

Anna Leginowicz
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

Analiza atrybutów danych sejsmicznych 3D występujących w systemie Petrel

Nowoczesne metody interpretacji bezpośrednich wskaźników węglowodorów wykorzystują zależność trasy sejsmicznej od właściwości ośrodka geologicznego. Charakterystyka atrybutów sejsmicznych pozwala na rozróżnienie pozytywnych anomalii sejsmicznych oraz negatywnych, czyli takich, które są spowodowane zawartością węglowodorów, a nie zmianami litologicznymi.

Atrybuty sejsmiczne, które od lat są integralną częścią projektów sejsmicznych, ewoluowały przez dziesięciolecia, aby obecnie mieć zastosowanie w różnorodnych metodologiach służących rozszerzeniu sposobów poszukiwań węglowodorów – np. w prognozowaniu litologii i petrofizyki zbiorników złożowych [2]. Atrybuty sejsmiczne zdefiniowane zostały jako ogół informacji uzyskanych z danych sejsmicznych, bądź w wyniku bezpośrednich pomiarów lub obliczeń, czy też na podstawie doświadczeń i logicznego rozumowania [11]. Atrybuty można określić jako miarę dynamicznych, kinematycznych i geometrycznych własności ośrodka uzyskanych z danych sejsmicznych, które wykorzystywane są zarówno do poszukiwania, jak i szczegółowego rozpoznawania oraz monitoringu złóż. Mogą one być prezentowane jako

atrybuty objętościowe (wolumetryczne) lub powierzchniowe (mapy atrybutów).

Na przestrzeni lat powstało wiele atrybutów – już w roku 1997 Chen i Sidney zdefiniowali ich więcej niż 300, jednak ich zaleta tkwi w kombinacji multi-atrybutów, czyli umiejętnym połączeniu kilku atrybutów w celu prognozowania litologii i charakterystyki złoża [1].

Celem niniejszej publikacji jest przedstawienie i analiza niektórych dostępnych w systemie Petrel atrybutów, mających znaczenie w poszukiwaniu złóż węglowodorów w rejonie zapadliska przedkarpackiego. Po klasyfikacji oraz ich teoretycznym przedstawieniu, dokonano przeglądu i charakterystyki atrybutów dostępnych w systemie Petrel, a następnie przeanalizowano procedury ich tworzenia na danych rzeczywistych. W pracy wykorzystano dane z rejonu zdjęcia sejsmicznego Ujkowice-Batycze 3D. Po założeniu projektu oraz wprowadzeniu do systemu danych sejsmicznych, przeanalizowano dostępne atrybuty powierzchniowe oraz objętościowe. W systemie Petrel istnieje możliwość generowania własnych atrybutów przy użyciu kombinacji istniejących atrybutów sejsmicznych, po uprzednim skorelowaniu właściwości ośrodka z odpowiednimi atrybutami.

Klasyfikacja oraz teoretyczne podstawy atrybutów sejsmicznych

Liczne atrybuty sejsmiczne można klasyfikować na wiele sposobów. Niektóre z nich oparte są o podstawowe atrybuty, tj.: amplitudę, kształt sygnału, częstotliwość, tłumienie, fazę i korelację. Kolejna klasyfikacja dotyczy zastosowania tych atrybutów w poszukiwaniach węglowodorów. Można w niej wyróżnić następujące 4 grupy: strukturalną, stratygraficzną, litologiczną i wskaźnik nasycenia [10]. Korzystając z licznych aplikacji dostępnych geologom i geofizykom można wygenerować wiele atrybu-

tów z danych sejsmicznych 3D, trzeba jednak nadmienić, że im więcej dostępnych atrybutów, tym więcej problemów z wyborem właściwego. Podczas pracy na danych rzeczywistych z wykorzystaniem atrybutów sejsmicznych konieczna jest gruntowna analiza dostępnej bibliografii, ponieważ mimo wielu typów dostępnych atrybutów nie można jednoznacznie zdefiniować, który atrybut powinien być wykorzystany w danych warunkach geologicznych. Niestety, relacje pomiędzy właściwościami skały a atry-

butami sejsmicznymi często są nieliniowe i mogą się zmieniać w zależności od lokalnych właściwości ośrodka geologicznego.

Klasyfikacja w dostępnej w systemie Petrel bibliotece atrybutów zakłada podział na następujące ich grupy, uporządkowane według potrzeb zastosowania:

- atrybuty związane z przetwarzaniem sygnału (*signal processing*),
- atrybuty trasy zespolonej (*complex attributes*),
- metody strukturalne (*structural methods*),
- metody stratygraficzne (*stratigraphic methods*),
- metody konwersji głębokościowej (*depth conversion methods*).

W pierwszej grupie atrybutów związanych z przetwarzaniem sygnału (*signal processing*) możemy wyróżnić takie atrybuty jak:

- pierwsza pochodna (*First derivative*),
- korektor graficzny (*Graphic equalizer*),
- rotacja fazy (*Phase Shift*),
- intensywność refleksu (*Reflection intensity*),
- amplituda RMS (*RMS Amplitude*),
- druga pochodna (*Second Derivative*),
- bramka czasowa (*Time gain*),
- wyrównanie amplitud AGC (*Trace AGC*),
- gradient trasy (*Trace gradient*).

Atrybuty z pierwszej grupy podlegają operacjom matematycznym wykonywanym na pojedynczej trasie sejsmicznej, co pozwala na uzyskanie przetworzonych danych sejsmicznych, czyli w efekcie końcowym – poprawienie jakości danych.

W skład drugiej grupy atrybutów trasy zespolonej (*complex attributes*) wchodzi:

- polarność pozorna (*Apparent polarity*),
- cosinus fazy (*Cosine of phase*),
- częstotliwość dominująca (*Dominant frequency*),
- obwiednia (*Envelope*),
- chwilowa szerokość pasma (*Instantaneous bandwidth*),
- częstotliwość chwilowa (*Instantaneous frequency*),
- faza chwilowa (*Instantaneous phase*),
- jakość chwilowa (*Instantaneous quality*),
- kwadratura amplitudy (*Quadrature amplitude*).

Atrybuty związane z trasą zespoloną dostarczają korzyści związanych z traktowaniem trasy sejsmicznej jak sygnału analitycznego zawierającego część rzeczywistą i urojona, choć rejestrowana jest tylko część rzeczywista [11]. Atrybuty te często wykorzystywane są do automatycznych interpretacji oraz innych analiz.

Podczas zaawansowanej interpretacji zawsze przydatne pozostają atrybuty związane z transformacją Hilberta [6],

tj.: amplituda chwilowa (*reflection strength, amplitude envelope*), faza chwilowa (*instantaneous phase*), polaryzacja pozorna (*apparent polarity*) oraz częstotliwość chwilowa (*instantaneous frequency*) (rysunek 1).

Amplituda chwilowa to obwiednia sygnału zespolonej trasy sejsmicznej, wykorzystana do śledzenia granic sekwencji – do wychwytywania głównych zmian w litologii. Podwyższone wartości związane są zwykle z dużymi zmianami litologicznymi pomiędzy sąsiednimi warstwami, natomiast stopniowe zmiany amplitudy chwilowej często wiążą się ze zmianami poziomymi ośrodka. Atrybut ten znany jest również jako: *Reflection Strength* – moc refleksu, *Envelope* – obwiednia lub chwilowa energia, czy magnituda. Definiowany jako całościowa energia trasy sejsmicznej (część rzeczywista i część urojona), opisany jest wzorem:

$$Envelope = [f^2(t) + g^2(t)]^{1/2}$$

Część rzeczywista $f(t)$ jest oryginalną trasą sejsmiczną, natomiast $g(t)$ – częścią urojoną trasy sejsmicznej; jest ona niezależna od fazy i zawsze ma wartość dodatnią.

Atrybut ten pokazuje anomalie typu *bright spot* – związane z akumulacjami gazu, wykrywa zmiany litologiczne spowodowane silną energią refleksu oraz granice stratygraficzne. Pokazuje bardzo wyraźnie nawet subtelne zmiany litologiczne, które mogą być zupełnie niewidoczne na wejściowych danych sejsmicznych.

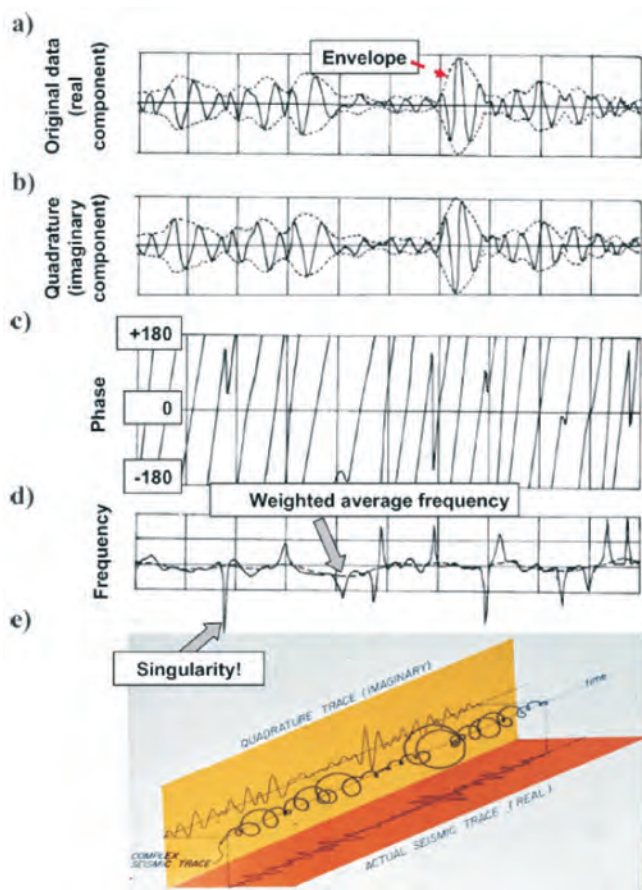
Cosinus fazy chwilowej pozwala na interpretację uskoków, wyklinowań i wszelkich nieciągłości sygnału, a także na korelację słabych refleksów.

Częstotliwość chwilowa także może być wskaźnikiem obecności węglowodorów, jeśli występujące poniżej złoża obniżenie wartości tego atrybutu nie jest spowodowane obecnością skał nieskonsolidowanych.

W grupie metod strukturalnych znalazły się następujące atrybuty:

- automatyczne śledzenie uskoków (*Ant tracking*),
- odchylenie upadu (*Dip Deviation*),
- gradient magnitudy (*Gradient magnitude*),
- lokalny azymut strukturalny (*Local structural azimuth*),
- lokalny upad strukturalny (*Local structural Dip*),
- wygładzenie strukturalne (*Structural Smoothing*),
- wariancja (metoda krawędzi) (*Variance, Edge method*).

Nowoczesne możliwości systemu pozwalają na generowanie atrybutów strukturalnych, takich jak: automatyczne śledzenie uskoków (*Ant tracking*) czy wariancja (*Variance*), które są nieocenione szczególnie w interpretacji danych sejsmicznych 3D, bowiem świetnie wychwytyują wszelkie nieciągłości oraz uskoki. Kolejne atrybuty, takie jak: odchylenie upadu (*Dip Deviation*), lokalny azymut strukturalny



Rys. 1. a) trasa sejsmiczna (część rzeczywista), b) kwadratura (część urojona), c) faza chwilowa, d) częstotliwość chwilowa [9]

(*Local structural azimuth*), czy lokalny upad strukturalny (*Local structural Dip*) – pozwalają na przybliżenie budowy strukturalnej ośrodka geologicznego.

W grupie metod stratygraficznych możemy wyróżnić następujące atrybuty:

- chaos (*Chaos*),
- inwersję genetyczną (*Genetic inversion*),
- wydzielenie jednakowych częstotliwości (*Iso-frequency component*),
- lokalne wypłaszczenie (*Local flatness*),

Przegląd i charakterystyka wybranych atrybutów sejsmicznych w systemie Petrel

Generowanie atrybutów w systemie Petrel może się odbywać na dwa sposoby: można wygenerować atrybuty powierzchniowe lub objętościowe (wolumetryczne). Procesy te bazują na różnych właściwościach trasy sejsmicznej: fizycznych i geometrycznych. W wyniku generacji atrybutów objętościowych powstaje wirtualny lub fizyczny wolumen danych sejsmicznych, natomiast w procesie tworzenia atrybutów powierzchniowych ekstrahowane są sejsmiczne właściwości związane z jakimś

- sieci neuronowe (*Neural net, Estimation model*),
- względną impedancję akustyczną (*Relative acoustic impedance*),
- tłumienie ($t \cdot \text{Attenuation}$).

Atrybuty stratygraficzne próbują wydzielić różny skład ośrodka geologicznego, zmiany litologiczne i stratygraficzne. Atrybuty takie jak chaos świetnie identyfikują nieciągłości czy uskoki oraz obiekty geologiczne (rafy, wysady solne, kanały rzeczne, ścieżki migracji gazu). Względna impedancja akustyczna (*Relative acoustic impedance*) przedstawia chwilowy kontrast impedancji akustycznej, wyznacza granice sekwencji oraz płaszczyzny niezgodności i nieciągłości; może także wskazywać porowatość i zawartość płynów złożowych.

Szczegółową interpretację i analizę można również przeprowadzać na atrybutach powierzchniowych w określonym przedziale danych, związanym z danym horyzontem. Podwyższone wartości na mapach atrybutów powierzchniowych – takich jak amplituda RMS, czy obniżone wartości na mapach średnich, ujemnych amplitud – są bezpośrednimi wskaźnikami węglowodorów (potwierdzają istniejące złoża gazu i informują o złożach jeszcze nieudokumentowanych).

Atrybuty sejsmiczne są podstawą w nowoczesnej interpretacji; można je łączyć i tworzyć nowe atrybuty charakteryzujące geologię danego rejonu, jednak dopiero interdyscyplinarne podejście i połączenie takich dziedzin jak: geologia, geofizyka i geostatystyka daje szansę na stworzenie poprawnej charakterystyki rejonu złożowego. Na bazie podstawowych atrybutów tworzone są atrybuty zaawansowane. Zostały one nazwane atrybutami hybrydowymi [10], a powstają w wyniku połączenia procedur matematycznych, statystycznych i logicznych. W systemie Petrel jest również możliwe wykorzystanie sieci neuronowych w celu połączenia multi-atrybutów sejsmicznych z danymi geofizyki wiertniczej, a finalny wynik tej operacji prowadzi do prognozowania litologii i charakterystyki złoża [2].

poziomem, horyzontem lub warstwą z wolumenu danych sejsmicznych.

Atrybuty sejsmiczne mogą być generowane z zerooffsetowych danych sejsmicznych po migracji lub zaimportowane do systemu w formacie SEG-Y.

W celu wygenerowania atrybutów powierzchniowych należy skorzystać z procesu *Surface attributes*, znajdującego się w module *Geophysics*.

