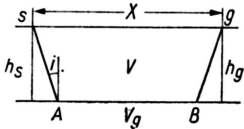


## INTERPRETACJA BADAŃ SEJSMICZNYCH METODĄ GARDNERA

PODSTAWOWYM celem badań sejsmicznych refrakcyjnych jest uzyskanie przekroju głębokościowego z określeniem prędkości granicznej rejestrowanego horyzontu. Prędkość graniczna pozwala na możliwość lepszego porównywania rejestrowanych horyzontów z odpowiadającymi im granicami utworów geologicznych. Znanych jest wiele metod interpretacji materiałów refrakcyjnych, opartych zarówno na sposobach analitycznych, jak i graficznych. Jedną z metod powszechnie stosowanych we Włoszech jest metoda Gardnera. W celu ogólnego zobrazowania zasady tej metody rozpatrzmy przebieg fali refrakcyjnej przedstawiony na ryc. 1, gdzie:



Ryc. 1. Przebieg fali refrakcyjnej.

- $s$  – punkt strzałowy,
- $g$  – geofon,
- $X$  – odległość od punktu strzałowego do geofonu,
- $A$  i  $B$  – punkty na rejestrowanym horyzoncie refrakcyjnym,
- $h_s$  – głębokość rejestrowanego horyzontu pod punktem strzałowym,
- $h_g$  – głębokość rejestrowanego horyzontu pod geofonem,
- $i$  – kąt pełnego odbicia,
- $V_g$  – prędkość graniczna,
- $V$  – prędkość średnia do rejestrowanego horyzontu.

Na wstępie należy przyjąć, iż zarówno punkt strzałowy  $s$ , jak i geofon  $g$  zostały sprowadzone do wspólnego poziomu odniesienia. Poza tym przyjmujemy horyzont refrakcyjny za równoległy do poziomu odniesienia, czyli:

$$h_s = h_g = h$$

a prędkość  $V$  jest prędkością stałą. Przy tych założeniach możemy zapisać czas, w jakim sejsmiczna fala refrakcyjna przebywa drogę  $sABg$ , tj. z punktu strzałowego do geofonu. Czas ten będzie wynosił:

$$t = \frac{2h}{V \cos i} + \frac{X - 2h \operatorname{tg} i}{V_g}$$

$$t = \frac{2h}{V \cos i} (1 - \sin^2 i) + \frac{X}{V_g}$$

skąd 
$$t - \frac{X}{V_g} = \frac{2h \cos i}{V} = T_i$$

różnica  $T_i = t - \frac{X}{V_g}$  nosi nazwę „intercept time”, ponieważ założyliśmy, że  $h_s = h_g$  możemy więc zapisać:

$$T_i = \frac{h_s \cos i}{V} + \frac{h_g \cos i}{V} \quad (1)$$

oznaczymy teraz 
$$t_s = \frac{hg \cos i}{V}$$

oraz 
$$T_g = T_i - \frac{h_s \cos i}{V} \quad (2)$$

Różnica  $T_g$  nosi nazwę „czasu geofonu” i jest związana z przebiegiem fali od horyzontu refrakcyjnego do geofonu. Natomiast czas oznaczony  $t_s$  związany jest z przebiegiem fali od punktu wybuchu do horyzontu refrakcyjnego. Jest on niezmienny dla całej gałęzi hodografu odstrzeliwanego z jednego punktu strzałowego. „Czas geofonu” odgrywa ważną rolę, gdyż jest następnie podstawą do otrzymywania przekroju głębokościowego. Jak wynika z wzorów (1) i (2) możemy napisać:

$$T_g = \frac{hg \cos i}{V}$$

skąd

$$h_g = T_g \frac{V}{\cos i} \quad (3)$$

Jest to głębokość horyzontu refrakcyjnego pod rozpatrywanym geofonem. W rzeczywistości jednak musimy jeszcze wziąć pod uwagę fakt, iż promień wynurza się pod kątem  $i$ , a więc należy uwzględnić przesunięcie,

$$s = h_g \cdot \operatorname{tg} i$$

gdyż rejestracja otrzymywana w miejscu geofonu odnosi się do punktu znajdującego się nie pionowo pod geofonem, lecz punkt ten na horyzoncie refrakcyjnym jest oddalony o wielkość  $s$ .

