

JERZY ŻARUK

Przedsięb. Geofizyki Górn. Naft. w Toruniu

MODEL PRĘDKOŚCIOWY ANTYKLINORIUM POMORSKIEGO

UKD 550.832.441.072:551.242.3.053(438-16)

Obszar antyklinorium pomorskiego jest obecnie przedmiotem intensywnych prac poszukiwawczych, w których metoda sejsmiczna ma znaczenie dominujące. Początkowo w północnej części antyklinorium, a następnie również w jego części środkowej wykonano szczegółowe prace sejsmiczne, które znacznie zwiększyły wiedzę o budowie geologicznej tego rejonu i stanowiły podstawę do usytuowania sporej ilości głębokich otworów wiertniczych o charakterze poszukiwawczym. Od chwili odkrycia złoża ropy naftowej na wyspie Wolin oraz złoża gazu w Wierzchowie — rejon antyklinorium pomorskiego uważany jest za jeden z bardziej perspektywicznych, a badania sejsmiczne w tym rejonie nabrały szczególnego znaczenia. Stosowana od kilku lat w pracach sejsmicznych metoda wielokrotnych pokryć, w wyraźny sposób podniosła jakość tych prac oraz umożliwiła śledzenie w sposób ciągły granic sejsmicznych, zalegających na znacznych głębokościach (cechsztyn, czerwony spągowiec) i będących obiektem szczególnego zainteresowania geologów, ze względu na znaczną perspektywiczność odkrycia w sprzyjających warunkach strukturalnych nagromadzeń bituminów o wartości przemysłowej.

Czynnikiem charakteryzującym skuteczność metody sejsmicznej jest stopień zgodności wyników uzyskiwanych tą metodą z danymi otrzymanymi z wierceń. Ponieważ bezpośrednie wyniki pomiarów sejsmicznych podawane są w jednostkach czasu, właściwa interpretacja głębokościowa tych pomiarów wymaga dobrej znajomości prędkości rozchodzenia się fal sejsmicznych w nadkładzie granic odbijających, które uzyskuje się głównie z pomiarów prędkości średnich w otworach wiertniczych. Nierównomierne przestrzenne rozmieszczenie otworów oraz fakt, iż pomiar średnich prędkości w otworze wiertniczym charakteryzuje ich rozkład, przeważnie w najbliższym otoczeniu odwiertu, nie pozwalają na obecnym etapie rozpoznania oraz przy stawianych pracach sejsmicznym wysokich wymaganiach, co do dokładności określania głębokości zalegania granic odbijających, na posługiwanie się przy przeliczaniu czasowych danych sejsmicznych na głębokościowe tylko danymi z jednego lub kilku pomiarów prędkości średnich. Analiza kompleksowa tych pomiarów wskazuje na złożoność zagadnienia prędkości średnich na obszarze antyklinorium pomorskiego.

Oprócz znacznych różnic w prędkościach warstwowych i kompleksowych występują też zasadnicze różnice w prędkościach średnich. Z drugiej zaś strony układ litostratygraficzny o zmiennych miąższościach warstw, przeciętych licznymi uskokiemi i wysadami solnymi, wymaga uwzględnienia prędkości warstwowych, czyli pionowego i poziomego gradientu prę-

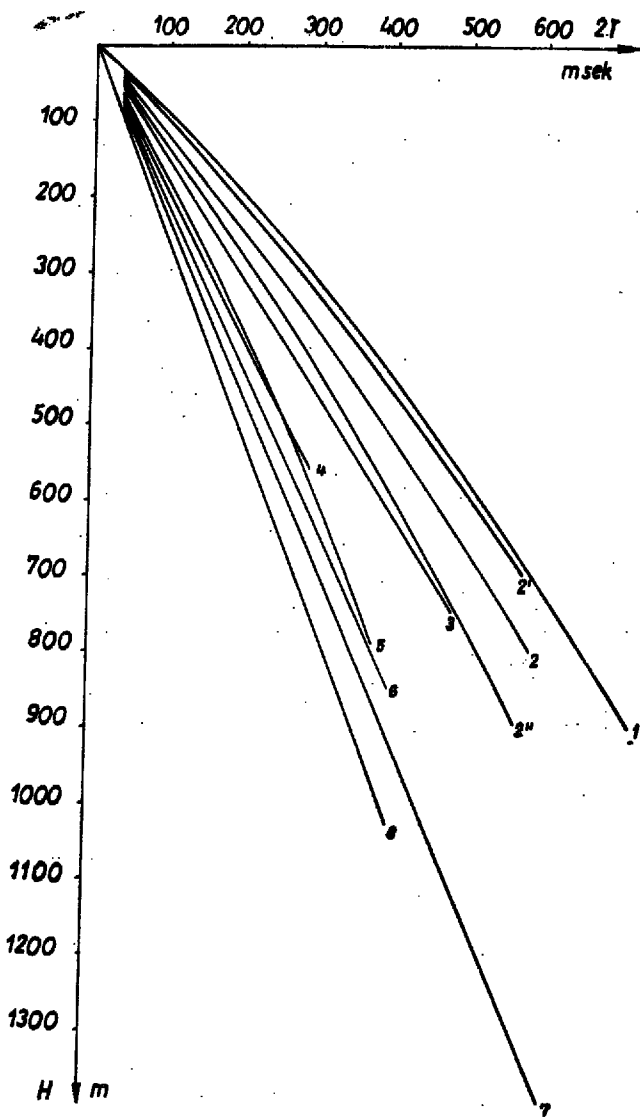
kości. Dokładna interpretacja głębokościowa danych sejsmicznych wymaga więc dokładnego rozpoznania stosunków prędkościowych w poszczególnych formacjach geologicznych.

