja sumowana danych modelowych Stack_velRMS_3



Rys. 9. Sekcja sumowana Stack velRMS_3 na tle pola prędkości velRMS_3

Po zakończonym etapie przetwarzania sejsmicznych danych modelowych pod kątem analiz AVO, a przed przystąpieniem do wykonania modułów AVO, należy przygotować interwałowe pole prędkości, dzięki któremu przeliczone zostaną kąty padania i stworzone zostaną kolekcje kątowe. Najlepiej wykorzystać do tego celu dane z analiz prędkości z pola prędkości velRMS_3, po odpowiednim ich przygotowaniu.

► **Velocity Manipulation oraz Interactive Velocity Edit**

Do przygotowania pola prędkości interwałowych zostały wykorzystane moduły *Velocity Manipulation* oraz *Interactive Velocity Edit*.

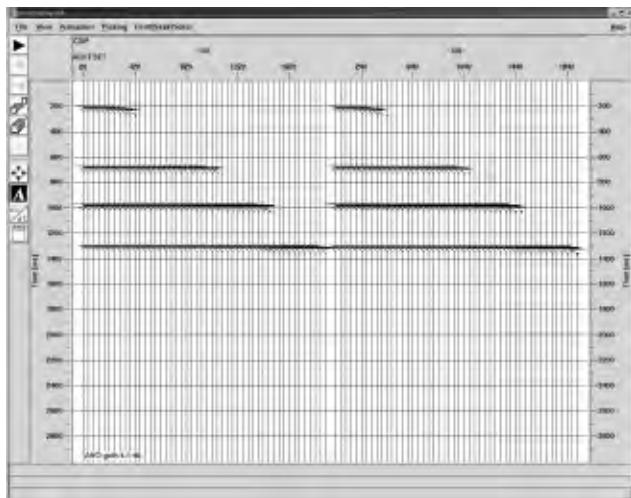
Przygotowane w ten sposób pole prędkości, przeliczone na czasowe prędkości interwałowe, może być wprowadzone do kolejnej aplikacji AVO *Analysis Gathers*.

► **AVO – kolekcje kątowe (*Analysis Gathers*)**

Dane wejściowe muszą mieć zaaplikowaną korektę NMO. Należy zwrócić uwagę, aby najbardziej interesujące interpretatora horyzonty po zaaplikowaniu poprawki NMO były płaskie. W tym przypadku wprowadzono prędkości z pliku velRMS_3.

Moduł ten konwertuje wejściowe kolekcje CDP na kolekcje kąta padania lub kolekcje ograniczone kątem (offsetem). Kolekcje te są używane jako wejściowe dane do AVO *Weighted Stack*. Dane zostają posortowane według AOFFSET na wejściu i wyjściu tego modułu. Ważnym parametrem tej aplikacji jest wprowadzenie prędkości interwałowych. Po ustaleniu właściwego zakresu kątów, procedura AVO *Analysis Gathers* generuje kolekcje tras odpowiadające różnym

kątom padania. W przypadku danych modelowych ustalono optymalny zakres kątów od 1-40° (rysunek 10).



Rys. 10. Wejściowa kolekcja CDP = 155 posortowana względem offsetu. Kolekcje kątowe danych modelowych, zakres kątów 1-40°

► AVO Weighted Stacks

Teoretyczną podstawą tej metody jest koncepcja ważonej sekcji sumowania, przedstawiona przez Smith'a i Gidlow'a, opisana szerzej w początkowej części niniejszej publikacji. Po właściwym przygotowaniu danych, analiza przy użyciu tego modułu może dostarczyć cennych informacji na temat litologii i rodzaju nasycenia. Ogólne rozpoznanie może być wykonane w module *AVO Weighted Stacks*, jednak bardziej szczegółowe dochodzenie powinno zostać wykonane na kolekcjach kątowych, analizując konkretną anomalię.