Uwzględnianie przesunięcia  $s$  jest sprawą istotną, zwłaszcza w przypadku, gdy horyzont refrakcyjny jest nierównoległy do poziomu odniesienia. Prawdziwości podanych wzorów można dowieść dla bardziej złożonych przypadków, tj. gdy  $V$  nie jest stała oraz gdy horyzont refrakcyjny jest nachylony do poziomu odniesienia pod kątem  $\varphi$ .

Należy jednak zwrócić uwagę, że omawiana metoda interpretacji jest słuszna dla horyzontów o niewielkich nachyleniach, tj. nie przekraczających  $10^\circ$ . Dlatego też do horyzontów o większych upadach metoda ta nie powinna być stosowana.

Przejdźmy teraz do omówienia na przykładzie praktycznego sposobu interpretacji metodą Gardnera. Jako przykład posłuży interpretacja najgłębszego horyzontu refrakcyjnego na sondowaniu Wołyni wykonanym w 1962 r. Horyzont ten wiązany jest z podłożem krystalicznym.

Pierwszą czynnością powinno być wprowadzenie odpowiednich poprawek sprowadzających zarówno ładunek, jak i wszystkie geofony do wspólnego poziomu odniesienia. Następnie należy dokonać konstrukcji hodografu na podstawie poprawionych wartości czasów. W przypadku sondowania Wołyni za podstawę przyjęto hodograf skonstruowany przez zespół wykonujący pomiary. Rozwiązanie takie nie jest najsluszniesze, gdyż nie zredukowano pomiarów do wspólnego poziomu odniesienia, ze względu jednak na to, że rozpatrywany w tym przypadku horyzont jest stosunkowo płaski, a morfologia mało urozmaicona dla zilustrowania metody interpretacji nie będzie to posiadać istotnego znaczenia.

W oparciu o czasy zredukowane obliczamy „intercept time” dla poszczególnych geofonów, czyli

$$T_i = t - \frac{X}{V_g}$$

gdzie  $t$  — czas zredukowany.

Na podstawie obliczonych czasów przy strzelaniu z jednego i drugiego punktu strzałowego skonstruowano „krzywe intercept”. Należy zaznaczyć, że normalnie krzywe te konstruowane są w skali poziomej 1:20 000 i pionowej 1 cm = 40 m/sek. Krzywe dla sondowania Wohyń w zmniejszonej skali przedstawione są na ryc. 2a. W tym przypadku mamy jednak do czynienia z płaskim horyzontem refrakcyjnym, dlatego bez większego błędu można było przedłużyć „krzywe intercept” w postaci linii prostych. W praktyce dla umożliwienia dokładniejszej interpretacji, gdy horyzont jest nie płaski, celowe jest wykonywanie prac refrakcyjnych taką metodyką, aby rejestracje uzyskiwane przy strzelaniu z jednej strony zachodziły za rejestracje z przeciwnego punktu strzałowego.

Mając już skonstruowane „krzywe intercept” przystępujemy do obliczenia czasów  $t_s$  dla obu punktów strzałowych. Czasy te oznaczmy dla punktu strzałowego 28 000 —  $t_s$  280 i dla punktu 16 000 —  $t_s$  160.

Wartości tych czasów obliczamy z równań,

$$\left. \begin{aligned} t_{s280} - t_{s160} &= \Delta t \\ t_{s280} + t_{s160} &= T_{i280} = T_{i160} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

gdzie  $\Delta t$  jest różnicą czasów między krzywymi „intercept” a  $T_{i280}$  i  $T_{i160}$  wartość „intercept time” dla geofonów w punktach strzałowych. W praktyce wartość  $\Delta t$  określamy graficznie, biorąc średnią odległość między wspomnianymi krzywymi. Słuszność pierwszego z tych dwu równań wynika z odjęcia równań określających „krzywe intercept”. Ponieważ równania te możemy zapisać

$$T_{i280} = t_{s280} + T_g$$

$$T_{i160} = t_{s160} + T_g$$

więc odejmując stronami otrzymamy

$$\Delta t = t_{s280} - t_{s160}$$

co jest pierwszym równaniem z układu (4). Natomiast drugie równanie tego układu wynika bezpośrednio z definicji „intercept time”, bowiem dla geofonu w punkcie strzałowym 16 000 „czas geofenu” wynosi  $t_{s160}$  i odwrotnie.

