

Marek GRAD

## Prędkości fal sejsmicznych w pokrywie osadowej platformy wschodnioeuropejskiej

Przedstawiono wyniki analizy prędkości podłużnych fal sejsmicznych w pokrywie osadowej polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej. Na podstawie danych z 261 otworów przedyskutowano szczegółowo zależności prędkości fal sejsmicznych od głębokości dla wszystkich okresów geologicznych od czwartorzędu i trzeciorzędzie po kambr. Dane były aproksymowane funkcją liniową  $v(z) = a + \beta z$  i potęgową  $v(z) = az^b$ . Współczynniki w tych zależnościach zostały określone metodą najmniejszych kwadratów. Wyniki analizy dla różnych rejonów platformy porównano z wynikami uzyskanymi przez innych autorów. Określono również zależność prędkości średniej od miąższości dla pokrywy kenozoicznej-mezozoicznej oraz osadowej polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej.

### WSTĘP

Znajomość rozkładów prędkości fal sejsmicznych w pokrywie osadowej ma duże znaczenie w interpretacji materiałów sejsmiki refleksyjnej i refrakcyjnej, a także w badaniach metodą głębokich sondowań sejsmicznych. Jest to szczególnie ważne dla obszarów o złożonej budowie geologicznej oraz znacznych różnicach miąższości poszczególnych warstw tworzących pokrywę osadową. W opracowaniu przedstawiono wyniki analizy prędkości fal sejsmicznych pomierzonych w otworach zlokalizowanych w polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej<sup>1</sup>. Badania przeprowadzono w sześciu jednostkach drugiego rzędu, wchodzących w skład obszaru „czysto” platformowego ( $A_{1-4}$ ), i w strefie brzeżnej platformy wschodnioeuropejskiej ( $B_1$  i  $C_{1a}$ ). Geologiczny podział tego obszaru (J. Sokołowski, 1968) oraz lokalizację otworów wykorzystanych w opracowaniu przedstawia fig. 1.

W omawianej części platformy wschodnioeuropejskiej grubość pokrywy osadowej (J. Skorupa, 1974; S. Młynarski, 1984) wzrasta od 200–500 m na wynie-

<sup>1</sup> Praca wykonana w ramach problemu CPBP: 03.02 temat 1.2.

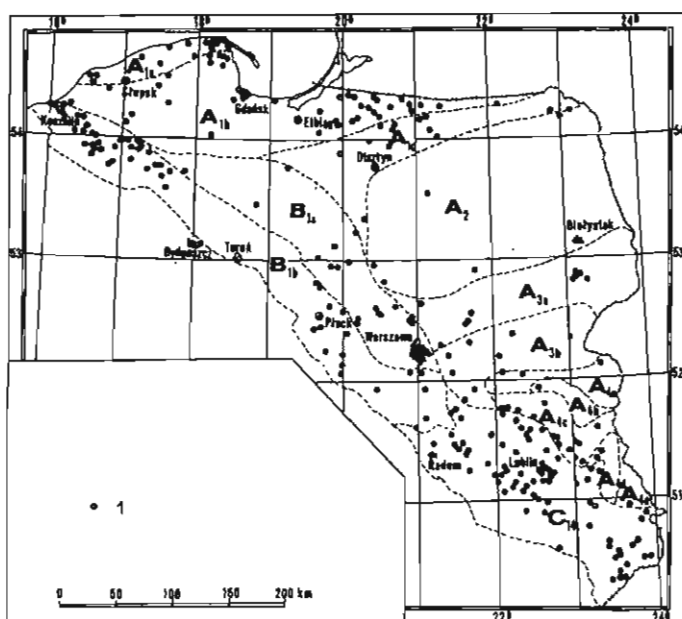


Fig. 1. Lokalizacja otworów i podział geologiczny polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej (J. Sokołowski, 1968)

Location of boreholes and geological subdivision of Polish part of the East-European Platform (after J. Sokołowski, 1968)

Jednostki geologiczne:  $A_1$  – synekliza perybałtycka;  $A_{1a}$  – wyniesienie Łeby,  $A_{1b}$  – niczka gdańska,  $A_{1c}$  – monoklina kętrzyńska;  $A_2$  – wyniesienie mazursko-suwalskie;  $A_3$  – obniżenie podlaskie;  $A_{3a}$  – monoklina wyszkowsko-białowiecka,  $A_{3b}$  – obniżenie podlaskie;  $A_4$  – wyniesienie zrębowe podlasko-lubelskie;  $A_{4a}$  – północne obrzeżenie masywu łukowskiego,  $A_{4b}$  – masyw łukowski,  $A_{4c}$  – południowe obrzeżenie masywu łukowskiego,  $A_{4d}$  – obniżenie włodawskie,  $A_{4e}$  – wyniesienie chełmskie;  $B_1$  – synklinorium brzeżne;  $B_{1a}$  – skłon platformowy,  $B_{1b}$  – synklinorium pomorsko-warszawskie;  $C_{1a}$  – synklinorium lubelskie; 1 – otwory wiertnicze

Geological units:  $A_1$  – Peribaltic Syncline;  $A_{1a}$  – Leba Elevation,  $A_{1b}$  – Gdańsk Basin,  $A_{1c}$  – Kętrzyn Monocline;  $A_2$  – Mazury-Suwałki Elevation;  $A_3$  – Podlasie Depression;  $A_{3a}$  – Wyszków-Białowieża Monocline,  $A_{3b}$  – Podlasie Depression;  $A_4$  – Podlasie-Lublin Horst Elevation;  $A_{4a}$  – northern margin of Łuków Massif,  $A_{4b}$  – Łuków Massif,  $A_{4c}$  – southern margin of Łuków Massif,  $A_{4d}$  – Włodawa Depression,  $A_{4e}$  – Chełm Elevation;  $B_1$  – Marginal Synclinorium;  $B_{1a}$  – platform slope,  $B_{1b}$  – Pomeranian-Warsaw Synclinorium;  $C_{1a}$  – Lublin Synclinorium; 1 – boreholes

sieniu mazursko-suwalskim ( $A_2$ ) do 8000–9000 m w synklinorium brzeżnym ( $B_1$ ) i lubelskim ( $C_{1a}$ ). Tak duże różnice miąższości na stosunkowo niewielkim obszarze wymagają szczegółowego i dokładnego rozpoznania prędkości sejsmicznych w pokrywie osadowej.

W opracowaniu wykorzystano dane z 261 otworów, w których w latach 1955–1982 wykonano rutynowe pomiary prędkości sejsmicznych. W większości przypadków maksymalna głębokość pomiaru wynosiła 1500–3500 m. Wyniki profilowania prędkości z platformy wschodnioeuropejskiej były dotychczas publikowane już wielokrotnie. Można tu wymienić opracowania rozkładów prędkości z głębokością dla wyniesienia mazursko-suwalskiego (J. Kowalczyk, 1967, 1969), syneklizy perybałtyckiej (A. Pepel, 1965) i synklinorium warszawskiego (A. Ptak, 1966; E. Kamińska, J. Zagórski, 1977) oraz analizy czasów pionowych dla synklinorium pomorskiego (J. Żaruk, 1971; H. Jankowski, 1975), a także dla innych regionów Polski (m.in. Z. Śliwiński, 1965; J. Łaski, 1967).

