

METODY SEJSMIKI OTWOROWEJ W POLSCE

UKD 550.834:622.241(091)(438)

Początki badań sejsmicznych w głębokich otworach wiertniczych przypadają na lata trzydzieste. Do niedawna jeszcze badania sejsmiczne w otworach miały charakter pomocniczy i wykonywano je przede wszystkim w celu określenia średnich prędkości. Obecnie badania te umożliwiają rozwiązanie wielu zagadnień geofizycznych i geologicznych. Do zadań najczęściej stawianych przed sejsmiką otworową należą ogólnie biorąc:

- pomiary prędkości fal (średnich, warstwowych, interwałowych, kompleksowych);
- litologiczno-stratygraficzna korelacja granic sejsmicznych i geologicznych;
- badanie położenia warstw stromo zapadających (zadania strukturalne);
- określanie własności sprężystych skał;
- badanie obrazu fałowego (geneza, typ, charakter, trajektorie, cechy kinematyczne i dynamiczne fal).

Ostatnie z wymienionych zadań ma fundamentalne znaczenie dla wszystkich badań sejsmicznych. Znanych jest wiele metod i odmian badań w otworach dla sejsmiki. Podział ich opiera się na różnicach typów wykorzystywanych fal, zakresów częstotliwości lub na właściwościach metodyki pomiarów. W Polsce zastosowano następujące metody:

- sejsmiczne profilowanie prędkości (karotaż sejsmiczny);
- pionowe profilowanie sejsmiczne;
- profilowanie akustyczne (karotaż akustyczny).

SEJSMICZNE PROFILOWANIE PRĘDKOŚCI (KAROTAŻ SEJSMICZNY)

Jest to najstarsza metoda sejsmiki otworowej licząca, jak już wspomiano, trzydzieści kilka lat. Jedne z pionierskich badań w Polsce (z 1936 r.) przedstawia praca A. Kisłowa (1). Profilowanie prędkości polega na rejestracji w otworze czasów przyjscia pierwszych impulsów fal prostych (bezpośrednich) wzbudzanych przy powierzchni ziemi zazwyczaj w 3 punktach strzałowych rozmieszczonych w 3 azymutach w stosunku do badanego otworu. Z czasów i głębokości rejestracji oblicza się prędkości średnie, interwałowe i kompleksowe.

Dotychczas w Polsce wykonano profilowanie prędkości w ponad 600 głębokich otworach wiertniczych (ryc. 1). Wyniki pomiarów są przedstawiane w standardowej (jednolitej) formie (ryc. 2). Graficzne opracowanie pomiarów jest wykonywane w formie zbiorczych wykresów w następujących układach:

- a — zależność czasu zredukowanego do pionu „na odwiert” t_r od głębokości H_r (hodograf pionowy),
- b — zależność prędkości średnich v_{sr} od głębokości,
- zależność prędkości kompleksowych v_k od głębokości,

- zależność prędkości interwałowych v_i od głębokości,
- c — zależność prędkości średnich od podwojonego czasu zredukowanego $2t_r$.

Dotychczas stosowaną metodykę i wyniki pomiarów średnich prędkości w otworach opisano w sposób wyczerpujący w literaturze fachowej (2—7, 9, 10, 17 i in.). Postęp techniczny w tej metodzie jest niewielki. W technice pomiarowej do nowości należy stosowanie, już w większości pomiarów, sond wielokanałowych (3—6) i odpowiednich kabli karotażowych oraz znaczne zwiększenie głębokości badań.

Odnosnie do opracowań, to innowacją w niektórych dokumentacjach pomiarów średnich prędkości jest zastosowanie elektronicznej techniki obliczeniowej do opracowania informacji o prędkościach. Niezależnie od stosowania tradycyjnej metodyki interpretacji oblicza się hodografy pionowe oraz prędkości średnie i interwałowe na maszynie cyfrowej Odra 1013, według programu wykonanego w Instytucie Naftowym (J. Łaski, M. Malaga). Program opracowano przy założeniu istnienia w ośrodku poziomego gradientu prędkości. W tym przypadku prędkość v , oprócz tego, że jest funkcją głębokości jest również funkcją odległości i kierunku (azymutu), w którym znajduje się punkt strzałowy:

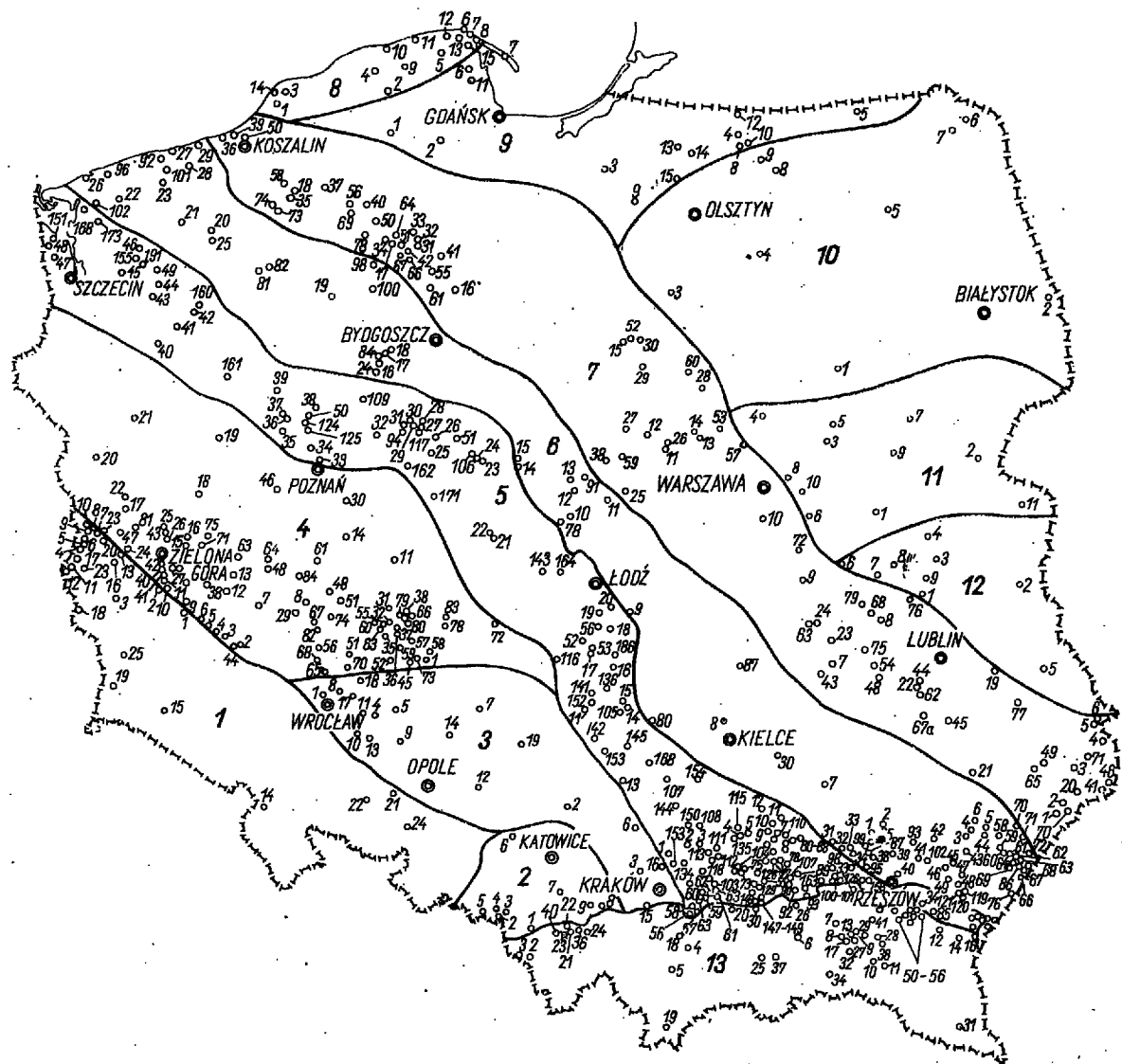
$$v = v_0 + \varepsilon \cdot d \cdot \cos(A - \varphi)$$

gdzie:

- v_0 — prędkość średnia zredukowana „na odwiert”,
- d — odległość punktu strzałowego od odwiertu,
- A — azymut punktu strzałowego,
- φ — azymut, w którym zmiany prędkości są największe (kierunek przeciwny do upadu),
- ε — współczynnik proporcjonalności.

W zależności tej występują trzy niewiadome v_0 , ε , φ . Mając dane z trzech punktów strzałowych otrzymujemy układ trzech równań, z których oblicza się te niewiadome. Obliczenia wykonuje się dla każdej głębokości sondy pomiarowej. Aproksymowania hodografów pionowych dokonuje się na podstawie analizy wyników profilowania prędkości z obszaru Polski przy zastosowaniu matematycznych maszyn cyfrowych (6). Stosuje się funkcję potęgową $t = c \cdot H^b$.

Poprawa metodyki i techniki karotażu sejsmicznego powinna mieć na celu przede wszystkim ciągłe korelacyjne śledzenie fal, co uzyskuje się przy zastosowaniu wielokanałowych sond głębinowych oraz dokładnym wiązaniu sejsmogramów z sąsiednich rozstawów przez pokrywanie się skrajnych stanowisk geofonów. Konieczny jest zapis magnetyczny. Poza tym postęp w tej metodzie powinien dotyczyć odbioru kierunkowego (geofony trójskładowe), analizy dynamicznej, opracowywania materiałów pomiarowych na centralach oraz stosowania różnych metod interpretacji zależnie od modelu ośrodka.



