EWA KAWALEC-LATAŁA, BARBARA KORYTOWSKA

Międzyresortowy Instytut Geofizyki AGH, Kraków

TRASY PSEUDOIMPEDANCJI AKUSTYCZNEJ DLA RÓŻNYCH MODELI BUDOWY SEJSMOGEOLOGICZNEJ OŚRODKÓW SKALNYCH

UKD 550.834

Zastosowanie metody estymacji oporu akustycznego na podstawie sejsmicznych pomiarów powierzchniowych zyskało w ostatnich latach dużą popularność. Wynika to z rozszerzenia zakresu interpretacji danych sejsmicznych, która nie ogranicza się już tylko, jak to miało miejsce pierwotnie, do interpretacji strukturalnej, ale rozwinęła się w kierunku śledzenia zmian stratygraficzno-litologicznych. Opór akustyczny (iloczyn gęstości i prędkości fali $\rho \cdot v$) jest jedną z podstawowych cech charakteryzujących fizyczne własności skały. Jej śledzenie dostarcza więc ważnych informacji zarówno o charakterze skał jak i o zmianach w litologii.

Rozwój tej metody stratygraficzno-litologicznej identyfikacji, zwanej powszechnie metodą „sejslog", jest konsekwencją rozwoju metod polegających na szczegółowym badaniu amplitud, wśród których najpopularniejsze są techniki stosowane do bezpośrednich poszukiwań węglowodorów. We wszystkich metodach opartych na interpretacji amplitud rejestrowanych sygnałów, poważnym źródłem błędów są trudności związane z wiarygodnym odtworzeniem prawdziwych amplitud. Na wielkość amplitudy ma wpływ wiele czynników (3): dywergencja sferyczna, selektywna absorpcja częstotliwości, zmiany wartości współczynników odbicia, zmiany miąższości warstw, odbicia wielokrotne, straty związane z transmisją, tłumienie. W związku z tym słuszne jest nie ograniczanie się do samej obserwacji amplitudy, ale wyodrębnienie z tras sejsmicznych współczynników odbicia w celu obliczenia sekcji oporu akustycznego. Otrzymane tą drogą trasy oporu akustycznego są nazywane trasami pseudooporu akustycznego. Przykłady zastosowania metody „sejslog" do interpretacji sejsmicznych rejestracji polowych są prezentowane w wielu pracach (1, 5, 7, 8).

Stosowanie metody „sejslog" w praktyce napotyka na wiele ograniczeń. Sama idea metody, jako operacji odwrotnej do liczenia sejsmogramów syntetycznych, jest prosta i teoretycznie uzasadniona (4, 6). Główne trudności występują na etapie jej realizacji, gdyż z konieczności stosuje się wiele uproszczeń, wynikających z naturalnych ograniczeń. Do najważniejszych należą:

1) ograniczony zakres częstotliwości rejestrowanej trasy sejsmicznej związany z tym brak części informacji zawartej zarówno w składowych o niskich jak i wysokich częstotliwościach,

2) przybliżenie trasy współczynników odbicia odpowiednio przetworzoną trasą sejsmiczną,

3) obliczanie oporu akustycznego według algorytmów opracowanych przy założeniu normalnego padania promienia sejsmicznego na granice odbijające,

4) odbicie wielokrotne i szum.

Teoretyczną trasę sejsmiczną można przedstawić jako splot trasy współczynników odbicia z sygnałem sejsmicznym:

$$x(t) = r(t) \cdot w(t) \qquad [1]$$

gdzie: $x(t)$ – trasa sejsmiczna
$r(t)$ – trasa współczynników odbicia
$w(t)$ – sygnał

Po przedstawieniu zależności [1] w dziedzinie częstotliwości:

$$X(\omega) = R(\omega) \cdot W(\omega)$$

gdzie dużymi literami oznaczono transformaty Fouriera odpowiednich wielkości, widać że splot trasy współczynników odbicia z sygnałem sejsmicznym o ograniczonym widmie amplitudowym powoduje zawsze ograniczenie zakresu częstotliwości trasy sejsmicznej do szerokości widma sygnału. W praktyce szerokość widma rzeczywistej trasy sejsmicznej jest ograniczona przez zakres częstotliwości sejsmicznych rejestracji powierzchniowych (ok. 10–70 Hz). Syntetyczne profilowanie twardości akustycznej, otrzymane poprzez inwersję sejsmicznej sekcji czasowej, ma ten sam zakres częstotliwości, co wyjściowa sekcja. Jest więc w najlepszym razie jedynie aproksymacją rzeczywistego profilowania akustycznego po filtracji pozostawiającej analogiczny jak na sekcji czasowej zakres częstotliwości.

