

Krzysztof Żuławiński  
Instytut Nafty i Gazu, Kraków

## Detekcja i rozdzielczość czasowa, a zdolność rozdzielcza *waveletu* sejsmicznego w cienkich warstwach

Zagadnienie wydzielenia uwarstwienia ośrodka dotyczy głównie utworów miocenu na terenie przedgórz Karpat; obszaru występowania złóż węglowodorów – szczególnie gazu – wraz z wynikającą stąd potrzebą wydzielenia warstw łupków i piaskowców z możliwie wysoką rozdzielczością, stanowi zatem poważne wyzwanie z punktu widzenia praktyki i teorii, i wiąże się zarówno z projektowaniem badań sejsmicznych, jak i z przetwarzaniem uzyskanych danych.

Kanoniczna dla tego zagadnienia (a właściwie dla problemu cienkich warstw w sejsmice) praca Widessa [6], wprowadzająca do rozważań klasyczny model klina, pomija kwestię kształtu *waveletu* i jego wpływu na rozdzielczość pionową sekcji sejsmicznej. Charakterystyczne jest jednak, że zarówno Widess jak Puryear i Castagna [5] czy Liu i Schmitt [2] posługują się *waveletami* o zbliżonym kształcie. Z reguły stosują oni *wavelet* Ricker'a o częstotliwości dominującej 30 Hz lub inny, o podobnym kształcie, a Widess prowadzi rozważania przybliżając stosowany przez siebie *wavelet* kosinusoidą wygaszaną z odległością od centralnej części funkcji. Wybór nie jest przypadkowy i nie wynika jedynie z popularności *waveletu* Ricker'a w badaniach modelowych, czy w przypadku Widessa z możliwości obliczeń analitycznych. Wydaje się, że powód takiego postępowania można wyjaśnić śledząc rozważania Berkhouta [1] na temat zdolności rozdzielczej *waveletu*.

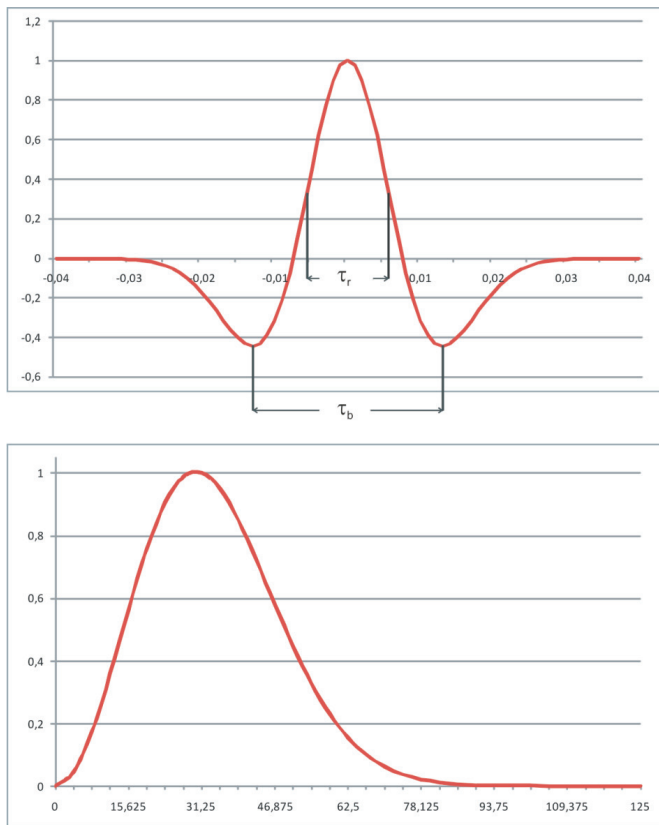
Rozważmy następujące aspekty mogące mieć wpływ na wybór kształtu sygnału:

- szerokość globalnego maksimum i oscylacje boczne – stosowane sygnały mają relatywnie małą szerokość centralnego ekstremum, duże ekstrema boczne i szybko zanikają,

- kształt widma sygnału – wybierane *wavelety* mają gładkie, kosinusoidalne widmo,
- częstotliwość maksimum widma – relatywnie niska.

