ZYGMUNT ŚLIWIŃSKI, ZBIGNIEW SOJA
Wydział Geofizyki P.P.P.N.

PRAKTYCZNA METODA KONSTRUKCJI SEJSMICZNYCH PRZEKROJÓW REFLEKSYJNYCH

Konstrukcja sejsmicznych granic odbijających często wymaga stosowania metodyki interpretacji pozwalającej na uwzględnianie pionowego i poziomego gradientu prędkości. Wpływ gradientu pionowego jest szczególnie ważny przy interpretacji dużych upadów. Trzeba jednak wyraźnie podkreślić, że w wielu przypadkach dla poprawnej lokalizacji granic refleksyjnych niezbędne jest wprowadzenie do obliczeń i gradientu poziomego. Dużą elastycznością pod względem możliwości uwzględniania zmian prędkości w pionie i poziomie charakteryzuje się interpretacja bazująca na średniej prędkości.

Przegląd metod średnich prędkości, będących u nas w zastosowaniu, wypada niezbyt zadowalająco.

Sposób stycznej (t_0) i metoda łuków w modyfikacji Czaszczyna nie powinny być używane przy upadach przekraczających 20°, gdyż powodują przesunięcia elementów odbijających w kierunku do środka struktury i zniekształcają upady. Nie wdając się w analizę tego zjawiska, które jest szczegółowo omówione w podręczniku Puzyriewa (2), trzeba zauważyć, że wspomniane błędy wynikają z lokalizacji punktu odbicia w odległości $h = \frac{\overline{V}_{(t_0)} t_0}{2}$, prostopadłej do wykreślonej granicy. Prędkość średnia w tych sposobach przyporządkowana jest czasowi t_0, więc odpowiada głębokości minimum izochrony. Wraz ze wzrostem upadu poważnie rośnie błąd w lokalizacji granicy odbijającej.

Stosowana u nas dla stromych struktur metoda Rice'a (3) też nie daje zadowalających wyników. Niewątpliwą jej zaletą jest łatwość operowania pionowym i poziomym gradientem prędkości, ale jak wynika z teorii metody i praktycznych doświadczeń, obraz wyinterpretowanej tym sposobem struktury jest przy większych upadach znacznie spłaszczony. Ponadto na stromych strukturach, wskutek zaniku horyzontów ciągłych, jesteśmy często zmuszeni wykreślać refleksy pojedyncze a nawet wykorzystywać hodografy jednostronne, co wymaga już wprowadzenia uzupełnień do sposobu Rice'a i komplikuje go.

Poniżej przedstawiona jest opracowana przez autorów metoda interpretacji fal odbitych, która łączy w sobie zadowalającą dokładność z zaletą szybkiej i prostej konstrukcji przekrojów głębokościowych. Została ona opracowana w paru modyfikacjach, które przystosowane są do interpretacji w zależności od występujących upadów i zmian prędkości w pionie i poziomie.

Podstawą konstrukcji, na której opiera się metoda, jest przekształcanie hodografów refleksyjnych związanych w punktach wzajemnych, hodografów pojedynczych a nawet jednostronnych, w przybliżone linie t_0. Wspólny też dla wszystkich modyfikacji jest sposób wyznaczania kąta wynurzenia α. Kąt α i odległość h od PS do punktu odbicia są współrzędnymi biegunowymi punktów odbicia, które określa się z czasów refleksów, stosując zależnie od typu rozwiązywanego zagadnienia odpowiednią prędkość średnią do obliczania h.

Położenie punktów odbicia przy wykorzystaniu czasów t_0 w punktach strzałowych, z założeniem średnich prędkości, określają następujące wzory:

$$X = \overline{V}_{(z,x)} \frac{t_0}{2} \sin\alpha \tag{1}$$

$$Z = \overline{V}_{(z,x)} \frac{t_0}{2} \cos\alpha \tag{2}$$

$$\alpha = \arcsin \overline{V}_{(z,x)} \left(\frac{dt}{dx}\right)_{x=x_{ps}} \tag{3}$$

$$h = \overline{V}_{(z,x)} \frac{t_0}{2} \tag{4}$$

Posługiwanie się powyższymi formułami nastręcza duże trudności. Jeżeli bowiem czasy możemy mierzyć dokładnie, to prędkość średnia jako funkcja współrzędnych punktów odbicia (x, z) nie jest nam a priori wiadoma. Gdy mamy tylko pionowy gradient prędkości, znane są rozwiązania tego problemu za pomocą interpretacji diagramami promieniowymi lub metodą łuków w ścisłym wariancie Puzyriewa (2). Obecność gradientu poziomego ogromnie komplikuje obliczenia i praktycznie uniemożliwia stosowanie wzorów (1—4).

Jak już wspomniano, opracowana przez autorów metoda wykorzystuje do interpretacji głębokościowej czasy t_0. Przekształcanie hodografów pojedynczych refleksów w przybliżone linie t_0 wykonuje się przez odjęcie (pod upad) lub dodanie (z upadem) do czasu t_0, odczytanego w punkcie strzałowym, wielkości $\frac{\Delta t}{2} = \frac{t_l - t_p}{2}$; t_l i t_p — czasy lewy i prawy symetrycznego hodografu względem PS na rozstawie Δx (ryc. 1a). W ten sposób otrzymuje się przybliżone czasy t_{ox} w punktach położonych w odległościach $\frac{\Delta x}{4}$ po obu stronach PS. Wielkość interwału Δx nie powinna być zbyt duża, aby stosunek $\frac{\Delta t}{\Delta x}$ nie różnił się zbytnio od wartości $\frac{dt}{dx}$. Miara przybliżenia tego rodzaju operacji wynika wprost z geometrycznego rozważania stosunków, jakie powstają przy zamianie stycznej do hodografu w punkcie strzałowym, różnicą czasów $t_l - t_p$ na odcinku Δx.

Analitycznie sprawdzić to można posługując się wzorem na linię $t_0 : \Delta t_0 = \frac{t_x^2 - t_n^2}{t_0}$, gdzie t_x — czas hodografu w dowolnym punkcie x, t_n — czas hodografu normalnego dla tego punktu.

Jak łatwo stwierdzić, wielkość popełnianego błędu określona jest nie uwzględnieniem mało znaczącego, przy niedużych interwałach Δx, czynnika $\frac{t_l - t_p}{2 t_0}$ w wyrażeniu na kąt α. Przyporządkowanie czasów $t_{(o,x)} : t_o + \frac{\Delta t}{2}$ i $t_o - \frac{\Delta t}{2}$ punktom położonym w od-

ległościach $\frac{\Delta x}{4}$ po obu stronach PS, powoduje ponadto pewne przemieszczenie elementów odbijających w kierunku upadu. Przesunięcia te są jednak z praktycznego punktu widzenia zaniedbywalne.