Ocena wpływu zakłóceń powodowanych przez refleksy wielokrotne i szum jest bardzo trudna i niejednoznaczna ze względu na nieliniowy charakter transformacji trasy sejsmicznej w procesie obliczania oporu akustycznego. Wszystkie refleksy wielokrotne powinny być w miarę możności usunięte podczas wstępnego przetwarzania trasy. Jednak, jak wynika z analizy przeprowadzonej dla modeli testowych, wpływ refleksów wielokrotnych na charakter tras pseudooporu akustycznego jest nieznaczny w przypadku, jeśli pojawiają się one poza zakresem czasu rejestracji sygnałów użytecznych. Zbyt mały stosunek sygnału do zakłóceń może w pewnych przypadkach uniemożliwić interpretację tras aproksymowanego oporu akustycznego. Ocena wiarygodności tras pseudooporu akustycznego musi być przeprowadzona indywidualnie dla każdego profilu.

Dla zilustrowania skuteczności metody „sejslog" w zależności od budowy sejsmologicznej ośrodka obliczono trasy pseudooporu akustycznego dla różnych wariantów tejże budowy. Ograniczono się do trzech zasadniczych typów ośrodka:

1) model ośrodka składający się z warstw o dużej

miąższości, wzrastających prędkościach warstwowych oraz niewielkich współczynnikach odbicia,

2) model ośrodka składający się z warstw o dużej miąższości, zawierający warstwy o obniżonej prędkości i odpowiednio większych kontrastach oporu akustycznego,

3) modele ośrodka zawierające cienkie wkładki o obniżonej prędkości warstwowej.

Miąższość niskoprędkościowych cienkich warstw dla kolejnych modeli trzeciej grupy wynosiła odpowiednio 5 m i 3 m. Trasy pseudo-oporu akustycznego obliczono przy założeniu stałej gęstości warstw oraz przy założeniu zróżnicowania gęstości warstw, przyjmując dla warstw cienkich $\rho = 1{,}4$ g/cm^3, a dla skał otaczających $\rho = 2{,}5$ g/cm^3. Modele o zróżnicowanej gęstości charakteryzowały się dużymi kontrastami twardości akustycznej i stanowiły pewną aproksymację ośrodków zawierających warstwy węglowe. Obliczone dla nich trasy pseudooporu akustycznego dostarczają informacji o wiarygodności procedury „sejslog" w przypadku dużych współczynników odbicia, charakterystycznych dla warunków występowania złóż węgla.

Dla przyjętych modeli sejsmogeologicznych generowano sejsmogramy syntetyczne jako wynik splotu trasy współczynników odbicia z sygnałem. We wszystkich modelowaniach stosowano sygnały Puzyriewa:

$$s(t) = \exp(-\beta^2 \cdot t^2) \cdot \sin(2\Pi f_o t \pm \Phi_o), \quad \Phi_o = 0$$

gdzie: f_o — częstotliwość dominująca
β — współczynnik tłumienia
Φ_o — faza początkowa
t — czas

Przyjęto dwa sygnały o takich samych parametrach: $f_o = 40$ Hz, $\Phi_o = 0$ oraz różnych współczynnikach tłumienia $\beta_1 = 25$ Hz i $\beta_2 = 60$ Hz. Przy tak dobranych parametrach widma amplitudowe sygnały obejmowały typowe częstotliwości sejsmiczne, różniły się jednak znacznie szerokością. Kształty stosowanych sygnałów i odpowiadające im widma amplitudowe przedstawione są na ryc. 1 i 2.

Wygenerowana syntetyczna trasa sejsmiczna najogólniej odpowiada trasie rzeczywistej, zarejestrowanej przy normalnym padaniu fali sejsmicznej na granicę odbijającą, po przetworzeniu mającym na celu odtworzenie prawdziwych amplitud. Taka trasa po poddaniu jej dekonwolucji stanowi aproksymację trasy współczynników odbicia. Obliczenie na jej podstawie trasy pseudooporu akustycznego, może być przeprowadzone według algorytmu opartego na ciągłym lub dyskretnym modelu ośrodka (2).