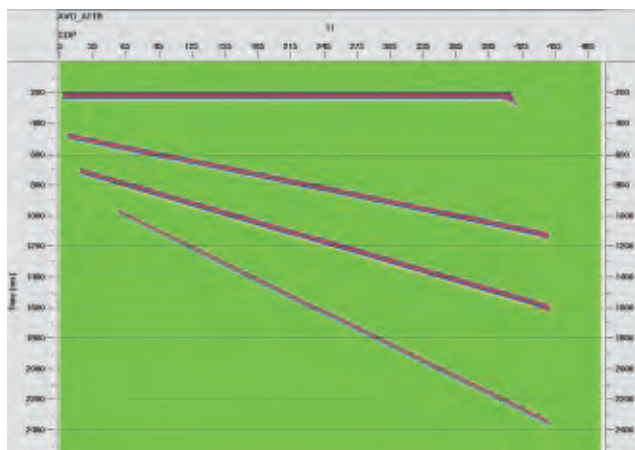
Analiza według modułu *AVO Weighted Stacks* jest używana (z sukcesem) do rozróżnienia pomiędzy obecnością gazu, a zmiennością litologiczną w przypadku „*bright spot'u*” na sekcji sejsmicznej.

W wyniku wykorzystania modułu *AVO Weighted Stacks* dostępne są następujące atrybuty w systemie ProMAX:

- V stack – P wave reflectivity – refleksyjność fali P,
- W stack – S wave reflectivity – refleksyjność fali S,
- V stack minus W stack,
- V stack podzielona przez W stack,
- W stack podzielona przez V stack,
- V stack minus skalowana W stack,
- suma wag V stack,
- suma wag W stack,
- Fluid Factor.

W niniejszej publikacji przedstawiono trzy główne atrybuty:

- V stack – P wave reflectivity – refleksyjność fali P – R_p ,
- W stack – S wave reflectivity – refleksyjność fali S – R_s ,
- Fluid Factor (rysunek 11).



Rys. 11. Sekcja Fluid Factor – atrybut modułu AVO Weighted Stack

$$V \text{ stack} = \Delta V_p / V_p$$

$$W \text{ stack} = \Delta V_s / V_s$$

Fluid Factor

$$\Delta F = \Delta V_p / V_p - 1,16 (V_s / V_p) (\Delta V_s / V_s) \quad (18)$$

W systemie ProMAX przyjęty jest trend linii Mudrock, według poniższej zależności:

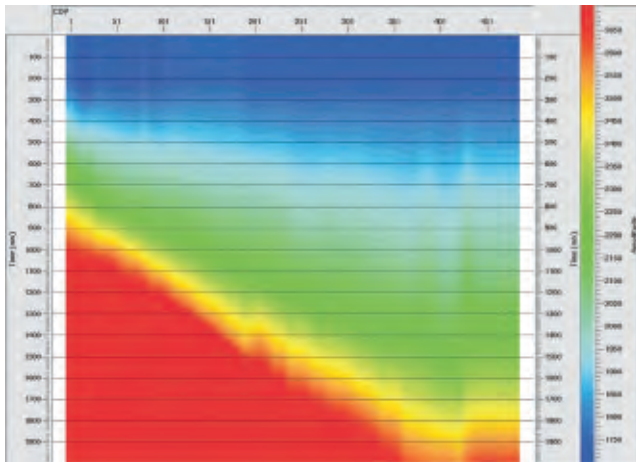
$$V_s = 0,8621 \cdot V_p - 1,1724 \quad (19)$$

Powyżej przedstawione wyniki modułu AVO Weighted Stack przetransformowano do formatu .sgy. Następnie po zaaplikowaniu pola prędkości fali P, wyników sekcji refleksyjności fali P, sekcji refleksyjności fali S oraz sekcji Fluid Factor obliczono przy pomocy programów autorskich (dr Anna Półchłopek) sekcję pola prędkości fali S – V_s .

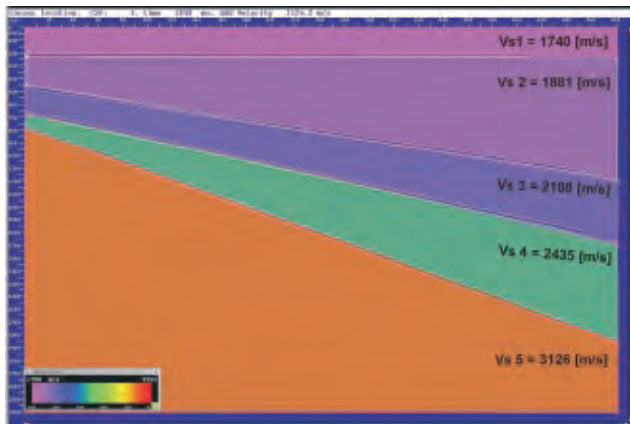
Z pliku prędkości fali S (rysunek 12) obliczono prędkości średnie w zadanych warstwach modelu (rysunek 13). Jak widać poniżej, niestety prędkości fali S odbiegają od prędkości założonych w modelu (rysunek 3).