Hodografy jednostronne (połówki refleksów) przekształca się w przybliżone linie t_o w sposób analogiczny, z tym że trzeba uwzględniać dodatkowe poprawki na krzywiznę hodografu normalnego wg wzoru: $\delta t \approx \frac{x^2}{2 t_o \overline{V}^2_{(t_o)}}$. Na dokładność tej operacji wpływa przede wszystkim błąd w określaniu prędkości średniej.

Kąt wynurzenia czoła fali zdefiniowany jest ogólnie wzorem (3). Praktycznie do wyznaczenia kąta α z pojedynczego refleksu stosowany jest wzór przybliżony, w którym występuje prędkość jako funkcja czasu t_o, a gradient czasu $\frac{dt}{dx}$ w PS zastąpiony jest przyrostem czasu Δt na odcinku hodografu Δx

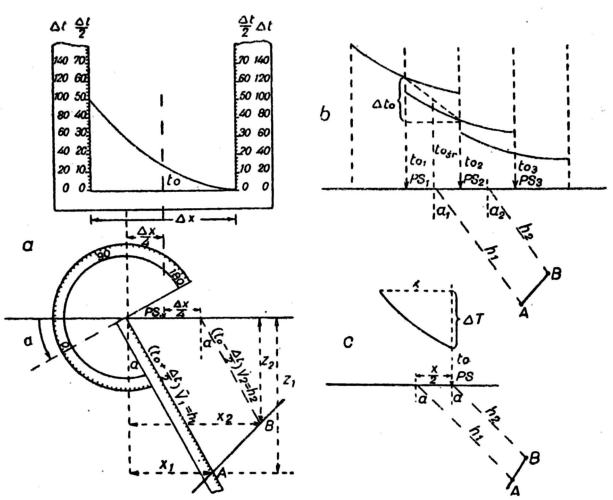
$$\alpha \approx \arcsin \overline{V}_{(t_o)} \frac{\Delta t}{\Delta x} \qquad (3')$$

Zamiana wyrażenia $\frac{dt}{dx}$ na $\frac{\Delta t}{\Delta x}$ pociąga za sobą błąd wynikający z nie uwzględnienia członu $\frac{t_1 + t_p}{2 t_o}$. Zaniedbanie tego członu przy bazach Δx nie przekraczających 500 m powoduje jednak tak małe odchylenia w określeniu kąta, że mogą być pomijane. Błąd ten dąży do zera z głębokością zalegania horyzontów odbijających.

Jeżeli refleksy są związane w punktach wzajemnych, Δt może być brane jako różnica odpowiednich czasów t_o w sąsiednich PS. Wówczas wzór na kąt α przedstawia się następująco:

$$\alpha \approx \arcsin \frac{1}{2} \overline{V}_{(t_{ośr})} \qquad (3'')$$

Prędkość średnia przyporządkowana jest czasowi $t_{ośr}$ (ryc. 1b).



Ryc. 1. Schemat konstrukcji sejsmicznej granicy odbijającej

a — w przypadku hodografu pojedynczego, b — w przypadku hodografów związanych w punktach wzajemnych (horyzont ciągły), c — w przypadku hodografu jednostronnego.

Fig. 1. Reflection plotting scheme.

a — in the case of a single hodograph only (no tie across the shot points), b — in the case of a tie across the shot points, c — in the case of a hodograph in one direction from the shot point only

Dla wszystkich formuł dotyczących kąta wynurzenia aktualne jest oczywiście założenie o płaskości granicy odbijającej na odcinku, na którym odczytuje się różnice czasów Δt.

Odnośnie do wprowadzenia do wzoru na kąt α prędkości średniej trzeba podkreślić, że dla struktur typu antyklinalnego w metodach prostoliniowych korzystnie jest operować prędkością średnią. Posługiwanie się we wzorze (3') wielkością $\overline{V} = f_{(t_o)}$ aczkolwiek jest postępowaniem nieścisłym, prowadzi w praktyce do uzyskiwania zadowalających rezultatów, co zostało sprawdzone na różnych założonych modelach prędkościowych.

Interpretacja głębokościowa może być prowadzona według różnych modyfikacji zależnie od występujących upadów i gradientu prędkości.

Uwzględnianie przy interpretacji gradientu pionowego prędkości jest ściśle związane z wielkością upadów. Przy upadach większych niż 10° wpływ zmian prędkości z głębokością powinien być brany pod uwagę. Warunek ten spełniają wszystkie poniżej przedstawione modyfikacje metody.

Modyfikacja I wykorzystuje prędkość średnią jako funkcję głębokości. Głównym dla niej wzorem obok aktualnych dla wszystkich modyfikacji formuł na kąt α (3') lub (3'') jest związek:

$$h = \frac{\overline{V}_{(Z_o)} \cdot t_{ox}}{2} \qquad (4^I)$$

gdzie

$$Z_o = h_o \cos\alpha, \; h_o = \frac{\overline{V}_{(t_{ox})} \cdot t_{ox}}{2}$$

Wskaźnik x przy czasie t_o określa przyporządkowanie czasów punktom, z których wystawiane są odległości h (ryc. 1).

W równaniu 4^I występuje prędkość jako funkcja głębokości Z_o. Postępowanie takie jest umotywowane pewną prawidłową współzależnością czynników h_o i $\cos\alpha$, według których oblicza się Z_o. Za duża prędkość $\overline{V}_{(t_o)}$ powoduje bowiem zwiększanie się h_o, a jednocześnie zmniejsza $\cos\alpha$. W efekcie prędkości $\overline{V}_{(Z_o)}$ w szerokim przedziale głębokości i kątów upadu niewiele różnią się od prędkości $\overline{V}_{(Z)}$. Ilustruje to rys. 8.

W modyfikacji II uwzględnia się prędkość w funkcji przybliżonego czasu pionowego $\overline{V}_{(\tau)}$. Wzór (4) przyjmuje wówczas postać:

$$h = \frac{\overline{V}_{(\tau)} \cdot t_{ox}}{2} \qquad (4^{II})$$

gdzie τ zdefiniowany jest wyrażeniem:

$$\tau = \frac{t_{ox}}{2} \cos\alpha$$

Dla zorientowania się w różnicy między wynikami, które uzyskuje się wg modyfikacji I i II, należy zdawać sobie sprawę z zależności, jakie istnieją między prędkościami średnimi a czasem pionowym τ i głębokością Z_o. Dla ośrodka z prędkością stałą w obu przypadkach mielibyśmy do czynienia z tą samą prędkością. Założenie pionowego gradientu prędkości powoduje, że dla danego czasu t_o prędkości $V(\tau)$ są mniejsze niż prędkości $\overline{V}(Z_o)$ (rys. 8), a tym samym element odbijający leży nieco płycej.