W naszym przypadku do dekonwolucji tras syntetycznych wybrano metodę dekonwolucji predykcyjnej. Sejsmogramy syntetyczne po dekonwolucji były normowane do maksymalnej wartości współczynnika odbicia dla danego modelu. Trasy pseudooporu akustycznego obliczono według wzoru wyprowadzonego dla ciągłego modelu ośrodka:

$$z_{k+1} = z_k \exp(2 \cdot r_k), \quad k = 1, 2, \ldots \qquad [2]$$

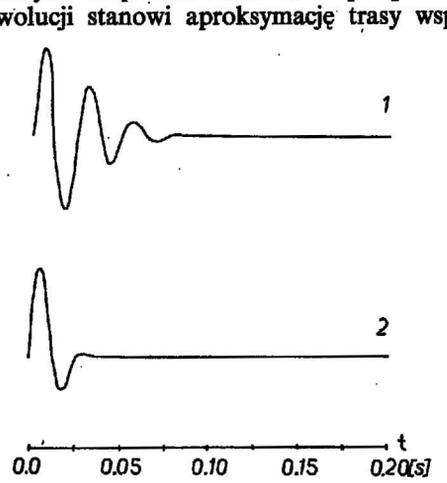
oraz według wzoru przybliżonego, będącego wersją logarytmiczną [2]:

$$z_k = z_1 \sum_{j=1}^{k-1} r_j \qquad [3]$$

Decyzja o obliczaniu tras pseudoimpedancji akustycznej według algorytmu opartego na ciągłym modelu ośrodka była wynikiem analizy dokładności obu typów algorytmów. Uwzględniono fakt, że modele należące do grupy trzeciej, zawierające niskoprędkościowe wkładki o wyraźnie obniżonej gęstości, charakteryzują się relatywnie wysokimi współczynnikami odbicia. W takiej sytuacji dokładniejsze wyniki otrzymuje się stosując algorytm bazujący na ciągłym modelu ośrodka skalnego.

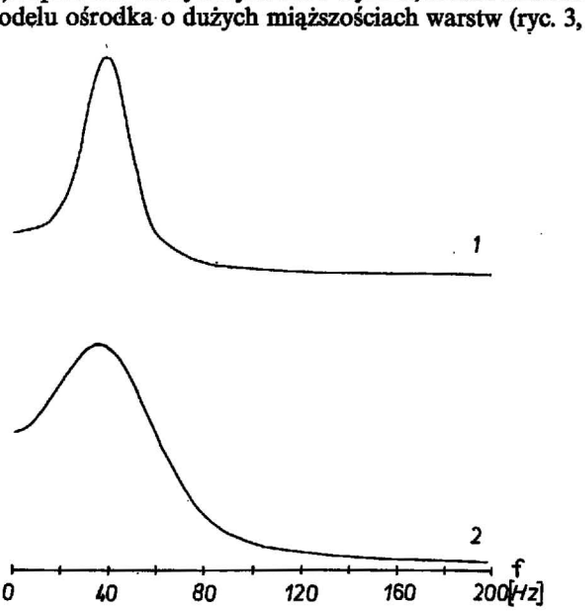
Modele sejsmologiczne, odpowiadające im sejsmogramy syntetyczne i trasy pseudooporu akustycznego dla kolejnych modeli zostały przedstawione na ryc. 3—10.

Jakość stosowanego sygnału sejsmicznego wyraźnie odzwierciedla się w jakości sejsmogramu syntetycznego. Zastosowanie dekonwolucji predykcyjnej w znacznym stopniu niweluje te różnice, co w konsekwencji powoduje porównywalną jakość tras pseudooporu akustycznego, otrzymanych w wyniku inwersji tras po dekonwolucji. Dla zilustrowania wpływu szerokości widma sygnału na charakter sejsmogramu syntetycznego i tras pseudooporu akustycznego dla modelu I i VI przedstawiono wyniki modelowania dla obu sygnałów sejsmicznych (ryc. 3, 4, 9, 10). Z przedstawionych rysunków wynika, że zarówno dla modelu ośrodka o dużych miąższościach warstw (ryc. 3,