Berkhout w swojej pracy używa określenia moc/siła rozdzielcza *waveletu* (*wavelet resolving power*), jednak słowo „zdolność” wydaje się lepszym tłumaczeniem, pomimo popularności słowa „*power*” w języku polskim. W terminie „rozdzielczość”, w odniesieniu do cienkich warstw, tkwi pewien dualizm. Można go rozumieć jako wykrywanie, detekcję cienkich warstw, czyli stwierdzenie, że mamy do czynienia z warstwą, która – ze względu na miąższość oraz impedancję ośrodka – pozostaje na granicy możliwości wydzielenia. Termin „rozdzielczość” można też rozumieć jako zdolność dokładnego określenia grubości warstwy na zapisie sejsmicznym. W pierwszym przypadku w literaturze poświęconej cienkim warstwom używa się terminu *detectability*, a w drugim – *resolvability*. Rozdzielczość czasowa *waveletu* (sygnału) definiowana jest jako interwał między punktami przegięcia jego centralnej części, co odpowiada podwójnemu czasowi przejścia fali sejsmicznej przez cieką warstwę (zmierzonemu na trasie sejsmicznej).

Punkt przegięcia wyznaczony jest przez zerowanie drugiej pochodnej sygnału  $d^2s(t)/dt^2 = 0$ , a wszystko to przy założeniu zerofazowości sygnału (tylko o takich *waveletach* jest tu mowa) – niezerofazowość sygnału znacząco komplikuje analizę. Uściślając, samo stwierdzenie występowania cienkiej warstwy nie oznacza właściwego określenia jej miąższości, bowiem interwał zmierzony na trasie sejsmicznej niekoniecznie odpowiada prawdziwemu podwójnemu czasowi przejścia przez cieką warstwę. I tak Widess uważa warstwę za cieką, gdy jej miąższość



Rys. 1. Przykład sygnału Rickera z podstawowymi parametrami – wykres w domenie czasu i widmo. Oś odciętych wyskalowana odpowiednio w [sek] i [Hz]

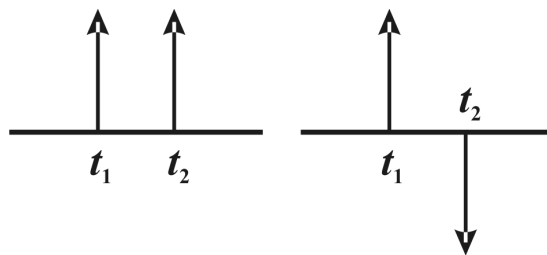
w czasie wynosi około  $\lambda/8$ , ale mierzalny interwał na trasie sejsmicznej dla sygnału Rickera wynosi  $\lambda/4,6$ . Wprawdzie J. Farr w swojej pracy twierdzi, że możliwa jest detekcja cienkiej warstwy o miąższości  $\lambda/40$ , jednak mierzalny interwał – czyli czas między maksimum a minimum pochodnej sygnału – pozostaje taki sam. Wielkość  $\lambda$  to dominująca długość fali (*predominant wavelegth*), czyli iloczyn prędkości fali w cienkiej warstwie i dominującego okresu (*predominant period*) – interwału między najbliższymi centralnego maksimum minimami sygnału. Częstotliwość otrzymana jako odwrotność dominującego okresu jest dla sygnału Rickera  $\cong 1,28$  większa niż częstotliwość maksimum widma. Widmo *waveletu* Rickera 30 Hz zanika przy 100 Hz, a odpowiadająca mu częstotliwość dominująca wynosi 38,6 Hz. Dla innych sygnałów zależności mogą być znacząco inne i na różnice te należy zwracać uwagę.