Ryc. 1. Zestawienie karotaży sejsmicznych na tle jednostek geologicznych wykonanych do 1969 r.

Fig. 1. Comparison of seismic loggings, made till 1969, against the background of geological units. Geological units according to W. Pożaryski.

Jednostki geologiczne wg W. Pożaryskiego: 1 - Sudety, 2 - zapadliśko górnośląskie, 3 - monoklina śląskokrakowska, 4 - monoklina przedsudecka, 5 - synklinorium szczecińsko-lódzko-miechowskie, 6 - antyklinorium środkowopolskie, 7 - synklinorium brzeskie, 8 - wyniesienie Leby, 9 - synekliza perybaltycka, 10 - wyniesienie mazursko-suwałskie, 11 - obniżenie podlaskie, 12 - wyniesienie zrębowe podlasko-lubelskie, 13 - Karpaty; O 3 - numery otworów profilowanych w jednostce geologicznej.

1 - Sudetes, 2 - Upper Silesian depression, 3 - Silesian-Cracow monocline, 4 - Fore-Sudetic monocline, 5 - Szczecin-Lódz-Miechów synclinorium, 6 - Middle-Polish anticlinorium; 7 - marginal synclinorium, 8 - Leba elevation, 9 - Peri-Baltic synecclise, 10 - Mazury-Suwałki elevation, 11 - Podlasie depression, 12 - horst-like Podlasie-Lublin elevation, 13 - Carpathians, O 3 - numbers of logging wells.

W rejonach ze złożoną budową geologiczną, gdzie fal załamanych lub odbitych od stromo zalegających granic nie rejestruje się na powierzchni ziemi, rejestracje fal w głębokich odwiertach można wykorzystywać do rozwiązania zadań strukturalnych (12, 16).

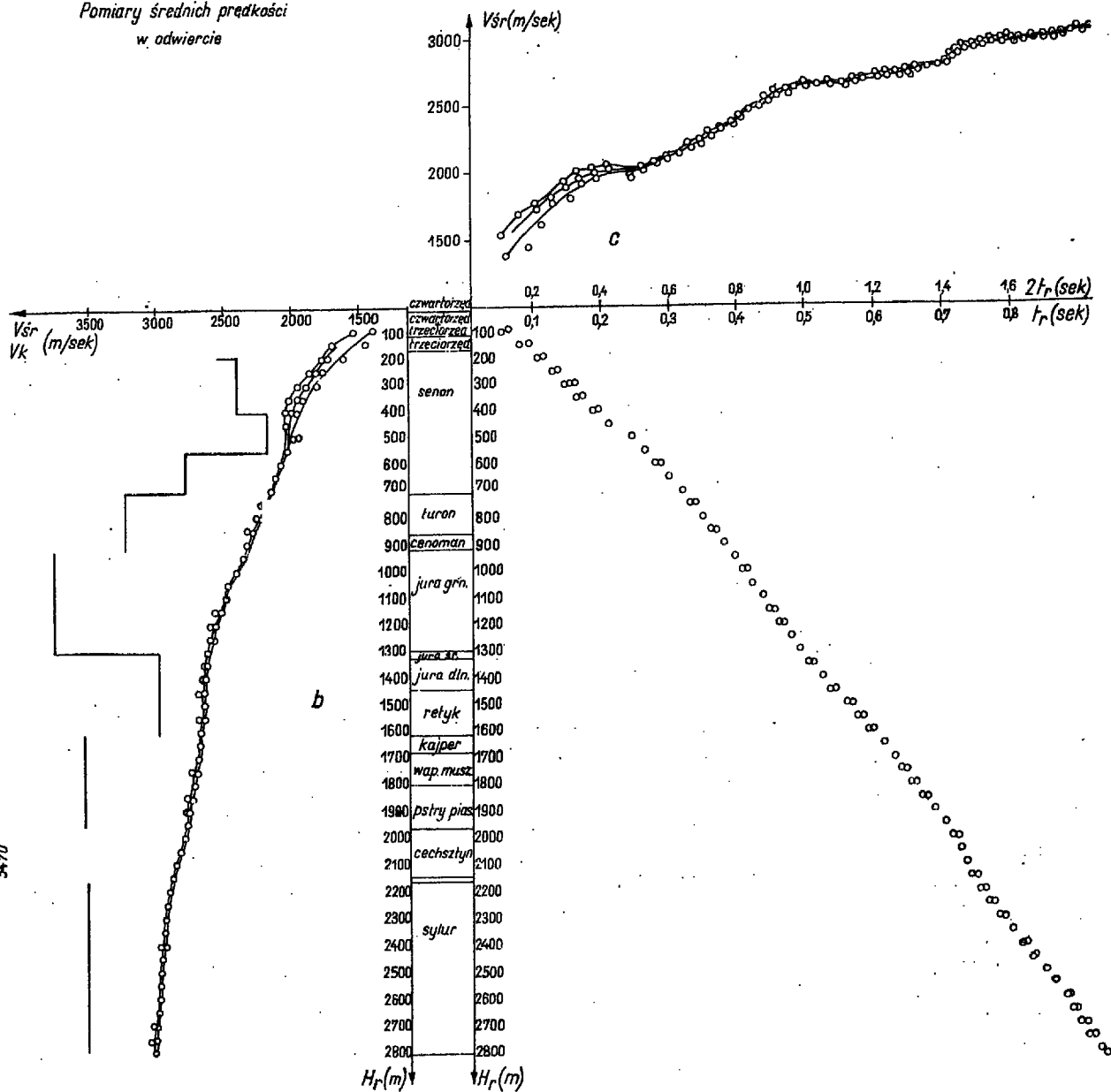
PIONOWE PROFILOWANIE SEJSMICZNE (PPS)