Porównując czas pionowy τ z czasem $\tau_o = \frac{Z_o}{\overline{V}_{(Z_o}}$ stwierdzić można, że $\tau \leqslant \tau_o$. Łatwo to sprawdzić ze stosunku tych wartości, który wynosi:

$$\frac{\tau_o}{\tau} = \frac{\overline{V}_{(t_o)}}{\overline{V}_{(Z_o)}} \quad \text{przy czym} \quad \overline{V}_{(t_o)} \geqslant \overline{V}_{(Z_o)}$$

Przy mniejszych upadach, jak też w rejonach, gdzie brak jest bliższych danych o prędkościach średnich, może być stosowana najprostsza modyfikacja (III), zdefiniowana znanymi wzorami z metody głębokości-przesunięć (3) i bardzo wygodna w praktyce. Podkreślić należy, że modyfikacja ta, jak to będzie wykazane niżej, zabezpiecza zadowalającą dokładność przy upadach do 30°, ale może być używana nawet przy upadach do 45°, jeżeli błędy powodowane przyjęciem $\overline{V} = f_{(t_o)}$ są zdecydowanie mniejsze od błędów mogących wyniknąć z tytułu słabego rozeznania prędkości. Prędkość $\overline{V}_{(t_o)}$ jest większa od prędkości $\overline{V}_{(Z_o)}$, a różnica ta zależy od kąta upadu. Zatem i odległość h od elementu odbijającego będzie wg modyfikacji III większa niż w sposobach poprzednich. Wzór (4) dla modyfikacji III przedstawia się następująco:

$$h = \frac{\overline{V}_{(t_{ox})} \cdot t_{ox}}{2} \qquad (4^{III})$$

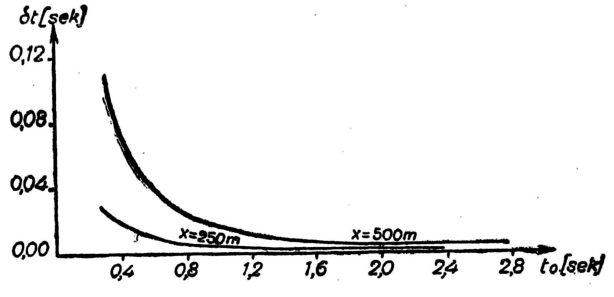
Ważną zaletą tej modyfikacji jest możliwość łatwego uwzględniania gradientu poziomego prędkości przez wykorzystanie rozwiniętych wykresów prędkości. Przy strukturach typu antyklinalnego, gdzie zazwyczaj obserwuje się wzrost prędkości w kierunku podnoszenia się warstw, przyjmowanie za dużej prędkości jako funkcji czasu t_o na otworze strzałowym do wyznaczania kąta α w pewnym stopniu kompensuje przyrost prędkości na odcinku X — X_{ps} (X — współrzędna punktu odbicia, X_{ps} — współrzędna w PS).

Technika kreślenia przekrojów głębokościowych we wszystkich modyfikacjach opiera się na wykorzystaniu prostych nomogramów. Dane wyjściowe do wyznaczania kąta α oraz odległości h, jakimi są czasy t_o i wartości Δt, odczytuje się albo z hodografów czy też przekrojów czasowych, albo wprost z sejsmogramów. W przypadku horyzontów ciągłych (refleksy związane w PS), gdy punkty strzałowe są położone blisko siebie i nie zachodzi obawa zniekształcenia wartości $\Delta t_o = t_{o1} - t_{o2}$ przez niepłaskość granicy odbijającej, kąt α oblicza się z czasu

$$t_{o\acute{s}r} = \frac{t_{o1} + t_{o2}}{2}$$

Jeżeli dysponujemy hodografami, czas $t_{o\acute{s}r}$ można odczytać w środku między PS_1 i PS_2 na linii łączącej t_{o1} i t_{o2} (ryc. 1b). Prędkość średnią do obliczenia kąta bierze się dla czasu $t_{o\acute{s}r}$.

Przy dużych odległościach między punktami strzałowymi, a także wobec stwierdzenia niepłaskości granic odbijających, kąty wynurzenia lepiej jest określić z pojedynczych refleksów, wykorzystując czasy t_o i $\Delta t = t_l - t_p$ na symetrycznych względem punktu strzałowego w rozstawach Δx.



Ryc. 2. Nomogram do obliczania poprawek na krzywiznę hodografu

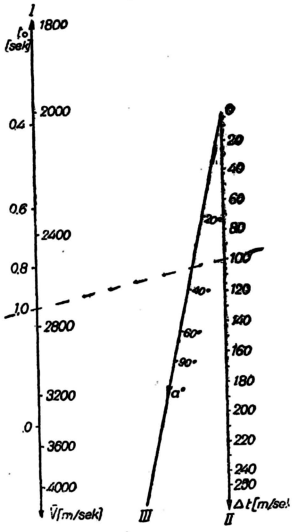
Fig. 2. Nomograph for curvature hodograph corrections.

Aby móc wyznaczyć kąt α z hodografów jednostronnych, trzeba mieć nomogram na krzywiznę hodografu normalnego skonstruowany wg zadanej krzywej prędkości i dla przyjętych odległości x (ryc. 2). Z nomogramu tego wyznacza się dla danych t_o i X poprawki δt, natomiast z hodografów odczytuje się różnicę czasów $\Delta T = t_x - t_o$ (znak ważny!) (ryc. 1c). Szukaną wartość uzyskuje się z różnicy

$$\frac{\Delta t}{2} = \Delta T - \delta t.$$

Prędkość średnią zarówno dla hodografów pojedynczych, jak i dla połówek refleksów przyporządkowuje się czasom t_o w PS. Różnice czasów z hodografów najwygodniej jest mierzyć sporządzoną do tego celu podziałką (ryc. 1a).

Dysponując danymi t_o i Δt wielkość kąta α odczytuje się z nomogramu skonstruowanego wg wzoru (3′). Przy posługiwaniu się wzorem (3″) należy operować wielkościami Δt o połowę mniejszymi. Wygodny w użyciu jest nomogram typu N (ryc. 3).