Rysunek 1 przedstawia sygnał Rickera oraz jego podstawowe parametry. Przegląd literatury poświęconej cienkim warstwom może prowadzić do pewnej konfuzji, bowiem autorzy stosują dość swobodnie trzy różne oznaczenia na dominujący okres:  $\tau_b$ ,  $\lambda_b$  i  $2b$  (gdzie  $b$  jest miąższością warstwy). Mają one także różne miana u Puryeara i Castagny [5] (na przykład znajdziemy tam rysunek, gdzie na osi odciętych mianowanej w milisekundach oznaczono

Parametry sygnału Rickera:

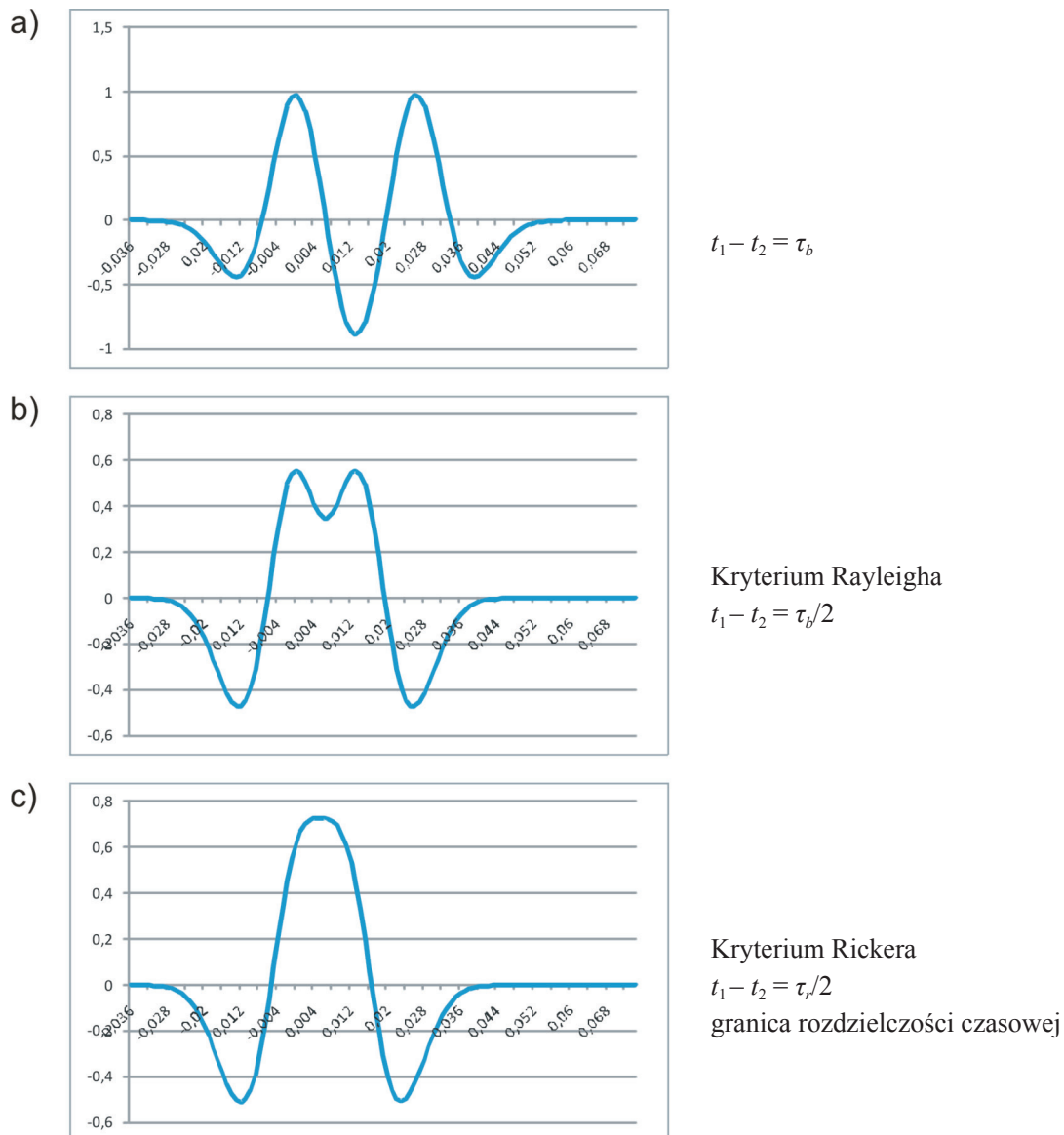
- częstotliwość maksimum widma: 30 Hz,
- dominujący okres  $\tau_b$ : 0,026 s,
- częstotliwość dominująca: 38,6 Hz,
- rozdzielczość czasowa  $\tau_b$ : 0,011 s,
- szerokość sygnału (*wavelet breadth*) tożsama z dominującym okresem,
- półokres dominujący, czyli odległość maksimum-minimum (*peak-to-trough*)  $\tau_b/2$ : 0,013 s,
- $\lambda_b = \tau_b \cdot V_b$  (nie występuje na rysunku) skaluje sygnał wobec analizowanej cienkiej warstwy; gdzie  $V_b$  – prędkość fali sejsmicznej w warstwie.