Przeprowadzono także próbę oszacowania prędkości propagacji fali S na danych rzeczywistych, przy użyciu modułów AVO dostępnych w systemie ProMAX.

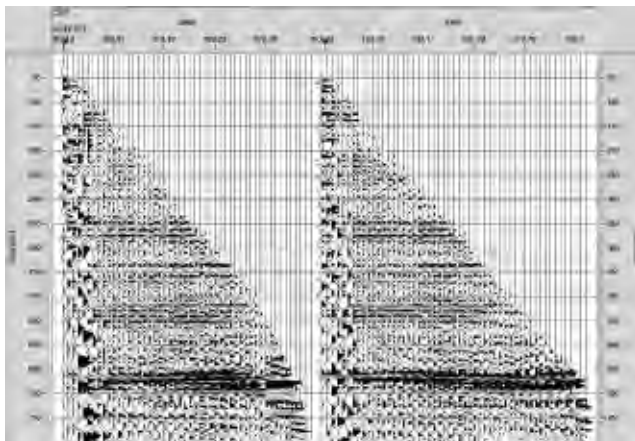
Dane sejsmiczne (profil T019) zostały poddane specjalistycznemu przetwarzaniu pod kątem analiz AVO



Rys. 12. Sekcja pola prędkości fali S – V_s



Rys. 13. Uśrednione w zadanych warstwach prędkości z pliku vel S



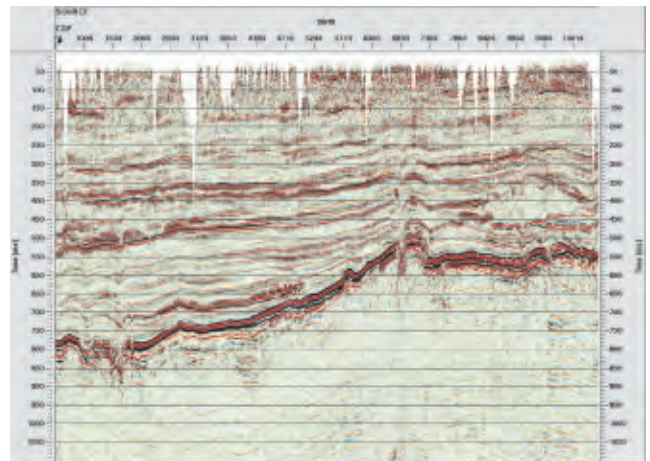
Rys. 14. Wejściowa kolekcja CDP posortowana według offsetu. Dane po odpowiednim przetworzeniu pod kątem analiz AVO – proc_avo.dat

(Geofizyka Toruń Sp. z o.o.). Najważniejsze warunki, które musi spełniać przetwarzanie pre-stack wymagane do analiz AVO, to według Yilmaz'a [12]:

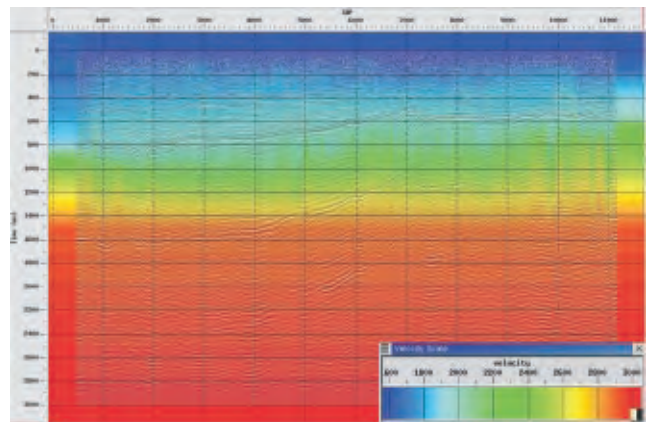
- zachowanie rzeczywistych amplitud w celu wychwycenia zmian amplitudy ze zmieniającym się offsetem

- (właściwie zastosowana aplikacja TAR oraz nie używanie AGC – dane nie mogą być skalowane!),
- sekwencja processingu powinna zachowywać charakterystykę częstotliwościową z płaskim przebiegiem w paśmie przenoszenia sygnału i w jak najszerszym zakresie,
- kolekcje wejściowe do analiz AVO muszą być zmięgowane pre-stack.