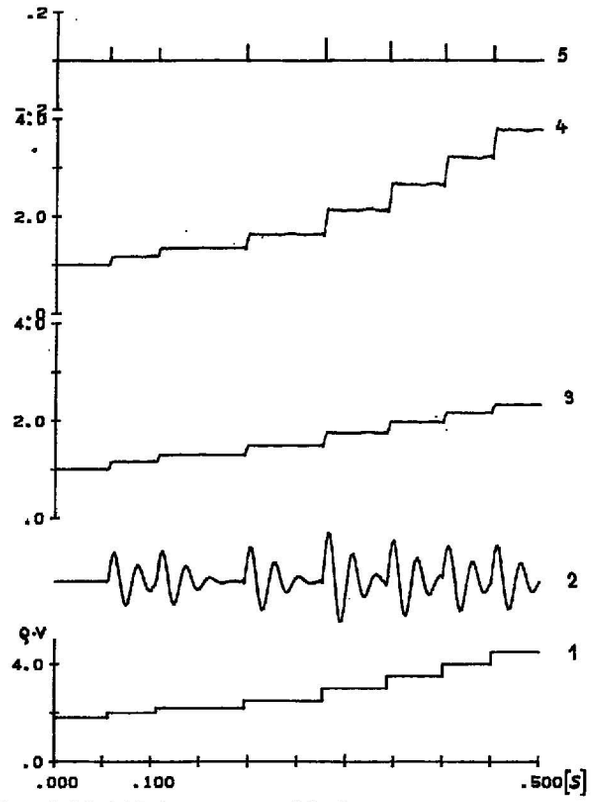
Ryc. 1. Sygnały Puzyriewa: 1 — $f_o = 40$ Hz, $\beta = 25$, 2 — $f_o = 40$ Hz, $\beta = 60$

Fig. 1. Puzyriev wavelets: 1 — $f_o = 40$ Hz, $\beta = 25$, 2 — $f_o = 40$ Hz, $\beta = 60$



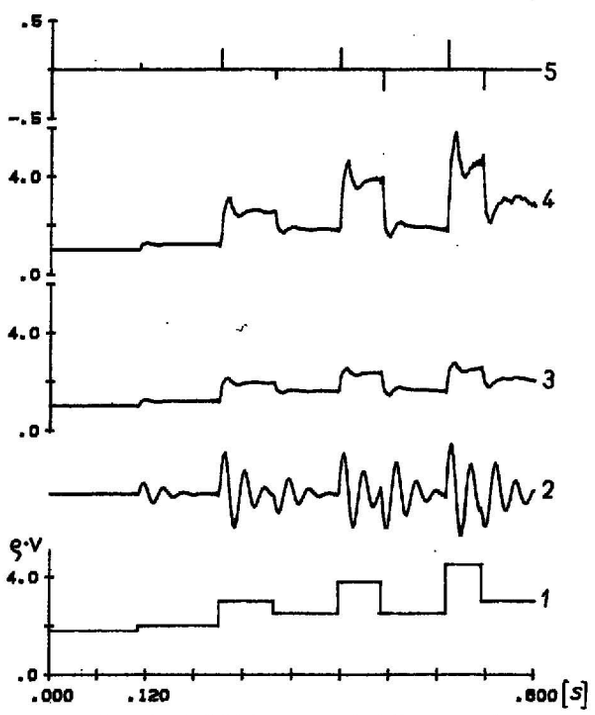
Ryc. 2. Widma amplitudowe: 1 — sygnału 1, 2 — sygnału 2