W celu otrzymania obiektywnych i dokładnych informacji o pionowym i poziomym gradiencie prędkości przeprowadzona została szczegółowa analiza wyników pomiarów średnich prędkości w otworach z obszaru antyklinorium pomorskiego. Analizą objęto 25 pomiarów o przeciętnym zasięgu głębokościowym 2700 m, wykonanych na obszarze antyklinorium oraz jego bezpośredniego obrzeżenia.

Na podstawie analizy uzyskanych hodografów pionowych wydzielono następujące kompleksy skał osadowych o zbliżonych wielkościach prędkości kompleksowych: malm — dogger, lias, retyk — kajper, wapień muszlowy — ret, pstry piaskowiec środkowy, pstry piaskowiec dolny, cechsztyn oraz czerwony spągowiec — karbon. W obrębie wydzielonych kompleksów obserwuje się ograniczony wpływ zmian facjalnych i ciśnień statycznych (z wyjątkiem utworów liasu). Dla każdego z wymienionych kompleksów określono wartości oraz charakter zmian z głębokością prędkości kompleksowych i interwałowych oraz sposób zmian prędkości średnich do stropu poszczególnych kompleksów. Otrzymane zależności aproksymowane były funkcjami potęgowymi $T = a \cdot H^b$ lub uśredniane liniami prostymi. Funkcje potęgowe tego typu stosowane są od szeregu lat przy analizach średnich lub kompleksowych prędkości. Uśrednienie linią prostą $H = c \cdot t$ jest mniej dokładne, lecz stanowi znaczne uproszczenie w interpretacji głębokościowej, ponieważ w takim przedstawieniu współczynnik c wyraża wielkość tej prędkości w kilometrach na sekundę.

Prędkości kompleksowe. W celu ustalenia wartości prędkości kompleksowych dla poszczególnych kompleksów dokonano redukcji hodografów pionowych do spągu kompleksów nadległych. Otrzymane odcinki hodografów, odpowiadających poszczególnym kompleksom, zestawiono w układzie współrzędnych (H , T) oraz aproksymowano funkcjami. Dla wszystkich kompleksów z wyjątkiem liasu otrzymano stosunkowo nieduży rozrzut wartości i w związku z tym wysoką dokładność aproksymacji. Wykresy prędkości kompleksowych malmu i doggeru oraz pstręgo piaskowca środkowego stanowią odwzorowanie funkcji potęgowej o wzorach odpowiednio $T = 3,06 \cdot H^{0,806}$ oraz $T = 0,108 \cdot H^{0,877}$ (ryc. 1).

Utwory liasu charakteryzują się bardzo zmiennymi prędkościami kompleksowymi, które wykazują zależność zarówno od głębokości występowania (ciśnienia statycznego) i litologii, jak i szeregu innych czyn-