długość fali  $\lambda$  – mierzoną zwykle w metrach). Warstwie o miąższości i prędkości przemnożonej przez współczynnik  $\alpha$  – z punktu widzenia rozdzielczości w czasie – odpowiada ten sam interwał  $2b/V_b$ , równy  $\tau_b$ . Długość fali  $\lambda_b$  rozumiana jest dwojako: albo jako  $\lambda_b = \tau_b \cdot V_b$  (i wtedy różni się o czynnik  $\alpha$ ), albo utożsamiana jest z  $\tau_b$ .



Rys. 2. Dublety spolaryzowane zgodnie (jednakowo) i przeciwnie – odpowiadają dwóm kolejnym współczynnikom odbicia o impedancji akustycznej równej pod względem modułu, i odpowiednio; o takich samych i przeciwnych znakach

Rozważmy rozdzielczość *waveletu* dla dubletu jednakowo spolaryzowanego – dodatnio, według stosowanych w tym przypadku kryteriów. Na rysunku 3 pokazano wynik splotu sygnału Rickera z takim dubletem dla trzech przypadków; kryterium Rickera wyznacza kres

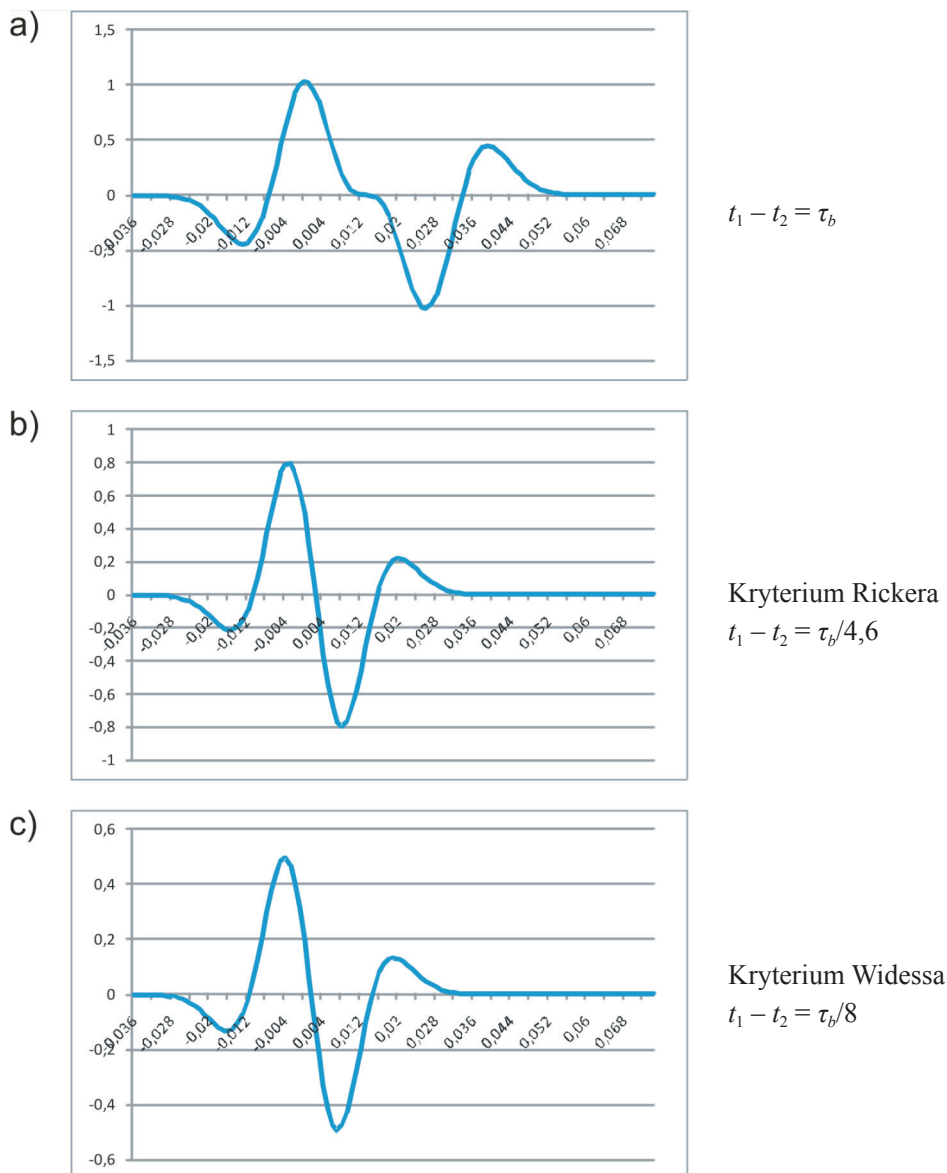


Rys. 3. Splot sygnału Rickera 30 Hz z dubletem spolaryzowanym dodatnio; według kryterium Rickera kresem możliwości rozdzielania takich refleksów jest zanik lokalnego minimum między *waveletami* (c), w przypadku tradycyjnego kryterium Rayleigha (b) rozdzielanie nie stanowi problemu – podobnie jak dla wzorcowego interwału równego okresowi dominującemu (a)  $t_1 = 0$  – czas maksimum pierwszego waveletu,  $t_2$  – czas drugiego refleksu, amplitudy zachowane, oś odciętych wyskalowana w sekundach