Fig. 2. Amplitude spectrum: 1 — of the wavelet 1, 2 — of the wavelet 2



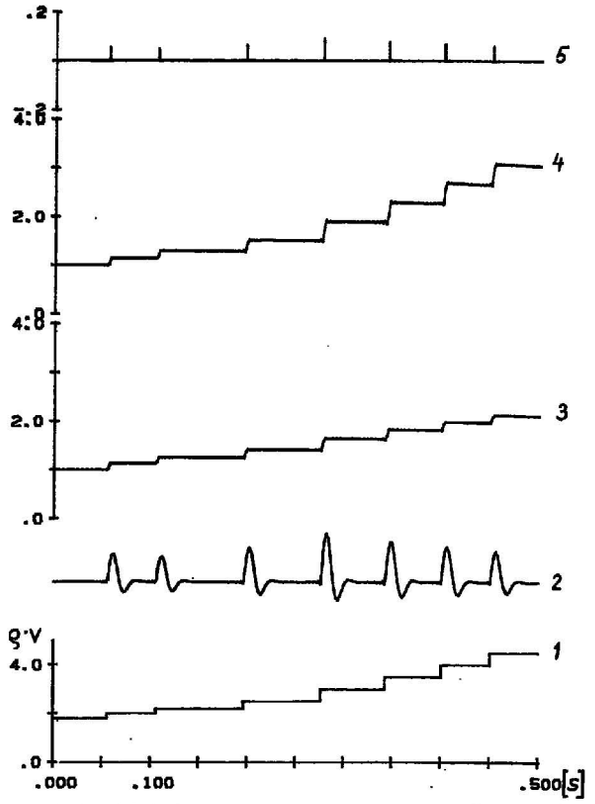
Ryc. 3. Model I: 1 — ρ · v z modelu, 2 — sejsmogram syntetyczny dla sygnału 1, 3 — trasa pseudooporu akustycznego wg wzoru [3], 4 — trasa pseudooporu akustycznego wg wzoru [2], 5 — wykres współczynników odbicia modelu

Fig. 3. Model I: 1 — ρ · v curve from the model, 2 — synthetic seismogram for the wavelet 1, 3 — pseudo-acoustic logs from the formula [3], 4 — pseudo-acoustic logs from the formula [2], 5 — graph of indices model's reflection



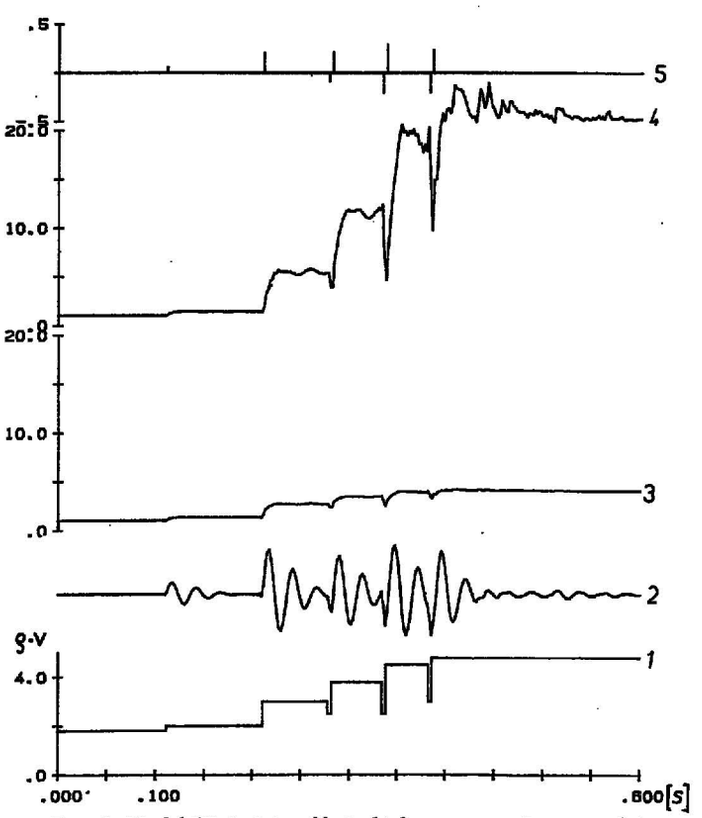
Ryc. 5. Model II; oznaczenia jak na ryc. 3