Pionowe profilowanie sejsmiczne jest najnowszą z metod sejsmiki otworowej u nas zastosowaną i w praktyce mało znaną. Opiera się ono na rejestracji pierwszych i dalszych impulsów. Dostarcza więcej informacji o charakterystyce prędkościowej przekroju, genezie i właściwościach rejestrowanych fal, o obecności i charakterze odbić wielokrotnych, formie zalegania granic odbijających i załamujących w

otoczeniu profilowanego otworu; umożliwia zbadanie procesu kształtowania się obrazu falowego, przy czym daje możliwość badania go w różnych częściach przekroju. Ponadto służy do litologiczno-stratygraficznej korelacji granic sejsmicznych z przekrojem geologicznym. To wszystko zwiększa wiarygodność interpretacji geologicznej danych sejsmicznych oraz pozwala oceniać możliwości poszukiwawcze i perspektywy badań sejsmicznych. I tak np. ważnym aktualnie zadaniem sejsmiki refleksyjnej jest zwiększenie głębokości badań. Jedną z przyczyn ograniczających efektywność i możliwości tej metody są fale wielokrotne, które utrudniają śledzenie fal odbitych od granic głęboko występujących.

Najbardziej efektywnym sposobem badania fal wielokrotnych, jak wykazała praktyka w ZSRR (8), jest metoda pionowego profilowania sejsmicznego.

Pomiary średnich prędkości
w odwiercie



Ryc. 2. Wyniki sejsmicznego profilowania prędkości (karotazu sejsmicznego).

Fig. 2. Results of velocity logging (seismic logging).

Przy stosowanej metodyce badań można określać charakterystyki kinematyczne, charakterystykę widmową i względny poziom amplitud dominujących fal jednokrotnych i wielokrotnych w wewnętrznych punktach ośrodka i na powierzchni ziemi. Zestawienie danych zarejestrowanych metodą PPS o intensywności fal wielokrotnych z cechami przekrojów typowymi dla większych obszarów wnosi dużo do zagadnienia tłumienia fal wielokrotnych i umożliwia właściwe zaprojektowanie badań metodą pokryć wielokrotnych w sejsmice refleksyjnej.

W metodzie PPS rejestracje fal sejsmicznych wykonuje się w otworze wiertniczym (na profilu pionowym) i na powierzchni ziemi wzdłuż profilu poziomego przechodzącego przez wylot otworu. Fale wzbudza się z kilku punktów strzałowych rozmieszczonych na poziomym profilu. Rejestruje się je w pierwszych i dalszych impulsach. Wielokanałowy zapis magnetyczny umożliwia realizowanie odbioru kierunkowego i polepszenie korelacji fal użytecznych. Dla rejestracji fal przemiennych i poprzecznych stosuje się trójskładowe układy geofonów.

W rezultacie rejestracji na pionowym i poziomym profilu otrzymuje się złożone profilowanie pionopionowe. Wyniki pionowego profilowania sejsmicznego przedstawia się w formie hodografów pionowych i poziomych sporządzonych ze skorelowanych sejsmogramów lub całych sekcji czasowych. Nad hodografem pionowym umieszcza się hodograf poziomy (z powierzchni) tak, aby osie czasowe tych hodografów pokrywały się.