rozdzielczości czasowej. Dla porównania pokazano też klasyczne kryterium Rayleigha. Dla dubletu spolaryzowanego przeciwnie rozdzielczość tego samego *waveletu* wzrasta, kryterium Rickera stanowi kres rozdzielczości czasowej, a kryterium Widessa można przyjąć jako kres detekcji cienkiej warstwy – jak pokazano na rysunku 4. Zastosowanie obwiednie sygnału nie umożliwia (poza granicą jaką wyznacza kryterium Rickera) zmierzenia miąższości cienkiej warstwy – obrazy różnią się praktycznie tylko amplitudą.

Sygnał Rickera – zwyczajowo stosowany w badaniach teoretycznych – dobrze spełnia wymagania Berkhouta

w stosunku do zdolności rozdzielczej *waveletu*, jednak jego (Berkhouta) wnioski można streścić jednym zdaniem – „nie istnieje jedyne (jedyne dobre) rozwiązanie problemu zdolności rozdzielczej *waveletu*”. Z widma o danym zakresie możemy stworzyć dwa skrajne rodzaje *waveletów* zerofazowych: pierwszy o małej szerokości centralnego maksimum i o dużej energii bocznych oscylacji oraz drugi, o dużej szerokości centrum i małych oscylacjach bocznych. W przypadku cienkich warstw pierwsza wersja jest lepszym wyborem; rozdzielaniu sąsiadujących w domenie czasu czy przestrzeni refleksów o podobnej wielkości lepiej służy mała szerokość głównego maksimum, osią-

