

Marek GRAD, Tran TRUNG DOAN, Wiesław KLIMKOWSKI

Sejsmiczne modelowanie pokrywy osadowej wzdłuż profilu przez platformę prekambryjską i paleozoiczną

Przedstawiono wyniki jedno- i dwuwymiarowego modelowania struktury pokrywy osadowej na platformie prekambryjskiej i paleozoicznej w Polsce. Wykorzystano materiały eksperymentalnych prac sejsmicznych z profili refrakcyjnych M-9 (3-X-73) i 1-VI-66. Wielowarstwowe modele dwuwymiarowe zostały dobrane metodą prób i błędów, przy użyciu metody dynamicznego śledzenia promienia w złożonych ośrodkach (metoda *ray tracing*). Porównanie eksperymentalnego pola falowego z hodografami teoretycznymi i seismogramami syntetycznymi wykazuje zgodność podstawowych grup fal refrakcyjnych występujących w pierwszych impulsach. Dla obydwu profili określono model struktury osadów, w tym również utworów podpermskich, a także prześledzono granicę podłoża. Uzyskane wyniki porównano z wcześniejszymi opracowaniami.

WSTĘP

Na lata 1965–1978 przypada okres najintensywniejszych sejsmicznych badań refrakcyjnych w Polsce. Ich celem było określenie budowy pokrywy osadowej, szczególnie utworów podpermskich, oraz struktury głębokiego podłoża. Wyniki interpretacji tych badań były przedmiotem wielu dokumentacji i opracowań (m.in. A. Mikołajczak, 1967; S. Toporkiewicz, 1966–1978; J. Skorupa, 1974). W ostatnich latach dokonano również reinterpretacji materiałów z wielu profili refrakcyjnych na obszarze całej Polski (A. Wojas, 1979; S. Młynarski, 1982; S. Toporkiewicz, 1984). Najgłębsza rejestrowana granica refrakcyjna charakteryzuje się prędkościami granicznymi 5800–6500 m/s. Na platformie prekambryjskiej można ją wiązać ze stropem prekambryjskiego podłoża krystalicznego, natomiast na pozostałym obszarze Polski – jedynie z podłożem określonym jako utwory skonsolidowane (S. Młynarski, 1984).

W dotychczasowych opracowaniach stosowane były klasyczne dla badań refrakcyjnych sposoby interpretacji: metoda linii t_0 , metoda izochron i inne rozwiązania zadania odwrotnego. W tym opracowaniu przedstawiono próbę zastosowania modelowania jedno- i dwuwymiarowego struktury pokrywy