W Polsce po raz pierwszy badania tą metodą przeprowadzili w 1969 r. specjaliści radzieccy za pomocą przedsiębiorstw geofizyki górnictwa naftowego (15). Profilowania wykonano w 11 otworach znajdujących się w następujących jednostkach geologicznych (ryc. 3):

- wyniesienie Łeba (Łeba-8, Żarnowiec IG-1),
- synklinorium pomorskie (Wierzchowo-3),
- obniżenie podlaskie (Dęba Wielkie-1),
- synklinorium lubelskie (Dęblin-7, Pionki-3, Machnów-1),
- monoklina przedsudecka (Zatonie-5, Marcinki IG-1),



Ryc. 3. Lokalizacja pionowych profilowań sejsmicznych wykonanych w 1969 r. (na tle jednostek geologicznych).

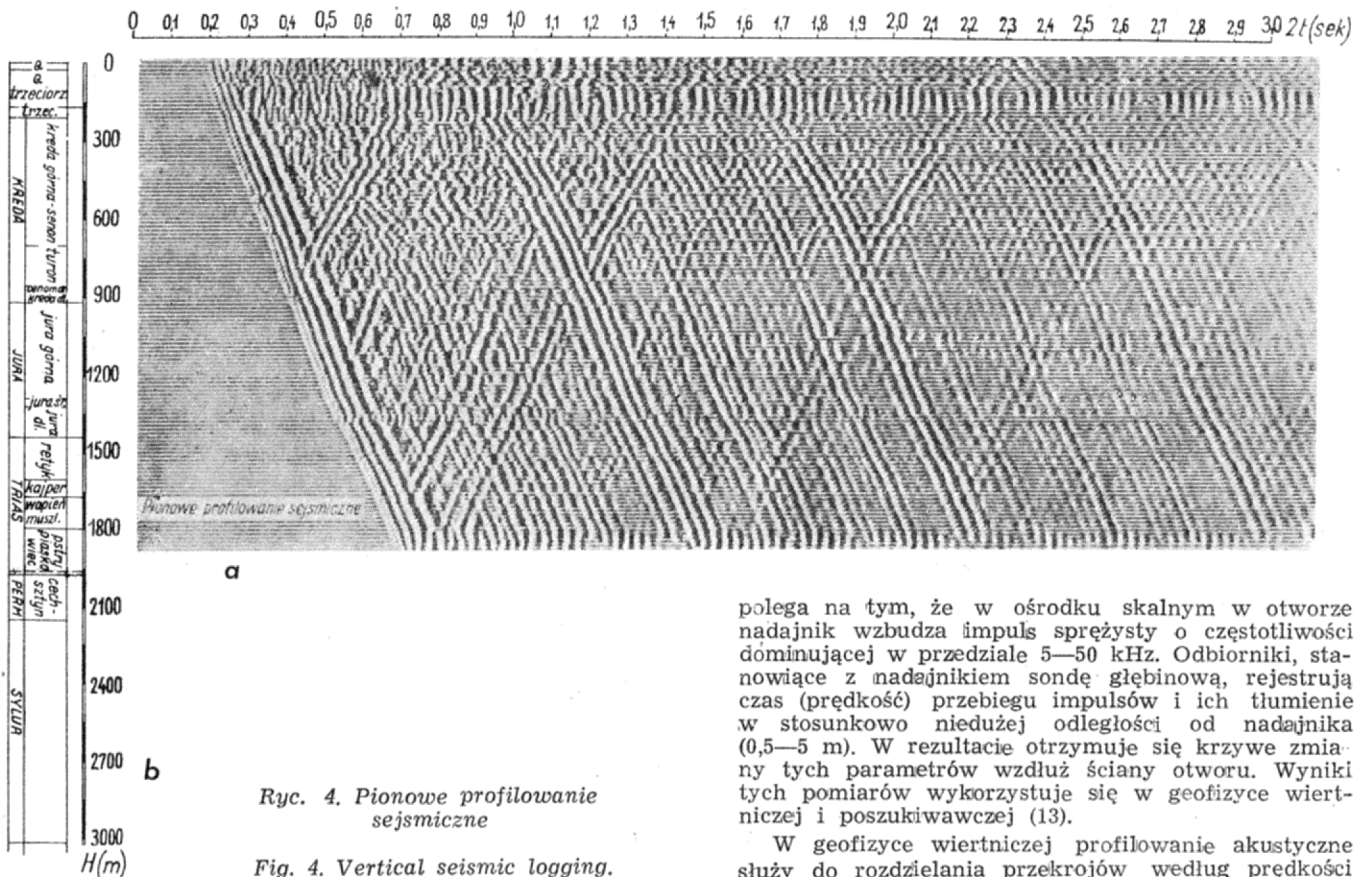
Fig. 3. Situation sketch of vertical seismic loggings made in 1969 (against the background of geological units).