W praktyce mamy nieraz do czynienia z przypadkami, gdy  $T_{i160}$  i  $T_{i280}$  wskutek błędów pomiaru i obliczeń nie są równe jak to ma miejsce w rozpatrywanym przypadku, wtedy do interpretacji przyjętą należy wartość średnią.

Mając już obliczone czasy  $T_s$  związane z przebiegiem promienia od punktu strzałowego do horyzontu refrakcyjnego możemy obliczyć „czasy geofonów”

$$T_g = T_i - t_s$$

dla obu gałęzi hodografów, tj. przy strzelaniu z PS 28 000 i z PS 16 000. Na podstawie obliczonych w podany sposób wartości wykreślamy krzywe „czasów geofonów”, które przedstawione są na ryc. 2b. W praktyce krzywe te wykreślamy w tej samej skali, co i „krzywe intercept”.

Mając już obliczone czasy geofonów możemy zgodnie ze wzorem (3) przejść do kalkulacji głębokości interpretowanego horyzontu pod poszczególnymi geofonami. Nie należy jednak zapominać o uwzględnieniu przesunięcia

$$s = h \cdot \operatorname{tg} i$$

Teoretycznie dla każdej obliczonej głębokości  $h$  należałoby liczyć oddzielnie przesunięcie  $s$ . W prak-

tyce jednak wystarczy obliczyć wartość przesunięcia  $s$  dla największej i najmniejszej głębokości na danym sondowaniu czy profilu, a do obliczeń na całym profilu uwzględniać wartość średnią. W przypadku sondowania Wohyń średnia wartość przesunięcia  $s$  wynosi 1300 m.

Poza tym wygodniej jest zamiast konstruować krzywe „czasów geofonów” (ryc. 2b) od razu przejść do tzw. „krzywych przesuniętych”, tj. krzywych „czasów geofonów” z uwzględnieniem przesunięcia  $s$ . Dla sondowania Wohyń krzywe te przedstawione zostały na ryc. 2c.