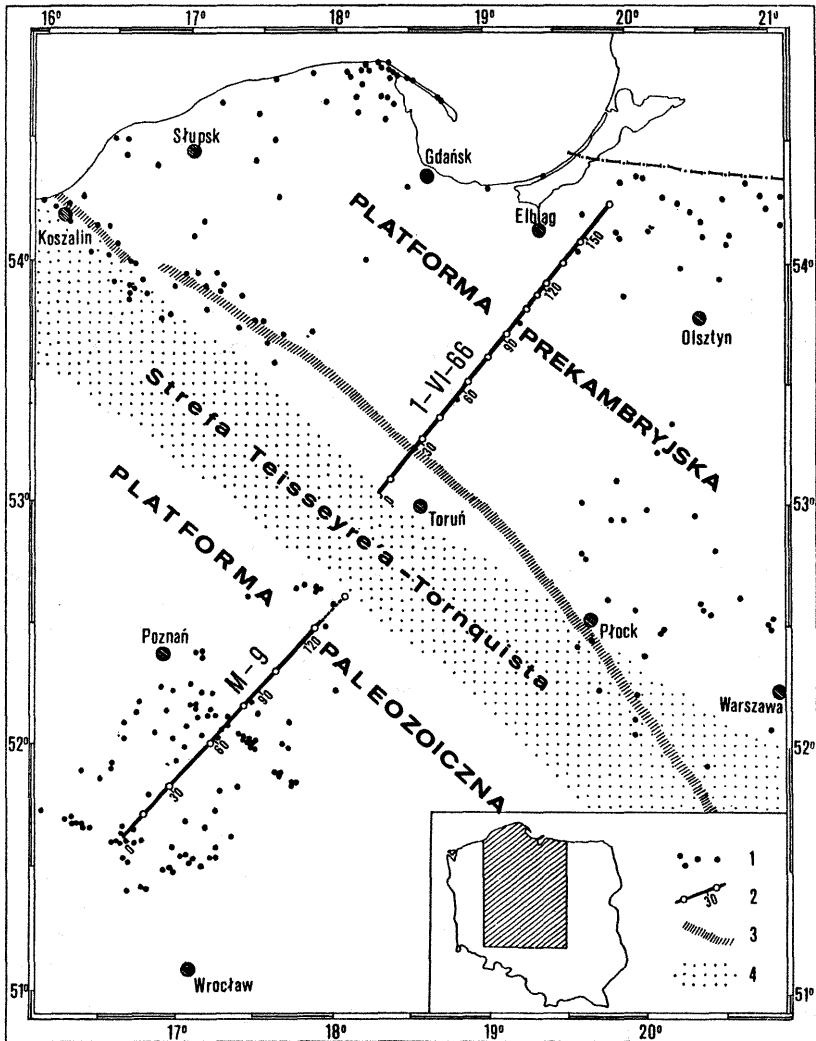


Fig. 1. Lokalizacja profili sejsmicznych i otworów w strefie kontaktu platformy paleozoicznej i platformy prekambryjskiej w Polsce

Location of seismic profiles and boreholes in contact zone of the Palaeozoic and Precambrian platforms in Poland

1 – otwory wiernicze; 2 – położenie punktów strzałowych na profilach refrakcyjnych i odległość od początku profilu w km; 3 – południowo-zachodni zasięg podłoża krystalicznego platformy wschodnioeuropejskiej wyznaczony metodami sejsmiki refrakcyjnej (J. Skorupa, 1974); 4 – strefa tektoniczna Teisseyre'a-Tornquista (A. Guterch, 1977)

1 – boreholes; 2 – location of shotpoints on refraction profiles and distance from the beginning of the profile in km; 3 – southwestern border of East-European Platform crystalline basement, as determined with refraction seismic methods (J. Skorupa, 1974); 4 – the Teisseyre-Tornquist tectonic zone (A. Guterch, 1977).

osadowej. Wielowarstwowe modele struktury otrzymano metodą prób i błędów. Rozkłady prędkości, głębokości i kształt granic refrakcyjnych dobierano i modyfikowano dla poszczególnych warstw modelu tak, aby uzyskać odpowiednią zgodność eksperymentalnych i teoretycznych hodografów oraz amplitud. W modelowaniu jednowymiarowym wykorzystano program *HOD*, obliczający teoretyczne hodografy w płaskorównoległych ośrodkach wielowarstwowych, w modelowaniu dwuwymiarowym zaś wykorzystano komputerowe programy *SEIS81*, *RAY83* i *SEIS83* (V. Červený, I. Pšenčík, 1981, 1983), oparte na dynamicznej teorii promieniowej rozchodzenia się fal sejsmicznych. W obliczeniach teoretycznych hodografów i amplitud fal oraz sejsmogramów syntetycznych promień sejsmiczny w złożonym ośrodku jest śledzony zgodnie z prawami sejsmiki geometrycznej (metoda *ray tracing*). Obliczenia przeprowadzono na komputerach *CDC CYBER 70* i *IBM PC*. Ten sposób interpretacji zastosowano do archiwalnych materiałów z północnej części profilu refrakcyjnego 1-VI-66 (A. Mikołajczak, 1967) oraz z profilu M-9 (3-X-73) — S. Toporkiewicz (1966 — 1978), których lokalizację przedstawia fig. 1. W opracowaniu wykorzystano wyniki szczegółowej analizy prędkości sejsmicznych pomierzonych w otworach zlokalizowanych na platformie prekambryjskiej i paleozoicznej. Obok wyników interpretacji i reinterpretacji dla pokrywy osadowej i jej podłoża dla obu profili prezentowane były modele głębokiej struktury skorupy ziemskiej (A. Guterch i in., 1975, 1986; M. Grad, 1980).

POKRYWA OSADOWA PLATFORMY WSCHODNIOEUROPEJSKIEJ

Północno-wschodnia Polska jest fragmentem wielkiej jednostki tektonicznej — platformy wschodnioeuropejskiej, zbudowanej z głęboko zmetamorfizowanego podłoża i spoczywającej wprost na nim pokrywy osadowej. W pokrywie można wyróżnić dwa główne kompleksy strukturalne: dolny, na który składają się skały kambryjsko-sylurskie, oraz górny, który tworzą skały permsko-kenozoiczne. Całkowita miąższość pokrywy osadowej w polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej zmienia się od 200 — 500 m na wyniesieniu mazursko-suwalskim do ponad 8000 m w strefie brzeżnej platformy (S. Kubicki i in., 1972; J. Skorupa, 1974; S. Młynarski, 1982, 1984).