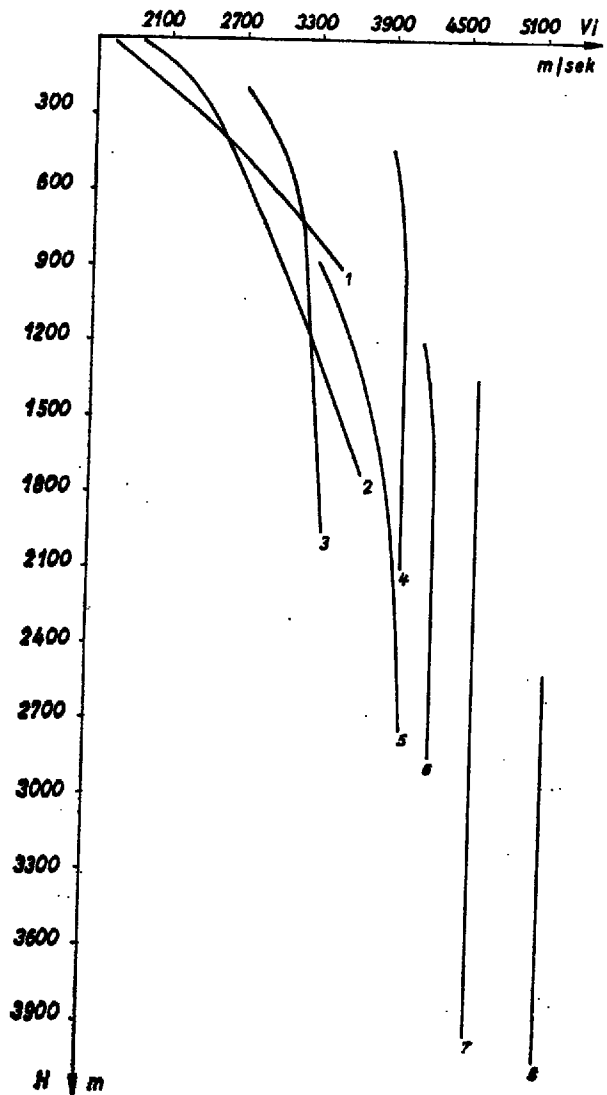
Ryc. 1. Kompleksowe hodografy pionowe:

1 — malmu i doggeru, 2 — liasu, 3 — retyku i kajpru, 4 — wapienia muszlowego i retu, 5 — pstrego piaskowca środkowego, 6 — pstrego piaskowca dolnego, 7 — cechsztynu, 8 — czerwonego spągowca i karbonu.

Fig. 1. Complex vertical hodographs of:

1 — Malm and Dogger, 2 — Lias, 3 — Rhaetian and Keuper, 4 — Muschelkalk and Röt, 5 — Middle Buntsandstein, 6 — Lower Buntsandstein, 7 — Zechstein, 8 — Rotliegendes and Carboniferous.

ników, np. warunków strukturalnych, w których się znajdują. Przy głębokościach stropu liasu rzędu 20—50 m wykres prędkości kompleksowych liasu prawie pokrywa się z wykresem dla malmu i doggeru, natomiast przy głębokościach stropu liasu powyżej 700 m zbliża się do wykresu dla retyku i kajpru. Stwierdzono, że nad wysadami solnymi utwory liasu posiadają znacznie większe prędkości kompleksowe i w wielu przypadkach na stosunkowo niedużych głębokościach osiągają wartości rzędu 3000 m/sek. Na ryc. 1 przedstawiono wykresy prędkości kompleksowych liasu dla rejonu Kołobrzegu (2'), gdzie strop utworów liasu zalega na głębokości 50—200 m; dla rejonu Gryfice — Międzyzdroje (2) strop liasu znajduje się na głębokości od 200 do 600 m oraz dla liasu nad wysadami solnymi (2').



Ryc. 2. Wykresy prędkości interwałowych. Objaśnienia jak przy ryc. 1.

Fig. 2. Diagram of interval velocities; explanations as in Fig. 1.

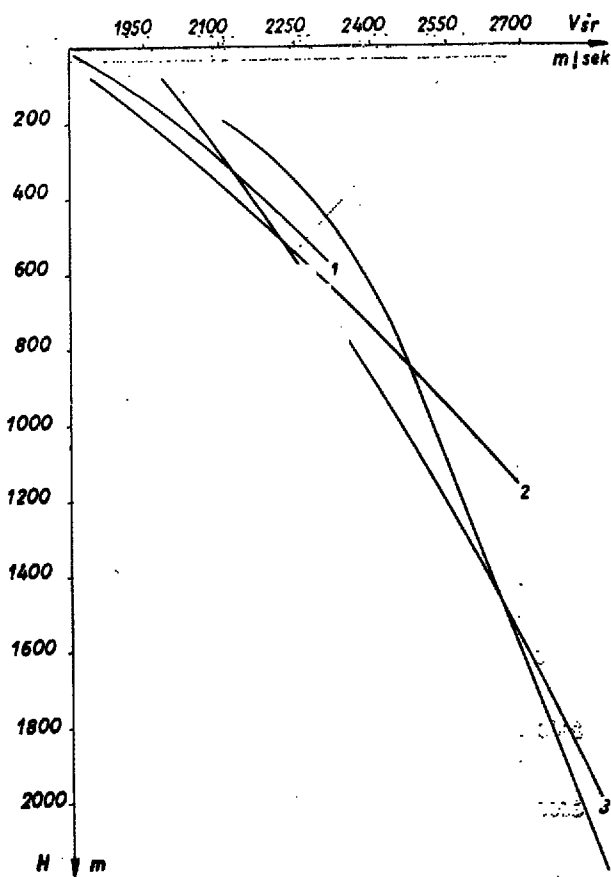
Wykresy dla kompleksów głębszych od liasu wykazują prawie liniowy wzrost czasów z głębokością i ze stosunkowo dużą dokładnością można je zastąpić liniami prostymi, co w znacznym stopniu upraszcza praktyczne posługiwanie się otrzymanymi zależnościami. Dla retyku i kajpru prędkość kompleksowa wynosi 3100 m/sek, dla wapienia muszlowego i retu 3850 m/sek, dla pstrego piaskowca dolnego 4250 m/sek, a dla cechsztynu 4600 m/sek. Utwory czerwonego spągowca i karbonu wykazują prędkość kompleksową równą 5150 m/sek.