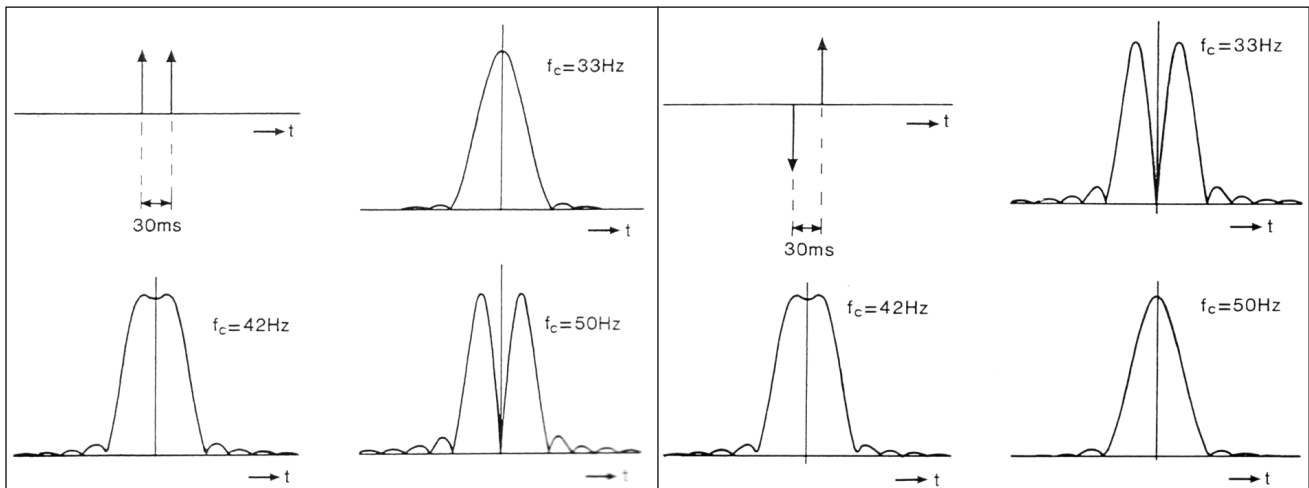


Rys. 4. Splot sygnału Rickera 30 Hz z dubletem spolaryzowanym przeciwnie (pierwszy refleks dodatni), kryterium Widessa stanowi granicę detekcji takiego dubletu (c) zaś kryterium Rickera – kres rozdzielczości czasowej (b), wynikowy sygnał w tych przypadkach różni się praktycznie tylko amplitudą, która dla pojedynczego refleksu znormalizowana jest do 1, jak w (a)  $t_1 = 0$  – czas maksimum pierwszego *waveletu*,  $t_2$  – czas drugiego refleksu, amplitudy zachowane, oś odciętych wyskalowana w sekundach

gnięta kosztem zwiększonych oscylacji bocznych. Drugie rozwiązanie pozwala wykryć słabe refleksy w obecności silnych. Dodatkowym czynnikiem jest długość *waveletu*; krótki sygnał redukuje ewentualne interferencje wytwarzane przez oscylacje boczne – obraz od słabych odbić może być istotnie zakłócony lub stłumiony, przez interferencje od refleksów o dużej impedancji.

Kolejnym problemem jest kształt widma *waveletu*, gdzie naturalnym dążeniem jest poszerzenie jego płaskiej części; ponieważ dążymy do wąskiego sygnału o niskich oscylacjach bocznych – widmo sygnału musi zawierać częstotliwości niskie i wysokie. Z widm o zawartości

częstotliwościowej ( $f_{min}, f_{max}$ ), o różnym kształcie, możemy uzyskać zerofazowe sygnały różniące się szerokością globalnego maksimum i wielkością bocznych ekstremów. Dążenie do jak największej części płaskiej prowadzi wprawdzie do zmniejszenia szerokości centralnego maksimum, ale odbywa się to kosztem powiększonych oscylacji bocznych ekstremów i wydłużenia sygnału (interferencje). W przypadku ekstremalnym, a więc prostokątnego kształtu widma, otrzymamy znany wzór  $s(t) = \cos 2\pi t \cdot \sin 2\pi(f_{max} - f_{min})t/\pi t$  – o najwyższym maksimum centralnym i wolno zanikających oscylacjach. Ze względów praktycznych i teoretycznych nie stosuje się