System dysponuje dużą ilością (52) atrybutów po-

wierzchniowych, których dokładne przedstawienie mogłoby zająć pokaźną część niniejszej pracy – dokonano zatem wyboru oraz prezentacji najważniejszych z nich [7].

Średnia energia (Average energy)

$$\left(\sum_i^n amp^2\right)/k$$

k – ilość próbek.

Jest to amplituda RMS, podniesiona do kwadratu. Atrybut ten mierzy współczynniki odbicia w oknie czasowym lub głębokościowym i jest używany jako bezpośredni wskaźnik węglowodorów w określonym obszarze.

Średnia magnituda (Average magnitude)

$$\left(\sum_i^n |amp|\right)/k$$

k – ilość próbek.

Ten atrybut mierzy współczynniki odbicia w oknie czasowym lub głębokościowym, ale jest mniej wrażliwy na duże wartości niż atrybut „Amplituda RMS” i może być używany jako wskaźnik węglowodorów. Dobrze obrazuje także pewne geologiczne szczegóły, które wyrażają się anomalnymi amplitudami w stosunku do otaczającego ośrodka geologicznego.

Średnie negatywne/pozytywne amplitudy (Average negative amplitude/Average positive amplitude)

Atrybut ten określa średnią wszystkich negatywnych/pozytywnych amplitud w analizowanym oknie. Zakres amplitud, które mają być brane pod uwagę może być określony przez parametr wyboru.

Średnia wartość szczytowa (piku dodatniego) (Average peak value)

Jest to średnia wszystkich szczytowych wartości w oknie; mogą to być lokalne maksima i w takim przypadku negatywne wartości szczytowe także mogą zostać uśrednione. Atrybut ten może być miarą pozytywnego współczynnika odbicia w oknie czasu lub głębokości. Wielkie albo małe wartości mogą być używane jak bezpośredni wskaźnik węglowodorów.

Średnia wartość piku ujemnego (Average trough value)

Ten atrybut mierzy średnią wartość ujemnych współczynników odbicia w oknie czasu albo głębokości. Jego użycie jest podobne jak w przypadku atrybutu średniej wartości szczytowej (piku dodatniego).

Amplituda maksymalna (maksymalne wartości amplitud) (Maximum amplitude)

Amplituda maksymalna mierzy współczynniki odbicia w zadanym oknie czasowym lub głębokościowym i dostarcza wartości maksymalnych, dodatnich amplitud w zdefiniowanym oknie. Atrybut ten jest używany jako wskaźnik takich węglowodorów jak anomalie typu *bright spot*.

Amplituda minimalna (minimalne wartości amplitud) (Minimum amplitude)

Amplituda minimalna mierzy współczynniki odbicia i dostarcza wartości minimalnych, ujemnych amplitud w zdefiniowanym oknie czasowym lub głębokościowym. Jest wskaźnikiem takich węglowodorów jak anomalie typu *bright spot*.

Magnituda maksymalna (Maximum magnitude)

Jest bardzo podobnym atrybutem do amplitudy maksymalnej.

Średnia amplituda (Mean amplitude)

$$\left(\sum_i^n amp\right)/k$$

k – ilość próbek.

Jest to średnia arytmetyczna amplitud, mierzona jako odchylenie trasy. Pozytywne lub negatywne odchylenie może wskazywać na obecność anomalii typu *bright spot*.

Średnia kwadratowa amplituda (RMS Amplitude (root-mean square))

Atrybut ten obliczany jest jako pierwiastek kwadratowy sumy amplitud, podzielonej przez ilość próbek:

$$\sqrt{\left(\sum_i^n amp\right)/k}$$

k – ilość próbek.

Jest to najbardziej rozpowszechniony atrybut powierzchniowy – zaliczany do bezpośrednich wskaźników węglowodorów, dzięki któremu można łatwo zlokalizować anomalie oraz różne szczegóły geologiczne, wyróżniające się wzmocnioną amplitudą na tle otaczającego tła ośrodka geologicznego.

Kolejną opcją w systemie Petrel są atrybuty wolumetryczne [7]. Jest ich 36, jednak szczegółowo omówione zostały tylko najważniejsze, najczęściej używane z nich. W celu wygenerowania atrybutów objętościowych wykorzystywany jest proces *Volume attributes*, znajdujący się w module *Geophysics*.

Automatyczne śledzenie uskoków (*Ant tracking*)

Atrybut ten używany jest do śledzenia i wizualizowania uskoków oraz do wydobywania ich z wolumenu danych sejsmicznych.

Polarność pozorna (*Apparent polarity*)

Polarność fazy chwilowej obliczana jest w lokalnym ekstremum amplitudy. Atrybut ten ujawnia znak współczynnika odbicia i w ten sposób dostarcza wskazówki na temat zmian w ośrodku geologicznym (np. występujących niezgodności). Jest on wykorzystywany do sprawdzania lateralnej zmienności polaryzacji wzdłuż wybranego horyzontu.

Czasami kontynuacja horyzontu na sekcji atrybutu polarności pozornej może być dużo lepsza niż na zaszuflonowanej sekcji sejsmicznej, a w przypadku lepszej jakości danych pozwala na wychwycenie cienkich wkładek warstw.

Chaos (*Chaos*)

Chaotyczny wzór sygnału zawarty w sygnale sejsmicznym jest miarą „braku organizacji” w metodach estymacji upadu i azymutu. Chaos zawarty w obrazie sejsmicznym może być spowodowany przez ścieżki migracji gazu, intruzje wysadów solnych, rafy i kanały rzeczne. Ponadto atrybut ten jest świetnym narzędziem służącym do detekcji wszelkich nieciągłości oraz uskoków.

Cosinus fazy (*Cosine of phase*)

Atrybut ten przedstawia zmiany fazy sygnału sejsmicznego; jest on niezależny od zmian amplitudy, dzięki czemu jest bardzo przydatny w procesie korelacji – zarówno w przypadku wysokich, jak i niskich amplitud.

Cosinus fazy chwilowej pozwala na interpretację uskoków, wyklinowań i wszelkich nieciągłości sygnału, a także na korelację słabych refleksów.

Razem z atrybutem fazy chwilowej, używany jako funkcja przewodnika podczas interpretacji trudnych obszarów o słabych amplitudach, pozwala również na bardziej wyraźne wyodrębnienie detali strukturalnych.

Częstotliwość dominująca (*Dominant frequency*)

Atrybut częstotliwości dominującej definiowany jest jako pierwiastek kwadratowy z sumy częstotliwości chwilowej do kwadratu i chwilowej szerokości pasma do kwadratu:

$$\omega_{RMS} = [\omega_B^2 + \omega_C^2]^{1/2}$$

Atrybut ten pomaga odnaleźć strefy o niskich częstotliwościach – strefy cienia.

Obwiednia (*Envelope*)

Atrybut ten znany jest również jako moc refleksu (*Reflection Strength*) lub chwilowa energia, czy też magnituda. Definiowany jako całościowa energia trasy sejsmicznej (część rzeczywista i część urojona), opisany jest wzorem:

$$Envelope = [f^2(t) + g^2(t)]^{1/2}$$

Atrybut ten pokazuje anomalie typu *bright spot* związane z akumulacjami gazu, wykrywa zmiany litologiczne spowodowane silną energią refleksu oraz granice stratygraficzne. Pokazuje bardzo wyraźnie nawet subtelne zmiany litologiczne, które mogą być zupełnie niewidoczne na wejściowych danych sejsmicznych.

Pierwsza pochodna (*First derivative*)

Jest to pierwsza pochodna trasy sejsmicznej po czasie, obliczana według wzoru:

$$FirstDerivative = \partial[f(t)]/\partial t$$

Atrybut pierwszej pochodnej jest użyteczny w analizach stratygraficznych – takich jak estymacje facji.

Chwilowa szerokość pasma (*Instantaneous bandwidth*)

Atrybut ten jest miarą względnej zmiany amplitudy i wskazuje pośrednio na zmiany w energii odbicia (związany jest z absorpcją przy odbiciu). Szybki wzrost, a więc duża wartość tego atrybutu świadczy o szerokim paśmie przenoszenia, czyli o słabej absorpcji przy odbiciu. W przypadku sekwencji piaskowce/lupki występuje wąskie pasmo przenoszenia, natomiast wyraźne warstwy o dużej miąższości przenoszą sygnał w szerokim zakresie częstotliwościowym.

Częstotliwość chwilowa (*Instantaneous frequency*)

Atrybut ten mierzy zmiany częstotliwości chwilowej i jest niezależny od amplitudy oraz od fazy. Bardzo dobrze ukazuje wszelkie zmiany właściwości złożowych skały – takie jak zawartość węglowodorów, strefy spekań, zmiany miąższości oraz lateralne zmiany litologiczne. Czasami strefy niskich częstotliwości mogą być związane z wyżej leżącą akumulacją węglowodorów (tzw. „cień niskoczęstotliwościowy”).

Faza chwilowa (*Instantaneous phase*)

Atrybut ten podkreśla ciągłość refleksów – jest niezależny od amplitudy sygnału, dzięki czemu ma dużą przydatność w procesie korelacji; zarówno w przypadku wysokich, jak i niskich amplitud [5]. Jest często wykorzystywany w czasie korelacji – jako atrybut podstawowy oraz podczas analizy innych atrybutów sejsmicznych. Wykorzystuje się go podczas identyfikacji uskoków, wyklinowań, niezgodności

kątowych, stref interferencji oraz wszelkich nieciągłości sygnału. Razem z atrybutem „cosinus fazy chwilowej” używany jest jako funkcja przewodnika podczas interpretacji trudnych obszarów o słabych amplitudach, pozwalając na bardziej wyraźne wyodrębnienie detali strukturalnych.

Lokalny azymut strukturalny (*Local structural azimuth*),
lokalny upad strukturalny (*Local Structural Dip*)

Obydwa te parametry opisują położenie płaszczyzny w przestrzeni i służą do wychwytywania potencjalnych uskoków, przez śledzenie nieciągłości w nachyleniu horyzontów.

Sieci neuronowe (*Neural net (Estimation model)*)

Wykorzystanie sieci neuronowych pozwala na stworzenie klasyfikacji atrybutów, a następnie estymację na uprzednio stworzonym modelu. Jest to narzędzie dające wielkie możliwości, pozwalające na estymację parametrów fizycznych ośrodka na całym wolumenie danych.

Rotacja fazy (*Phase Shift*)

Zwykle rotacja fazy stosowana jest w celu lepszego dopasowania różnych wersji danych sejsmicznych. Rotacja fazy o 180° powoduje odwróconą polarność, natomiast rotacja fazy +90° lub -90° powoduje zamianę pików (dodatnich bądź ujemnych) na wartość zero (tzw. *zero-crossing*).

Rotacja fazy może być używana do połączenia polarności z litologią oraz w celu polepszenia korelacji pomiędzy porowatością, a amplitudami trasy sejsmicznej.

Względna impedancja akustyczna (*Relative acoustic impedance*)

Całkowanie tras sejsmicznych dostarcza estymacji logarytmu naturalnego impedancji akustycznej. Całkowanie

następuje po filtracji Butterworth'a. Wartość impedancji nie jest absolutna, lecz względna. RAI to ograniczony częstotliwościowo estymator impedancji akustycznej, obliczany (przy założeniu, że trasa sejsmiczna nie zawiera szumu, odbić wielokrotnych, jest zerofazowa i szerokopasmowa częstotliwościowo) za pomocą wzoru:

$$\ln(\rho v) = 2 \int_{t=0}^{t=T} f(t) dt$$

Atrybut sejsmiczny RAI (*Relative acoustic impedance*) można łatwiej skorelować z danymi geofizyki wiertniczej. Atrybut ten przedstawia chwilowy kontrast impedancji akustycznej, wyznacza granice sekwencji oraz płaszczyzny niezgodności i nieciągłości; może także wskazywać porowatość i zawartość płynów złożowych.

Druga pochodna (*Second Derivative*)

Jest to druga pochodna trasy sejsmicznej po czasie – oblicza się ją według wzoru:

$$\text{SecondDerivative} = \partial^2[f(t)]/\partial t^2$$

Atrybut drugiej pochodnej pomaga w odnalezieniu ciągłości szczególnie trudnych horyzontów, w obszarach o słabej jakości danych.

Automatyczne wzmocnienie (*Trace AGC*)

Atrybut ten dostarcza wyrównanych przez funkcję RMS amplitud w zmiennym oknie.

Wariancja (*Variance (Edge method)*)

Wariancja służy do wyodrębnienia nieciągłości sygnału, pozwalając wychwycić drobne uskoki – niewidoczne na danych sejsmicznych.

Analiza atrybutów powierzchniowych na przykładzie danych sejsmicznych obszaru Ujkowice-Batycze 3D

Do wygenerowania atrybutów powierzchniowych wykorzystano interpretacje horyzontów wykonane na danych sejsmicznych 3D z rejonu Ujkowice-Batycze, opracowanych przez Geofizykę Kraków (rysunek 2).

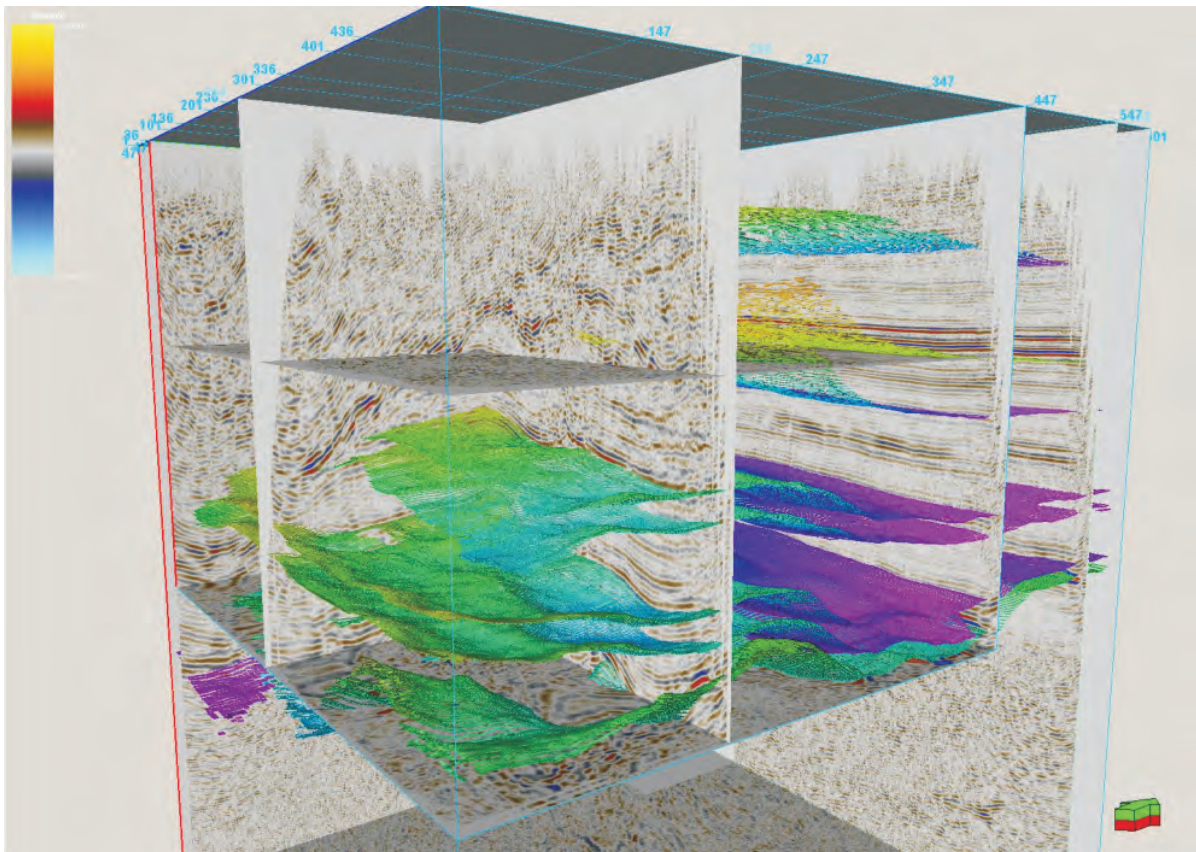
Po założeniu projektu Ujkowice-Batycze w systemie Petrel oraz wprowadzeniu dostępnych danych, w pierwszej kolejności należy stworzyć powierzchnię – najlepiej o takiej samej rozdzielczości (gridzie) i rotacji (orientacji w przestrzeni X-Y) jak wejściowe dane sejsmiczne.