Fig. 5. Model II; description of symbols as in Fig. 3



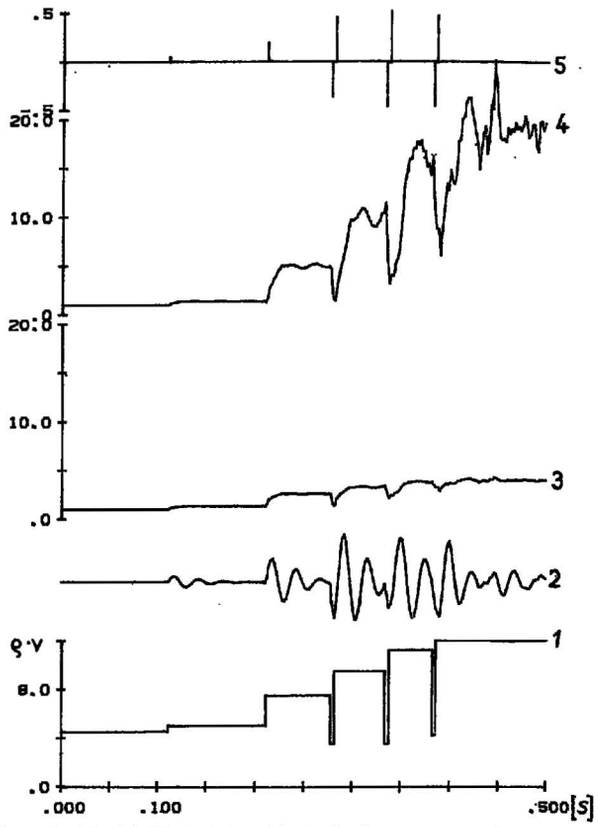
Ryc. 4. Model I: 2 — sejsmogram syntetyczny dla sygnału 2; pozostałe oznaczenia jak na ryc. 3

Fig. 4. Model I: 2 — synthetic seismogram for the wavelet 2; description of the other symbols as in Fig. 3



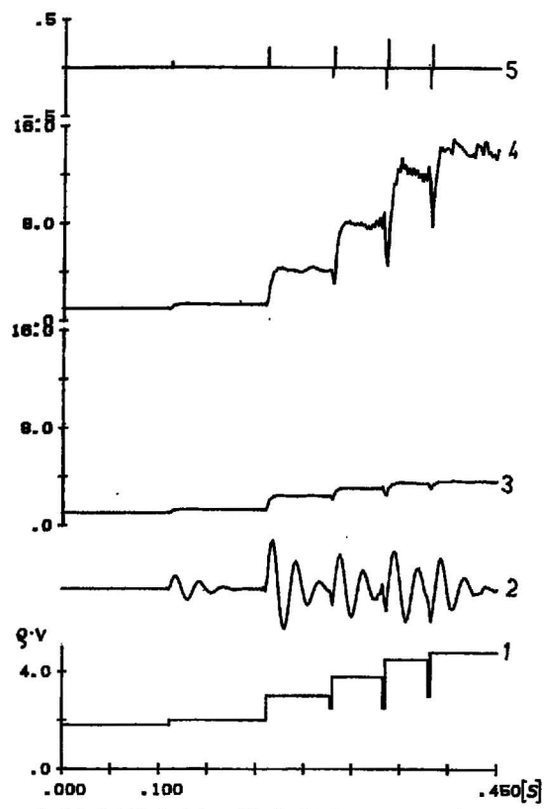
Ryc. 6. Model III (miąższość cienkich warstw = 5 m, ρ stałe); oznaczenia jak na ryc. 3

Fig. 6. Model III (thickness of thin layers = 5 m, ρ = constans); description of symbols as in Fig. 3



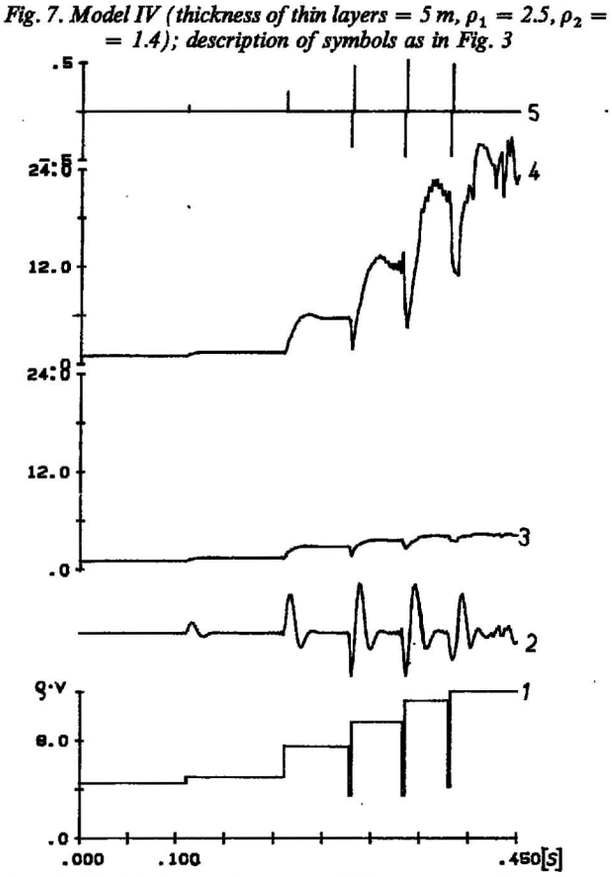
Ryc. 7. Model IV (miąższość cienkich warstw = 5 m, ρ_1 = = 2,5, ρ_2 = 1,4); oznaczenia jak na ryc. 3