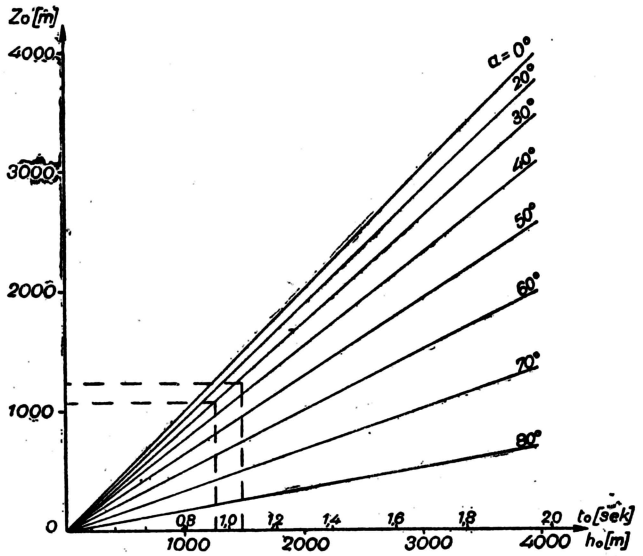
Ryc. 3. Nomogram do obliczania kąta α

Fig. 3. Nomograph for α angle.

W przypadku ogólnym drabinka I wyskalowana jest wartościami prędkości, drabinka II stosunkiem $\frac{\Delta t}{\Delta x}$ (opisane Δt, Δx = const.), a kąty α odczytuje się na skali III. Jeżeli interpretacja jest prowadzona bez uwzględnienia gradientu poziomego prędkości, to drabinka I może być wprost przeskalowana na czasy t_o dla danej krzywej prędkości średniej.

Odległości h wyznacza się w zależności od przyjętej modyfikacji. Jeżeli posługujemy się wzorem (4I), gdzie prędkość musi być określona jako funkcja głębokości, wymaga to uprzedniego obliczenia wartości Z_o. Służy do tego celu prosty nomogram siatkowy (ryc. 4), w którym na jednej osi zaznaczone są głębokości Z_o, a na drugiej odległości h_o. Te ostatnie korzystnie jest przeskalować wprost na czasy t_o odpowiednio do stosowanej krzywej prędkości średnich. Parametr α występuje w nomogramie jako rodzina prostych. Następnie dla danej wartości Z_o odczytuje się z krzywej $\overline{V}_{(z)}$ prędkość średnią, którą mnoży się przez właściwe t_o. Do tego celu można zastosować np. nomogram siatkowy jak na ryc. 5. Na osi rzędnych opisana jest głębokość, na osi odciętych czasy t_o, a pęk prostych odpowiada parametrowi prędkości. Nomogram taki, podobnie jak i nomogram N na kąt α, wygodnie jest mieć skonstruowany dla dwóch zakresów czasów, np. dla t_o do 2 sek i ponad 2 sek.

Podkreślić należy, że wszystkie omawiane nomogramy są w zasadzie uniwersalne, tzn. raz sporządzone nadają się w każdym rejonie, a co najwyżej można w nich dla uproszczenia przeskalowywać niektóre drabinki, jak np. $\overline{V}_{(t_o)}$, na t_o w nomogramie na kąt α czy też h_o na t_o w nomogramie na Z_o.



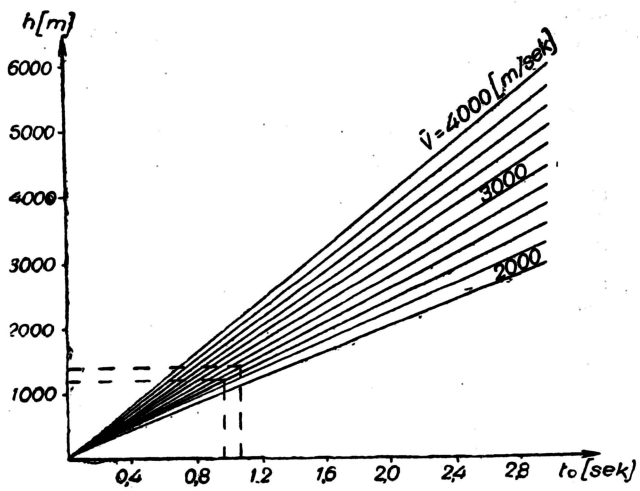
Ryc. 4. Nomogram do obliczania wartości Z_o

Fig. 4. Nomograph for Z_o coordinate.

Gdy operujemy wzorem (4^{II}), odpada czynność powtórnego odczytywania prędkości, nie oblicza się też odległości h, ale głębokość Z. Prędkość $\overline{V}_{(\tau)}$ może być bowiem wprost uwzględniona w nomogramie na głębokość Z (ryc. 6). Na osi odciętych wyznaczony jest czas t_o, a na osi rzędnych czas pionowy τ, który przeskalowuje się bezpośrednio na Z dla danego rozkładu prędkości. Parametr α przedstawia na nomogramie rodzinę prostych.

W modyfikacji III, jeżeli do interpretacji wykorzystuje się jedną krzywą $\overline{V}(t_o)$ wówczas do odmierzenia h służy linijka, której podziałka metryczna jest opisana wprost w czasach t_o. Interpretacja wg modyfikacji III, ale z uwzględnieniem gradientu poziomego prędkości, wymaga zastosowania do obliczenia h tego samego nomogramu co i przy modyfikacji I (ryc. 5).

Praktyczny tok postępowania przy interpretacji najlepiej zilustrować na przykładzie. W tym celu



Ryc. 5. Nomogram do obliczania odległości h

Fig. 5. Nomograph for h coordinate.

niech będzie dany hodograf refleksu pojedynczego (ryc. 1a), którego $\Delta t = 0{,}1$ sek, $t_o = 1{,}0$ sek, $\Delta x = 500$ m. Bazując na tych danych dla wszystkich trzech modyfikacji otrzymuje się:

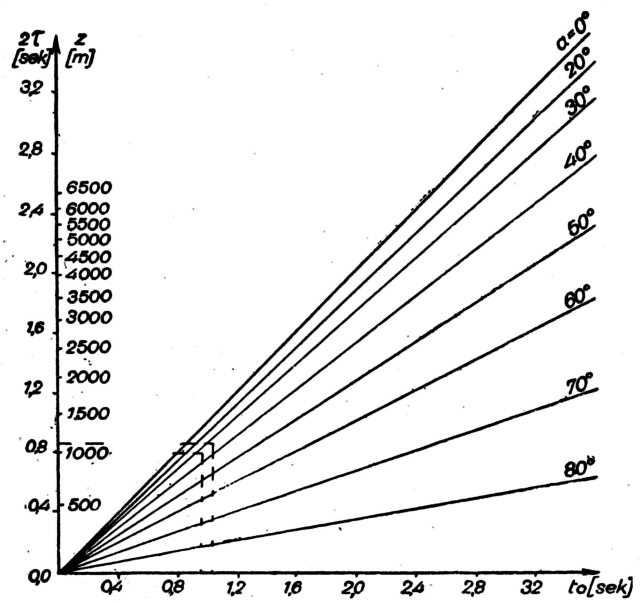
1. Kąt $\alpha = 33°$ z nomogramu ryc. 3.
2. Czasy $t_{ox} : t_o \frac{\Delta t}{2} = 1{,}05$ sek i $t_o - \frac{\Delta t}{2} = 0{,}95$ sek

Na hodografie tę operację przeprowadza się graficznie za pomocą kroczka.

Kąt $\alpha = 33°$ odkłada się kątomierzem z linijką w punktach położonych w odległości $\frac{\Delta x}{4} = 125$ m po obu stronach od PS. Kierunek odłożenia kąta α zależy od przesunięcia minimum hodografu (ryc. 1).

Jeżeli interpretację prowadzi się wg modyfikacji III bez gradientu poziomego $\overline{V}$, to odległość h odmierza się na linijce wyskalowanej w czasach t_o, zaznaczając punkty przy $t_o = 1{,}05$ sek i $t_o = 0{,}95$ sek. Odpowiada to $h_1 = 1465$ m i $h_2 = 1273$ m. Łącząc oba punkty (A, B) otrzymuje się odcinek granicy odbijającej (ryc. 1a).

Przy uwzględnianiu gradientu poziomego na pojedynczym refleksie prędkość do obliczenia kąta α bierze się z rozwiniętego wykresu prędkości dla czasu t_o w punkcie strzałowym. Wartości h czyta się z nomogramu (ryc. 5) dla czasów t_{ox} i prędkości im przyporządkowanych na rozwiniętym wykresie. W danym przykładzie prędkości odpowiadałyby czasom 1,05 sek i 0,95 sek. w punktach położonych w odległości 125 m po obu stronach PS.



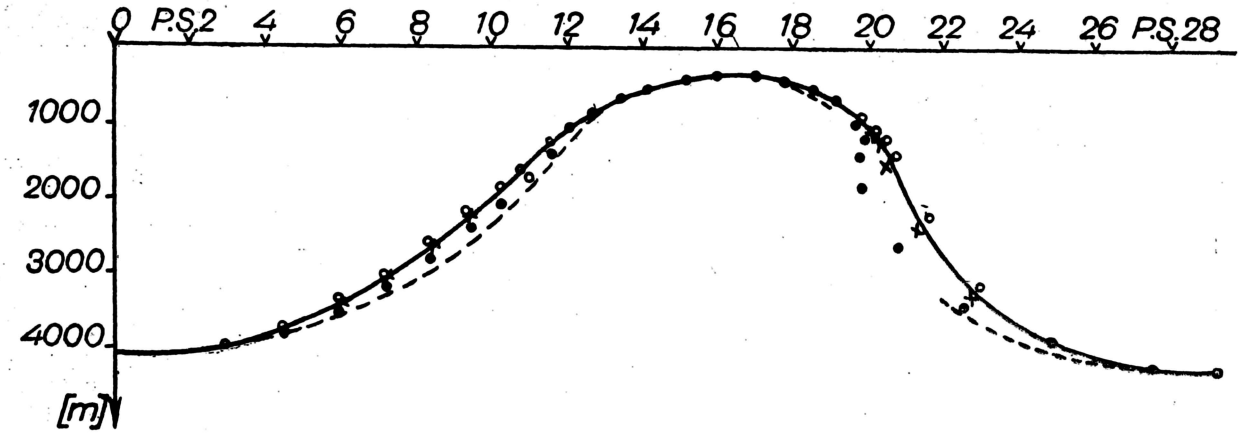
Ryc. 6. Nomogram do obliczania czasu pionowego τ i głębokości Z.

Fig. 6. Nomograph for vertical time τ and vertical depths Z.

Stosując modyfikację II z nomogramu (ryc. 6) otrzymuje się $Z_1 = 1145$ m i $Z_2 = 1005$ m. Położenie punktu odbicia znajduje się w miejscu, gdzie linijka kątomierza odcina głębokość Z (ryc. 1a). Punkty A i B wyznaczają granicę.

Interpretacja sposobem I wymaga dodatkowo odczytania:

1. $Z_{o1} = 1230$ m, $Z_{o2} = 1065$ m z nomogramu (ryc. 4)
2. $\overline{V}_{(Z_{o1})} = 2650$ m/sek, $\overline{V}_{(Z_{o2})} = 2550$ m/sek z krzywej $V_{(Z)}$
3. $h_1 = 1390$ m i $h_2 = 1210$ m z nomogramu (ryc. 5).



Ryc. 7. Porównanie sposobów interpretacji na modelu struktur

——— model struktury — metoda krzywoliniowa (V = = 1900 + 1,38 Z), ×××× — modyfikacja I, ○○○○ — modyfikacja II, ●●●●● — modyfikacja III, ——————— sposób stycznej.

Fig. 7. Comparison of different interpretation methods on structure model.

——— structure model — curved ray method (V = 1900 + + 1,38 Z), x x x — modification I, ○ ○ ○ — modification II, ● ● ● — modification III, ——————— tangent to arch method

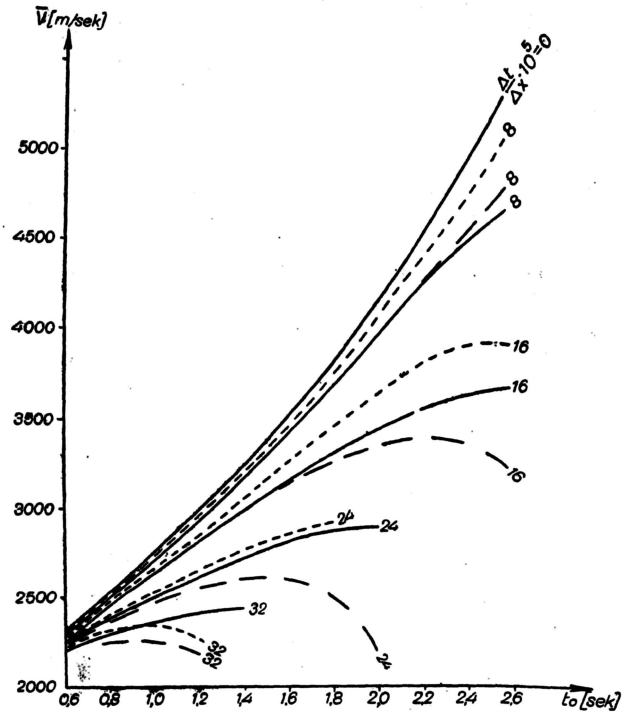
Technika nanoszenia punktu odbicia kątomierzem z linijką jest podobna jak w modyfikacji III, z tym że linijka ma podziałkę metryczną.