- fale od utworów cechsztyńskich; intensywne, dobrze się korelujące;
- fale od utworów pstręgo piaskowca;
- fale od utworów wapienia muszlowego;
- fale od utworów retyku;
- fale od utworów jurajskich;
- fale od utworów kredowych.

Granica między kredą a jurą stanowi oprócz powierzchni ziemi główne źródło fal wielokrotnych. Fale od cechsztynu interferują z dwukrotnie odbitą falą od stropu jury. Na powierzchni ziemi rejestruje się sumaryczny obraz falowy, którego poszczególnych fal często nie da się rozróżnić w czasie. Rejestracje fal wzdłuż pionowego profilu w otworze umożliwiają rozdzielenie ich (według czasu i głębokości), określenie prędkości i trajektorii. Tak więc można jednoznacznie określić typ i charakter fal. Stanowi to zasadniczą wyższość rejestracji w otworze nad rejestracją na powierzchni ziemi. Ze względu na duże możliwości pionowych profilowań sejsmicznych należałoby przystąpić do ich masowego stosowania w Polsce.

PROFILOWANIE AKUSTYCZNE (KAROTAŻ AKUSTYCZNY)

Profilowanie akustyczne w otworach jest kompleksem pomiarów czasów przebiegu (pomiarów prędkościowe) oraz własności dynamicznych (pomiarów amplitudowe) fal ultradźwiękowych. Istota metody



Ryc. 4. Pionowe profilowanie sejsmiczne

Fig. 4. Vertical seismic logging.

synklinorium miechowskie (Secemin IG-1), zapadlisko przedkarpackie (Miększ Nowy-1).

Przykład rejestracji metodą PPS przedstawia ryc. 4. Już samo zestawienie rejestracji z otworu (ryc. 4a) i z powierzchni ziemi oraz przekroju litologiczno-stratygraficznego (ryc. 4b) dostatecznie ilustruje obraz falowy dla danego układu geologicznego. Na podstawie analizy zbiorczych sejsmogramów można wydzielić, począwszy od dołu przekroju, następujące grupy fal odbitych od ostrych granic sejsmicznych:

polega na tym, że w ośrodku skalnym w otworze nadajnik wzbudza impuls sprężysty o częstotliwości dominującej w przedziale 5—50 kHz. Odbiorniki, stanowiące z nadajnikiem sondę głębinową, rejestrują czas (prędkość) przebiegu impulsów i ich tłumienie w stosunkowo niedużej odległości od nadajnika (0,5—5 m). W rezultacie otrzymuje się krzywe zmiany tych parametrów wzdłuż ściany otworu. Wyniki tych pomiarów wykorzystuje się w geofizyce wiertniczej i poszukiwawczej (13).

W geofizyce wiertniczej profilowanie akustyczne służy do rozdzielenia przekrojów według prędkości i korelacji geologicznej przewierconych warstw, wydzielenia warstw porowatych i przepuszczalnych, obliczania rodzaju płynów złożowych w warstwach, badania stanu zacementowania otworu, lokalizacji złóż oraz uszkodzeń rur.

W geofizyce poszukiwawczej profilowanie akustyczne wykorzystuje głównie sejsmika do identyfikacji i korelacji granic sejsmicznych oraz geologicznych, szczegółowych studiów prędkości warstwowych, określenia prędkości średnich jako funkcji

głębokości, sporządzania sejsmogramów syntetycznych i badania dynamicznych charakterystyk fal. Profilowanie akustyczne charakteryzuje się największą wydajnością i szczegółowością badania w pionie własności sprężystych skał.

Profilowanie akustyczne było wypróbowane po raz pierwszy w USA w 1954 r. W Polsce prototyp aparatury skonstruował w latach 1960–64 Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN na zlecenie Przedsiębiorstwa Geofizyki Przemysłu Naftowego. Systematyczne pomiary w otworach wykonywane są przez PGPN od 1965 r. Profilowanie akustyczne (dla celów sejsmicznych) wykonuje w PGPN od 1968 r. grupa specjalistów radzieckich pod kierownictwem W. Giełfanda aparaturą ŁAK-2. Dotychczas wykonano profilowania w kilkudziesięciu otworach na obszarze całej Polski.

Przykład opracowania pomiarów dla potrzeb sejsmiki przedstawiono na ryc. 5. Zawiera ono wykresy prędkości warstwowych (ryc. 5a), współczynników odbicia (5b), hodograf pionowy (5c) i sejsmogram impulsowy (5d). Do sporządzania sejsmogramu syntetycznego potrzebna jest właśnie znajomość współczynników odbicia fal (ryc. 5b, d) na granicach warstw o różnych gęstościach ρ i prędkościach (V).