Ogólnie można stwierdzić, że ze wzrostem wieku geologicznego utworów prędkości kompleksowe znacznie rosną.

Prędkości interwałowe. Określanie prędkości interwałowych przeprowadzono według wzoru

$$v_i = \frac{\Delta H_i}{\Delta T_i}$$

gdzie: ΔH_i — interwał głębokości, dla którego określano prędkości interwałowe,
 ΔT_i — czas przebiegu fali prostej w przedziale obranego interwału prędkości.



Ryc. 3. Wykresy prędkości średnich dla stropu:

1 — malmu i doggeru itd. (obj. jak przy ryc. 1);

Fig. 3. Diagram of average velocities for top of:

1 — Malm and Dogger, 2 ... a.o. as in Fig. 1.

Ponieważ dokładność określenia prędkości interwałowej jest ściśle związana z długością obranego interwału, miąższością poszczególnych warstw oraz długością kroku pomiarowego (w czasie wykonywania pomiarów prędkości średnich w otworze), uznano za celowe obranie 200-metrowego interwału. Dla wapienia muszlowego i retu, ze względu na mniejsze miąższości tego kompleksu, wielkość interwału skrócono do 150 m w celu otrzymania większej ilości danych.

Na ryc. 2 przedstawione zostały wykresy prędkości interwałowych dla poszczególnych kompleksów. Dla utworów malmu i doggeru, liasu, retyku i kajpru oraz pstrego piaskowca środkowego zaznacza się wyraźny wzrost prędkości interwałowych z głębokością. Wapień muszlowy oraz pstry piaskowiec dolny charakteryzują się małymi zmianami prędkości interwałowych. Utwory cechsztynu, czerwonego spągowca i karbonu nie wykazują wzrostu prędkości interwałowych z głębokością.

Dla wszystkich kompleksów stwierdzono zależność prędkości warstwowych, a tym samym i interwałowych od litologii. Szczególnie wyraźnie zależność ta występuje w przypadku cechsztynu. Przy wykształceniu salinarnym prędkości warstwowe wynoszą około 4400–4500 m/sek, natomiast w przypadku facji anhydrytowo-dolomitycznej wahają się od 5200 do 6200 m/sek.

Stwierdzono, że poczynając od pewnych głębokości prędkości interwałowe wapienia muszlowego i re-

tu oraz pstrego piaskowca dolnego są prawie stałe i wynoszą: dla wapienia muszlowego i retu na głębokościach większych od 800 m — powyżej 3900 m/sek, dla pstrego piaskowca dolnego na głębokościach powyżej 2000 m — 4250 m/sek.

Utwory wieku paleozoicznego charakteryzują się mniej więcej stałymi prędkościami interwałowymi i nie wykazują związku z głębokością. Prędkość interwałowa cechsztynu wynosi 4600 m/sek, a czerwonego spągowca i karbonu — 5150 m/sek.

Sumując można stwierdzić, iż ze wzrostem wieku geologicznego osadów prędkości interwałowe rosną, maleje natomiast wpływ głębokości na ich wielkość.

Prędkości średnie. Już na podstawie pobieżnego zapoznania się z wynikami pomiarów średnich prędkości można wnioskować, że na obszarze antyklinorium pomorskiego zachodzą znaczne zmiany zarówno pionowego, jak i poziomego ich gradientu. Dla uzyskania optymalnych, a jednocześnie dokładnych zależności przeprowadzono analizę czasów pionowych do stropu poszczególnych kompleksów. W celu zwiększenia ilości informacji dla 11 głębokich otworów obszaru antyklinorium pomorskiego nie posiadających pomiarów prędkości średnich sporządzono analityczne hodografy pionowe do głębokości rozpoznanych granic geologicznych. Określone z hodografów pionowych oraz otrzymane analitycznie wartości czasów pionowych do stropu poszczególnych kompleksów zostały naniesione na wykresy w postaci $T = f(H)$, a następnie aproksymowane funkcjami potęgowymi typu $T = a \cdot H^b$.