Konstruowanie powierzchni rozpoczyna się od wyznaczenia granic zasięgu. Przy użyciu procesu *Make/Edit Polygons* należy wykreślić poligon bazując na interpretacji danego horyzontu.

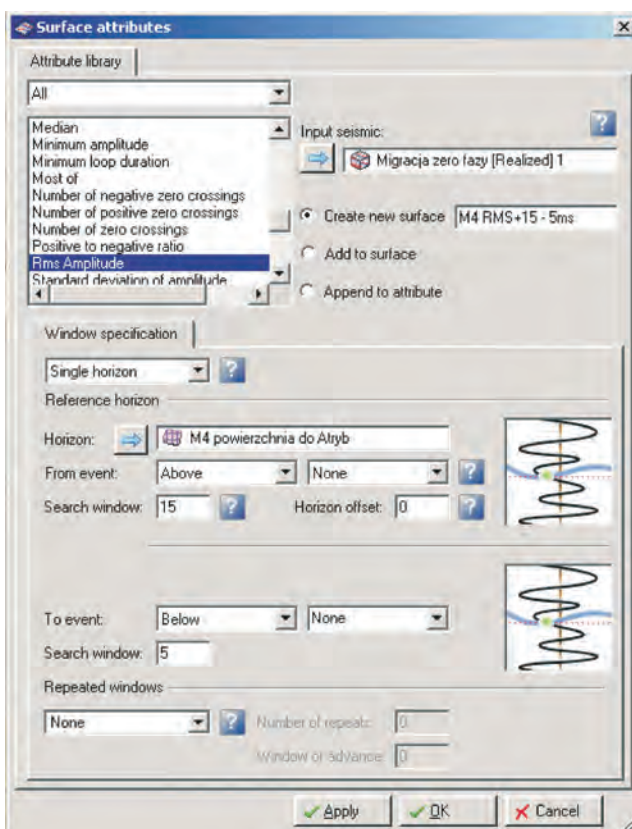
Mapy powierzchniowe w systemie Petrel tworzone są przy użyciu procesu *Make/Edit Surface*. W procesie tym można skonstruować grid z następujących danych wejściowych: markery otworowe – dane o stratygrafii, inne dane punktowe, dane liniowe, lub można wykonać powtórny grid powierzchni. System dysponuje różnymi typami algorytmów służącymi do interpolacji danych – np.: *Kriging*, *Convergent*, *Minimum Krzywizny*, sieci neuronowe i in.

Aby wygenerować atrybuty powierzchniowe należy skorzystać z procesu *Surface attributes*, dającego szerokie możliwości wyboru parametrów.

Sprecyzowanie zakresu obliczania atrybutów odbywa się w zakładce *Window specification* (rysunek 3), która



Rys. 2. Projekt Ujkowice-Batycze 3D z interpretacją horyzontów mioceńskich: Msp, M7, M6, M5, M4, M3, M2, M1



Rys. 3. Okno procesu *Surface attributes*, z przykładowym wyborem parametrów

umożliwia obliczanie atrybutów powierzchniowych w różnych kombinacjach przedziałów:

- horyzont-horyzont – obliczenia atrybutu wykonywane są pomiędzy dwoma wybranymi horyzontami,
- pojedynczy horyzont – obliczenia wykonywane są w pobliżu wybranego horyzontu w zadanym oknie,
- Z-Z – obliczenia atrybutu wykonywane są pomiędzy zadanymi wartościami (Z).

Jeśli chcemy wygenerować atrybuty związane w pojedynczym horyzontem, wówczas w oknie należy wybrać odpowiednie parametry – np. dotyczące okna przeszukiwania lub odsunięcia od horyzontu.

Jednymi z najbardziej powszechnych i zarazem najcenniejszych atrybutów powierzchniowych są atrybuty związane z amplitudą – takie jak: amplituda RMS, amplitudy minimalne oraz maksymalne. Ekstremalne wartości tych atrybutów potwierdzają udokumentowane złoża węglowodorów oraz pozwalają na znalezienie analogicznych zapisów analizowanych atrybutów w nowych rejonach poszukiwawczych. W przypadku korzystnej budowy strukturalnej i potwierdzenia anomalii – na mapach atrybutów najczęściej mamy do czynienia z rejonem występowania węglowodorów.

Podczas tworzenia mapy powierzchniowej atrybutu RMS dla horyzontu M4 w przedziale +15 ms, –5 ms wykorzy-

stano okno przeszukiwania (*Search window*) (rysunek 3). Po wybraniu odpowiedniego horyzontu odniesienia – w tym przypadku: „M4 powierzchnia do Atryb.” – należy ustalić okno przeszukiwań (*Search window*). Ponieważ system nie dopuszcza możliwości przyjęcia wartości ujemnych, zakres -5 ms określa kombinacja parametrów *Below* (poniżej horyzontu) oraz 5 , w okienku *Search window*. Podobnie zakres $+15$ ms określa się poprzez parametr *From event: Above*, czyli okno równe 15 ms powyżej wybranego horyzontu. W rezultacie powstała mapa powierzchniowa atrybutu RMS dla horyzontu M4 w przedziale: $+15$ ms, -5 ms, przedstawiona w oknach 2D (rysunek 4) oraz 3D (rysunek 5).

Przedstawione na rys. 4 i 5 mapy pozwalają na weryfikację anomalii związanych z akumulacją węglowodorów w rejonie horyzontu M4. Podwyższone wartości atrybutu amplitudy RMS (zaznaczone kolorem zielono-żółtym) obserwowane są w rejonach podniesień strukturalnych oraz otworów: Tuligłowy-37, Jaksmanice oraz Przemysł-280K.

Ponieważ celem tej pracy nie była interpretacja danych sejsmicznych, a jedynie przedstawienie atrybutów sejsmicznych dostępnych w systemie Petrel – zostały one w niej pominięte.

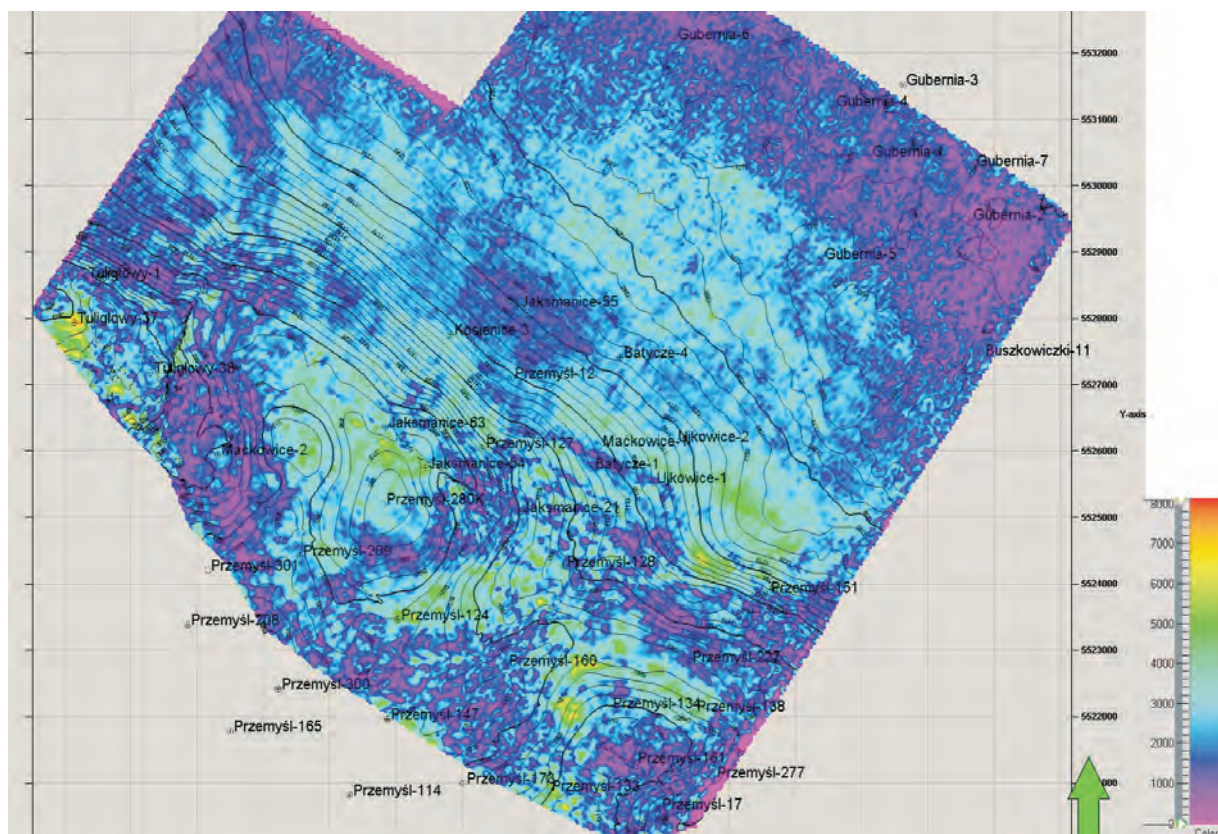
Kolejnym atrybutem powierzchniowym jest atrybut minimalnych wartości amplitud, który zostanie przedstawiony na mapie powierzchniowej horyzontu M6 w oknie:

$+15$ ms, -5 ms. Na podstawie tego atrybutu zaprezentowano schemat postępowania w przypadku tworzenia atrybutów powierzchniowych.

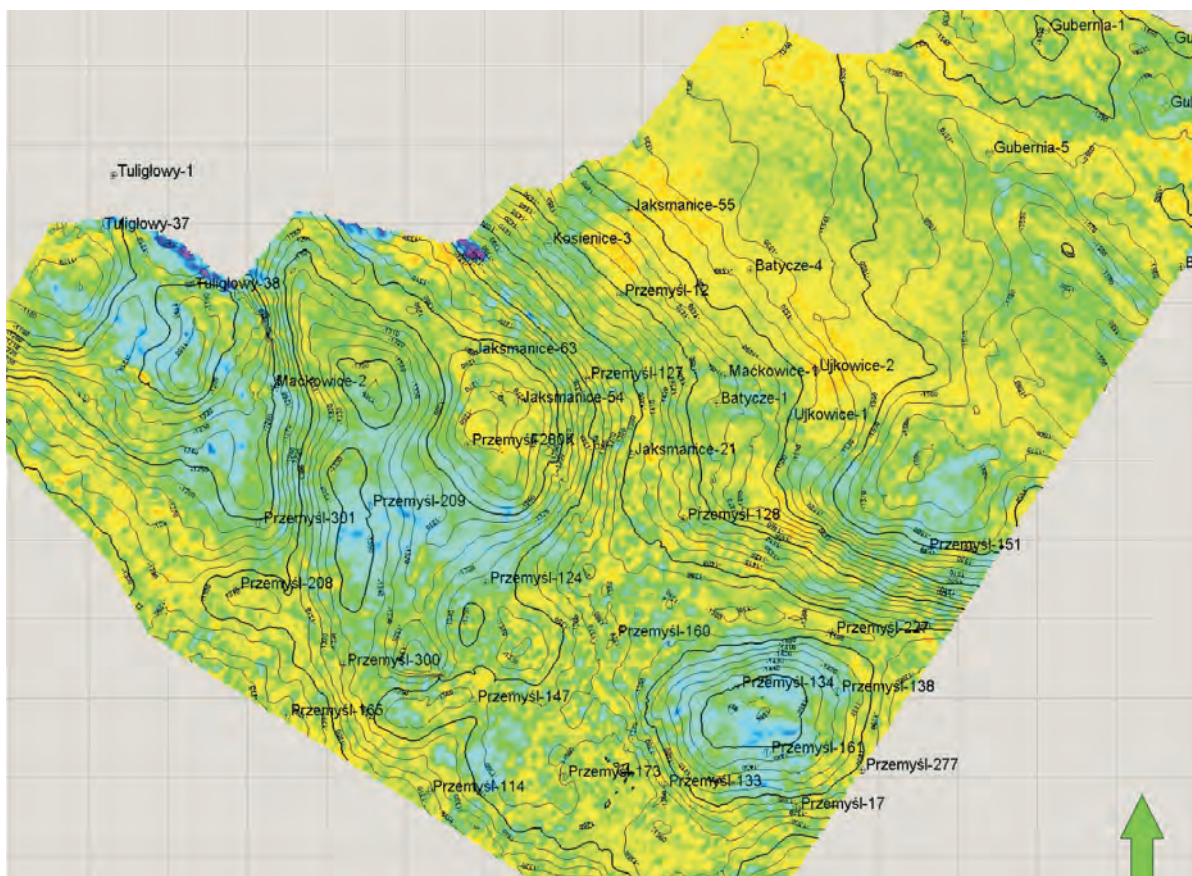
W pierwszej kolejności przy użyciu procesów *Make/Edit polygon* oraz *Make/Edit Surface* zostaje stworzona (w oparciu o wykonaną interpretację horyzontu M6) mapa strukturalna wybranej powierzchni M6 (rysunek 6); już obserwowane na mapie struktury dają pierwszą sugestię o potencjalnych możliwościach ośrodka geologicznego do akumulacji węglowodorów.

Następnie na mapie powierzchniowej przy pomocy procesu *Surface attributes* stworzony zostaje wybrany atrybut powierzchniowy – w tym przypadku atrybut minimalnych wartości amplitud (rysunki 7 i 8).