## ANALIZA PRĘDKOŚCI WARSTWOWYCH

Danymi wyjściowymi są prędkości warstwowe ( $v_i$ ) uzyskane w rutynowych profilowaniach prędkości. Dla poszczególnych otworów były analizowane one dla kolejnych okresów geologicznych od trzeciorzędu i czwartorzędu po kambry. W przypadkach, kiedy w ramach jednej formacji stratygraficznej występowało znaczne zróżnicowanie prędkości, przyjmowano szczegółowszy podział zakresów głębokości i odpowiadających im prędkości. Zależności prędkości  $v$  od głębokości  $z$  dla określonej formacji stratygraficznej i określonej jednostki geologicznej aproksymowano funkcją liniową:

$$v(z) = \alpha + \beta z \quad [1]$$

a współczynniki  $\alpha$  i  $\beta$  określono metodą najmniejszych kwadratów (H. Hänsel, 1968):

$$\alpha = \frac{\sum_{i=1}^n p_i h_i \sum_{i=1}^n p_i h_i v_i - \sum_{i=1}^n p_i v_i \sum_{i=1}^n p_i h_i}{\left(\sum_{i=1}^n p_i h_i\right)^2 - \sum_{i=1}^n p_i \sum_{i=1}^n p_i h_i^2} \quad [2]$$

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^n p_i h_i \sum_{i=1}^n p_i v_i - \sum_{i=1}^n p_i \sum_{i=1}^n p_i h_i v_i}{\left(\sum_{i=1}^n p_i h_i\right)^2 - \sum_{i=1}^n p_i \sum_{i=1}^n p_i h_i^2}$$

W wyrażeniach tych  $h_i = 1/2 (h'_i + h''_i)$ , gdzie  $h'_i$  i  $h''_i$  oznaczają odpowiednio głębokość stropu i spągu  $i$ -tej warstwy. Prędkość warstwowa  $v_i$  w  $i$ -tej warstwie dotyczy środka warstwy na głębokości  $h_i$ . Wagę poszczególnych prędkości warstwowych przyjęto równą grubości warstwy  $p_i = h''_i - h'_i$ .

Wstępne wyniki aproksymacji funkcją liniową [1], zgeneralizowane dla całej polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej, zostały już opublikowane wcześniej (M. Grad, 1986). Dla tych samych danych dokonano również aproksymacji zależności prędkości od głębokości za pomocą funkcji potęgowej:

$$v(z) = az^b \quad [3]$$

Współczynniki  $a$  i  $b$  wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów po przekształceniu wzoru [3] do postaci:

$$\ln v(z) = \ln a + b \ln z \quad [4]$$

Wykorzystane zostały wyrażenia [2], przy czym zamiast występujących tam  $h_i$ ,  $v_i$  i  $p_i$  uwzględniono logarytmy tych wielkości. Aproksymację funkcją liniową [1] i potęgową [3] zastosowano do wszystkich jednostek dla poszczególnych okresów geologicznych od kredy po kambry. W przypadku prędkości średnich w trzeciorzędzie i czwartorzędzie, pokrywie kenozoicznej-mezozoicznej oraz całym kompleksie osadowym zastosowano również aproksymację funkcją liniową i potęgową.

Tabela 1

## Prędkości sejsmiczne w platformie wschodnioeuropejskiej

	Krelda	Jura	Trias	Perm	Karbon	Dewon	Sylur	Ordowik	Kambr
<b>A<sub>1a</sub></b>	v=762 z <sup>0,189</sup> z=50-800	v=450 z <sup>0,267</sup> z=135-720	v=634 z <sup>0,208</sup> z=275-876						
<b>A<sub>1b</sub></b>	v=834 z <sup>0,143</sup> z=75-840	v=1214 z <sup>0,102</sup> z=175-1080	v=537 z <sup>0,231</sup> z=270-1700	v=3017 z <sup>0,062</sup> z=450-2150	*	*	v=268 z <sup>0,344</sup> z=740-4380	v=1260 z <sup>0,152</sup> z=1490-4415	v=1078 z <sup>0,182</sup> z=1430-5000
<b>A<sub>1c</sub></b>	v=407 z <sup>0,290</sup> z=205-1050	v=379 z <sup>0,269</sup> z=450-1740	v=289 z <sup>0,318</sup> z=630-2870						
<b>A<sub>2</sub></b>	v=421 z <sup>0,290</sup> z=185-1200	v=573 z <sup>0,244</sup> z=400-1976	v=280 z <sup>0,325</sup> z=800-2500	*	*	*	*	*	*
<b>A<sub>3</sub></b>	v=677 z <sup>0,222</sup> z=125-970	v=874 z <sup>0,137</sup> z=335-1430	v=399 z <sup>0,280</sup> z=455-2070	v=277 z <sup>0,364</sup> z=480-2270	*	*	v=681 z <sup>0,235</sup> z=595-3585	v=1167 z <sup>0,151</sup> z=630-1980	v=1332 z <sup>0,152</sup> z=665-4250
<b>A<sub>4</sub></b>	v=674 z <sup>0,233</sup> z=0-700	v=1093 z <sup>0,173</sup> z=250-900	*	*	v=983 z <sup>0,181</sup> z=400-1550	*	v=820 z <sup>0,199</sup> z=395-2975	*	v=878 z <sup>0,219</sup> z=775-3375
<b>B<sub>1a</sub></b>	v=292 z <sup>0,347</sup> z=170-1940	v=514 z <sup>0,262</sup> z=850-2740	v=150 z <sup>0,412</sup> z=1350-3040	v=2680 z <sup>0,083</sup> z=1615-4370	*	*			v=500 z <sup>0,290</sup> z=2800-3880
<b>B<sub>1b</sub></b>	v=454 z <sup>0,274</sup> z=45-1650	v=435 z <sup>0,286</sup> z=100-3260	v=199 z <sup>0,382</sup> z=740-4520		v=803 z <sup>0,213</sup> z=1900-4650	v=4650=const z=1725-4850	*	*	*
<b>C<sub>14</sub></b>	v=632 z <sup>0,248</sup> z=0-1125	v=805 z <sup>0,281</sup> z=350-1585	*	*	v=1152 z <sup>0,168</sup> z=360-3490	v=3150 z <sup>0,059</sup> z=810-4920	v=1464 z <sup>0,134</sup> z=1100-5010	*	*
<b>Całość</b>	v=899 z <sup>0,216</sup> v=1991+1229z z=0-1940	v=471 z <sup>0,282</sup> v=2586-0,701z z=100-3250	v=263 z <sup>0,342</sup> v=1993+0,757z z=270-4520	v=2118 z <sup>0,110</sup> v=4482+0,224z z=450-4370	v=908 z <sup>0,199</sup> v=3284+0,383z z=360-4650	v=3454 z <sup>0,046</sup> v=6781-0,064z z=810-4920	v=415 z <sup>0,287</sup> v=2483+0,568z z=395-5010	v=958 z <sup>0,187</sup> v=3027+0,029z z=530-4415	v=802 z <sup>0,223</sup> v=3826+0,376z z=665-5000

z - głębokość w m. v - prędkość w m/s. \* - brak danych

przyjmując jednak dla wszystkich zestawów danych wagę  $p_i = 1$ . Współczynniki aproksymacji liniowej  $\alpha$  i  $\beta$  oraz potęgowej  $a$  i  $b$  dla całego obszaru zestawiono w tab. 1. Poniżej szczegółowiej przedstawiono wyniki dla poszczególnych okresów geologicznych.