W celu wizualizacji danych wejściowych (proc_avo.dat) przetworzonych pod kątem AVO wykonano sumowanie (rysunek 15), wykorzystując pole prędkości RMS (plik final.vel – rysunek 16).



Rys. 15. Sekcja sumowana proc_avo.stk



Rys. 16. Pole prędkości sumowania (plik final.vel) wraz z sekcją proc_avo.stk

➤ CDP/Ensemble Stack

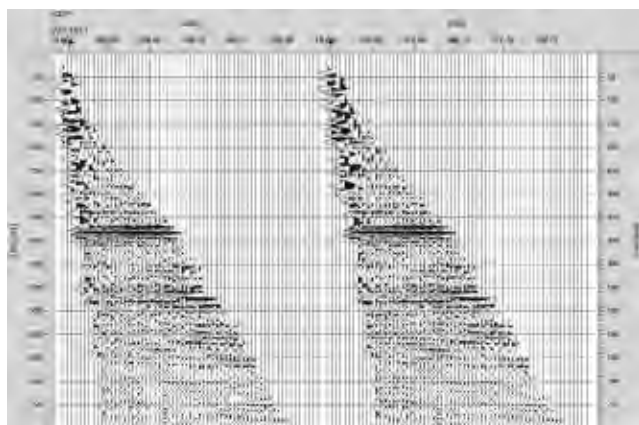
Za pomocą modułu CDP/Ensemble Stack wykonano składanie, którego efektem jest sekcja sumowana proc_avo.stk (rysunek 15).

W module Normal Moveout Correction wykorzystano model prędkości final.vel (rysunek 16). Analiza prędkości pod kątem AVO (w standardowym przetwa-

rzaniu co 2-3 km) powinna być wykonywana dość gęsto (np. co 250 m), w celu wychwycenia zmian prędkości, które mogą powodować anomalie AVO. W tym przypadku analiza prędkości była wykonana co 0,5 km, co można uznać za wystarczającą gęstość.

► AVO Analysis Gathers

Moduł ten konwertuje wejściowe kolekcje CDP na kolekcje kąta padania lub kolekcje ograniczone kątem (offsetem). Kolekcje te używane są jako wejściowe dane do AVO *Weighted Stack*. Dane zostają posortowane według AOFFSET na wejściu i wyjściu tego modułu. Ważnym parametrem tej aplikacji jest wprowadzenie prędkości interwałowych, przeliczonych z pliku prędkości RMS – final.vel. Po ustaleniu właściwego zakresu kątów, procedura AVO *Analysis Gathers* generuje kolekcje tras, odpowiadające różnym kątom padania. Kolekcje te służą także do analizowania właściwości AVO na poszczególnych rekordach. W tym przypadku wykorzystano kolekcje kątowe w zakresie od 10-35° (rysunek 17).



Rys. 17. Kolekcja kąтова odpowiadające kątom padania (10-35°) AVO *Analysis Gathers*

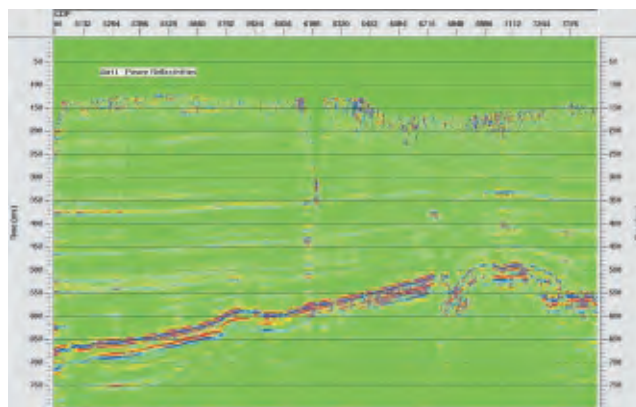
► AVO Weighted Stacks

Podstawą tej metody jest koncepcja ważonej sekcji sumowania, przedstawiona przez Smith'a i Gidlow'a. Analiza w module AVO *Weighted Stacks* jest używana z powodzeniem do rozróżnienia anomalii „*bright spot*” spowodowanej obecnością gazu, od anomalii powstałej wskutek zmienności litologicznej.