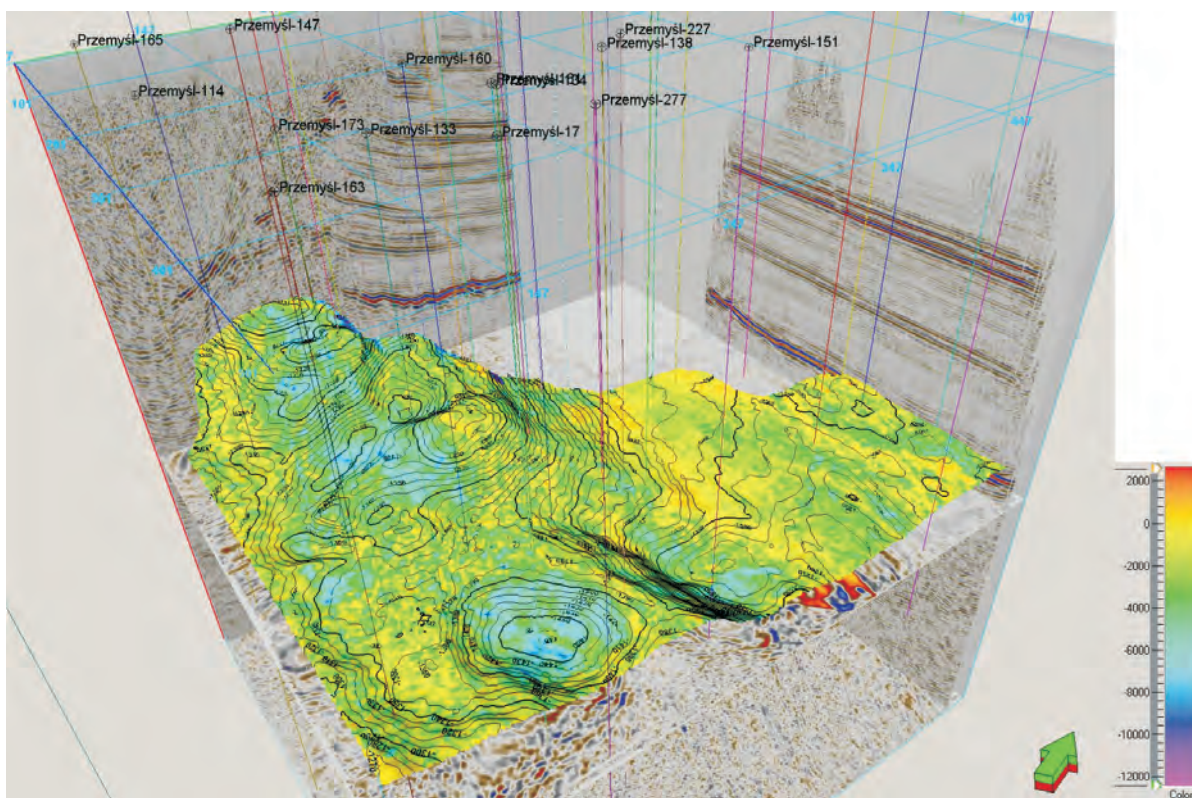
Obniżenie wartości amplitud (kolor niebieski) – wraz z korzystną budową geologiczną (czyli podniesieniami strukturalnymi obserwowanymi na konturach mapy strukturalnej M6) – dają dużą szansę na poprawne wyznaczenie stref anomalnych związanych z akumulacją węglowodorów (rysunek 7). Przedstawiona w oknie 3D wersja przestrzennej mapy powierzchniowej atrybutu minimalnych wartości amplitud dla horyzontu M6 (rysunek 8) umożliwiła sprawdzenie, czy w tym przypadku wytypowane pułapki strukturalne pokrywają się z miejscami o obniżonych wartości amplitud.



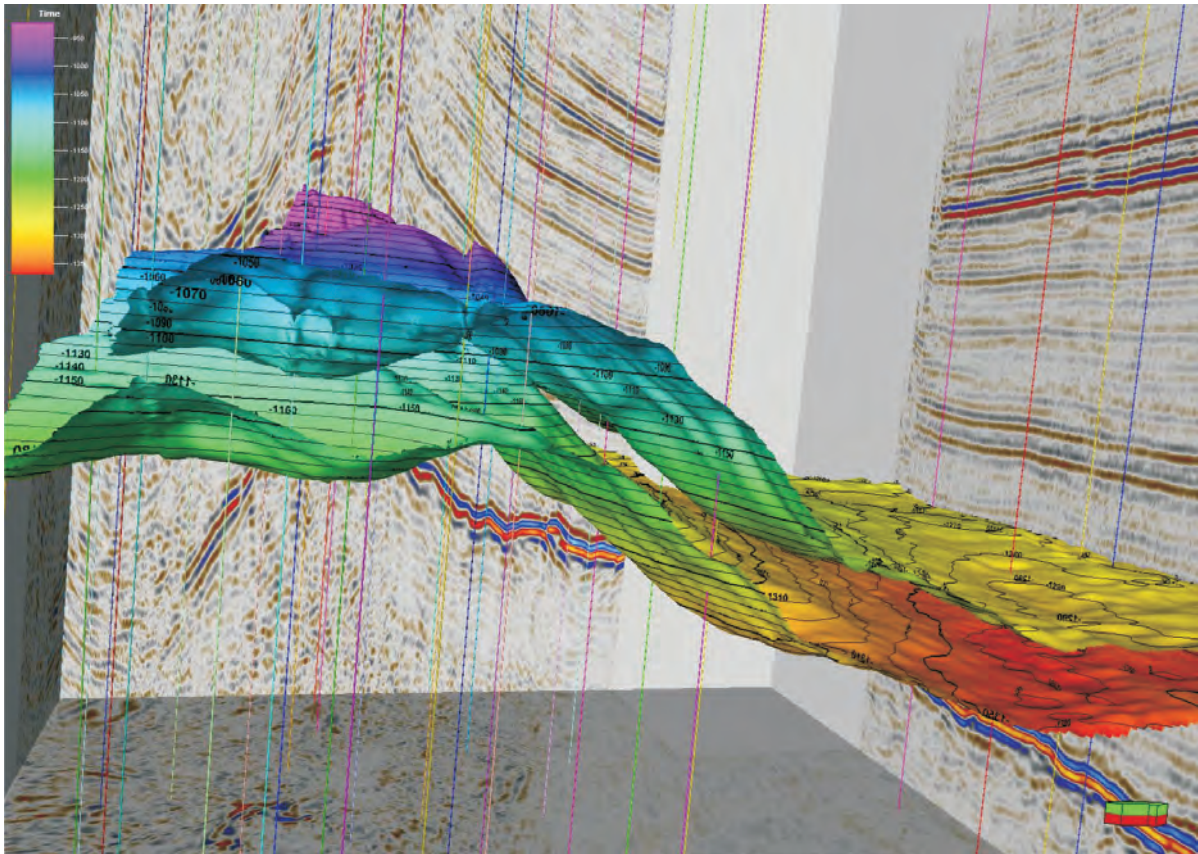
Rys. 4. Mapa powierzchniowa atrybutu RMS dla horyzontu M4 w przedziale: $+15$ ms, -5 ms, przedstawiona w oknie 2D



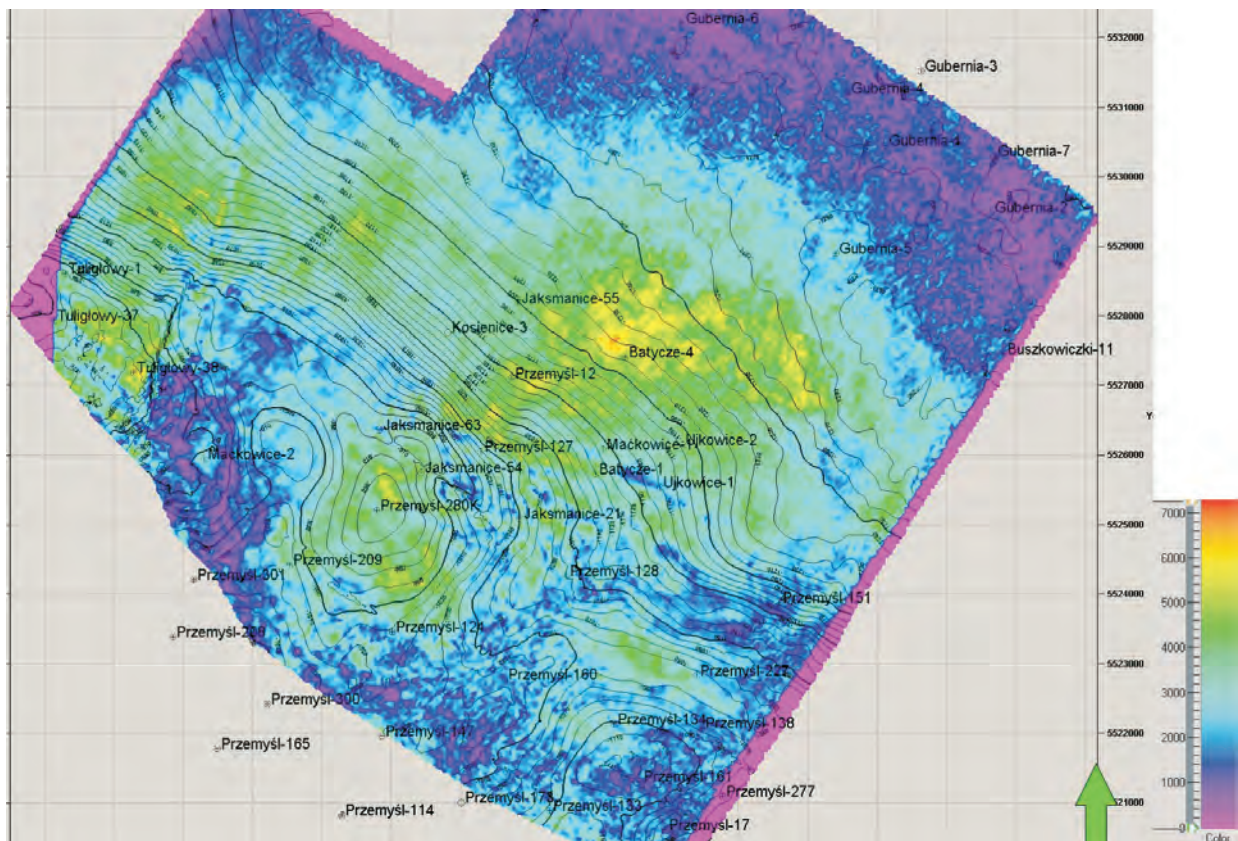
Rys. 7. Mapa powierzchniowa minimalnych wartości amplitud dla horyzontu M6 w przedziale: +15 ms, -5 ms, przedstawiona w oknie 2D



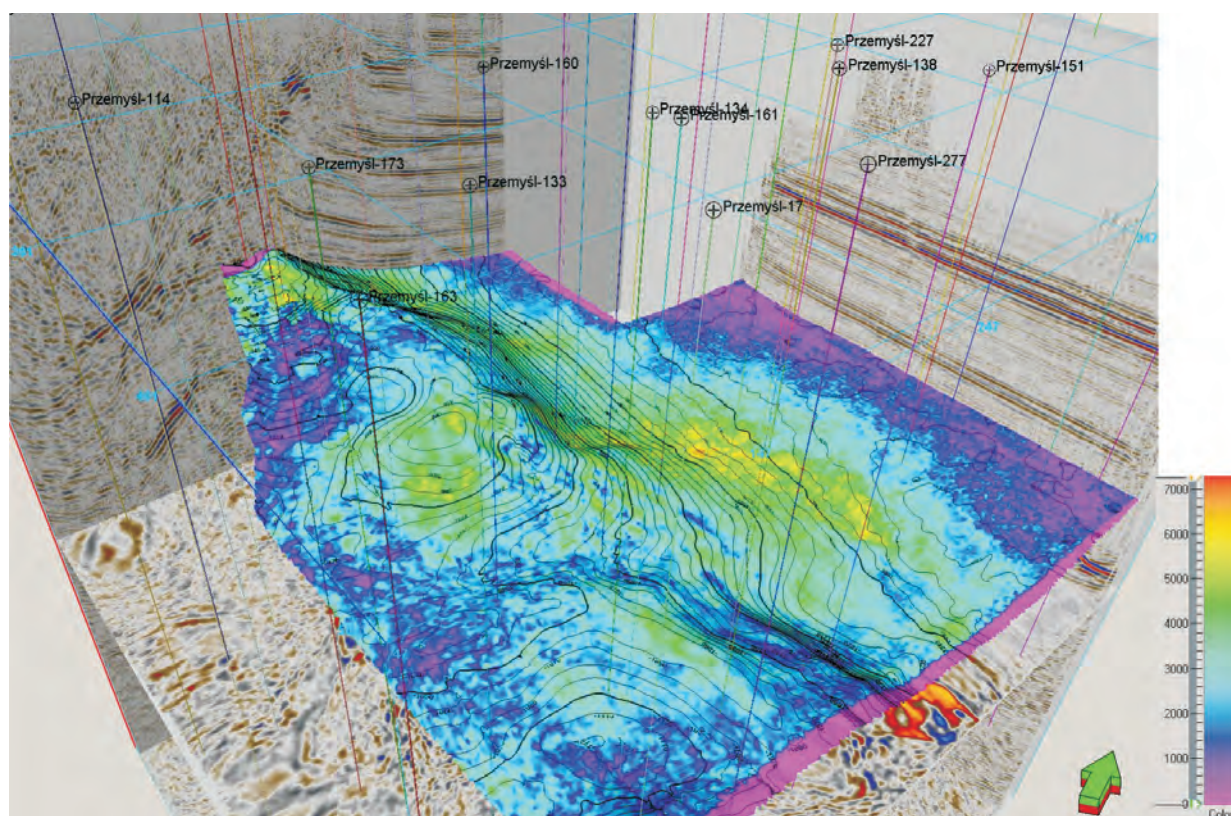
Rys. 8. Mapa powierzchniowa minimalnych wartości amplitud dla horyzontu M6 w przedziale: +15 ms, -5 ms, przedstawiona w oknie 3D



Rys. 9. Mapy strukturalne horyzontów M4 i M5, zaprezentowane w oknie 3D



Rys. 10. Mapa atrybutu amplitudy RMS pomiędzy horyzontami M4 i M5, przedstawiona w oknie 2D



Rys. 11. Mapa atrybutu amplitudy RMS pomiędzy horyzontami M4 i M5, przedstawiona w oknie 3D

Atrybuty powierzchniowe, oprócz omówionych wcześniej opcji związanych z jednym z horyzontów, mogą również być tworzone pomiędzy dwoma wybranymi powierzchniami; w tym przypadku zostanie zaprezentowany schemat postępowania mający na celu stworzenie atrybutów amplitudy RMS pomiędzy powierzchniami M4 i M5 (rysunek 9).