Fig. 7. Model IV (thickness of thin layers = 5 m, ρ_1 = 2.5, ρ_2 = = 1.4); description of symbols as in Fig. 3



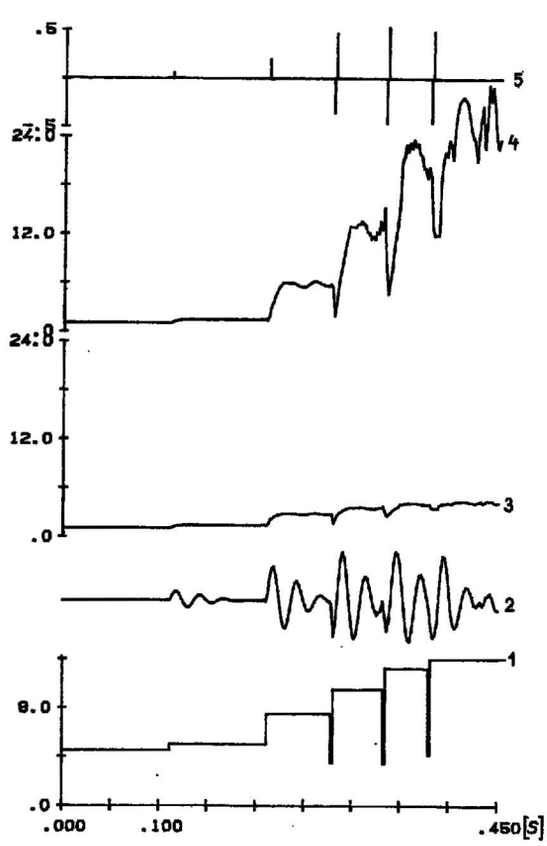
Ryc. 8. Model V (miąższość cienkich warstw = 3 m, ρ stałe); oznaczenia jak na ryc. 3

Fig. 8. Model V (thickness of thin layers = 3 m, ρ = constans); description of symbols as in Fig. 3



Ryc. 9. Model VI (miąższość cienkich warstw = 3 m, ρ_1 = = 2,5, ρ_2 = 1,4); oznaczenia jak na ryc. 3

Fig. 9. Model VI (thickness of thin layers = 3 m, ρ_1 = 2.5, ρ_2 = = 1.4); description of symbols as in Fig. 3



Ryc. 10. Model VI; oznaczenia jak na ryc. 4

Fig. 10. Model VI; description of the symbols as in Fig. 4

4), jak i modelu zawierającego cienkie wkładki (ryc. 9, 10) o silnie obniżonym oporze akustycznym generowane sejsmogramy syntetyczne są wyraźnie gorsze dla sygnału o węższym widmie.

Jest oczywiste, że to pogorszenie wyników związane z szerokością sygnału ujawniłoby się na trasach pseudooporu akustycznego, obliczonych w wyniku bezpośredniej inwersji sejsmogramów. Wykonanie właściwie dobranej dekonwolucji, w tym wypadku dekonwolucji predykcyjnej, uwalnia trasy pseudoimpedancji akustycznej od wpływu szerokości sygnału. Na przedstawionych trasach modelowych różnice te są praktycznie w całości wyeliminowane. Należy zdawać sobie jednak sprawę, że przy inwersji danych rzeczywistych, obarczonych wieloma zakłóceniami całkowite uwolnienie się zarówno od ujemnego wpływu wąskiego widma sygnału, jak i pozostałych czynników zakłócających, będzie niemożliwe. Dla wyrobienia sobie opinii o wiarygodności procedury „sejslog" w danym rejonie geologicznym celowe wydaje się przeprowadzenie prac modelowych, uwzględniających specyfikę budowy geologicznej danego rejonu, analogicznych do prezentowanych w niniejszej pracy.