WYNIKI PIONOWEGO PROFILOWANIA PRĘDKOŚCI

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 w obszarach o złożonej budowie geologicznej oraz znacznych różnicach miąższości poszczególnych kompleksów tworzących pokrywę osadową. Wyniki analizy prędkości fal sejsmicznych pomierzonych w otworach zlokalizowanych w polskiej części platformy wschodnioeuropejskiej były już publikowane wcześniej (M. Grad, 1987).

Zależność prędkości od głębokości dla poszczególnych okresów od trzeciorzędu i czwartorzędu po kambr aproksymowano funkcją liniową i potęgową. Prędkość średnia w utworach kenozoicznych, których miąższość na omawianym

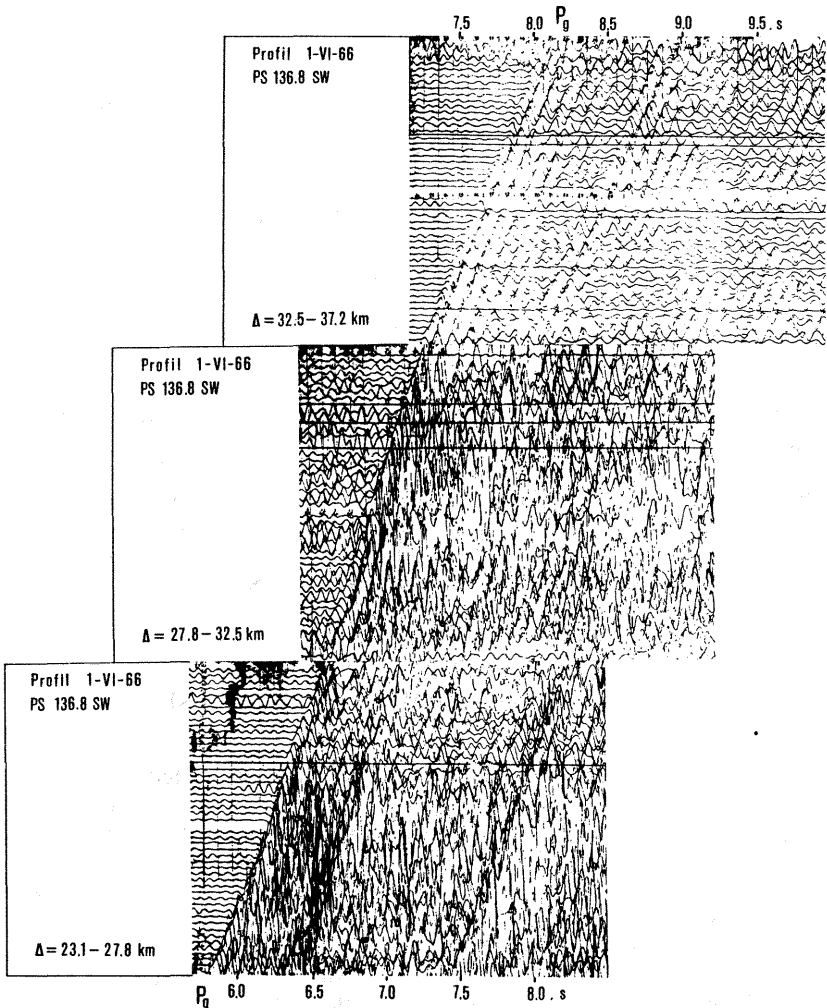


Fig. 2. Przykład rejestracji sejsmicznych na profilu 1-VI-66 w odległości 23,1–37,2 km od PS 136.8 SW

Example of seismic records on profile 1-VI-66 in the distance range 23.1–37.2 km from SP 136.8 SW
 P_g – fala refrakcyjna w pierwszych impulsach związana z krystalicznym podłożem platformy wschodnioeuropejskiej; odległość między kanałami $\Delta x = 100$ m

P_g – refracted wave connected with crystalline basement; distance between the channels $\Delta x = 100$ m

obszarze nie przekracza 350 m, wynosi ok. 1800 m/s. W utworach mezozoicznych (głównie jurajskich) obserwuje się wyraźne zróżnicowanie prędkości: najmniejsze w syneklizie perybałtyckiej, a największe w synklinorium lubelskim. Największe prędkości, średnio ok. 5000 m/s, występują w utworach permu i dewonu. Uogólnione wyrażenia na prędkość dla syneklizy perybałtyckiej i synklinorium brzeżnego posłużyły do określenia wyjściowego modelu prędkościowego pokrywy osadowej platformy wschodnioeuropejskiej w rejonie profilu 1-VI-66.