W pierwszej kolejności należy stworzyć mapy strukturalne obu tych powierzchni, a następnie przy pomocy procesu

Surface attributes i wybraniu opcji „horyzont-horyzont”, w której obliczenia atrybutu wykonywane są pomiędzy dwoma wybranymi horyzontami, stworzony zostaje wybrany atrybut powierzchniowy – amplituda RMS (rysunki 10 i 11). W oknie 3D łatwiej dostrzec korelację pomiędzy wysokimi wartościami amplitudy RMS (kolor żółto-zielony), a korzystną budową strukturalną ośrodka geologicznego w rejonach Tuligłowy i Przemysł-280K (rysunek 11).

Analiza atrybutów wolumetrycznych na przykładzie danych sejsmicznych z rejonu Ujkowice-Batycze 3D

Do wygenerowania atrybutów wolumetrycznych wykorzystano dane sejsmiczne 3D z rejonu Ujkowice-Batycze, opracowane przez Geofizykę Kraków.

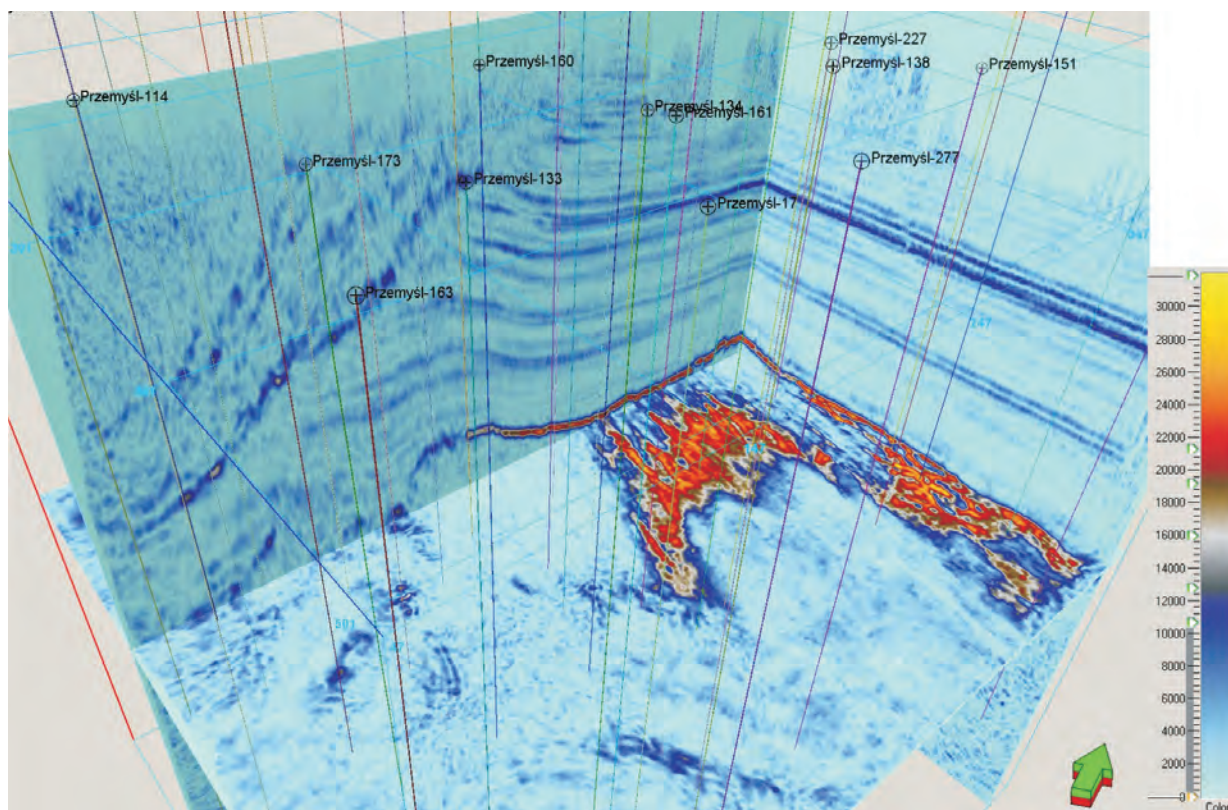
W celu uzyskania atrybutów objętościowych posłużono się procesem *Volume Attributes* z modułu *Geophysics*, w którym można wygenerować atrybuty w wersji wirtualnej (*Virtual*) – np. w celu szybkiego przetestowania, bądź w wersji urzeczywistnionej (*Realized*); wówczas dane zostają fizycznie zapisane na dysku. Warto zauważyć, że wygenerowanie wersji urzeczywistnionej pochłania dużo czasu, zatem zazwyczaj w celu sprawdzenia i jedynie wyświetlenia danego atrybutu wystarczy wersja wirtualna.

W dalszej części artykułu zaprezentowano przykłady najczęściej używanych atrybutów objętościowych.

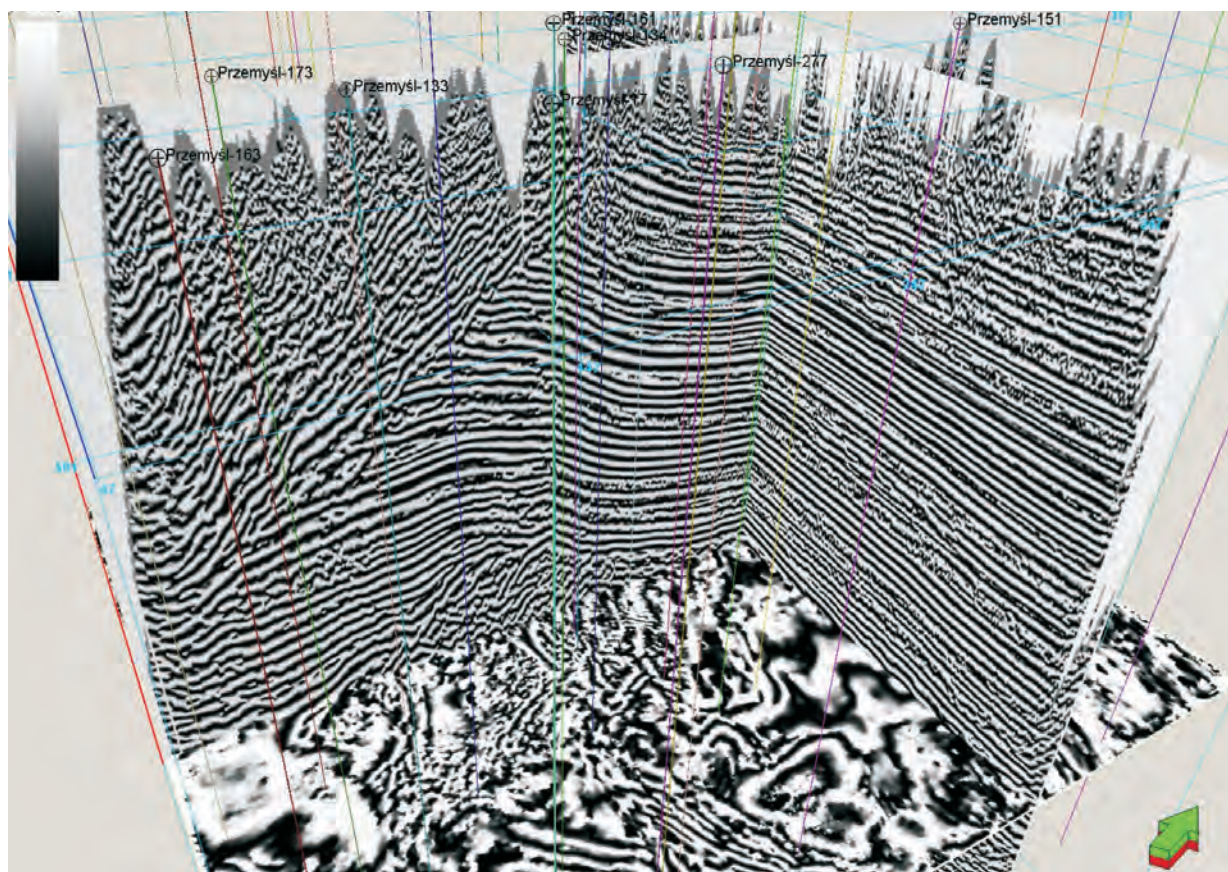
W pierwszej kolejności zostały wygenerowane atrybuty podstawowe, zaliczane do grupy atrybutów trasy zespolonej (*complex trace*):

Obwiednia (*Envelope*) (rysunek 12) – atrybut, który pokazuje anomalie typu *bright spot*, dobrze wyznacza granice stratygraficzne oraz uwidacznia zmiany litologiczne spowodowane silną energią refleksu. Wysokie wartości amplitudy wskazują na miejsca o dużym kontraście impedancji.

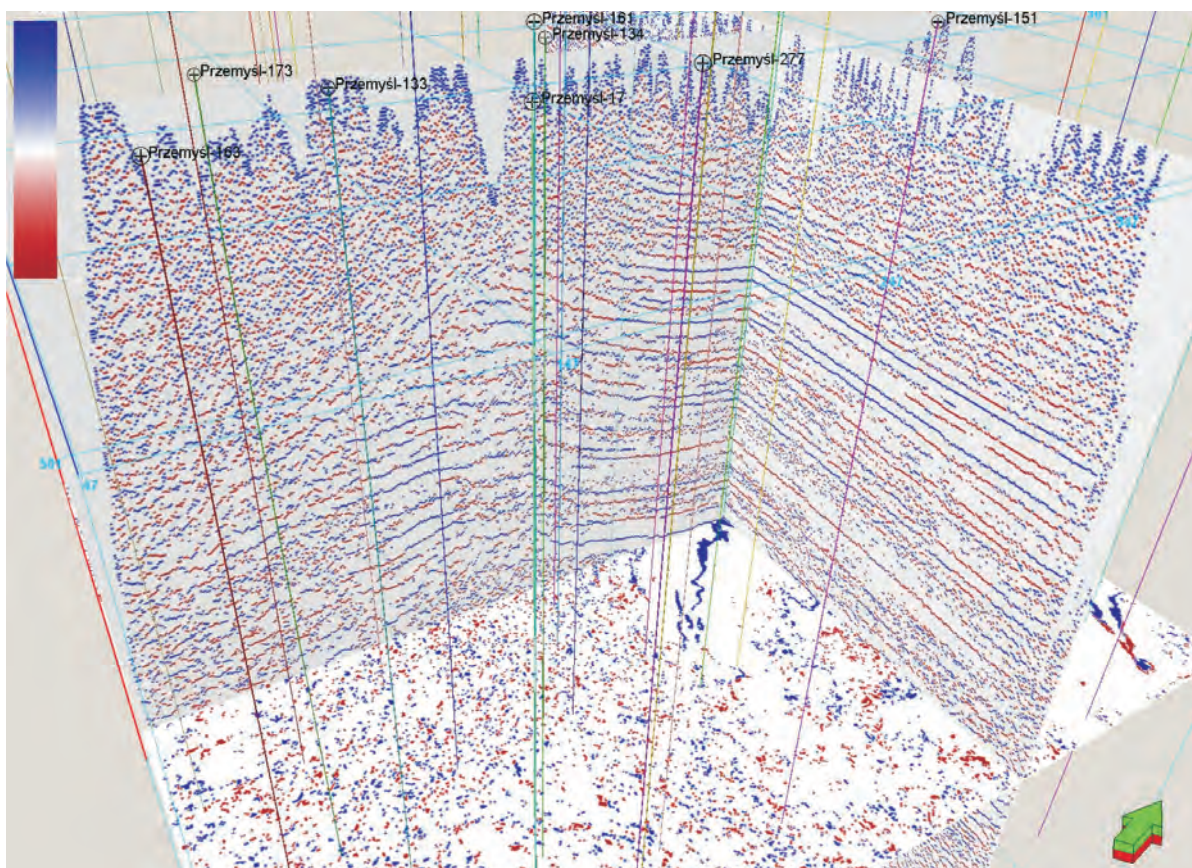
Cosinus fazy (*Cosine of phase*) (rysunek 13) – w plastyczny sposób przedstawia zmiany fazy sygnału sejsmicznego; jest on niezależny od zmian amplitudy, dzięki czemu jest bardzo przydatny w procesie korelacji; zarówno w przypadku wysokich, jak i niskich amplitud. Cosinus fazy chwilowej pozwala na interpretację uskoków, wyklinowań



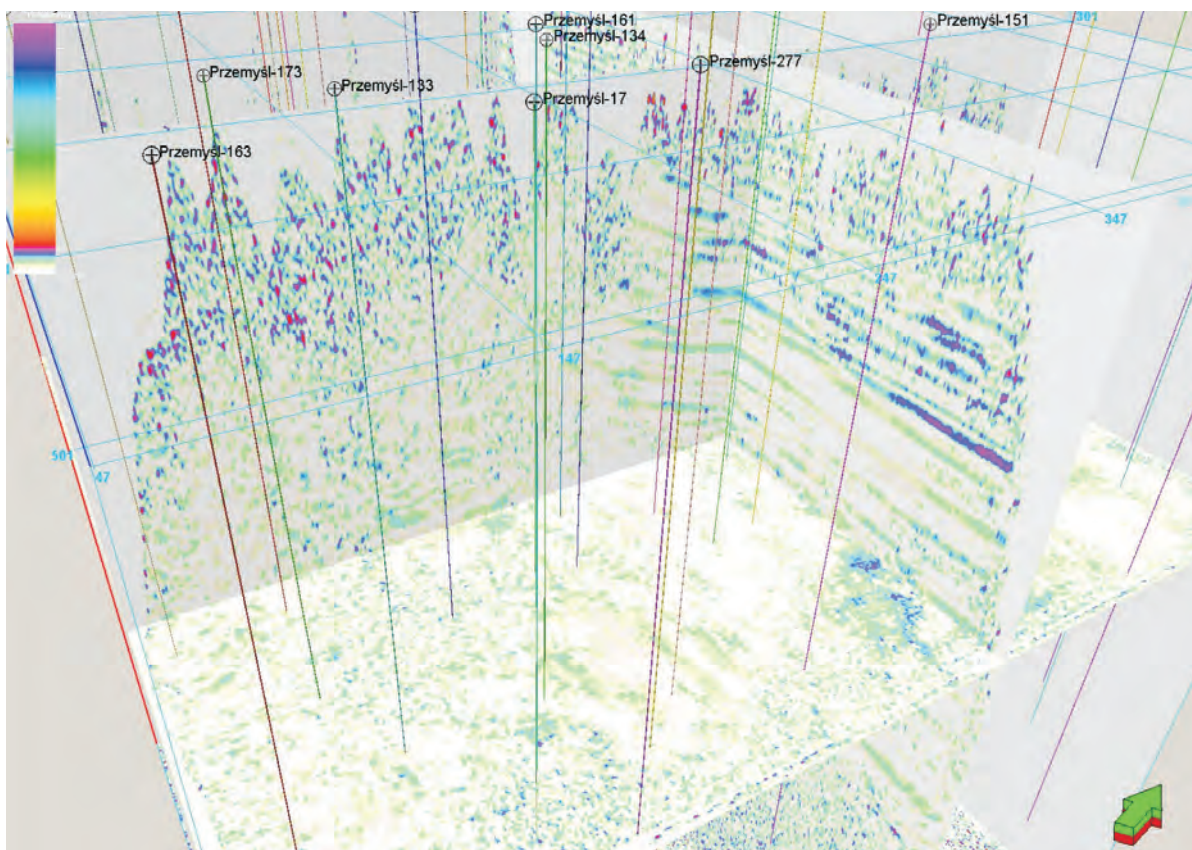
Rys. 12. Atrybut objętościowy – obwiednia (*Envelope*), przedstawiony w oknie 3D