Otrzymano następujące zależności:

— dla stropu malmu i doggeru

$$T = 1,715 \cdot H^{0,896} \text{ przy } \sigma = \pm 6 \text{ msek}$$

— dla stropu liasu

$$T = 2,541 \cdot H^{0,882} \text{ przy } \sigma = \pm 6 \text{ msek}$$

— dla stropu retyku i kajpru

$$T = 2,300 \cdot H^{0,844} \text{ przy } \sigma = \pm 14 \text{ msek}$$

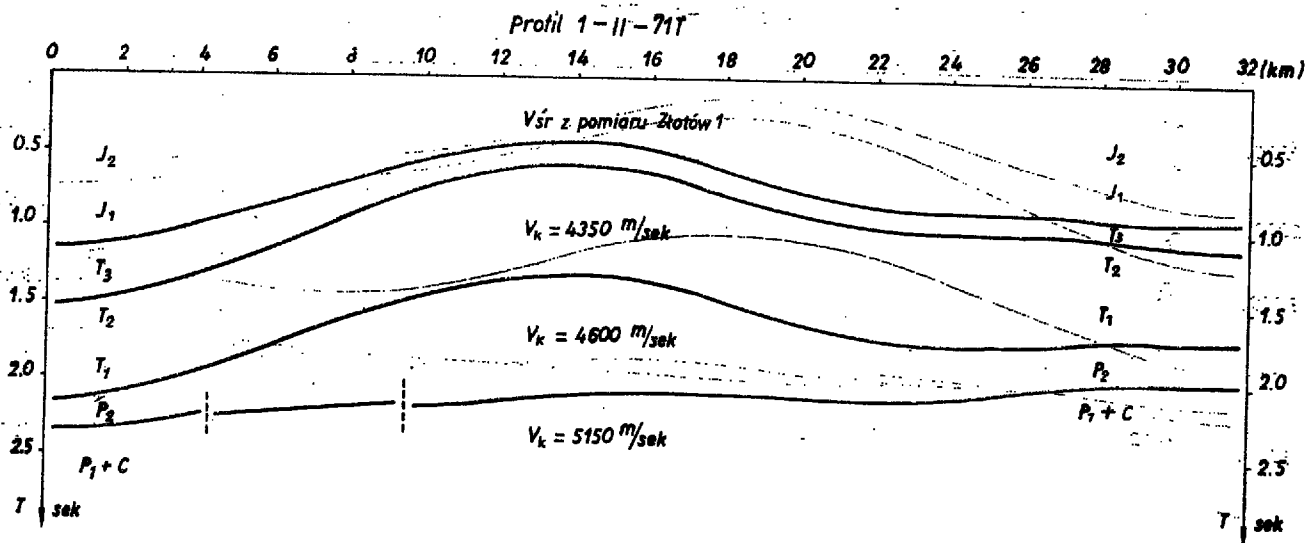
— dla stropu wapienia muszlowego i retu

$$T = 2,038 \cdot H^{0,863} \text{ przy } \sigma = \pm 16 \text{ msek.}$$

Na ryc. 3 przedstawiono wykresy zmian prędkości średnich dla stropu: malmu i doggeru, liasu, retyku i kajpru oraz wapienia muszlowego i retu. Dla wszystkich kompleksów obserwuje się znaczny wzrost prędkości średnich z głębokością. Największy gradient pionowy posiadają prędkości w utworach malmu i doggeru, co powoduje, że strop liasu charakteryzuje się znacznymi ich zmianami. Przy zmianie głębokości zalegania stropu liasu z 200 m na 1200 m następuje wzrost średnich prędkości z 1900 do 2700 m/sek. Stosunkowo mniejszym gradientem odznaczają się prędkości w utworach retyku i kajpru.