Rys. 5. Wpływ wyboru częstotliwości *waveletu* na rozdzielczość dubletów nie jest oczywisty. Optymalna częstotliwość sygnału nie istnieje; powinna ona być dobrana pod kątem celu. Obwiednia *waveletu* splecionego z dubletem silnie wpływa na możliwość rozdzielenia składowych dubletu, *wavelet* 33 Hz skutecznie ukrywa składowe dubletu spolaryzowanego jednakowo – przeciwnie do spolaryzowanego przeciwnie, *vice versa* dla sygnału 50 Hz [1]

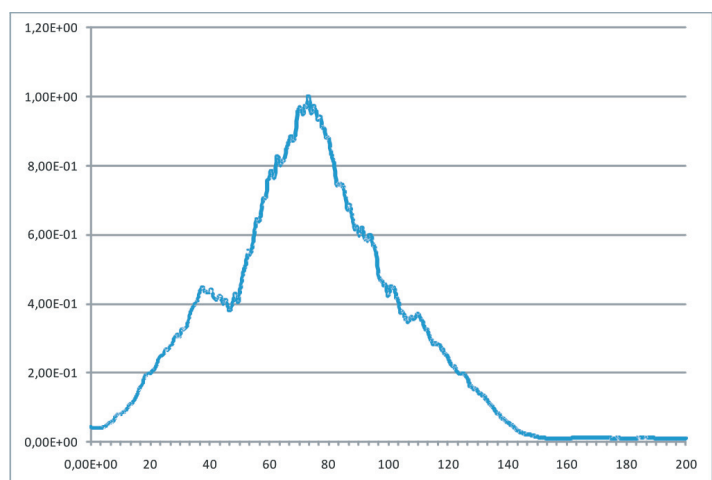
takiego widma, ale nikt też nie dąży do widma o kształcie kosinusoidalnym, z którego otrzymamy szersze maksimum globalne, z bardzo szybko zanikającymi oscylacjami – podobnie jak w widmie sygnału Ricker'a. Jeżeli jednak chcemy wykryć refleks (szczególnie w obecności szumu) – prostokątny kształt widma jest najkorzystniejszy. W wypadku blisko położonych refleksów o podobnej impedancji kształt taki jest mało użyteczny.

Zestawiając śledzenie laminowania ośrodka (w przypadku, gdy z pomiarów otworowych znamy jego refleksyjność) z modelem klina, poszukiwania możemy ograniczyć do wykrywania dubletów – model klina będzie jego abstrakcyjną reprezentacją. Bez względu na spolaryzowanie refleksów w dublecie, obwiednia sygnału generowana przez taki dublet może być użyta do rozdzielania uwarstwienia. W interpretacji do tego celu wykorzystuje się także obwiednię sygnału (jako atrybut sejsmiczny) lub jej pochodne. Jak pokazuje Berkhout [1], częstotliwość maksimum widma może mieć decydujący wpływ na możliwość rozdzielania dubletu.

Jeśli więc śledzimy uwarstwienie w interesującym nas zakresie, częstotliwość może mieć istotne znaczenie.

Nie jest więc przypadkiem, że w teoretycznych rozważaniach rozdzielności cienkich warstw stosowane są sygnały krótkie, o szerokim widmie, kształtu kosinusoidalnego i relatywnie niskiej częstotliwości dominującej. Model klina Widessa wymusza taki wybór – sygnał jest optymalny; z punktu widzenia dubletu o przeciwnej polaryzacji i celu, jakim jest roz-

dzielenie refleksów o takiej samej impedancji. W praktyce, w obecności szumu, wybór *waveletu* może być warunkowany potrzebą detekcji – co pozostaje w sprzeczności z potrzebą zwiększenia rozdzielności pionowej w obszarze uwarstwienia o niskiej miąższości. Rozsądnie przyjmując, że sumarycznie mamy raczej do czynienia z dubletami przeciwnie spolaryzowanymi (jak pokazują pomiary otworowe), wybór *waveletu* w utworach miocenu może interpretację utrudniać lub wręcz uniemożliwiać. Sądząc jednak z zakresu częstotliwościowego analizowanych obecnie profili sejsmicznych (rysunek 6), wiele jeszcze w tej dziedzinie pozostaje do zrobienia.