## TRZECIORZĘD I CZWARTORZĘD

Łączna miąższość utworów trzeciorzędowych i czwartorzędowych na omawianym obszarze nie przekracza zazwyczaj 350 m. Zestawienie prędkości średnich  $\bar{v}_{TQ}$  w zależności od głębokości przedstawiono na fig. 2. Rozrzut prędkości średnich jest stosunkowo duży - od ok. 1500 do ok. 2100 m/s. Obserwuje się jednak wyraźny ich wzrost z głębokością. Zależności te mają podobny charakter niezależnie od jednostki geologicznej, dlatego aproksymowano je łącznie dla wszystkich rozpatrywanych otworów. Zakres głębokości 0-350 m jest stosunkowo niewielki i do aproksymacji wystarczające jest użycie funkcji liniowej. Zależność prędkości średniej  $\bar{v}_{TQ}$  od głębokości dla utworów trzeciorzędowych i czwartorzędowych ma postać:

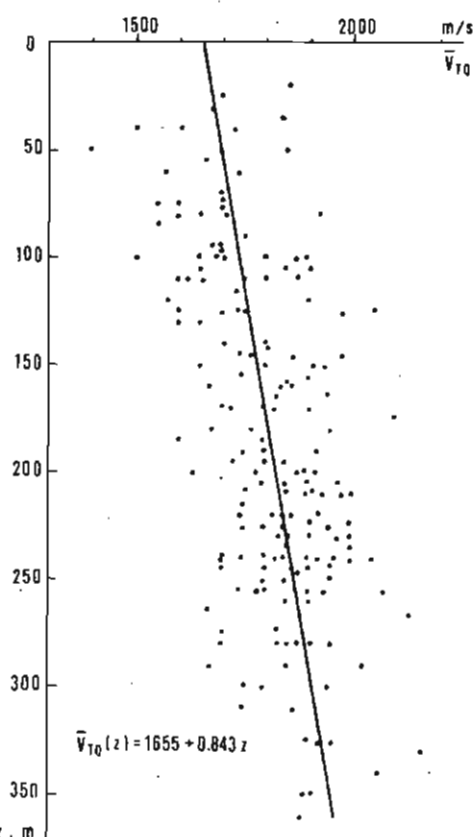


Fig. 2. Prędkości średnie w trzeciorzędzie i czwartorzędzie  
Mean velocities for the Tertiary and Quaternary

$$\bar{v}_{TQ}(z) = 1655 + 0,843z \quad [5]$$

gdzie:  $z$  – głębokość spągu trzeciorzędu w m;  $\bar{v}_{TQ}$  – prędkość średnia kompleksu w m/s.

Zależność [5] można przedstawić również w postaci:

$$\bar{v}_{TQ}(z) = 1655(1 + 0,000509z) \quad [6]$$

czemu odpowiada funkcja rozkładu prędkości z głębokością w postaci:

$$v_{TQ}(z) = 1655(1 + 0,000509z)^2 \quad [7]$$

W mniej szczegółowych opracowaniach można przyjmować dla całego kompleksu utworów trzeciorzędowych i czwartorzędowych prędkość stałą, równą 1800 m/s.

#### KREDA

Maksymalne głębokości, na których pomierzono prędkości warstwowe w utworach kredowych, są rzędu 1000 m dla obszaru platformowego (A) i synklinorium lubelskiego ( $C_{1,4}$ ) oraz 1500 m dla synklinorium brzeźnego ( $B_1$ ) – fig. 3a.

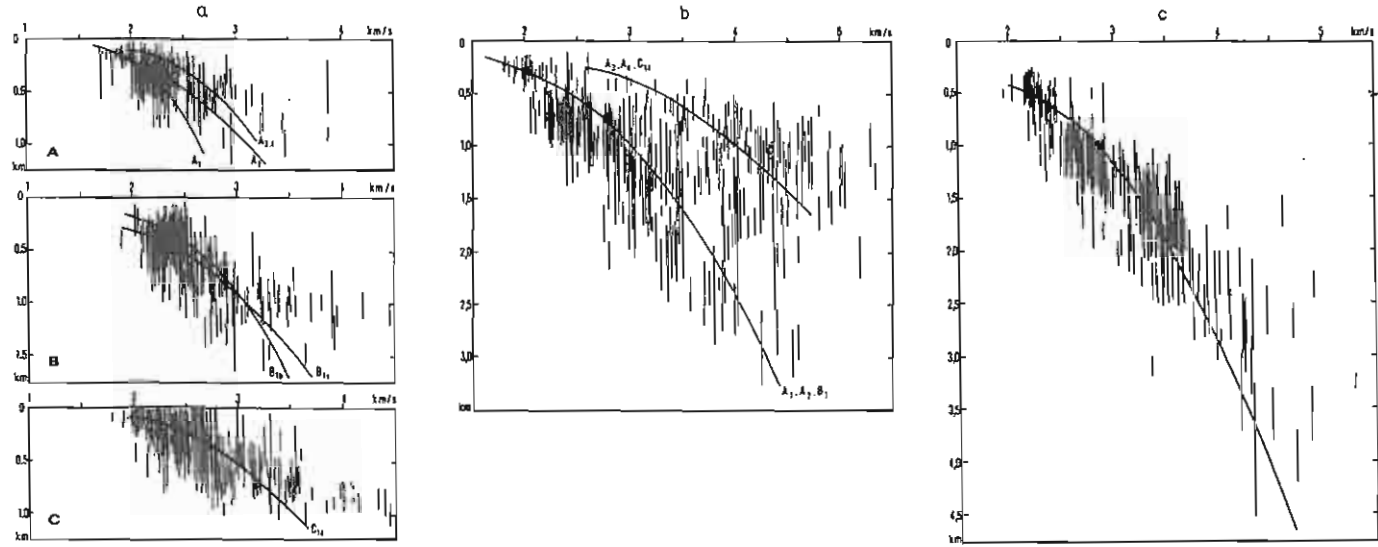


Fig. 3. Prędkości warstwowe  $w$ : a – kredzie dla jednostek geologicznych A, B i C, b – jurze, c – triasie  
 Layer velocities for: a – Cretaceous of the geological units A, B and C, b – Jurassic, c – Triassic  
 Objaśnienia jak na fig. 1  
 Explanations as given in Fig. 1

Obserwuje się tu wyraźny wzrost prędkości z głębokością we wszystkich jednostkach. Dla obszaru platformowego (A) największe prędkości w utworach kredowych notuje się w obniżeniu podlaskim ( $A_3$ ) i na wyniesieniu zrębowym podlasko-lubelskim ( $A_4$ ), a najmniejsze w syneklizie perybałtyckiej ( $A_1$ ). Różnica prędkości dla tych jednostek rośnie z głębokością i osiąga ok. 500 m/s na głębokości 1000 m. Na wyniesieniu mazursko-suwalskim ( $A_2$ ) prędkości mają wartości pośrednie, a charakter zmian jest zbliżony do zmian na skłonie platformowym ( $B_{1a}$ ) i w synklinorium pomorsko-warszawskim ( $B_{1b}$ ). Największe prędkości obserwuje się w synklinorium lubelskim ( $C_{14}$ ). Wzory aproksymujące zależność prędkości od głębokości funkcją potęgową mają postać:

$$\begin{aligned}v_K^{A1}(z) &= 788z^{0.176} \\v_K^{A2}(z) &= 421z^{0.290} \\v_K^{A3,4}(z) &= 746z^{0.211} \\v_K^{B1}(z) &= 405z^{0.292} \\v_K^{C14}(z) &= 632z^{0.248}\end{aligned}\quad [8]$$

Wzory uwzględniające szczegółowszy podział geologiczny na jednostki trzeciego rzędu jak również uogólnienia dla całego obszaru zestawiono w tab. 1.