POLE FALOWE NA PROFILU 1-VI-66

Profil 1-VI-66 zlokalizowany został w centralnej Polsce w strefie kontaktu platformy paleozoicznej i prekambryjskiej. W niniejszym opracowaniu wykorzystano materiały z północno-wschodniej części profilu, przebiegającego w przybliżeniu wzdłuż linii Grudziądz – Prabuty – Pasłek (fig. 1). Przyjęty tu początek profilu odpowiada odległości 160 km we wcześniejszych opracowaniach (A. Mikołajczak, 1967; S. Wojas, 1979). Część profilu na platformie wschodnioeuropejskiej ma 170 km długości i 12 punktów strzałowych rozmieszczonych co 10–20 km.

Uzyskano dobre sejsmogramy, na których stosunek amplitud fal użytecznych do amplitud fal zakłócających jest wystarczająco duży i zapewnia jednoznaczne wyznaczenie ciągów korelujących się fal refrakcyjnych. Ilustrację pola falowego z profilu 1-VI-66 stanowi montaż sejsmogramów z PS 136.8 SW przedstawiony na fig. 2.

Na platformie wschodnioeuropejskiej rejestracje były prowadzone w odległościach od 10–20 do 30–60 km od punktu strzałowego. Dla wszystkich punktów strzałowych zarejestrowano falę refrakcyjną P_g , związaną ze stropem podłoża krystalicznego. Fale te mają bardzo regularny charakter i występują w pierwszych impulsach począwszy od odległości 10–30 km, w zależności od obszaru badań. Fale P_g charakteryzują się częstością ok. 15 Hz oraz dynamicznym dwu- lub trzyfazowym zapisem.

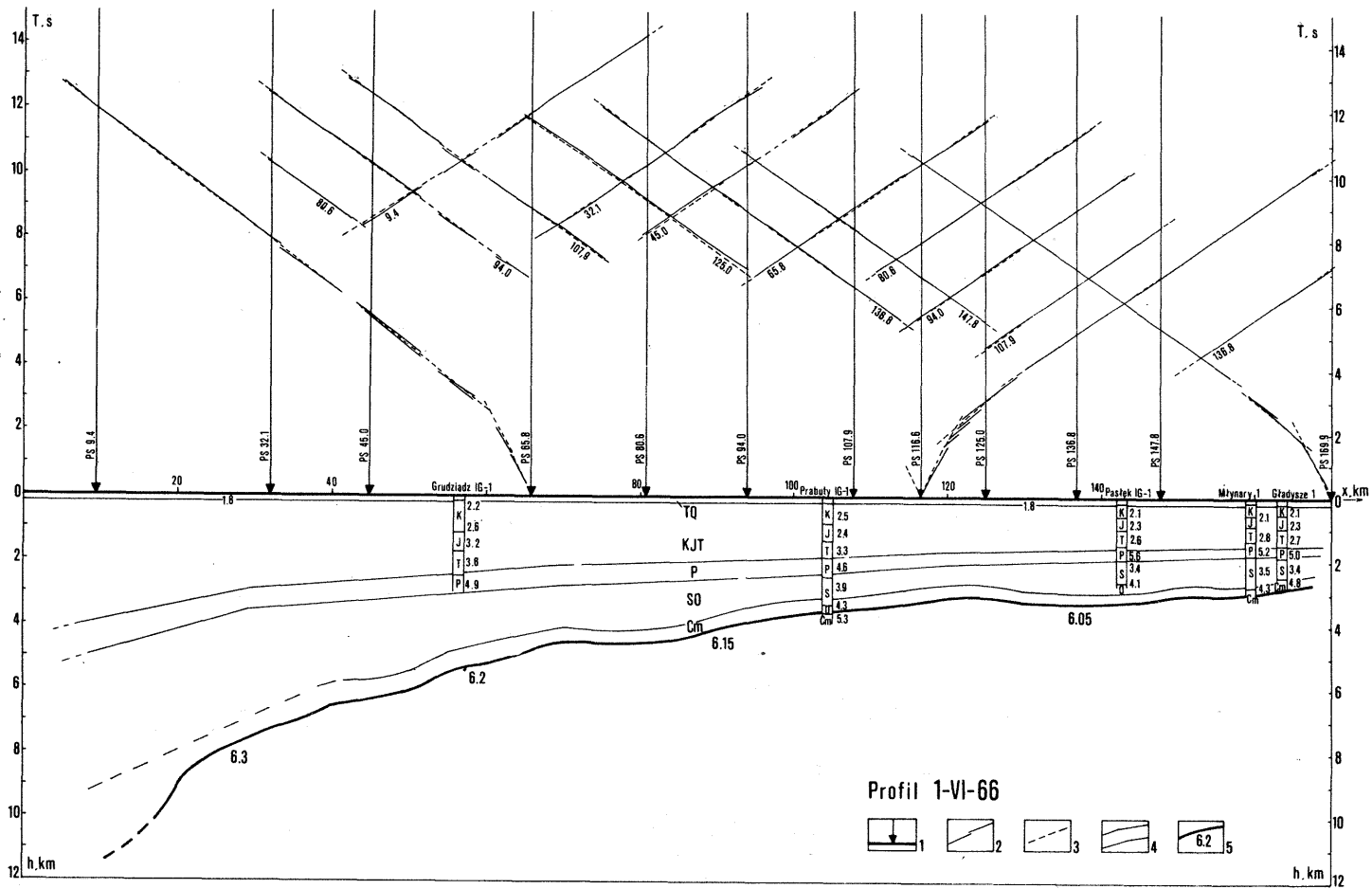
W trzech przypadkach (PS 65.8 NE, PS 116.6 SW i PS 169.9 SW), gdy rejestracje prowadzono od odległości 0, zarejestrowano również fale refrakcyjne związane ze stropem utworów permskich oraz bliżej nie zidentyfikowane fale z młodszych kompleksów.