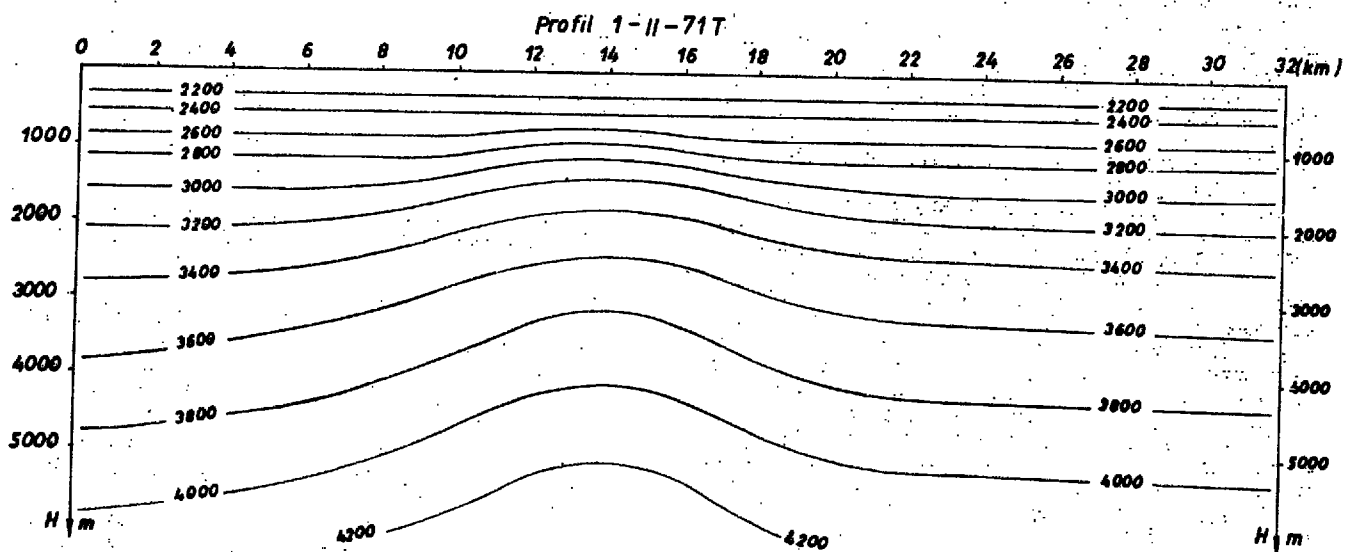
Zestawienia czasów pionowych do stropu kompleksów głębszych od wapienia muszlowego i retu wykazują znaczny rozrzut przekraczający wielkość dwu lub nawet więcej faz refleksu, co świadczy o dużych zmianach średnich prędkości na obszarze antyklinorium pomorskiego. Aproksymacja ośrodka od powierzchni ziemi do granic głębszych od stropu wapienia muszlowego i retu, za pomocą jednej zależności funkcyjnej nie miałaby sensu, ze względu na ostre zmiany prędkości na granicach wydzielonych kompleksów.

Modele prędkościowe. Przeprowadzona analiza prędkości kompleksowych, interwałowych i średnich dostarczyła szeregu nowych informacji o stosunkach prędkościowych panujących na obszarze antyklinorium pomorskiego. Uzyskane wartości prędkości kompleksowych, interwałowych i średnich określają w trojaki sposób wzrost prędkości z głębokością dla utworów malmu i doggeru, liasu, retyku i kajpru oraz wapienia muszlowego i retu. Dla pozostałych kompleksów zmiana prędkości z głębokością określo-



Ryc. 4. Model czasowo-prędkościowy struktury Złotowa.

Fig. 4. Time-velocity model for the Złotowo structure.



Ryc. 5. Rozkład prędkości średnich wzdłuż profilu przez strukturę Złotowa.

Fig. 5. Distribution of average velocities along the profile across the Złotowo structure.

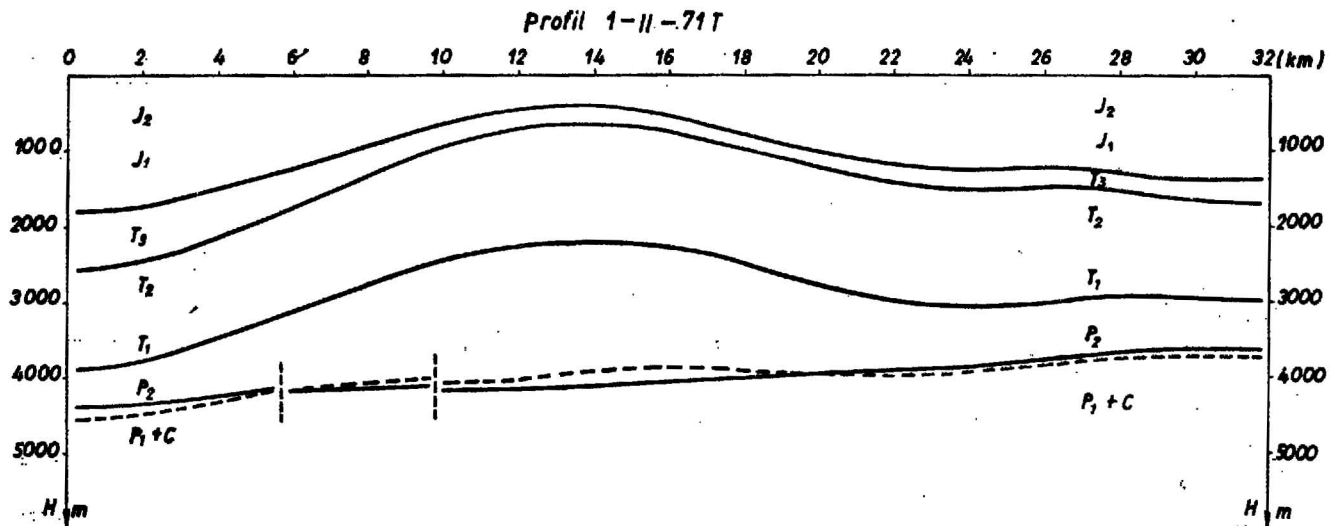
na została dwójako: przez prędkości kompleksowe oraz interwałowe. Uzyskane zgodności upowazniają do sporządzenia modeli prędkościowych dla poszczególnych rejonów antyklinalium pomorskiego.