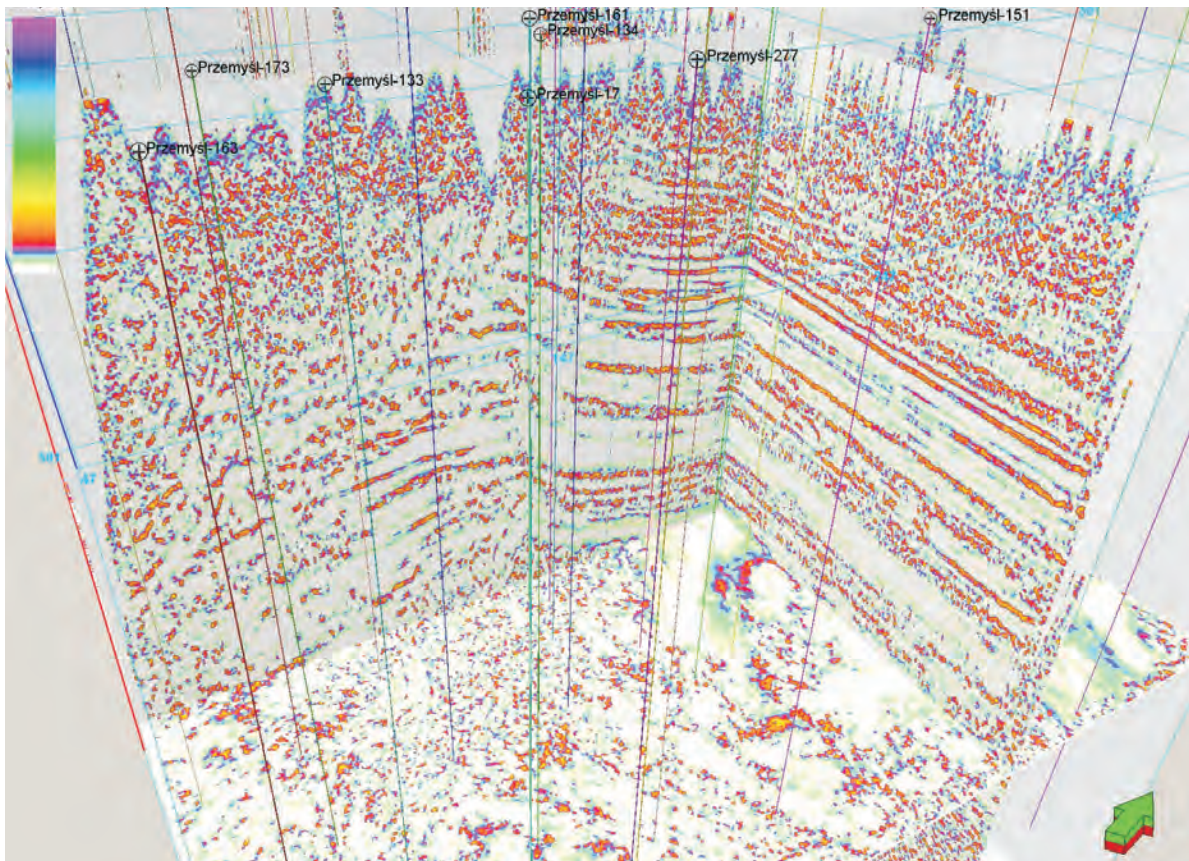
Rys. 13. Atrybut objętościowy – cosinus fazy, przedstawiony w oknie 3D



Rys. 14. Polarność pozorna (*Apparent Polarity*), przedstawiona w oknie 3D



Rys. 15. Atrybut objętościowy – częstotliwość chwilowa (*Instantaneous frequency*), przedstawiona w oknie 3D



Rys. 16. Atrybut objętościowy – chwilowa szerokość pasma (*Instantaneous bandwidth*), przedstawiona w oknie 3D

i wszelkich nieciągłości sygnału, a także na korelację słabych refleksów. W tym przypadku świetnie uwidocznili granicę nasunięcia fliszowego Karpat.

Polarność pozorną (*Apparent polarity*) (rysunek 14) ujawnia znak współczynnika odbicia i w ten sposób dostarcza wskazówki na temat zmian w ośrodku geologicznym – np. występujących niezgodności (obserwowanych na granicy miocenu i nasunięcia fliszowego). Atrybut ten jest wykorzystywany do sprawdzania lateralnej zmienności polaryzacji wzdłuż wybranego horyzontu.

Czasami kontynuacja horyzontu na sekcji atrybutu polarności pozornej może być dużo lepsza niż na zaszurowanej sekcji sejsmicznej, a w przypadku lepszej jakości danych pozwala na wychwycenie cienkich wkładek warstw.

Częstotliwość chwilowa (*Instantaneous frequency*) (rysunek 15) – atrybut ten mierzy zmiany częstotliwości chwilowej i jest niezależny od amplitudy oraz fazy. Bardzo dobrze ukazuje on wszelkie zmiany właściwości złożowych skały – takie jak zawartość węglowodorów, strefy spękań, zmiany miąższości oraz lateralne zmiany litologiczne. Czasami strefy niskich częstotliwości mogą być związane z wyżej leżącą akumulacją węglowodorów (tzw. „cień niskoczęstotliwościowy” lub „strefa cienia”). Ujemne wartości tego atrybutu mogą odpowiadać pakietom

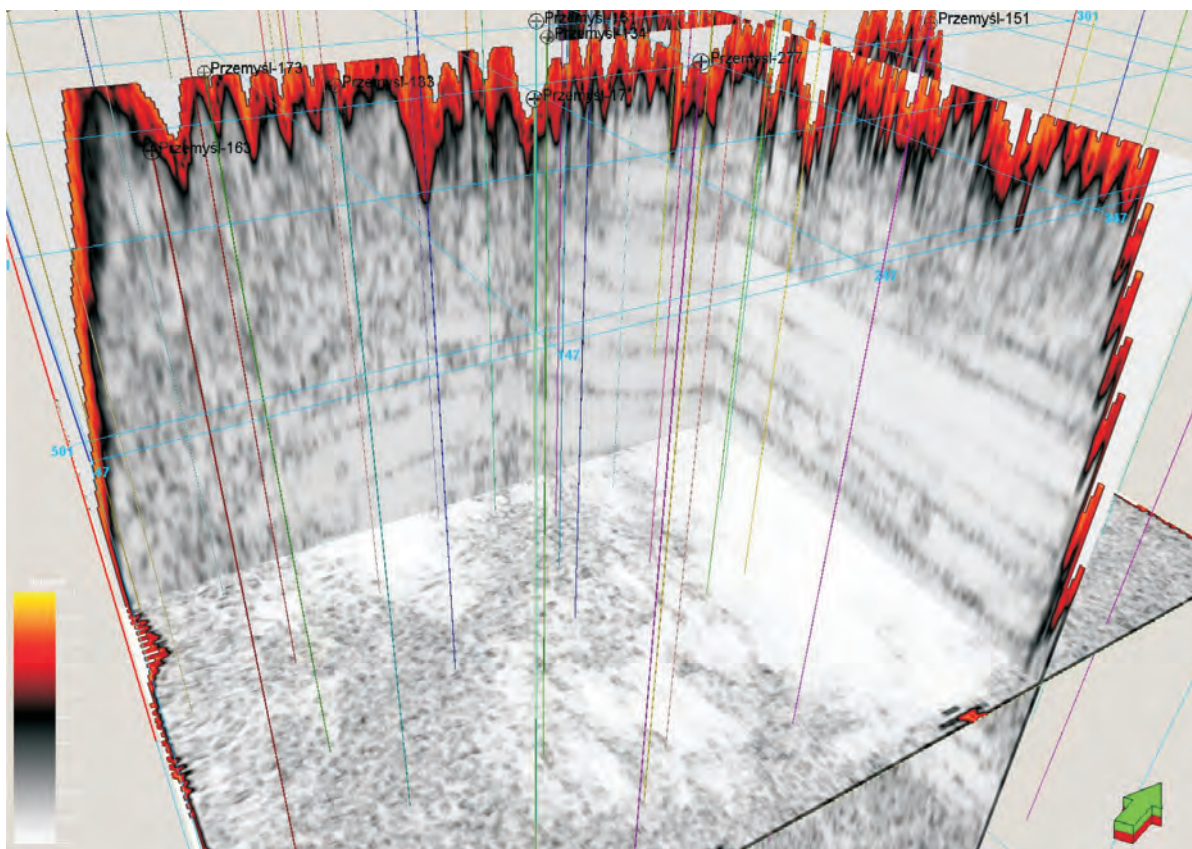
interferencyjnym, powstającym w obszarze wyklinowań warstw, bądź w ośrodku cienkoławicowym. Znaczne obniżenie wartości częstotliwości chwilowej może świadczyć o obecności złóż gazu.

Chwilowa szerokość pasma (*Instantaneous bandwidth*) (rysunek 16) – atrybut ten jest miarą względnej zmiany amplitudy i pośrednio wskazuje na zmiany w energii odbicia; związany jest z absorpcją przy odbiciu. Szybki wzrost, a więc duża wartość atrybutu świadczy o szerokim paśmie przenoszenia, czyli o słabej absorpcji przy odbiciu. W przypadku sekwencji piaskowce/łupki występuje wąskie pasmo przenoszenia, natomiast wyraźne warstwy o dużej miąższości przenoszą sygnał w szerokim zakresie częstotliwościowym.

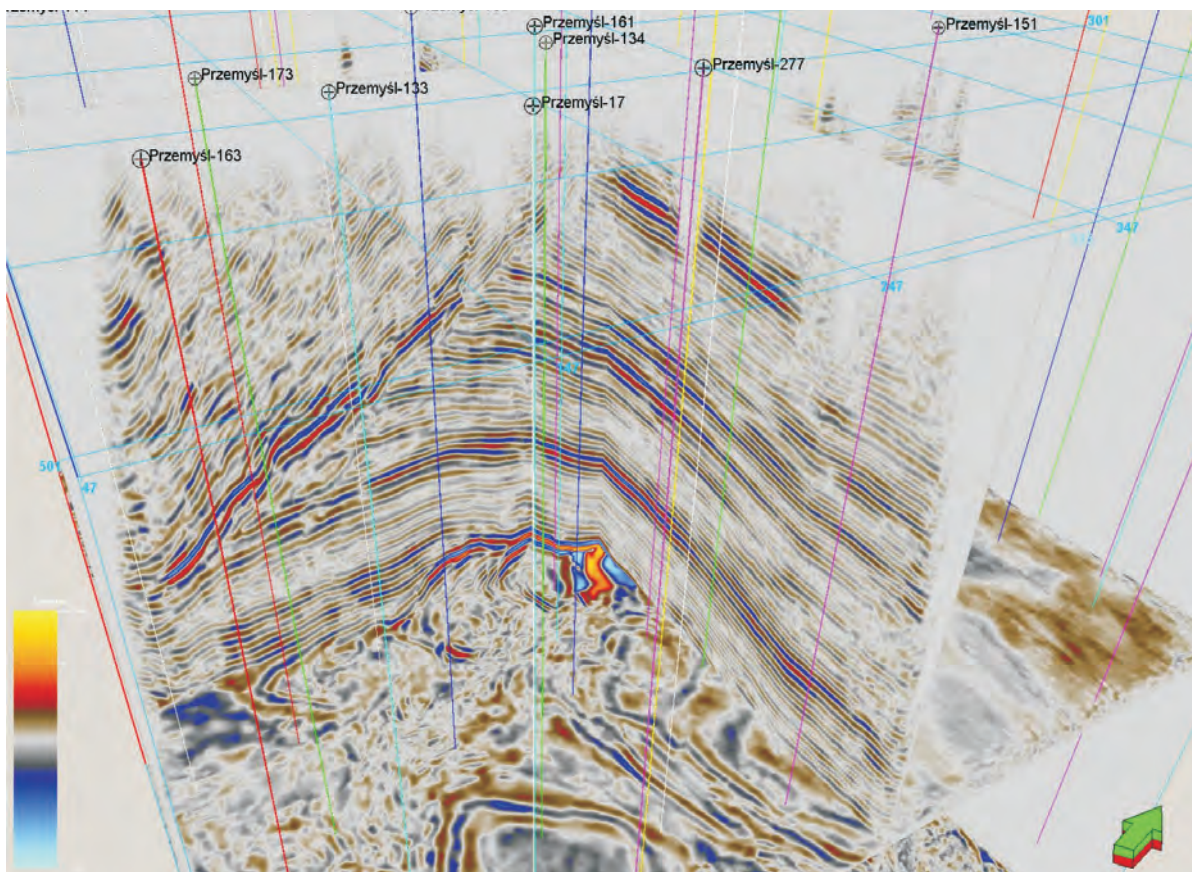
W następnej kolejności wygenerowano i przeanalizowano atrybuty zaliczane do grupy metod strukturalnych:

Wariancja (metoda krawędzi) (*Variance (Edge method)*) (rysunek 17) – jest atrybutem służącym do wyodrębnienia nieciągłości sygnału i pozwala wychwycić drobne uskoki, niewidoczne na danych sejsmicznych.

Wygładzenie strukturalne (*Structural Smoothing*) (rysunek 18) – zaletą tego atrybutu jest selektywne wygładzenie horyzontów (co oznacza, że w przypadku istnienia struktury – wygładzenie strukturalne zapewni ciągłość horyzontu struktury lokalnej).