#### JURA

Na omawianym obszarze prędkości w utworach jurajskich uzyskano w interwale głębokości 100–3250 m. Obserwuje się wyraźne zróżnicowanie tych wartości w części północno-zachodniej ( $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ) oraz południowej ( $A_3$ ,  $A_4$ ,  $C_{14}$ ). W części południowej są one znacznie większe (np. na głębokości 1500 m różnica prędkości średnich przewyższa 1000 m/s), obserwuje się również większy ich wzrost z głębokością (fig. 3b). Przedstawione krzywe aproksymują dane dla części północno-zachodniej i południowej. Rozbieżności w obu grupach dla jednostek niższego rzędu nie przekraczają 200 m/s (tab. 1). Zgeneralizowane wzory na prędkość w utworach jury mają postać:

$$\begin{aligned}v_J^{A1,2B1}(z) &= 316z^{0.326} \\v_J^{A3,4C14}(z) &= 437z^{0.322}\end{aligned}\quad [9]$$

#### TRIAS

Najwięcej danych dla utworów triasowych pochodzi z syneklizy perybałtyckiej ( $A_1$ ) i synklinorium brzeżnego ( $B_1$ ). Maksymalne głębokości, dla których otrzymano prędkości warstwowe, wynoszą odpowiednio 2000 i 4500 m. Mimo stosunkowo dużego przedziału głębokości (250–4500 m) rozrzut prędkości warstwowych jest nieduży. Dla poszczególnych jednostek wyższego rzędu uśrednione prędkości warstwowe są zbliżone, a ich odchylenia od krzywej uśrednionej dla całego obszaru nie przekraczają 200 m/s. Obserwuje się wyraźny ich wzrost z głębokością od ok. 2900 m/s na głębokości 1000 m do ok. 4500 m/s na głębokości 4000 m. Prędkość w utworach triasowych jest mniejsza od prędkości w utworach jurajskich w części

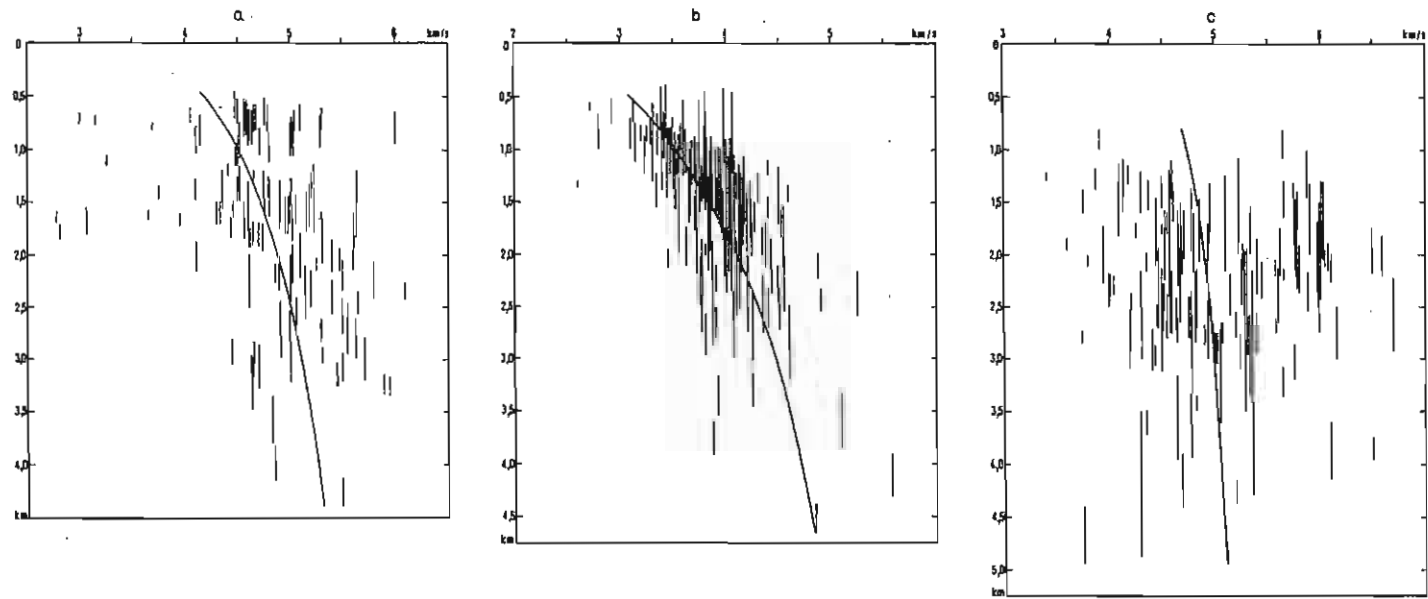


Fig. 4. Prędkości warstwowe w: a – permie, b – karbonie, c – dewonie  
 Layer velocities for: a – Permian, b – Carboniferous, c – Devonian



północno-zachodniej, a różnica w całym zakresie głębokości wynosi ok. 250 m/s. Prędkości w triasie są również wyraźnie mniejsze od prędkości w utworach kredowych. Krzywa aproksymująca prędkości dla całego rozpatrywanego obszaru, przedstawiona łącznie z prędkościami w poszczególnych otworach (fig. 3c), ma postać:

$$v_T(z) = 263z^{0.342} \quad [10]$$

#### PERM

Niemal 80% wszystkich pomiarów prędkości warstwowych w permie pochodzi z wyniesienia Łeby ( $A_{1a}$ ), niecki gdańskiej ( $A_{1b}$ ) i synklinorium pomorsko-warszawskiego ( $B_{1b}$ ). Dla obszaru  $A_{1a}$  większość danych otrzymano z przedziału głębokości 500–1000 m, a dla obszaru  $A_{1b}$  z przedziału 750–1750 m. W obu przypadkach nie obserwuje się wyraźnej korelacji prędkości z głębokością. Rozrzut jest duży, od ok. 4300 do ok. 5300 m/s. W przedziale głębokości 500–2000 m można przyjąć dla całego obszaru  $A_1$  średnią prędkość warstwową  $v_p^{A_1} \approx 4800$  m/s. Dla obszaru  $B_1$  dane pochodzą z przedziału głębokości 1500–4300 m. Również tu obserwuje się znaczny rozrzut od ok. 4600 do ok. 5700 m/s. Brak jest tu zależności prędkości od głębokości i dla całego przedziału można przyjąć stałą, średnią wartość dla utworów permskich  $v_p^{B_1} \approx 5000$  m/s. Na fig. 4a przedstawiono prędkości warstwowe w utworach permskich dla całego obszaru oraz zgeneralizowaną krzywą zależności prędkości od głębokości:

$$v_p(z) = 2118z^{0.110} \quad [11]$$

#### KARBON

Na rozpatrywanym obszarze utwory karbońskie występują głównie w synklinorium lubelskim ( $C_{14}$ ). Nieliczne dane z południowego obrzeżenia masywu łukowskiego ( $A_{4c}$ ) i synklinorium pomorsko-warszawskiego ( $B_{1b}$ ) zgrupowane są na wykresie prędkość–głębokość, podobnie jak dane z synklinorium lubelskiego ( $C_{14}$ ), i dalej będą rozpatrywane łącznie. Prędkości warstwowe w utworach karbońskich uzyskano z przedziału głębokości 500–4500 m, przy czym większość danych z głębokości 750–2000 m (dane z  $C_{14}$ ). Rozrzut wartości jest stosunkowo nieduży. Ilustruje to fig. 4b, na której przedstawiono również krzywą aproksymującą zależność prędkości od głębokości dla wszystkich danych.

$$v_c(z) = 906z^{0.199} \quad [12]$$

Prędkości w utworach karbońskich są znacznie mniejsze od prędkości w permie, natomiast większe od uśrednionych dla całego obszaru prędkości warstwowych w kredzie, jurze i triasie. Ciekawe jest porównanie prędkości w ramach jednej tylko jednostki  $C_{14}$ . Prędkości w karbonie są tu podobne do prędkości w kredzie, natomiast wyraźnie mniejsze od prędkości w jurze.

#### DEWON

Pomiary prędkości warstwowych w dewonie, podobnie jak w karbonie, pochodzą głównie z synklinorium lubelskiego ( $C_{14}$ ) oraz z jednostek  $A_{4c}$  i  $B_{1b}$ . Interwał głębokości waha się od 800 do 5000 m. Obserwuje się bardzo duży rozrzut danych od ok.

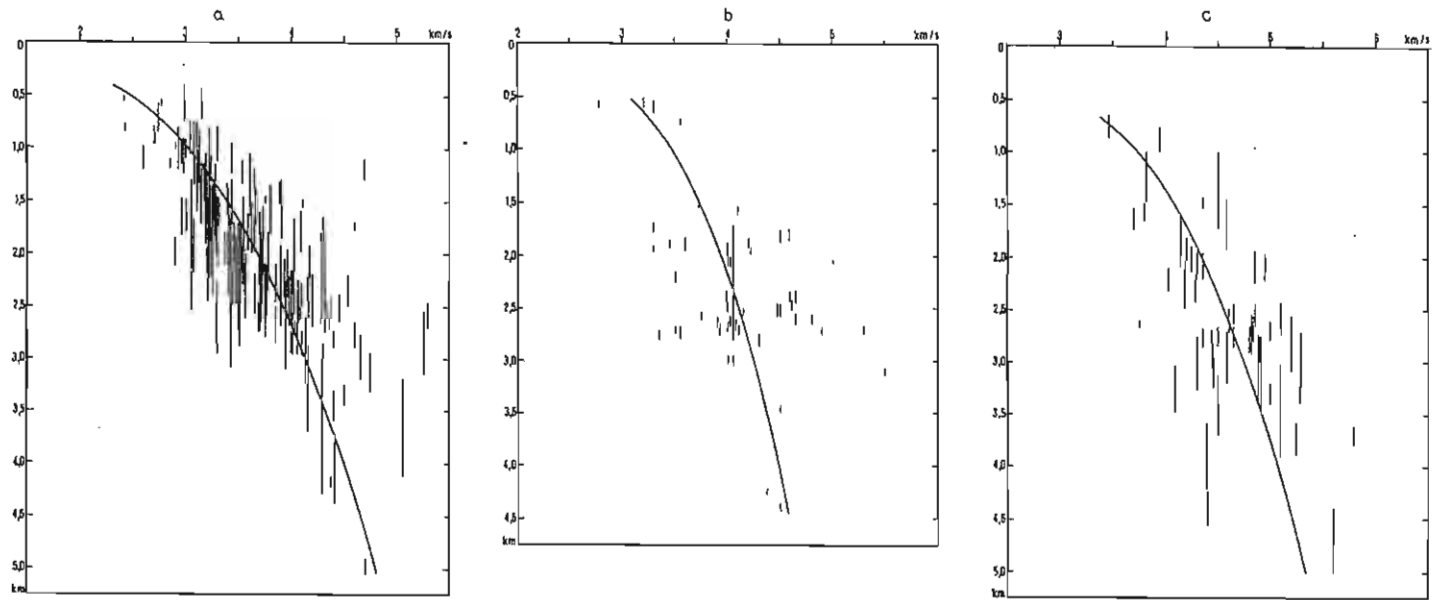


Fig. 5. Prędkości warstwowe w: a – sylurze, b – ordowiku, c – kambrze  
 Layer velocities for: a – Silurian, b – Ordovician, c – Cambrian

3300 do ok. 6700 m/s, przy czym większość mieści się w przedziale 4000–6000 m/s. Tak duże różnice prędkości występują nie tylko w różnych rejonach, ale nawet w poszczególnych otworach, znacznie przekraczając 1000 m/s. W tym przypadku należałoby przeprowadzić osobną analizę prędkości uwzględniającą szczegółowszy podział utworów dewońskich. Brak również wyraźnej zależności prędkości od głębokości. W przybliżeniu można przyjmować dla całego przedziału głębokości stałą prędkość w utworach dewońskich  $v_D \approx 5100$  m/s. Funkcja potęgowa, przedstawiona łącznie z prędkościami warstwowymi na fig. 4c, aproksymująca prędkość w dewonie ma postać:

$$v_D(z) = 3454z^{0.046} \quad [13]$$

#### SYLUR

Najwięcej pomiarów prędkości warstwowych w sylurze uzyskano dla syneklizy perybałtyckiej ( $A_1$ ). Z wyniesienia Łeby ( $A_{1a}$ ) otrzymano dane z przedziału głębokości 750–3000 m, a z niecki gdańskiej ( $A_{1b}$ ) z przedziału 750–4400 m. Na głębokości 750 m w obu rejonach prędkość wynosi ok. 2750 m/s. W obu przypadkach obserwuje się wyraźny wzrost prędkości z głębokością, przy czym dla obszaru  $A_{1a}$  jest on większy i na głębokości 3000 m różnica prędkości wynosi ponad 500 m/s. Wzory na prędkość mają postać:

$$v_S^{A_{1a}}(z) = 195z^{0.391} \quad [14]$$

$$v_S^{A_{1b}}(z) = 210z^{0.373}$$

Dla pozostałej części obszaru otrzymano niewielką liczbę danych, niemniej są one bardzo zbliżone do prędkości dla obszaru  $A_1$ . Ilustruje to fig. 5a, na której przedstawiono wszystkie pomiary i zgeneralizowaną krzywą aproksymującą w postaci:

$$v_S(z) = 415z^{0.287} \quad [15]$$

#### ORDOWIK

Dla całego rozpatrywanego obszaru uzyskano niewielką liczbę danych dla ordowiku. W większości przypadków są to prędkości w stosunkowo cienkich warstwach, o grubości rzędu 100 m. Rozrzut prędkości jest duży, od ok. 3000 do ok. 5000 m/s, a większość przypada w przedziale 3900–4300 m/s. Ilustruje to fig. 5b, na której zaznaczono również krzywą zmian prędkości z głębokością w postaci:

$$v_O(z) = 956z^{0.187} \quad [16]$$

Wzrost prędkości z głębokością jest niewielki, od ok. 3500 m/s na głębokości 1000 m do ok. 4500 m/s na głębokości 4500 m. Podobne zależności otrzymano przy szczegółowej analizie dla jednostek niższego rzędu.