W przypadku poziomego zalegania i stałej miąższości warstw sporządzony model prędkościowy charakteryzować się będzie wyłącznie pionowym gradientem prędkości, pozwalającym na posługiwanie się przy przeliczaniu danych czasowych na głębokościowe, wyłącznie prędkościami średnimi. Natomiast w przypadkach budowy typowo strukturalnej lub ostrych zmian miąższości poszczególnych kompleksów oprócz pionowego powstaje również poziomy gradient prędkości.

Sporządzony model prędkościowy powinien uwzględniać oba te gradienty, zgodnie ze zmianami kątów nachylenia lub miąższości poszczególnych kompleksów prędkościowych. Możliwość zastosowania teoretycznie najwłaściwszych modeli prędkościowych, pozwalających na uwzględnienie prędkości kompleksowych oraz załamania promienia sejsmicznego na granicach warstw o różnych prędkościach, będzie dla

granic płytko zalegających mocno ograniczona ze względu na brak lub trudności w zidentyfikowaniu tych granic na sejsmicznych przekrojach czasowych, będących na obecnym etapie rozpoznania podstawowym materiałem wyjściowym dla sporządzenia modeli czasowo-prędkościowych. Szczególnie dotyczy to granic jurajskich. Duże znaczenie będzie mieć w tych przypadkach posługiwanie się prędkościami średnimi do stropu określonej granicy trzaskowej. Dlatego też przyjęty model prędkościowy będzie bezpośrednio oddziaływał na metodykę głębokościowej interpretacji danych sejsmicznych.

Jako przykład praktycznego wykorzystania ustalonych zależności przedstawiony zostanie model prędkościowy sporządzony dla rejonu Złotowa. W rejonie tym w 1971 r. wykonano półszczegółowe prace sejsmiczne, w efekcie których otrzymano przekroje oraz mapy czasowe poszczególnych granic refleksyjnych. Przy przeliczaniu otrzymanych przekrojów czasowych na głębokościowe posłużono się opisanymi wyżej zależnościami, sporządzając dla danego rejonu model czasowo-prędkościowy o 4 kompleksach prędkości-



Ryc. 6. Przekrój głębokościowy przez strukturę Złotowa.

Fig. 6. Depth section across the Złotowo structure.

wych: od powierzchni ziemi do stropu wapienia muszlowego; od stropu wapienia muszlowego do stropu cechsztynu; od stropu do spągu cechsztynu oraz poniżej spągu cechsztynu (ryc. 4). W celu ustalenia właściwych dla danego rejonu prędkości średnich i kompleksowych wykorzystano pomiary prędkości średnich w otworach Złotów 1, Świdwin 1, 2 i 3. Dla utworów cechsztynu i starszych przyjęto wartości prędkości kompleksowych ustalonych dla całego obszaru antyklinorium pomorskiego.

Na ryc. 5 przedstawiono zmiany średnich prędkości wzdłuż profilu sejsmicznego 1-II-71T, przecinającego strukturę Złotowa, określoną na podstawie prędkości kompleksowych z uwzględnieniem głębokości występowania oraz zmian miąższości poszczególnych kompleksów prędkościowych. Dla ustalenia tak znacznego zróżnicowania prędkości średnich konieczne byłoby wykonanie znacznej ilości pomiarów średnich prędkości w głębokich otworach wiertniczych. Dotychczas w rejonie Złotowa wykonano tylko 1 pomiar prędkości średnich do głębokości 1500 m. Głębokości granic refleksyjnych do stropu wapienia muszlowego łącznie określano za pomocą hodografu pionowego ustalonego dla tego rejonu na podstawie pomiaru średnich prędkości. Głębokości pozostałych granic określano za pomocą prędkości kompleksowych podanych na ryc. 4. Otrzymany przekrój głębokości obrazuje ryc. 6. Na rycinie linią ciągłą zaznaczono przebieg granic określony na podstawie prędkości kompleksowych, a linią przerywaną głębokość granicy podsolnej, określoną za pomocą prędkości średnich z pomiaru Złotów 1.