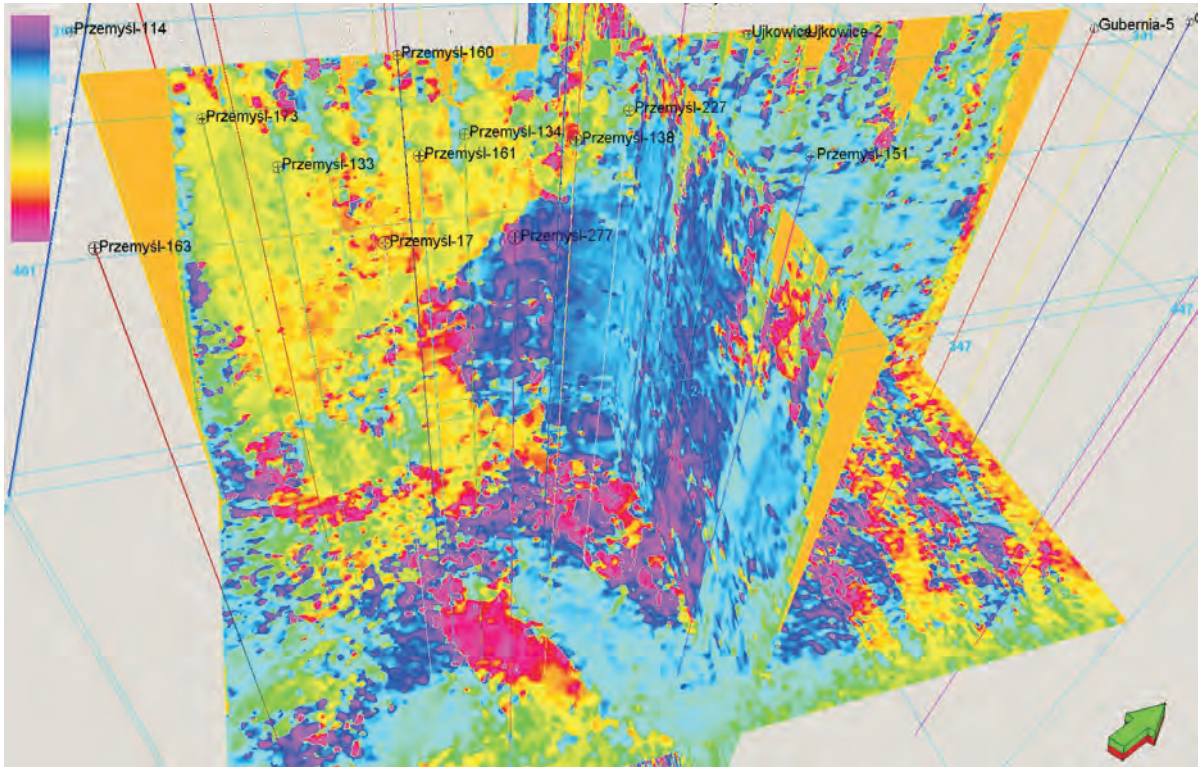
Rys. 17. Atrybut objętościowy z grupy metod strukturalnych – wariancja (*Variance*), przedstawiona w oknie 3D



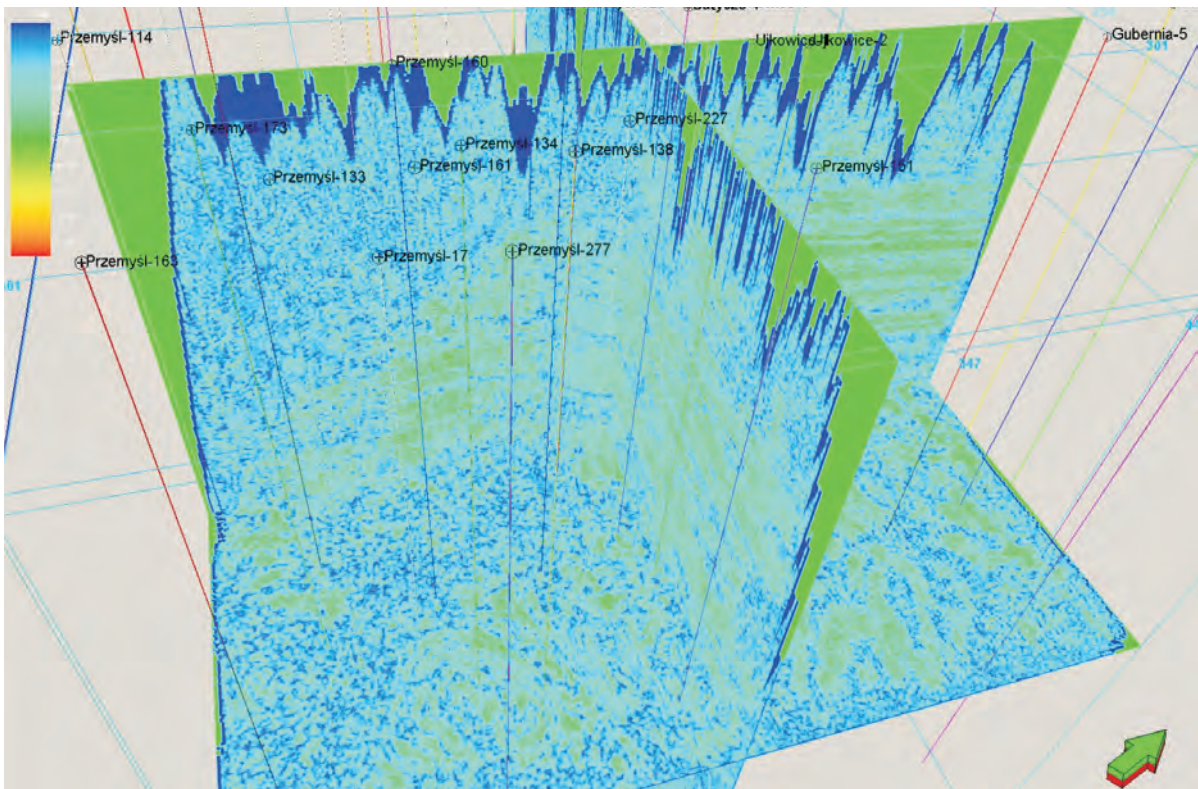
Rys. 18. Atrybut objętościowy z grupy metod strukturalnych – wygładzenie strukturalne (*Structural Smoothing*)

Lokalny azymut strukturalny (*Local structural azimuth*) (rysunek 19) oraz lokalny upad strukturalny (*Local structural Dip*) (rysunek 20) – parametry te opisują położenie

płaszczyzny w przestrzeni i służą do wychwytywania potencjalnych uskoków przez śledzenie nieciągłości w nachyleniu horyzontów.



Rys. 19. Atrybut objętościowy z grupy metod strukturalnych – lokalny azymut strukturalny (*Local structural azimuth*)



Rys. 20. Atrybut objętościowy z grupy metod strukturalnych – lokalny upad strukturalny (*Local structural Dip*)

Kolejną przeanalizowaną na danych rzeczywistych grupą były atrybuty metod stratygraficznych, takie jak:

Chaos (rysunek 21) – który jest świetnym narzędziem służącym do detekcji wszelkich nieciągłości oraz uskoków. Chaos zawarty w obrazie sejsmicznym może być spowodowany przez ścieżki migracji gazu, intruzje wysadów solnych, rafa i kanały rzeczne.

Tłumienie (t^* Attenuation) (rysunek 22) – to atrybut pozwalający uchwycić otwarte spękania w ośrodku geologicznym. Tłumienie jest związane z gęstością spękań oraz pionową miąższością strefy spękań. Atrybut ten powiązany jest z absorpcją częstotliwości; w przypadku szczelin wypełnionych gazem następuje pochłanianie wysokich częstotliwości, natomiast w przypadku szczelin wypełnionych płynem następuje absorpcja niskich częstotliwości.

Względna impedancja akustyczna (*Relative acoustic impedance* – RAI) (rysunek 23) – to atrybut przedstawiający chwilowy kontrast impedancji akustycznej; wyznacza on granice sekwencji, płaszczyzny niezgodności i nieciągłości, może także wskazywać porowatość i zawartość płynów złożowych. Atrybut sejsmiczny RAI można łatwiej skorelować z danymi geofizyki wiertniczej – proponowana w systemie automatycznie skala kolorów związana jest ze skalą typową dla sekcji sejsmicznej (rysunek 23); być może nie jest to najlepiej dopasowany zakres kolorystyczny, ale z pewnością jest on diametralnie różny od obowiązującego w branży poszukiwań węglowodorów szerokiego spektrum kolorów używanego do wyświetlania danych impedancji akustycznej. Z tego powodu przeanalizowano dostępną w Petrele bibliotekę kolorów i wybrano inną ich paletę (rysunek 24).

Ostatnim atrybutem zaprezentowanym w niniejszym opracowaniu jest atrybut *Sweetness* (nie posiadający polskiego tłumaczenia) (rysunek 25) – jest to iloraz amplitudy chwilowej i pierwiastka kwadratowego z częstotliwości chwilowej.

Ponieważ w systemie Petrel istnieje możliwość generowania zaawansowanych atrybutów, które powstają w wyniku połączenia procedur matematycznych z wcześniej wygenerowanymi atrybutami podstawowymi, zatem przy użyciu funkcji kalkulatora (dostępnej w aplikacjach generujących atrybuty) wykonano procedurę pozwalającą na uzyskanie atrybutu *Sweetness*, według poniższej zależności:

$$sweetness = \frac{envelope}{\sqrt{Inst_frequency}}$$

Atrybut *Sweetness* wyodrębnia facje piaszczyste w utworach klastycznych; niestety jednak, w ośrodku cienkoławicowym oraz w miejscach wyklinowań warstw uwidacznia

także obszary o podniesionych (wskutek efektu interferencji) amplitudach. Atrybut ten zawsze należy interpretować w połączeniu z częstotliwością oraz amplitudą chwilową.

Podsumowując, można stwierdzić, iż system posiada bardzo sprawne narzędzia do tworzenia atrybutów sejsmicznych; zarówno powierzchniowych, jak i objętościowych – nieodzownych w interpretacji sejsmiki 3D.

W niniejszym artykule przedstawiono klasyfikację atrybutów sejsmicznych dostępnych w systemie Petrel, a także omówiono podstawy teoretyczne niektórych z nich. Dokonano również szczegółowej charakterystyki wybranych atrybutów powierzchniowych oraz objętościowych. Konkretnie procedury tworzenia atrybutów przeanalizowane zostały na przykładzie danych sejsmicznych 3D z rejonu Ujtkowice-Batycze.

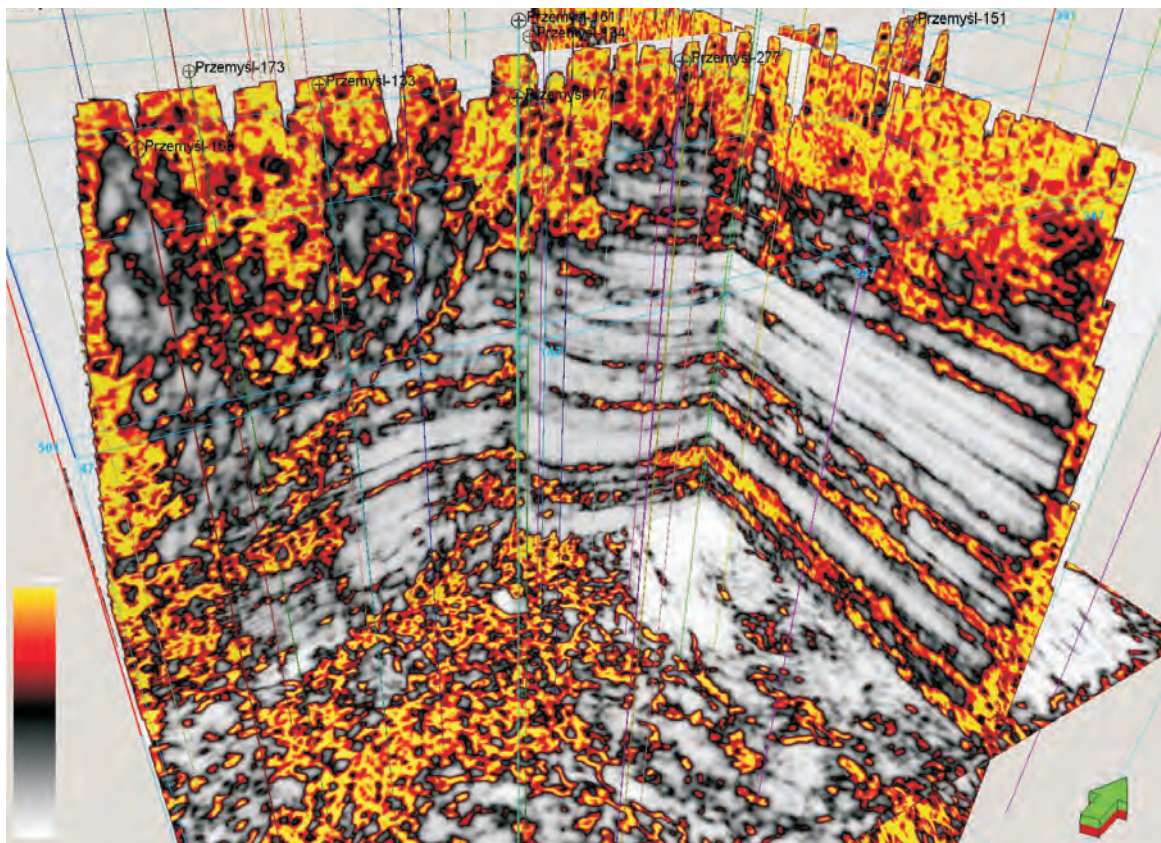
Petrel dysponuje dużą i łatwo dostępną dla użytkownika biblioteką atrybutów sejsmicznych. Dzięki klarownym regułom, klasyfikacja atrybutów oraz ich podział według zastosowania umożliwia szybkie odnalezienie poszukiwanego atrybutu, a także przetestowanie innych atrybutów dostępnych w danej grupie tematycznej.

Wadą systemu jest utrudniony dostęp do zakresów wartości i skali kolorów niektórych mniej popularnych atrybutów. W przyszłości planowane jest zaimportowanie do systemu nowych skali barw, a także stworzenie w nim kilku zakresów kolorystycznych dla wybranych atrybutów (na przykład dla względnej impedancji akustycznej).