## KAMBR

Najwięcej pomiarów prędkości warstwowych wykonano dla utworów kambru niecki gdańskiej ( $A_{1b}$ ). Prędkości warstwowe otrzymano z przedziału głębokości 1500 – 5000 m. Obserwuje się ich wzrost z głębokością od ok. 4000 m/s na głębokości 1500 m do ok. 5200 m/s na głębokości 5000 m. Rozrzut wartości jest nieduży. Mogą one być przybliżone wzorem:

$$v_{Cm}^{A1b}(z) = 790z^{0,221} \quad [17]$$

Dla pozostałych części platformy otrzymano jedynie nieliczne dane, niewystarczające do szczegółowej analizy. Są one bliskie wartościom dla niecki gdańskiej. Zestawienie wszystkich prędkości warstwowych dla kambru przedstawiono na fig. 5c. Krzywa aproksymująca zależność prędkości od głębokości dla całego obszaru ma postać:

$$v_{Cm}(z) = 802z^{0,223} \quad [18]$$

\*

Prezentowane wyniki charakteryzują najbardziej typowe zależności prędkości sejsmicznych od głębokości dla poszczególnych okresów geologicznych. Szczegółowsze dane (tab. 1) przedstawiają wyniki aproksymacji prędkości warstwowych funkcją potęgową [3] dla jednostek drugiego i trzeciego rzędu. Podano również przedziały głębokości, z których pochodzą dane profilowania prędkości. W przypadku małej liczby pomiarów ( $n < 5$ ) nie określono zależności prędkość – głębokość ze względu na małą wiarygodność wyników. Dotyczy to głównie utworów paleozoicznych o stosunkowo niedużych miąższościach. W takich przypadkach wystarczającą dokładność zapewniają uogólnione wzory dla całego rozpatrywanego obszaru. Wyniki aproksymacji prędkości warstwowej funkcją potęgową [3] i liniową [1] dla całego obszaru przedstawiono w tab. 1. Odpowiadające im wykresy zostały porównane na fig. 6.

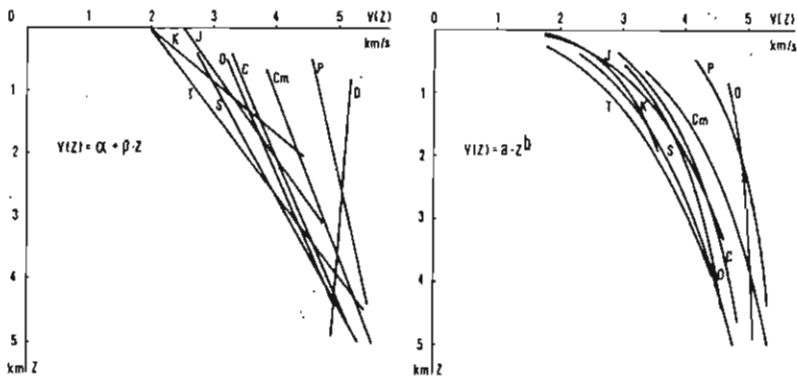


Fig. 6. Porównanie wyników aproksymacji prędkości w funkcji głębokości dla wszystkich jednostek  
Comparison of results of approximation of velocities in function of depth for all the units

K – kreda; J – jura; T – trias; P – perm; C – karbon; D – dewon; S – sylur; O – ordowik; Cm – kambr  
K – Cretaceous; J – Jurassic; T – Triassic; P – Permian; C – Carboniferous; D – Devonian; S – Silurian;  
O – Ordovician; Cm – Cambrian

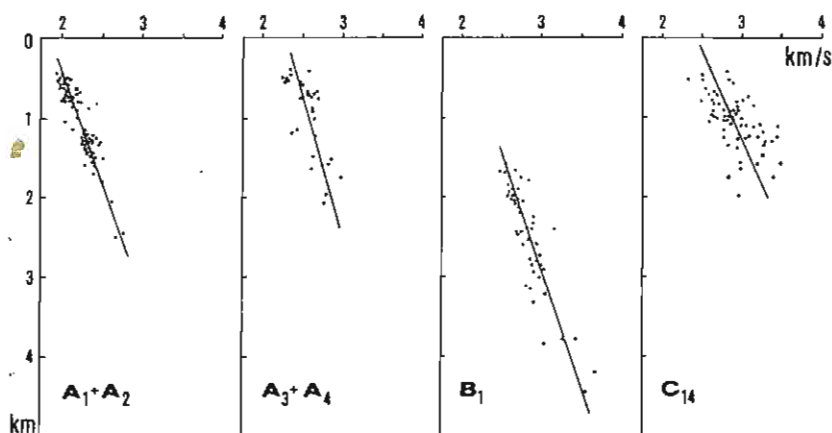


Fig. 7. Zależność prędkości średniej od głębokości dla pokrywy kenozoicznej-mezozoicznej  
Dependence of mean velocity on depth for the Cenozoic-Mesozoic cover

Objaśnienia jak na fig. 1  
Explanations as given in Fig. 1

## PRĘDKOŚCI ŚREDNIE

Na podstawie danych profilowania prędkości przeprowadzono analizę prędkości średnich kompleksu kenozoicznego-mezozoicznego oraz całej pokrywy osadowej platformy wschodnioeuropejskiej. Zależność prędkości średniej od miąższości aproksymowano funkcją liniową [1].