We wszystkich modyfikacjach przy interpretacji refleksów związanych w PS, jeżeli posługujemy się czasem $t_{o\,śr}$, odległość h wyznacza się z tych czasów, a otrzymane punkty odbicia łączy się w linię ciągłą zgodnie z ogólnym charakterem upadów (ryc. 1b). Gdy dane są wyłącznie dwie związane połówki hodografów, h oblicza się z czasów t_{o1} i t_{o2} w punktach strzałowych. Przy połówkach refleksów (ryc. 1c) otrzymuje się dwie wartości h: jedną w punkcie strzałowym, a drugą w połowie długości hodografu branego do obliczeń.

Możliwości zastosowania metody ilustrują przytoczone poniżej porównania wykonane na modelach struktur oraz na pojedynczych refleksach. Ryc. 7 przedstawia asymetryczną strukturę antyklinalną o amplitudzie ok. 4000 m i upadach dochodzących do 70°. Model policzony jest przy założeniu liniowego wzrostu prędkości z głębokością wg równania V 1900 + 1,38 Z. Celowo został przyjęty tak duży gradient prędkości (ryc. 8), gdyż na skrajnym przykładzie można lepiej przeprowadzić porównania. Różnice między poszczególnymi metodami maleją bowiem wraz ze zmniejszaniem się gradientu prędkości. Na marginesie można zauważyć, że przyjęty rozkład prędkości odpowiada w przybliżeniu prędkościom w niecce łódzko-szczecińskiej do głębokości ok. 1000—1500 m. Niżej faktyczny gradient prędkości jest tam znacznie mniejszy niż w założonym przykładzie.

Najlepsze odwzorowanie modelu struktury, jak widać z ryc. 7, uzyskano wg modyfikacji I. Z wyjątkiem odcinka największych upadów, gdzie horyzont przebiega nieco głębiej, współrzędne punktów odbicia pokrywają się idealnie z granicą teoretyczną. Dobre przybliżenie daje również modyfikacja II, z tym że elementy odbijające układają się tu nieco za płytko. Modyfikacja III daje granicę za głęboką, a po stromej stronie struktury pod PS 20 w ogóle traci sens. Horyzont wykreślony dla porównania metodą stycznej (t_o) najbardziej odbiega od modelu. Po stromej stronie struktury nie ma już możliwości interpretacji tym sposobem, gdyż wszystkie łuki przecinają się w tym samym miejscu.

Ryc. 9a, b, c przedstawiają dwa związane w punktach wzajemnych refleksy wykreślone wg trzech modyfikacji referowanej metody i sposobem łuków Czaszczyna na tle modelu (V 1990 + 1,38 Z). Podobnie jak i w przypadku omawianej struktury obserwuje się doskonałą zgodność interpretacji wg modyfikacji I z teoretyczną granicą, nieco płytsze ułożenie refleksów przy modyfikacji II oraz głębsze wg modyfikacji III. We wszystkich trzech sposobach praktycznie nie ma przesunięć poziomych w przeciwieństwie do danych, które uzyskano metodą łuków (ryc. 9a) czy też stycznej (ryc. 9b), gdzie przemieszczenia elementów odbijających zarówno w pionie, jak i poziomie są bardzo duże. Szczególnie interesujące jest porównanie przedstawione na ryc. 9c, gdzie te same dwa związane refleksy interpretowane są jako cztery niezależne hodografy jednostronne. W wyniku zastosowania modyfikacji I, II i III ułożenie refleksów jest prawie identyczne jak na rycinach 9a i 9b, natomiast elementy odbijające wykreślone sposobem Czaszczyna ułożyły się chaotycznie i zupełnie odmiennie niż na poprzednich rycinach i na modelu.



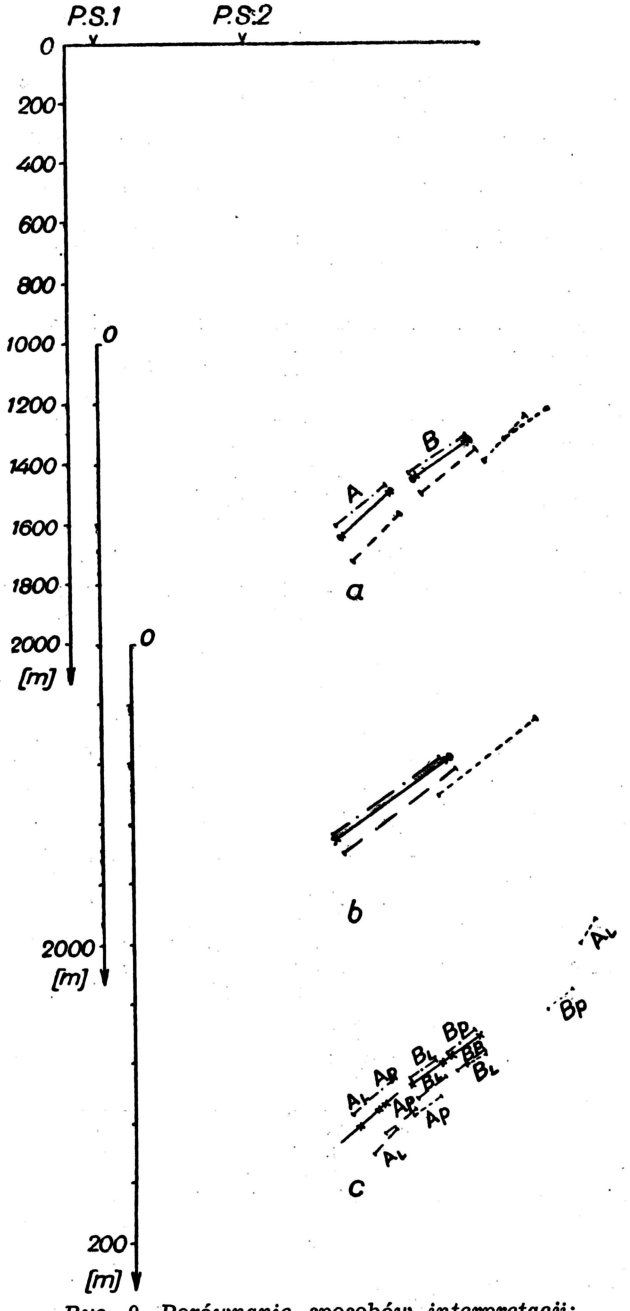
Rys. 8. Wykresy prędkości średniej

$\overline{V} = f_{(Z)}$, ———— $\overline{V} = f_{(Z_o)}$, ———— $\overline{V} = f_{(t)}$

Fig. 8. Average velocity graphs.