Mając już „krzywe przesunięte” i stosując wspomniane przedtem wzór

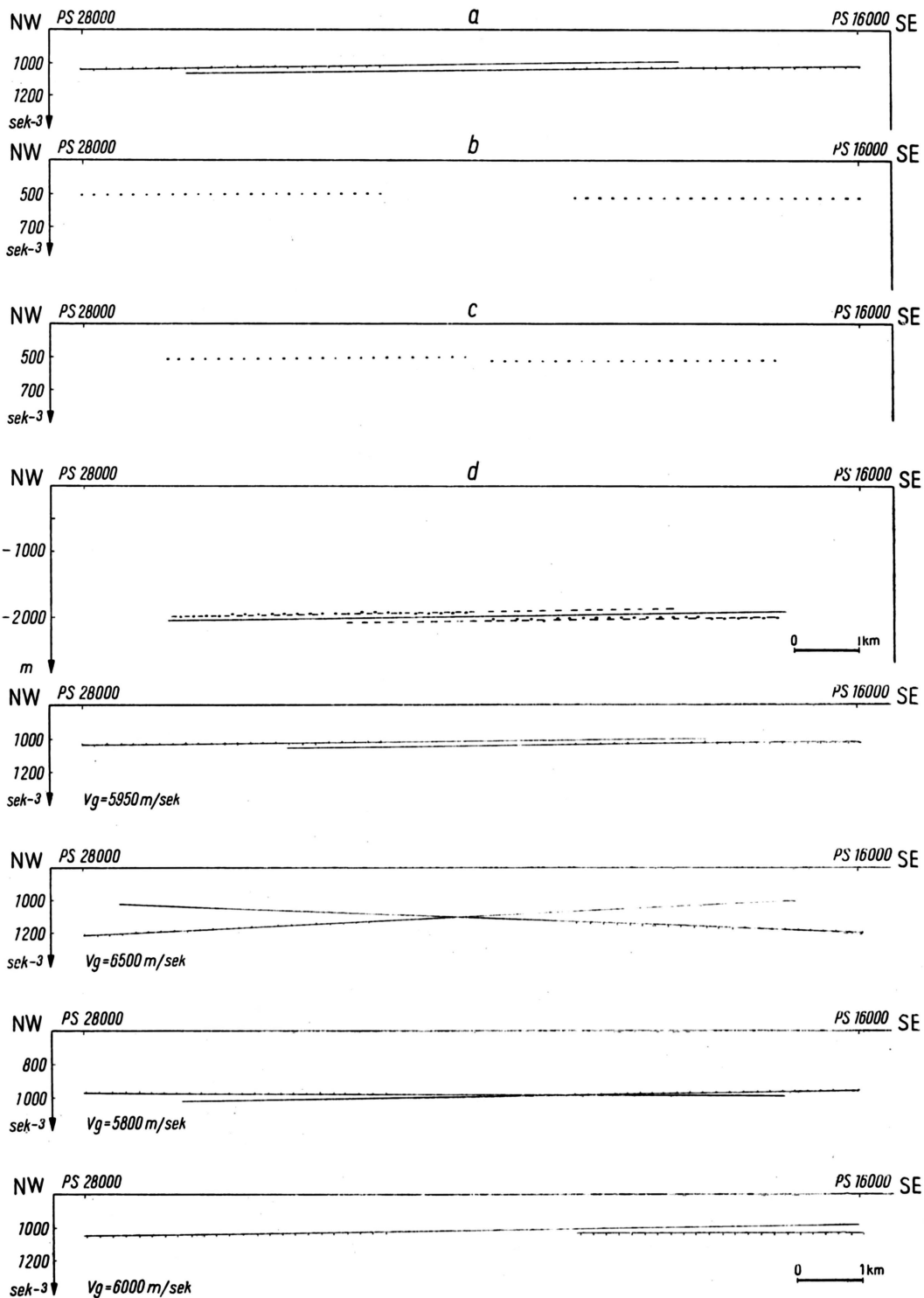
$$h = T_g \frac{V}{\cos i}$$

otrzymujemy przekrój głębokościowy, z tym że horyzont refrakcyjny przyjmuje się jako średnią wartość z wyników otrzymanych na podstawie interpretacji dwu przeciwległych gałęzi hodografów.

Interpretacja głębokościowa dla sondowania Wohyń przedstawiona jest na ryc. 2d. W tym przypadku przyjęto stałą prędkość graniczną wzdłuż całego sondowania równą 3250 m/sek. Dzięki uwzględnieniu przesunięcia  $s$  na ryc. 2d można było skonstruować odcinek horyzontu refrakcyjnego odpowiadający uzyskanym rejestracjom. Z otrzymanych wyników widać, że długość wykonanego sondowania pozwoliła na przesledzenie odcinka horyzontu refrakcyjnego w sposób ciągły, gdyż odcinek horyzontu refrakcyjnego, któremu odpowiadają rejestracje na hodografie w jedną stronę styka się z odcinkiem, którego odzwierciedleniem jest druga gałąź hodografu. Na ogół dokładniejsze wyniki otrzymamy, jeżeli krzywe przesunięte obliczone z dwu przeciwległych gałęzi hodografu zachodzą na siebie, wówczas ten sam odcinek poziomu załamującego śledzi się dwukrotnie. W rozpatrywanym jednak przypadku można było zupełnie pewnie wyznaczyć przebieg granicy załamującej, mimo nie zazębienia się „krzywych przesuniętych”. Pozwala na to stosunkowo płaski i nieskomplikowany przebieg interpretowanego horyzontu.