Dla kompleksu kenozoicznego-mezozoicznego wykorzystano dane z 219 otworów. Obliczenia prowadzono dla wszystkich podjednostek drugiego rzędu. Wzory na prędkość średnią utworów kenozoicznych-mezozoicznych mają postać:

$$\begin{aligned}\bar{v}_{KM}^{A_1}(z) &= 1849 + 0,375z \\ \bar{v}_{KM}^{A_2}(z) &= 2055 + 0,264z \\ \bar{v}_{KM}^{A_3}(z) &= 2127 + 0,365z \\ \bar{v}_{KM}^{A_4}(z) &= 2230 + 0,435z \\ \bar{v}_{KM}^{B_{1a}}(z) &= 2083 + 0,300z \\ \bar{v}_{KM}^{B_{1b}}(z) &= 2018 + 0,340z \\ \bar{v}_{KM}^{C_{14}}(z) &= 2432 + 0,450z\end{aligned}\quad [19]$$

Ze względu na podobny charakter zależności prędkości od miąższości, można dokonać uogólnienia dla sąsiednich obszarów:  $A_1 + A_2$ ,  $A_3 + A_4$  i  $B_1$ . Mają one wtedy postać:

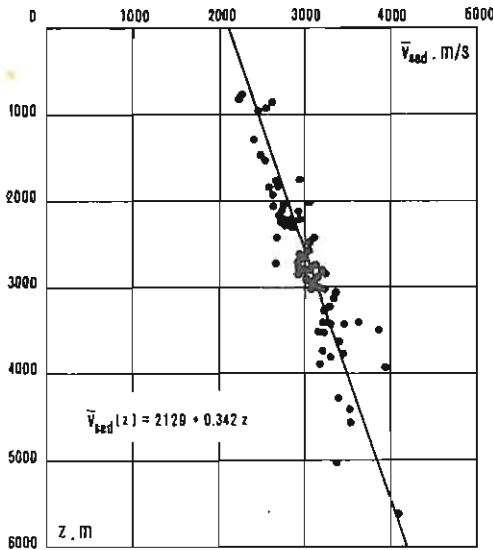


Fig. 8. Zależność prędkości średniej od głębokości dla warstwy osadowej w polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej  
Dependence of mean velocity on depth for sedimentary rocks in Polish part of the East-European Platform

$$\bar{v}_{KM}^{A_1+A_2}(z) = 1858 + 0,351z$$

$$\bar{v}_{KM}^{A_1-A_4}(z) = 2277 + 0,284z \quad [20]$$

$$\bar{v}_{KM}^B(z) = 2018 + 0,338z$$

Prędkości średnie i aproksymujące je wyrażenia [20] ilustruje fig. 7. Najmniejsze prędkości średnie obserwuje się dla obszaru  $A_1 + A_2$ , natomiast największe dla  $C_{14}$ . Wpływają na to wyższe prędkości w kredzie i jurze oraz prawie całkowity brak niskoprędkościowych osadów trzeciorzędu i czwartorzędu oraz triasu w synklinorium lubelskim.

Dla określenia zależności prędkości średniej od miąższości dla całej warstwy osadowej wykorzystano dane z kilkudziesięciu otworów, które osiągnęły podłoże krystaliczne. Maksymalna głębokość podłoża wynosiła 5600 m. Otrzymano liniową zależność:

$$\bar{v}_{sed}(z) = 2129 + 0,342z \quad [21]$$

Również w tym przypadku obserwuje się zróżnicowanie prędkości w zależności od obszaru. Wzór [21] można traktować jako przybliżenie prędkości średniej tylko do głębokości ok. 5000 m. Dla większych głębokości, dla których brak jest danych z bezpośrednich pomiarów w otworach, wykorzystano wyniki sejsmicznych badań refleksyjnych i refrakcyjnych (H. Jankowski i in., 1976, 1977). Uzyskany dzięki tym danym wzór ma postać (M. Grad, 1986):

$$\bar{v}_{sed}(z) = 2,05 \sqrt{1 + 0,4z} \quad [22]$$

Pozwala on oszacować prędkość średnią osadów o miąższości do ok. 10 000 m.

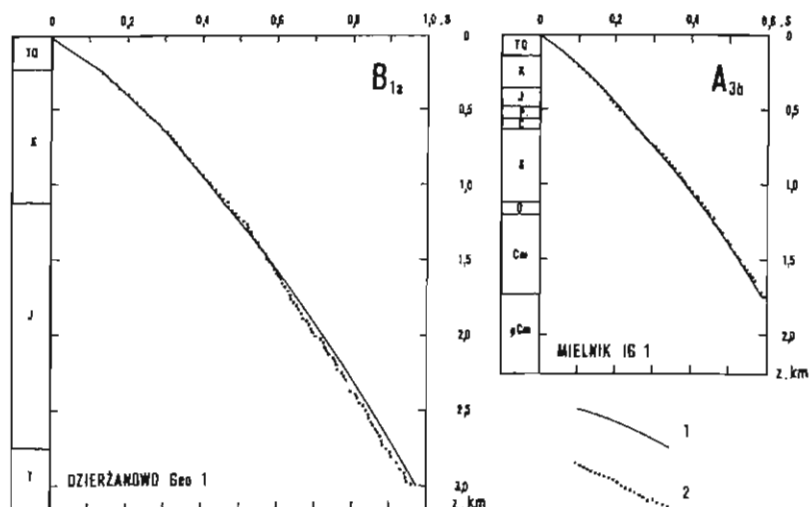


Fig. 9. Porównanie hydrografów pionowych z otworów Dzierżanowo Geo 1 i Mielnik IG 1  
Comparison of vertical travel-times from boreholes Dzierżanowo Geo 1 and Mielnik IG 1

1 - hodograf obliczony na podstawie uśrednionej krzywej rozkładów prędkości (tab. 1); 2 - dane pomiarowe; pozostałe objaśnienia jak na fig. 1 i 6  
1 - travel-time calculated on the basis of averaged curve of velocity distributions (Table 1); 2 - measurement data; other explanations as given in Figs. 1 and 6

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Zależności prędkości od głębokości dla poszczególnych okresów od trzeciorzędu i czwartorzędu po kambry apoksymowano funkcją liniową [1] i potęgową [3]. Prędkość średnia w utworach kenozoicznych, których miąższość na omawianym obszarze nie przekracza 350 m, wynosi ok. 1800 m/s. W utworach mezozoicznych (głównie jurajskich) obserwuje się wyraźne zróżnicowanie prędkości (fig. 3): najmniejsze notuje się w syneklizie perybałtyckiej ( $A_1$ ), a największe w synklinorium lubelskim ( $C_{14}$ ). Znajduje to również odzwierciedlenie w prędkościach średnich pokrywy kenozoiczno-mezozoicznej (fig. 7). Największe prędkości (średnio ok. 5000 m/s) notuje się w utworach permu i dewonu (fig. 4a, c). Zestawienie zależności prędkości od głębokości dla poszczególnych okresów i jednostek geologicznych północno-wschodniej Polski pozwala oszacować prędkości warstwowe w pokrywie osadowej dla konkretnych rejonów i przedziałów głębokości. Jako przykład może posłużyć porównanie hydrografów pionowych dla otworów Dzierżanowo Geo 1 i Mielnik IG 1 (fig. 9). Według J. Łaskiego (1967) hydrografy tych otworów są najbardziej charakterystyczne dla omawianego obszaru badań ( $B_{12}$  i  $A_{3b}$ ). Dla otworu Bytów IG 1, typowego dla obszaru  $A_{1b}$ , obserwowane prędkości są nieco mniejsze od prędkości wyznaczonych na podstawie wzorów z tab. 1, a różnica hydrografów na głębokości 2000 m wynosi ok. 30 ms.

Przedstawione wyrażenia na prędkości warstwowe (tab. 1) oraz średnie pokrywy kenozoiczno-mezozoicznej (wzory [19], [20]) i całej warstwy osadowej (wzory [21], [22]) pozwalają oszacować rozkłady prędkości w pokrywie osadowej платфор-

my wschodnioeuropejskiej. Mogą one być wykorzystane w badaniach sejsmicznych metodą refleksyjną i refrakcyjną jak również w głębokich sondowaniach sejsmicznych.