Współczynnik odbicia oblicza się wg wzoru:

$$K = \frac{\rho_2 V_2 - \rho_1 V_1}{\rho_2 V_2 + \rho_1 V_1}$$

W praktyce wykorzystuje się przybliżony wzór:

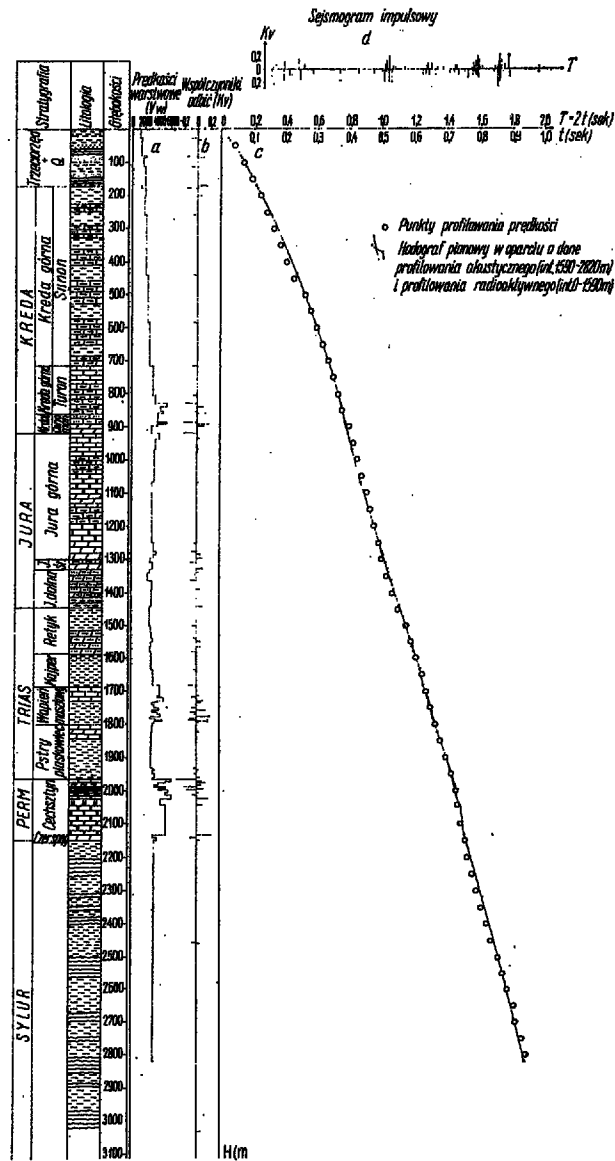
$$K \approx \frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}$$

Prędkość w warstwach odczytuje się z krzywej profilowania. Dysponując współczynnikami odbicia (sejsmogramem impulsowym) i przyjętą formą impulsu można sporządzić sejsmogram syntetyczny metodą analogową lub obliczeniową. Identyfikacji i korelacji granic sejsmicznych z geologicznymi dokonuje się na podstawie różnic w prędkościach warstwowych w zestawieniu z przekrojem litologiczno-stratygraficznym otworu (ryc. 5a) lub drogą porównania sejsmogramów syntetycznych z sejsmogramami połowymi. Prędkości średnie w funkcji głębokości i czasu można obliczyć z krzywej czasu sumarycznego dopiero po skalibrowaniu jej na podstawie zwykłego karotażu sejsmicznego. Tak więc karotaż sejsmiczny stanowi podstawę do kalibracji krzywej czasu sumarycznego profilowania akustycznego.

Przypomnijmy ponadto, że wyniki karotażu akustycznego mogą różnić się istotnie od wyników zwykłego karotażu sejsmicznego w funkcji średnich prędkości (11). Przyczyny rozbieżności wyników obu metod mogą być następujące:

- zmiana właściwości skał blisko ściany otworu (np. spowodowana działaniem płuczki lub ciśnieniem przy wierceniu);
- niejednorodność skał (heterogeniczność) i dyspersja prędkości;
- konstrukcja i rozmiary sondy;
- średnica otworu, ukształtowanie powierzchni ścian otworu, ich łowienie w powiązaniu z właściwościami badanego przekroju.

Oceniając ogólnie aktualny stan karotażu akustycznego w Polsce należy stwierdzić, że praktyka pozostaje jeszcze daleko w tyle za teorią. Rozwój jakościowy i ilościowy na dużą skalę jest możliwy po uzyskaniu wysokiej klasy aparatury zapewniającej wykonywanie pomiarów dla rozwiązywania wszystkich wymienionych na wstępie zagadnień.



Ryc. 5. Wyniki profilowania akustycznego.