Przykład zastosowania modyfikacji III, w przypadku gradientu poziomego prędkości, demonstruje ryc. 10. Obserwuje się zadowalającą zgodność między modelem struktury a granicą interpretowaną za pomocą rozwiniętego wykresu prędkości. Ma tu miejsce wspomniana przy omawianiu modyfikacji III kompensacja prędkości.

Dla potwierdzenia i w pewnym stopniu uogólnienia informacji o dokładności metody sporządzono porównawcze wykresy współrzędnych biegunowych kąta α i odległości h do punktu odbicia (ryc. 11 i 12). Zostały one obliczone dla poszczególnych modyfikacji i modelu z przyjętym rozkładem prędkości $V = 1900 + 1{,}38\ Z$, w parametrycznej zależności od czasu t_o i stosunku $\frac{\Delta t}{\Delta x}$. Na wykresach kątów α



Ryc. 9. Porównanie sposobów interpretacji:
a — hodografu pojedynczego, b — hodografów związanych w punktach wzajemnych, c — hodografu jednostronnego.

Fig. 9. Comparison of different interpretation methods.
a — single hodograph only, b — reflection times are tied across the shot points, c — a hodograph in one direction from the shot point only.

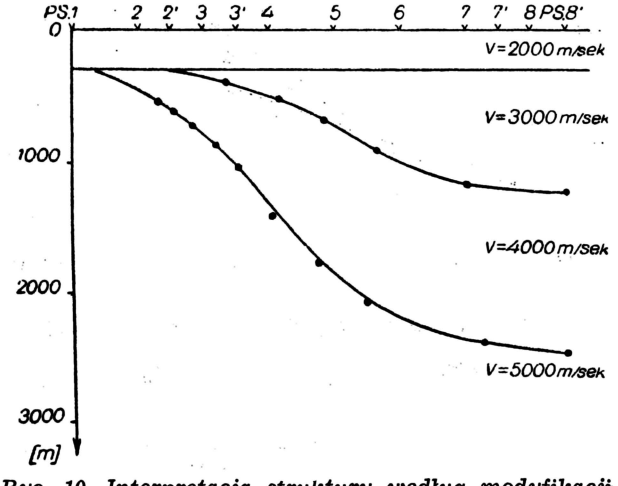
wykreślono ponadto linie równych upadów i równych głębokości. Jak widać z ryc. 11, w zakresie najczęściej występujących upadów i głębokości różnice w kącie α są nieduże. Stosunkowo znaczne rozbieżności na większych głębokościach i przy niewielkich upadach tłumaczy się nierealnym dla większych czasów bardzo dużym gradientem prędkości $\frac{d\overline{V}}{dt}$ założonej krzywej (ryc. 8). W ośrodku rzeczywistym, jak wiadomo, pionowy gradient prędkości na głębokości poniżej 3 km dąży do zera. W praktyce zatem wspomniane rozbieżności nie mają miejsca, a wzór (3′) prawidłowo określa kąt α. Przy mniejszych głębokościach krzywe prawie pokrywają się do ok. 40°, a zupełnie dobrze pasują nawet do 60-stopniowych upadów. Różnice, które obserwuje się przy upadzie 60° i głębokościach ok. 1000 m, nie przekraczają 3°, co wobec krótkich celowych wyraża się znikomymi przesunięciami.

Jak wynika z ryc. 12c, krzywe odległości do punktu odbicia h obliczane wg modyfikacji I wykazują bardzo dobrą zgodność z krzywymi modelu. Wykresy h wg modyfikacji II (ryc. 12b) przebiegają poniżej krzywych teoretycznych. Obydwa te rysunki potwierdzają uprzednio wyciągnięte wnioski dotyczące dokładności poszczególnych modyfikacji. Odległość h liczona wg modyfikacji III oczywiście nieza-leży od stosunku $\frac{\Delta t}{\Delta x}$ i pokrywa się z zerową krzywą modelu teoretycznego. Stąd też przy upadach, zgodnie z wcześniej prowadzonymi rozważaniami oraz przykładami z ryc. 7 i 9, refleksy kreślone tym sposobem muszą zalegać zawsze za głęboko. Jeżeli jednak upady nie przekraczają 30°, błędy w h są mniejsze niż 5%.

Oba wykresy porównawcze, aczkolwiek sporządzone tylko dla jednego rozkładu prędkości, pozwalają jednak zorientować się w zakresie stosowalności poszczególnych modyfikacji metody. Pamiętać należy, że przyjęty model prędkości wyostrza różnicę między prędkościami:

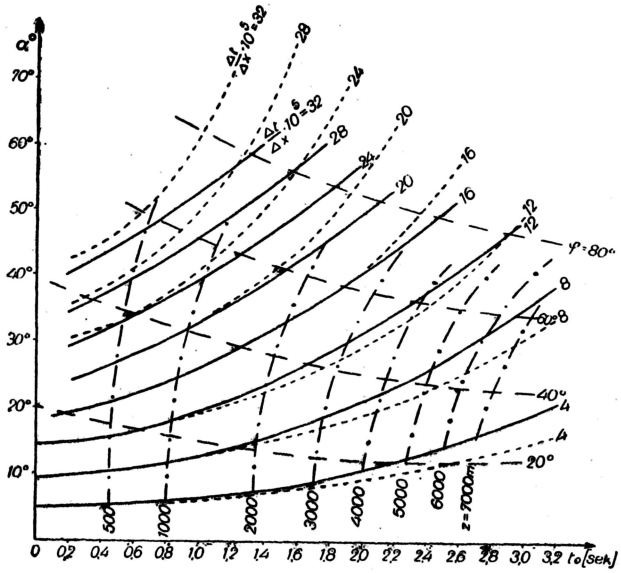
$$\overline{V} = f(Z),\ \overline{V} = f(Z_o),\ \overline{V} = f(\tau) \text{ a } \overline{V} = f(t_o)$$

(ryc. 8) i tym samym zwiększa rozbieżności między współrzędnymi punktów odbicia otrzymywanymi różnymi metodami. Spotykany najczęściej w praktyce paraboliczny wzrost prędkości z głębokością zmniejsza w znacznym stopniu te niezgodności, zwłaszcza na większych głębokościach.