Instytut Geofizyki  
Uniwersytetu Warszawskiego  
Warszawa, ul. Pasteura 7

Nadesłano dnia 27 lutego 1986 r.

#### PIŚMIENNICTWO

- GRAD M. (1986) – Seismic waves velocities of the East European Platform in Poland. *Acta Geoph. Pol.*, **34**, p. 21–29, nr 1.
- HÄNSEL H. (1968) – Podstawy rachunku błędów. Wyd. Nauk.-Techn. Warszawa.
- JANKOWSKI H. (1975) – Rozkład prędkości średnich w utworach permo-mezozoicznych NW Polski. *Kwart. Geol.*, **19**, p. 701–712, nr 3.
- JANKOWSKI H., KANIEWSKA E., KRÓLIKOWSKI C., MAREK S., MŁYNARSKI S., PEPEL A. (1976) – Opracowanie modelu sejsmogeologicznego wzdłuż profilu Syców–Mława (LT-4). *Arch. Inst. Geof. PAN. Warszawa.*
- JANKOWSKI H., KANIEWSKA E., KRÓLIKOWSKI C., MAREK S., MŁYNARSKI S., PEPEL A. (1977) – Opracowanie modelu sejsmogeologicznego wzdłuż profilu LT-5. *Arch. Inst. Geof. PAN. Warszawa.*
- KAMIŃSKA E., ZAGÓRSKI J. (1977) – Analiza prędkości sejsmicznych w Synklinorium Warszawskim. *Nafta*, **33**, p. 293–300, nr 9.
- KOWALCZUK J. (1967) – O intensywności fal sejsmicznych na obszarze wyniesienia mazursko-suwalskiego (północno-wschodnia Polska). *Zesz. Nauk. AGH*, **162**, *Geologia*, z. 8.
- KOWALCZUK J. (1969) – Rozpoznanie prędkościowe utworów skalnych dla regionów geologicznych Polski. *Geof. i Geol. Naft.*, **2–4**, p. 45–72.
- ŁASKI J. (1967) – Analiza wyników profilowania prędkości z obszaru Polski przy zastosowaniu matematycznych maszyn cyfrowych. *Pr. Geol. Komis. Nauk Geol. PAN Oddz. w Krakowie*, **39**.
- MŁYNARSKI S. (1984) – The structure of deep bedrock in Poland on the basis of refraction results. *Publ. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci.*, **A-13(160)**, p. 87–100.
- PEPEL A. (1965) – Z zagadnień wyznaczania funkcji prędkości od głębokości w utworach paleozoicznych Syneklizy Perybaltyckiej i Wyniesienia Leby. *W: Stan i kierunki rozwoju geofizyki w Polsce*, cz. I.
- PTAK A. (1966) – Wstępne regionalne opracowanie rozkładu prędkości w obrębie synklinorium warszawskiego. *Geofiz. i Geol. Naft.*, **5–6**, p. 133–136.
- SKORUPA J. (1974) – Mapa sejsmiczna Polski. *Inst. Geol. Warszawa.*
- SOKOŁOWSKI J. (1968) – Charakterystyka geologiczna i strukturalna jednostek regionalnych Polski pod kątem poszukiwań bituminów. *Surowce mineralne*, **1**, p. 7–58.
- ŚLIWIŃSKI Z. (1965) – Studium prędkości sejsmicznych w synklinorium Łódzko-Szczecińskim. *Pr. Geol. Komis. Nauk Geol. PAN Oddz. w Krakowie*, **29**.
- ŻARUK J. (1971) – Analiza wyników profilowania prędkości w otworach synklinorium pomorskiego. *Prz. Geol.*, **19**, p. 138–145, nr 3.



Marek GRAD

## СКОРОСТЬ РАСПРОСТРАНЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЛН В ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩЕ ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

### Резюме

В статье приводятся итоги анализа скоростей распространения сейсмических волн в осадочном чехле Восточно-Европейской платформы. По данным 261 скважин детально рассмотрена зависимость скоростей от глубины для всех формаций, от четвертичных и третичных до кембрийских. Для отдельных формаций данные аппроксимировались линейной функцией  $v(z) = \alpha + \beta z$  и степенной  $v(z) = az^b$ . Коэффициенты  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $a$ ,  $b$  определялись по методу наименьших квадратов.

Средняя скорость распространения сейсмических волн в кайнозойских отложениях, мощность которых в рассматриваемом районе не превышает 350 м, составляет около 1800 м/с. В мезозое (преимущественно в юре) скорости различны (фиг. 3) — самые низкие скорости отмечены в Балтийской синеклизе ( $A_1$ ), а самые высокие — в Люблинском синклинории ( $C_{1,4}$ ), что находит свое отражение в различии средних скоростей в лернско-мезозойском комплексе (фиг. 7). Самые высокие скорости распространения волн в осадочном чехле (в среднем около 5000 м/с) наблюдаются в перми и девоне (фиг. 4а и с).

Сопоставление зависимости скорость—глубина для отдельных стратиграфических формаций и геологических элементов Северо-Восточной Польши представлены на таблице 1. Эти данные позволяют установить скорости распространения волн по пластан в осадочном покрове для конкретных районов и интервалов глубин (например фиг. 9). Предложено выражение пластовых скоростей (таб. 1) и средних скоростей осадочного кайнозойско-мезозойского покрова (формула [19], [20]) и всей осадочной толщи (формула [21], [22]) могут быть использованы в сейсмических исследованиях методом отраженных волн и преломленных волн, а также в глубинном сейсмическом зондировании.

Marek GRAD

## VELOCITIES OF SEISMIC WAVES IN SEDIMENTARY COVER OF THE EAST-EUROPEAN PLATFORM

### Summary

The paper presents results of analysis of velocities of seismic waves in sedimentary rocks of Polish part of the East-European Platform. The changes of the velocities along with depth in all the formations from the Quaternary and Tertiary to Cambrian are discussed on the basis of data from 261 boreholes. Data for individual formations were approximated using linear and power functions  $v(z) = \alpha + \beta z$  and  $v(z) = az^b$ , respectively) and coefficients  $\alpha$  and  $\beta$  and  $a$  and  $b$  were calculated by the least square method.

Cenozoic strata, less than 350 m thick in the studied area, are characterized by mean velocities of about 1800 m/s. The velocities appear highly varying in Mesozoic rocks, especially Jurassic ones (Figs. 3), being the lowest in the Peribaltic Synecize ( $A_1$ ) and the highest in the Lublin Synclinorium ( $C_{1,4}$ ). This is also reflected by variability of mean velocities of the Cenozoic-Mesozoic complex (Fig. 7). The highest velocities (about 5000 m/s at the average) were recorded in the case of Permian and Devonian rocks (Figs. 4a and c).

Table 1 shows the velocity-to-depth relation for individual stratigraphic formations and geological units of north-eastern Poland. The data make possible estimation of layer velocities for sedimentary cover in a given region or depth interval (see e.g. Fig. 9). The presented equations for calculation of layer velocities and mean velocities for the Cenozoic-Mesozoic cover (equations [19] and [20]) and the whole sedimentary cover (equations [21] and [22]) may be used in reflection and refraction surveys and also deep seismic soundings.