Rys. 6. Znormalizowane widmo z profilu sejsmicznego wykonanego i przetworzonego w ostatnich latach w interwale miocenu. Poprzez właściwy dobór częstotliwości i kształtu *waveletu*, szeroki zakres częstotliwościowy spektrum pozwala poszerzyć możliwości wydzielenia cienkich warstw w tym interwale. Oś odciętych wyskalowana w Hz

Artykuł nadesłano do Redakcji 20.09.2010 r. Przyjęto do druku 11.10.2010 r.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Andrzej Kostecki

**Literatura**

[1] Berkhout A.J.: *Seismic Resolution*. Geophysical Press, 1984.  
 [2] Liu Y., Schmitt D.R.: *Amplitude and AVO responses of a single thin bed*. Geophysics, 68, 1161–1168, 2003.  
 [3] Marfurt K.J., Karlin R.L.: *Narrow band spectral analysis and thin bed tuning*. Geophysics, 66, 1274–1283, 2001.  
 [4] Partyka G.A., Gridley J.A., Lopez J.A.: *Interpretational aspects of spectral decomposition in reservoir characterization*. The Leading Edge, 18, 353–360, 1999.  
 [5] Puryear C.I., Castagna J.P.: *Layer-thickness determination and stratigraphic interpretation using spectral inversion: Theory and application*. Geophysics, 73, No. 2, 37–48, 2008.  
 [6] Widess M.: *How thin is a thin bed?* Geophysics, 38, 1176–1180, 1973.



Mgr inż. Krzysztof ŻUŁAWIŃSKI – absolwent Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki i Automatyki AGH, specjalność: Fizyka Stosowana. Pracownik Zakładu Geofizyki w Instytucie Nafty i Gazu. Zajmuje się teorią pola falowego, rozdzielczością i przetwarzaniem sejsmicznym oraz programowaniem. Zainteresowania: żeglarstwo, windsurfing, kongniwistyka.

Oferta



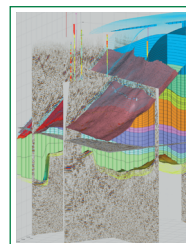
**ZAKŁAD SEJSMIKI**

Kierownik: dr Anna Póchlópek

31-733 Kraków, ul. Bagrowa 1  
 tel.: +48 12 653 25 12 wew. 155  
 fax: +48 12 653 16 65  
 e-mail: anna.polchlopek@inig.pl

Zakres działania:

- interpretacje strukturalne i litologiczno-facjalne zdjęć sejsmicznych 2D i 3D,
- konstrukcje modeli prędkościowo-głębokościowych na podstawie analizy danych sejsmicznych,
- migracje sejsmiczne MGF-K w wersji *postack* i *prestack* w dziedzinie czasu i głębokości dla fal PP i PS,
- wielokładnikowa sejsmika powierzchniowa i otworowa (PPS-3C),
- zastosowanie metod geostatystycznych do budowy statycznych i dynamicznych modeli złóż węglowodorów,
- ocena parametrów anizotropii ośrodka na podstawie danych sejsmicznych,
- zastosowanie dekompozycji spektralnej do identyfikacji cienkich warstw.



**INSTYTUT NAFTY I GAZU**

ul. Lubicz 25A, 31-503 Kraków  
 tel.: +48 12 421 00 33 fax: +48 12 430 38 85  
 www.inig.pl office@inig.pl

KRS 0000075478, REGON 000023136, NIP 675-000-12-77