Fig. 5. Results of acoustic logging

PODSUMOWANIE

W literaturze obcej poświęca się bardzo dużo miejsca sejsmice otworowej (11, 12, 14 i in.). Wynika to z potrzeb badania rzeczywistego obrazu falowego, korelacji granic sejsmicznych i geologicznych oraz dokładnych pomiarów prędkości. Natomiast u nas trudno jest mówić o zadowalającym poziomie sejsmiki otworowej. Obecnie, jeśli chodzi o poziom badań sejsmicznych w otworach, to nie odpowiada on poziomowi sejsmiki powierzchniowej. Mimo znacznego postępu nie docenia się właściwie przydatności sejsmiki otworowej i należy jej roli w kompleksie badań sejsmicznych, a przecięt możliwości tej metody są duże. Dalszy rozwój jest uwarunkowany przede wszystkim wyposażeniem w odpowiedni sprzęt pomiarowy i zapewnić go może tylko odpowiednia polityka inwestycyjna i metodyczna zleceniodawców oraz instytucji poszukiwawczych i geofizycznych. Ograniczona objętość artykułu nie pozwala na omówienie, choćby pobieżne, tego obszernego zagadnienia.

LITERATURA

1. Kisłow A. — Pomiar sejsmicznych prędkości średnich w tortonie przedgórze Karpat. Lwów, 1939.
2. Kisłow A. — Zagadnienie pomiarów średnich prędkości w przypadku istnienia stromych upadów, Geofizyka poszuk. i wiert. 1962, nr 11—12.
3. Kowalczyk J. — Rozpoznanie prędkościowe utworów skalnych dla regionów geologicznych Polski. Geofizyka i Geol. naft. 1969, nr 2—4.
4. Krach B., Krach E. — Nomogramy do liczenia prędkości średnich. Ibidem, 1964, nr 10—12.
5. Krach B. — Wyniki prac Grupy Pomiarów Średnich Prędkości w 1959 r. Geofizyka poszuk. i wiertn. 1961, nr 9—10.
6. Łaski J. — Analiza wyników profilowania prędkości z obszaru Polski przy zastosowaniu matematycznych maszyn cyfrowych. Warszawa, 1967.
7. Młynarski S. — Karotaż sejsmiczny w latach 1953—59 na obszarze Polski. Prz. geol. 1960, nr 10.
8. Muzyka I. M. — O włąnaniu osobiennostej rzarziea na intensiwnost' mnogokratnych woin (po danym wiertikalnego sejsmiczieskiego profilowania). Fizyka Ziemi, 1969, nr 11.
9. Pawłowicz E. — Metodyka i interpretacja pomiarów średnich prędkości. Geofizyka poszuk. i kopaln. 1958, nr 11—12.
10. Pepel A. — Z zagadnień wyznaczania funkcji prędkości od głębokości w utworach paleozoicznych syneklizy perybałtyckiej i wyniesienia Łęby. Stan i kier. rozw. geof. w Polsce. Cz. I, 1965.
11. Problemy sejsmiczieskiej razwiedki. Moskwa, 1962.
12. Rudnickij W. P. — Sejsmiczieskiye issledowanija w skwaziinach. Kijów, 1968.
13. Soja Z. — Profilowanie akustyczne otworów i pierwsze ich zastosowanie w PGNP. Techn. Poszuk. 1967, nr 24.
14. Sprawocznik geofizika. Moskwa 1966, t. IV.
15. Sprawozdania z profilowań otworów metodami: PPS (B. Giejman, J. Głan, S. Kuwyszyn), PA (W. Giefand, L. Mienakier, M. Zaleski), SPP (B. Krach, B. Burchat, H. Grzeszczuk, J. Świtek). Archiwa PGNP i PPG. Toruń, Kraków, Warszawa.
16. Śliwiński Z., Feret B. — O możliwościach wykorzystania sejsmicznych fal załamanych, rejestrowanych w głębokich odwiertach do badania niektórych form strukturalnych w podłożu miocenu na przedgórze Karpat. Geofizyka i Geol. naft. 1967, nr 3.
17. Śliwiński Z. — Studium prędkości sejsmicznych w synklinorium łódzko-szczecińskim. Warszawa, 1965.
18. Świtek J. — Pionowe profilowanie sejsmiczne. Techn. Poszuk. 1970, nr 34.

SUMMARY

The article deals with the methods of drilling seismics applied in Poland, and the examples of examinations and forms of presenting results. Possibilities of the individual methods are discussed and their use is presented. Particular attention is paid to the modern solutions of seismic investigations in bore holes, introduced in the last years.

РЕЗЮМЕ

В статье описываются применяющиеся в Польше методы скважинной сейсморазведки с примерами проведенных работ и форм изображения результатов. Рассматриваются области применения отдельных методов. Много внимания посвящено новейшим решениям в области скважинной сейсморазведки за последние годы.