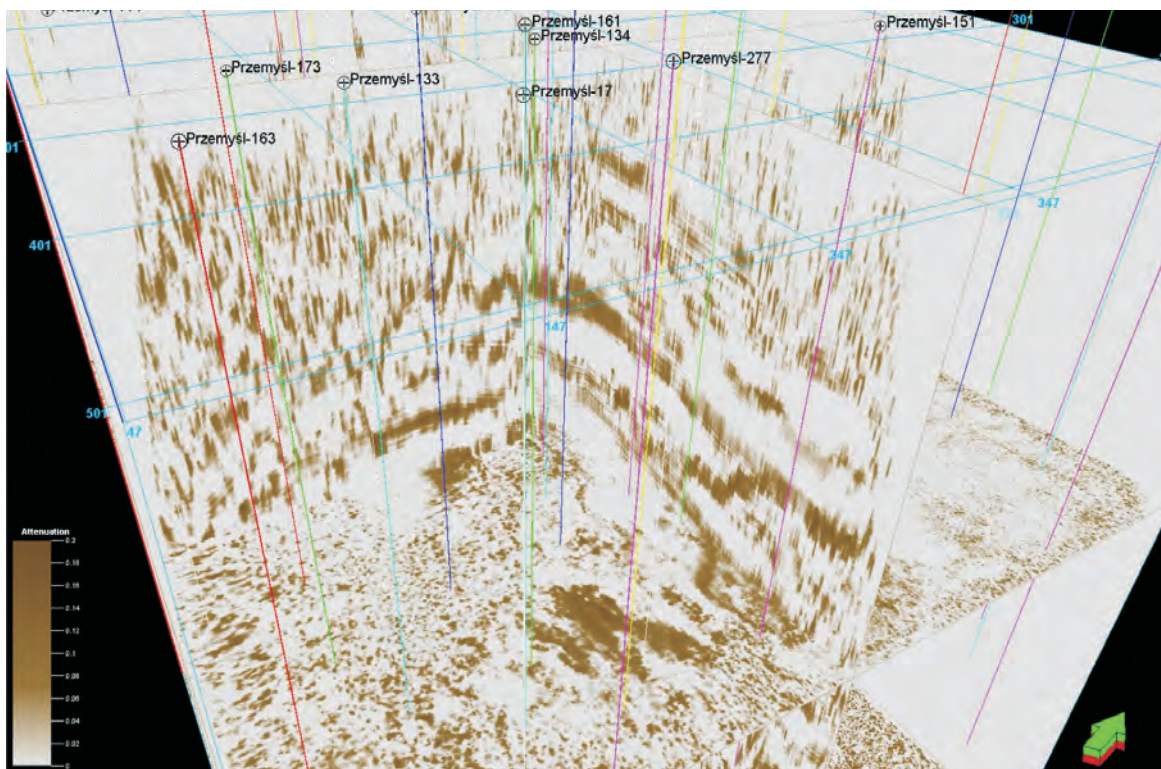
Reasumując, atrybuty sejsmiczne są nieodłączną częścią projektów poszukiwań złóż węglowodorów. Wykorzystanie teorii sygnału i zastosowanie jej do projektów sejsmicznych otworzyło nowe możliwości interpretacyjne. W dobie coraz doskonalszych technik akwizycyjnych, przetwarzania oraz możliwości wizualizacji danych ogromnych wolumenów sejsmicznych, gwałtownie rosną oczekiwania w stosunku do interpretatorów. Olbrzymią pomocą przy tak dużych ilościach danych sejsmiki 3D są atrybuty sejsmiczne, dzięki którym podczas żmudnej i czasochłonnej pracy interpretacyjnej udaje się uzyskać dodatkowe informacje.

Atrybuty sejsmiczne są podstawą w nowoczesnej interpretacji – można je łączyć i tworzyć nowe atrybuty charakteryzujące geologię danego rejonu, jednak dopiero interdyscyplinarne podejście i połączenie takich dziedzin jak: geologia, geofizyka i geostatystyka daje szansę na stworzenie poprawnej charakterystyki rejonu złożowego. Na bazie atrybutów podstawowych tworzone są atrybuty zaawansowane – nazwane atrybutami hybrydowymi [10]; powstają one w wyniku połączenia procedur matematycznych, statystycznych i logicznych.

W systemie Petrel jest również możliwość wykorzysta-



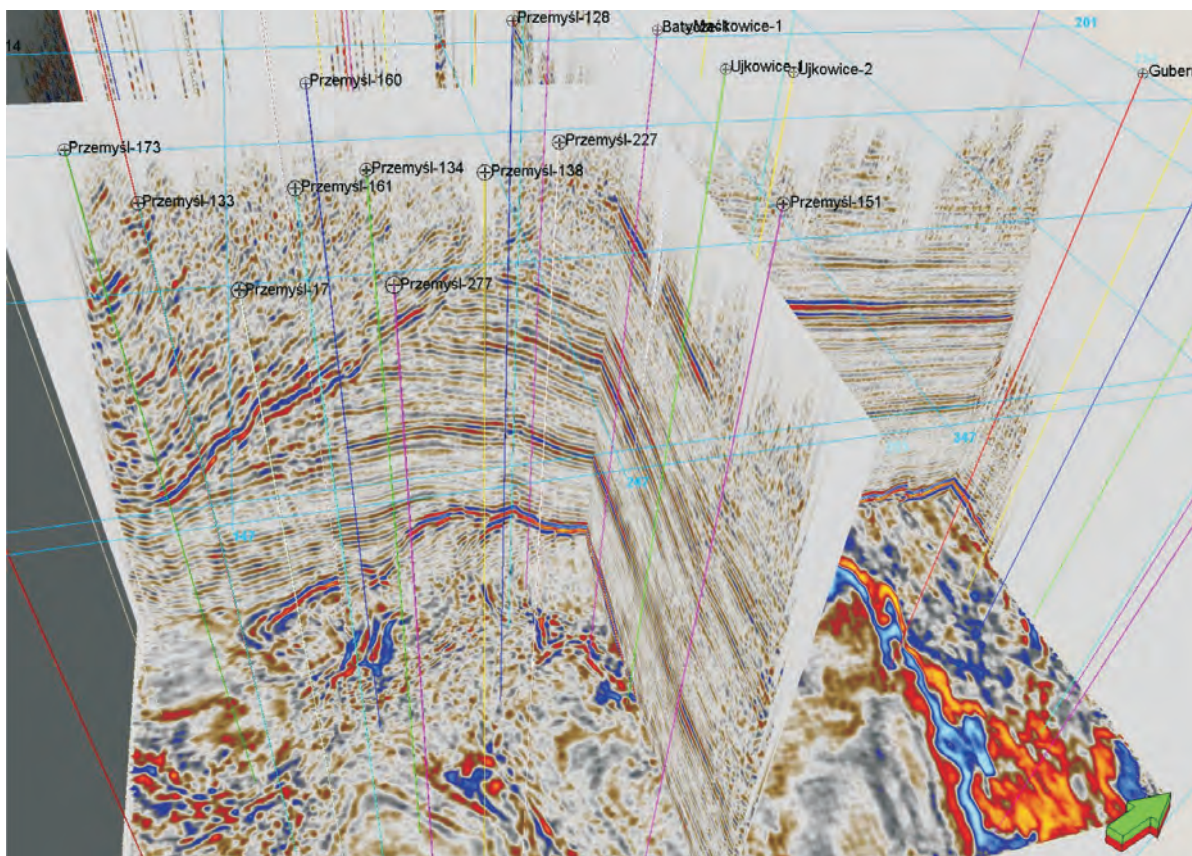
Rys. 21. Atrybut objętościowy z grupy metod stratygraficznych – chaos, przedstawiony w oknie 3D



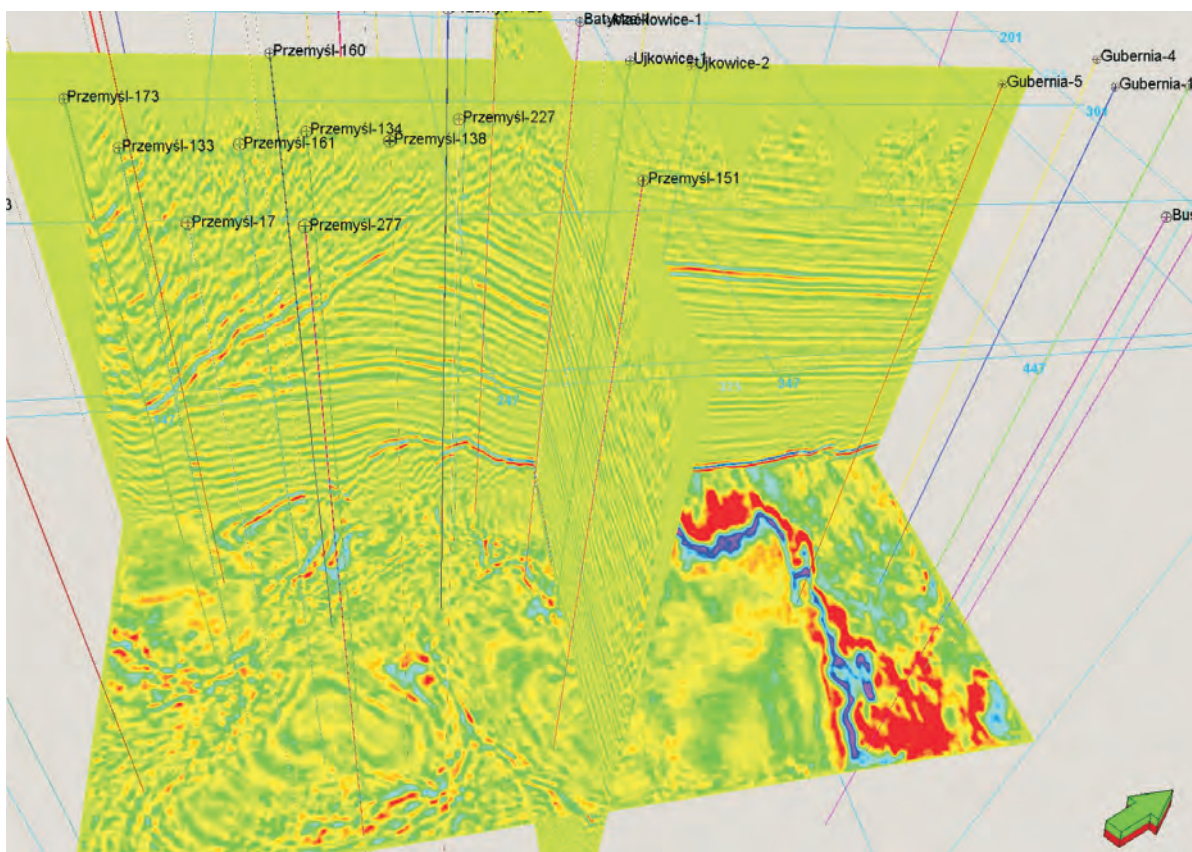
Rys. 22. Atrybut objętościowy z grupy metod stratygraficznych – tłumienie ($t \cdot \text{Attenuation}$), przedstawiony w oknie 3D

nia sieci neuronowych w celu połączenia multi-atrybutów sejsmicznych z danymi geofizyki wiertniczej – wynik tej

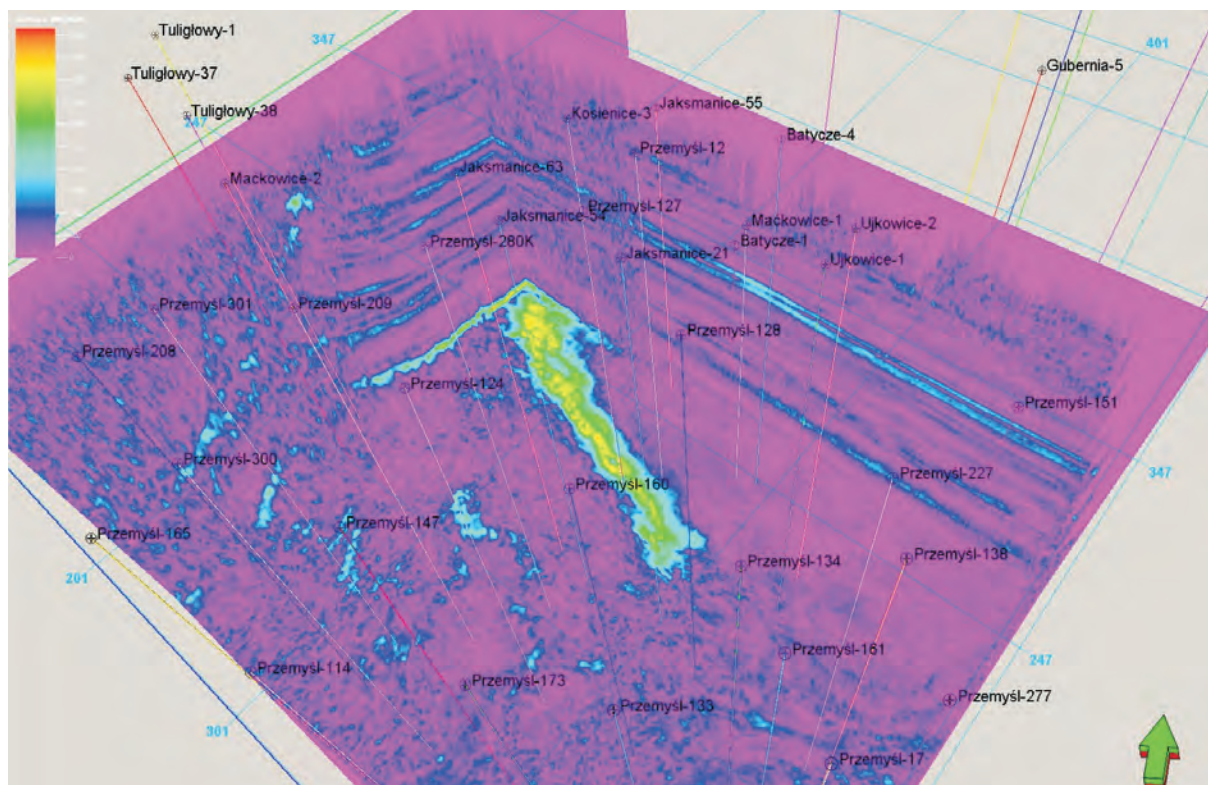
operacji prowadzi do prognozowania litologii i charakterystyki złoża [2].



Rys. 23. Atrybut z grupy metod stratygraficznych – względna impedancja akustyczna (*Relative acoustic impedance*)



Rys. 24. Względna impedancja akustyczna (*Relative acoustic impedance*) po zmianie skali kolorów



Rys. 25. Atrybut *Sweetness* – generowanie zaawansowanych atrybutów za pomocą dostępnych w systemie Petrel funkcji matematycznych

Artykuł nadesłano do Redakcji 3.06.2011 r. Zatwierdzono do druku 29.06.2011 r.

Recenzent: prof. zw. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

Literatura

- [1] Chen Q., Sidney S.: *Seismic attribute technology for reservoir forecasting and monitoring*. The Leading Edge, 16, no. 5, 1997.
- [2] Chopra S., Marfurt K.: *Seismic Attributes – A historical perspective*. Geophysics no. 5, vol. 70, September-October 2005.
- [3] Chopra S., Marfurt K.: *Seismic Attributes – A promising aid for geological prediction*. CSEG Recorder, Special Edition, 2006.
- [4] Jędrzejowska-Tyczkowska H. i in.: *Metaatrybuty sejsmiczne – koncepcja i zastosowania praktyczne*. Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna GEOPETROL, 93–98, 2006.
- [5] Kasina Z.: *Metodyka badań sejsmicznych*. Wyd. Instytutu GSMiE PAN, 1998.
- [6] Myśliwiec M.: *Poszukiwania złóż gazu ziemnego w osadach miocenu zapadliska przedkarpackiego na podstawie interpretacji anomalii sejsmicznych – weryfikacja anomalii*. Przegląd Geologiczny, 52, nr 4, 307–314, 2004.
- [7] Petrel Manual – wersja 2009.2.
- [8] *Reprocessing i reinterpretacja prac sejsmicznych 3D Ujkwice-Batycze*. Opracowanie wyników badań sejsmicznych Geofizyki Kraków, rok 2008.
- [9] Taner M.T., Sherif R.E.: *Complex seismic trace analysis*. Geophysics no. 6, vol. 44, 1979.
- [10] Taner M.T.: *Attributes Revisited*. Rock Solid Images, Houston, Texas 1992 (Revised Sep. 2000).
- [11] Taner M.T.: *Seismic Attributes*. CSEG Recorder, September 2001.



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