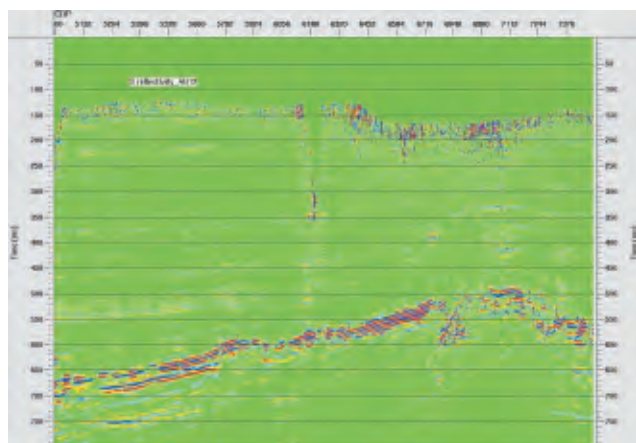
Przedstawiono trzy główne atrybuty modułu AVO *Weighted Stacks*, opisane szczegółowo w początkowej części niniejszej publikacji:

- V stack – P wave reflectivity – refleksyjność fali P – R_p (rysunek 18),

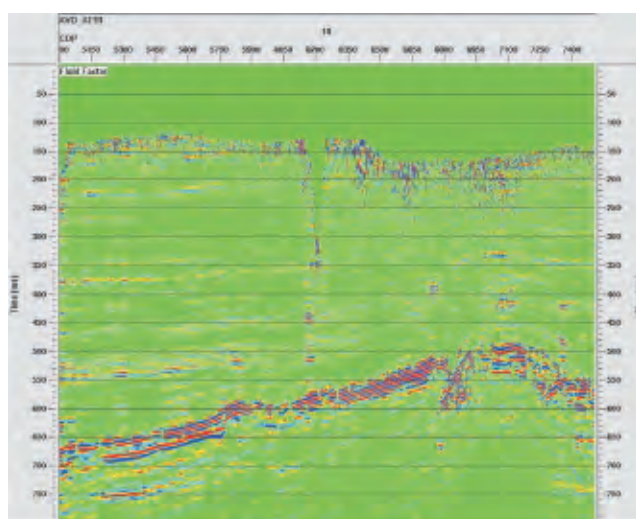
- W stack – S wave reflectivity – refleksyjność fali S – R_s (rysunek 19),
- Fluid Factor (rysunek 20).



Rys. 18. Sekcja refleksyjności fali P – atrybut AVO *Weighted Stack*



Rys. 19. Sekcja refleksyjności fali S – atrybut AVO *Weighted Stack*



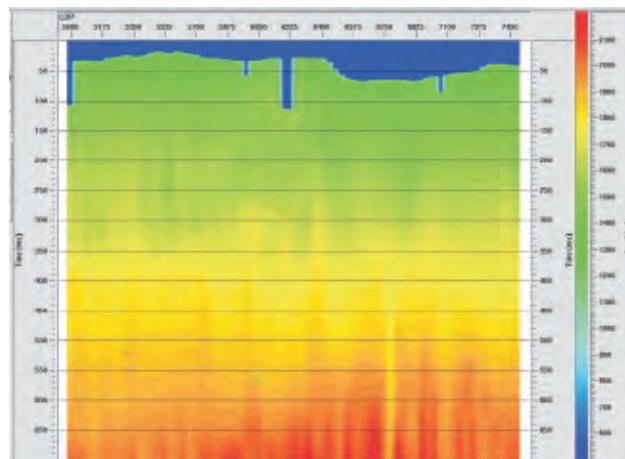
Rys. 20. Sekcja Fluid Factor – atrybut AVO *Weighted Stack*

Przedstawione na rysunkach: 18, 19 i 20 wyniki modułu AVO *Weighted Stack* przetransformowano

do formatu .sgy. Następnie, po zaaplikowaniu pola prędkości fali P (final.vel) do wyników sekcji refleksyjności fali P, sekcji refleksyjności fali S oraz sekcji *Fluid Factor* – obliczono przy pomocy programów autorskich (dr Anna Półchłopek) sekcję pola prędkości fali S – V_s .