Istotnym momentem, na który należy zwrócić uwagę jest fakt, że interpretacja materiałów refrakcyjnych omawianą metodą pozwala dodatkowo na kontrolę prawidłowości przyjętej prędkości granicznej. „Krzywe intercept” obliczone dla obu gałęzi hodografu muszą być w stałej wzajemnej odległości, gdy do interpretacji przyjęta została prawidłowo prędkość graniczna. Dla zobrazowania w jakim stopniu zmiana przyjętej prędkości granicznej wpływa na przebieg „krzywych intercept” dokonano kilku przeliczeń, które zostały przedstawione na ryc. 3. Za przykład posłużyło to samo sondowanie refrakcyjne Wohyń, dla którego skonstruowano przekrój głębokościowy. Najpierw obliczono „krzywe intercept” przy  $V_g = 5950$  m/sek, tj. takiej prędkości, która była przyjmowana do dalszej interpretacji. Ze względu na spokojny przebieg rejestrowanego odcinka granicy załamującej otrzymane krzywe można było potraktować jako proste. Po przedłużeniu ich okazało się, że są one do siebie równoległe. Oznacza to, że przyjęto do obliczeń dobrą prędkość graniczną. Następnie przyjęto  $V_g = 6500$  m/sek, a więc różnica z poprzednią wartością wynosi 550 m/sek. Jak widać na ryc. 3 nie ma już zupełnie równoległości i otrzymane proste przecinają się pod wyraźnym kątem. Zmniejszono więc różnice w prędkościach granicznych do 150 m/sek. i 50 m/sek., przyjmując kolejno  $V_g = 5800$  m/sek. i 6000 m/sek. Na zalążonych wykresach można zaobserwować, że jeżeli różnica 150 m/sek. zaznacza się jeszcze wyraźnie, to w przypadku 50 m/sek. różnica w nierównoległości prostych jest już trudniejsza do wyznaczenia.

W świetle przedstawionych materiałów można przyjąć, że dzięki kontroli wzajemnej odległości między „krzywymi intercept” możemy wyznaczyć prędkość



Ryc. 2. Fazy interpretacji sondowania refrakcyjnego.

a — krzywe „intercept”, b — krzywe „czasów geofonów”, c — krzywe przesunięta, d — przekrój głębokościowy.

graniczną z dokładnością do 100 m/sek. Należy jeszcze przypomnieć, że do obliczeń wykorzystane zostały czasy odczytane z hodografów, a nie bezpośrednio z filmów. Można zatem przypuszczać, że biorąc do interpretacji czasy przyjęcia fali bezpośrednio z sejsmogramów, wprowadzając odpowiednie poprawki oraz konstruując krzywe we właściwej dla nich skali można będzie podwyższyć dokładność wyznaczenia prędkości granicznej. Błąd, z jakim została przyjęta prędkość graniczna daje się również wyznaczyć ze wzajemnej odległości między „krzywymi intercept” w sposób analityczny, oznaczając:

$T$  — czas,  $X$  — długość rozpatrywanego odcinka,  $Vg$  — prędkość graniczna oraz wiedząc, że:

$$T = \frac{X}{Vg}$$

po zróżnicowaniu możemy otrzymać:

$$dVg = \frac{dT Vg^2}{X}$$

gdzie  $dT$  jest różnicą czasów na rozpatrywanym odcinku.

Ogólnie należy stwierdzić, że omawiana metoda interpretacji materiałów refrakcyjnych pozwala na dokonanie kontroli poprawności przyjętych prędkości granicznych, co dla niektórych tematów może mieć bardzo istotne znaczenie.

Ryc. 3. „Krzywe intercept” przy przyjęciu różnych prędkości granicznych.

## L I T E R A T U R A

1. C a s s i n i s R. — La sismica di rifrazione nella ricerca delle strutture profonde. „Quaderni di Geofisica Applicata” 1958.
2. F a v r e B. — Cours de Geophysique — Institut Francais du Petrole. 1956.
3. G a r d n e r L. — An aeral plan of mapping sub-surface structure by refraction shooting. „Geophysics” 1939.