Jak z tego wynika metoda ta, stosowana dotychczas dość powszechnie, daje znaczne błędy w określeniu zarówno głębokości występowania, jak i obrazu strukturalnego. Różnica w określeniu głębokości występowania granicy podsolnej w obrębie struktury Złotowa wynosi od -200 m w części peryferyjnej do +200 m w partii szczytowej. Ustalone zależności pomiędzy prędkościami sejsmicznymi a głębokością w poszczególnych formacjach geologicznych pozwalają na sporządzanie modeli prędkościowych dla wybranych rejonów antyklinorium pomorskiego i posługiwanie się przy interpretacji czasowych danych sejsmicznych prędkościami bardziej zbliżonymi do rzeczywistych, co w zdecydowany sposób podnosi dokładność określenia głębokości zalegania poszczególnych granic refleksyjnych, w szczególności zaś granic podsolnych. Znaczna dokładność otrzymanych zależności pozwala na sporządzanie hodografów prędkości średnich, co w dużym stopniu ułatwia dowiązanie stratygraficzne sejsmicznych granic refleksyjnych.

Określony na podstawie analizy prędkości sejsmicznych model prędkościowy antyklinorium pomorskiego pozwala z niewielkim błędem przyporządkować czasowym przekrojom sejsmicznym właściwe przekroje głębokościowe, wyraźnie zwiększając dokładność interpretacji sejsmicznej na obszarze antyklinorium pomorskiego.

LITERATURA

1. Kowalczyk J. — Rozpoznanie prędkościowe utworów skalnych dla rejonów geologicznych Polski. Geofiz. i Geol. naft. 1969, nr 2—4.
2. Krach B. — Zestawienia hodografów pionowych, prędkości interwałowych w rejonie synklinizy perybałtyckiej 1968 r. Ibidem, 1969, nr 8—9.
3. Łaski J. — Uwzględnianie warstwowej budowy ośrodków przy interpretacji sejsmiki refleksyjnej. Ibidem, 1967, nr 4—6.
4. Ogniew A. — Prędkości sejsmiczne skał osadowych wschodniej części monokliny przedsudeckiej. Ibidem, 1970, nr 1—2.
5. Ptak A. — Wstępne regionalne opracowanie rozkładu prędkości w obrębie synklinorium warszawskiego. Ibidem, 1966, nr 5—6.
6. Sławiński Z. — Model prędkościowy zachodniej części obszaru przedsudeckiego. (Prz. geol. 1965, nr 7.
7. Sławiński Z. — Studium prędkości sejsmicznych w synklinorium łódzko-szczecińskim. Prz. geol. 1965, nr 29.
8. Trygar H. — Badania sejsmiczne północno-zachodniej części monokliny przedsudeckiej. Geofiz. i Geol. naft. 1966, nr 7—8.
9. Żaruk J. — Prędkości sejsmiczne skał osadowych północnej części antyklinorium pomorskiego. Ibidem, 1971, nr 12.

SUMMARY

On the basis of an analysis of measurements of average velocities in 25 boreholes on the Pomeranian anticlinorium certain stratigraphical-velocity complexes have been distinguished. A precise analysis of complex, interval and average velocities was carried out for these complexes, as a result of which the relation between seismic velocities and age and

depth of deposits was established. On the basis of the relationships obtained it was possible to construct concrete velocity models for the regions selected or for the entire area of the Pomoranien anticlinorium which significantly increases the degree of accuracy in the depth interpretation of seismic data. As an example of utilization of the established relationships a velocity model was constructed along the seismic profile intersecting the Złotowo structure. Moreover, the influence of the horizontal velocity gradient on the accuracy of depth interpretation of the sub-salt boundary is demonstrated.

РЕЗЮМЕ

На основании анализа замеров средних скоростей распространения сейсмических волн в 25 буровых

скважинах на площади Подморского антиклинория определены стратиграфо-скоростные комплексы. Затем в итоге детального анализа комплексных, поинтервальных и средних скоростей были установлены связи между сейсмическими скоростями и возрастом и глубиной залегания пород. Полученные данные позволяют составить конкретные скоростные модели отдельных районов или всей площади Поморского антиклинория, которые в значительной степени повышают точность глубинной интерпретации сейсмических данных. В качестве примера составлена скоростная модель вдоль сейсмического профиля, пересекающего Злотовскую структуру, и показано влияние горизонтального градиента скоростей на точность глубинной интерпретации залегания нижней границы соляной структуры.