W niniejszej publikacji przeanalizowano atrybuty AVO *Weighted Stacks*. Aplikacja ta używana jest do rozróżniania anomalii „*bright spot*” spowodowanych zawartością gazu, od anomalii powstałej w wyniku zmienności litologicznej. Przedstawiono metodę wykorzystującą zależność zmienności amplitudy z offsetem, prowadzącą do obliczenia refleksyjności fali P, refleksyjności fali S i ostatecznie uzyskania sekcji współczynnika *Fluid Factor* – atrybutu, który szczególnie mocno reaguje na anomalie związane z zawartością węglowodorów. Podjęto także próbę oszacowania prędkości propagacji fali poprzecznej, wykorzystując moduły AVO dostępne w systemie ProMAX.

Metoda ta oparta jest na koncepcji „*weighted stacking*”, w której głównym założeniem jest przedstawienie różnic w odniesieniu do trendu tła (np. zawodnionego ośrodka). Technologię tę zastosowano



Rys. 21. Sekcja prędkości propagacji fali poprzecznej – S

zarówno do danych modelowych, jak i rzeczywistych danych sejsmicznych.

Głównym zastosowaniem przedstawionej metody, według autorki powinno być wskazywanie stref interesujących złożowo, a szczególnie rozróżnianie, czy dana anomalia „*bright spot*” jest anomalią spowodowaną przez zmiany litologiczne, czy też nasycenie węglowodorami.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Literatura

- [1] Castagna J.P., Swan H.W., Foster D.J.: *Framework for AVO gradient and intercept interpretation*, Geophysics, Soc. of Expl. Geophys., vol. 63, 1998.
- [2] Fatti J.L., Smith G.C., Vail P.J., Strauss P.J., Levitt P.R.: *Detection of gas in sandstone reservoirs using AVO analysis: A 3-D seismic case history using the Geostack technique*, Geophysics, vol. 59, no. 9, p. 1362-1376, 1994.
- [3] Hampson Russell Software Services Ltd. – online.
- [4] Leginowicz A.: *Analiza zmienności amplitudy względem offsetu w systemie ProMAX*, Nafta-Gaz, nr 10, 2008.
- [5] Ostrander W.J.: *Plane-wave reflection coefficients for gas sands at non-normal angles of incidence*, Geophysics, Soc. of Expl. Geophys., 49, p. 1637-1649, 1984.
- [6] ProMAX Manual Book.
- [7] Rutherford S.R., Williams R.H.: *Amplitude-versus-offset variations in gas sands*, Geophysics, Soc. of Expl. Geophys., 54, 680-688, 1989.
- [8] Shuey R.T.: *A simplification of the Zoeppritz equations*, Geophysics, vol. 50, 1985.
- [9] Smith G.C., Gidlow P.M.: *Weighted stacking for rock property estimation and detection of gas*, Geophysical Prospecting, 35, p. 993-1014, 1987.
- [10] Smith G.C., Sutherland R.A.: *The fluid factor as an AVO indicator*, Geophysics, vol. 61, no. 5, p. 1425-1428, 1996.
- [11] Wiggins R., et al.: *A method for determining and displaying the shear-velocity reflectivities of a geologic formation*, European Patent Application 0113944, 1983.
- [12] Yilmaz O.: *Seismic Data Analysis*, Society of Exploration Geophysicists, 2001.



Mgr inż. Anna LEGINOWICZ – absolwentka Wydziału Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH w Krakowie. Jest asystentem w Zakładzie Sejsmiki INiG w Krakowie, gdzie zajmuje się interpretacją sejsmiczną przy użyciu oprogramowania Schlumberger’a GeoFrame/Charisma oraz zagadnieniami inwersji sejsmicznej i sejsmiki wielokomponentowej.