Ryc. 10. Interpretacja struktury według modyfikacji III z poziomym gradientem prędkości
——— model struktury, ●●●●● modyfikacja III.

Fig. 10. A structure interpretation according to modification III with horizontal velocity variations.
——— structure model, ● ● ● ● modification III



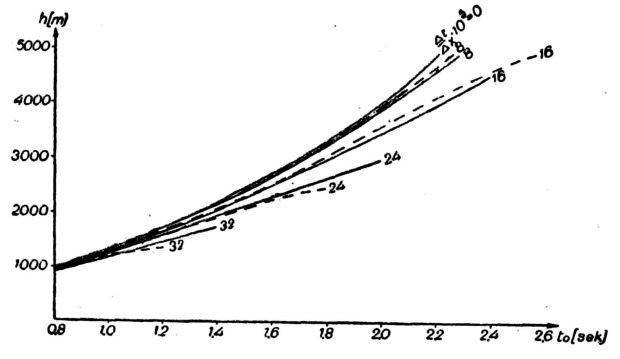
Ryc. 11. Porównanie kątów α w zależności od stosunku $\frac{\Delta t}{\Delta x} 10^5$ *i czasu* t_o

——— α obliczone ze współrzędnych x, z, dla metody krzywoliniowej (V = 1900 + 1,38 Z) – – – – α obliczone według wzoru (3'), — — — linie równych kątów upadów, —·—·— linie równych głębokości Z.

Fig. 11. Comparison of α angles for different values $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right) \cdot 10^5$ *and for different* t_o *times.*

——— calculated from x, z, coordinates in curved ray method (V = 1900 + 1,38 Z), – – – calculated according to (3') formula, — — — equal dips lines, —·—·— equal depths (Z) lines

Przedstawione trzy modyfikacje metody stanowią jedną całość pozwalającą na interpretację w różnych warunkach sejsmogeologicznych i w zależności od stopnia rozpoznania prędkościowego. Raz sporządzony komplet nomogramów umożliwia interpretatorowi operowanie w sposób elastyczny gradientem

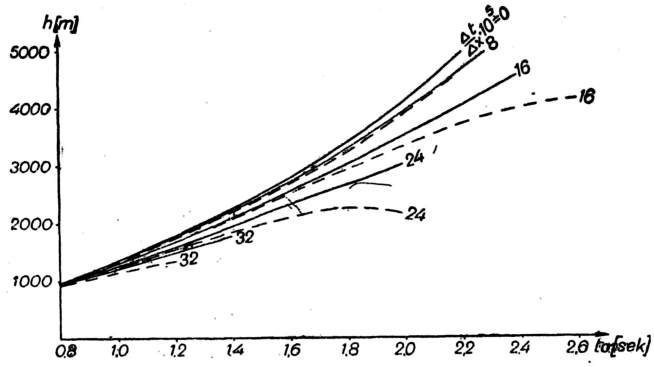


Ryc. 12a. Porównanie odległości h w zależności od stosunku $\frac{\Delta t}{\Delta x} 10^5$ *i czasu* t_o

——— h obliczone ze współrzędnych x, z, dla metody krzywoliniowej (V = 1900 + 1,38 Z), — — h obliczone według modyfikacji I

Fig. 12a. Comparison of h coordinates for different values $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right) \cdot 10^5$ *and for different* t_o *times.*

——— h calculated from x, z, coordinates in curved ray method (V = 1900 + 1,38 Z), — — h calculated according to modification I



Ryc. 12b. Porównanie odległości h w zależności od stosunku $\frac{\Delta t}{\Delta x} 10^5$ *i czasu* t_o

——— h obliczone ze współrzędnych x, z, dla metody krzywoliniowej (V = 1900 + 1,38 Z), — — h obliczone według modyfikacji II.

Fig. 12b. Comparison of h coordinates for different values $\left(\frac{\Delta t}{\Delta x}\right) \cdot 10^5$ *and for different* t_o *times.*

——— h calculated from x, z, coordinates in curved ray method (V = 1900 + 1,38 Z), — — h calculated according to modification II

prędkości, co prowadzi do otrzymywania zadawalających wyników. Prostota i szybkość techniki procesu interpretacyjnego (modyfikacja III ok. 20% szybsza od metody łuków) stanowi o możliwości praktycznego zastosowania metody w produkcji. Potwierdzają to doświadczenia uzyskane w Wydziale Geofizyki PPPN.

LITERATURA

1. Gołąb M., Śliwiński Z. — Interpretacja materiałów sejsmicznych uzyskanych metodą refleksyjną na strukturze Sompolna Gopła. „Przegl. Geol." 1958, nr 6.
2. Puzyriew N. N. — Interprietacija dannych siejsmorazwiedki mietodom otrażennych wołn. Moskwa 1957.
3. Rice R. B. — A Discussion of Steep Dip Seismic Computing Methods I, II. „Geophysics" XIV nr 2, XV nr 1.

SUMMARY

The method of construction of seismic reflection cross-sections is described, which due to its simplicity and satisfactory exactness is suitable for practical application. The method is based on the application of approximate t_o lines. It is worked out in three different modifications for different dips and for vertical and horizontal velocity variations.

Plotting technique and auxiliary nomographs for every modification are described and the comparisons for structure models, single reflections and for (h, α) polar coordinates are given.

РЕЗЮМЕ

В статье представлен метод конструкции сейсмических разрезов, полученных по способу отраженных волн, который, благодаря простоте техники интерпретации и достаточной точности, пригоден для практического применения в производстве. Методика основывается на использовании приближенных значений линий t_o. Метод обработан в трех модификациях, которые могут быть использованы при интерпретации в зависимости от углов падения границы и вертикального и горизонтального градиента скорости.

В статье рассматривается техника вычерчивания глубинных разрезов для соответствующих модификаций, а также номограммы, предназначенные для этой цели.

Проведено сопоставление результатов интерпретации на моделях структур, одинарных отражениях и на графиках полярных координат (h, α).