Analiza wyników inwersji syntetycznej trasy sejsmicznej wskazuje na wyraźne odzwierciedlanie się granic refleksyjnych na trasach pseudooporu akustycznego, zarówno w sytuacji występowania dużych jak i małych kontrastów akustycznych. Dla modeli reprezentujących budowę geologiczną ośrodków o dużych miąższościach warstw otrzymuje się trasy pseudoimpedancji bardzo dobrze odzwierciedlające budowę geologiczną ośrodka. W sytuacji pojawienia się w modelu cienkich wkładek, czytelność trasy pseudoimpedancji akustycznej nieco pogarsza się, przy czym nie obserwuje się istotnego wpływu wielkości kontrastu akustycznego między cienkimi wkładkami a warstwami otaczającymi na jakość tras pseudooporu akustycznego.

Dobra rozdzielczość tras pseudooporu akustycznego, obliczonych dla modeli zawierających cienkie wkładki o obniżonej gęstości względem warstw otaczających, wskazuje na przydatność metody „sejslog", opracowanej pierwotnie dla poszukiwania złóż węglowodorów, do rozpoznawania budowy złóż węgla. Zmniejszenie niejednoznaczności rozwiązania zadania odwrotnego inwersji rzeczywistych tras sejsmicznych, można uzyskać poprzez rozszerzenie algorytmów inwersji o możliwość dowiązania rozwiązania do znanych *a priori* rzeczywistych wartości oporu akustycznego (jeśli dane takie są dostępne), oraz uzupełnienia informacji od strony niskich częstotliwości na podstawie prędkości składania.

LITERATURA

1. Becquey M., Lavergne M., Willm C. – Geophysics, 1979 vol. 44 nr 5 s. 1485–1501.
2. Berteussen K.A., Ursin B. – Ibidem, 1983 vol. 48 nr 10 s. 1351–1358.
3. O'Doherty R.F., Anstey N.A. – Geophysical Prospecting, 1971 vol. 19 s. 430–458.
4. Kunetz G. – Ibidem, 1963 vol. 11 nr 4 s. 409–422.
5. Lavergne M., Willm C. – Ibidem, 1977 vol. 25 nr 2 s. 232–250.
6. Lindseth R.O. – J. Canad. Wall Logging Soc., 1972 vol. 5 s. 13–26.
7. Lindseth R.O. – Oil and Gas J., 1976 vol. 74 nr 43 s. 67–71.
8. Lindseth R.O. – Geophysics, 1979 vol. 44 nr 1 s. 3–26.

SUMMARY

The factors, limiting an usage of "sejslog" method and effecting considerably on quality and credibility of calculated pseudo-impedence logs were discussed here. The phenomena of limited frequency band of entered signal was regarded in synthetic seismograms, using signals of broad and narrow amplitude spectrum. The pseudo-impedence logs were calculated for models of various types of seismic structure of rock buildups. The results were illustrated on figures, where such features as: curve $\rho \cdot v$ (estimated on model parameters), synthetic seismogram, pseudo-impedence logs as well as curve of reflection coefficients were drown separately for any regarded structural model.

Translated by the author

РЕЗЮМЕ

В статье описаны факторы ограничивающие применение метода „сейслог", которые оказывают существенное влияние на качество и достоверность расчитанных трасс акустического псевдо-сопротивления. Особенное внимание обращено на ограниченную полосу частот регистрированного сигнала и учтено этот факт генерируя комплексные сейсмограммы для сигналов с широким и узким амплитудными спектрами. Трассы акустического псевдо-сопротивления расчитаны для моделей, представляющих разные типы сейсмологического строения скальной среды. Результаты представлены в форме рисунков, на которых составлены: кривая $\rho \cdot v$ расчитанная из параметров модели, комплексная сейсмограмма, трассы акустического псевдо-сопротивления, а также кривая коэффициентов отражения, отдельно для каждой модели.