Hodografy fal refrakcyjnych, występujących na profilu 1-VI-66 w pierwszych wstąpieniach, przedstawione zostały na fig. 3.

MODELOWANIE DWUWYMIAROWE

Modelowanie dwuwymiarowe pokrywy osadowej i podłoża krystalicznego platformy wschodnioeuropejskiej przeprowadzono na profilu refrakcyjnym 1-VI-66 na podstawie hodografów pierwszych wstąpień. Wstępny model struktury opracowano na podstawie wyników dotychczasowych badań geofizycznych i geologicznych, przeprowadzonych w tym rejonie platformy. Głębokość występowania podłoża krystalicznego określono na podstawie przekroju głębokościowego, wyznaczonego zmodyfikowaną metodą izochron, oraz na podstawie mapy sejsmicznej Polski (A. Wojas, 1979; J. Skorupa, 1974). Pokrywę osadową podzielono na kompleksy zgodnie z podziałem geologicznym. Miąższości i głębokości występowania poszczególnych kompleksów określono na podstawie danych z otworów. Rozkłady prędkości fal P dla poszczególnych warstw określono na podstawie wyników aproksymacji danych profilowania prędkości w otworach (M. Grad, 1987). Prędkość fal P w podłożu krystalicznym przyjęto z ogólnego modelu skorupy ziemskiej platformy wschodnioeuropejskiej (m.in. A. Guterch i in., 1975; M. Grad, 1976, 1986).

Pierwsze obliczenia przeprowadzone dla modelu wstępnego wykazały, że przy braku hodografów związanych z poszczególnymi kompleksami geologicznymi, bez szkody dla wyników, można połączyć sąsiadujące ze sobą kompleksy o zbliżonych rozkładach prędkości. W ten sposób liczba kompleksów pokrywy osadowej o istotnie różniących się własnościach sprężystych została ograniczona



do pięciu: trzeciorzęd + czwartorzęd (TQ), kreda + jura + trias (KJT), perm (P), sylur + ordowik (SO) i kambry (Cm).

Podział ten nie uległ już zmianom. W kolejnych etapach modelowania nieznacznie skorygowano rozkłady prędkości. Metodą prób i błędów dobrano kształt, nachylenie i głębokość granic (fig. 3). Głębokość liczono od poziomu odniesienia, który wynosił 100 m n.p.m. Różnice czasów eksperymentalnych i teoretycznych nie przekraczają na ogół 0,05 s. W przeliczeniu na głębokość granicy refrakcyjnej, związanej ze stropem podłoża krystalicznego, daje to różnicę 100–200 m.

MODEL STRUKTURY NA PROFILU 1-VI-66

Materiał sejsmiczny z profilu refrakcyjnego 1-VI-66 nie pozwolił na szczegółowe określenie struktury pokrywy osadowej. Model przedstawiony na fig. 3 daje bardzo zgeneralizowany obraz budowy kompleksu osadowego: oprócz granicy podłoża krystalicznego możliwe było prześledzenie jedynie trzech krótkich odcinków horyzontu o prędkości granicznej $v_g \sim 5100$ m/s związanego z utworami permskimi. Ze względu na prędkości fal P w pokrywie osadowej zostały wyróżnione kompleksy: kenozoicznie-mezozoiczny i kambryjsko-sylurski, rozdzielone kompleksem podwyższonej prędkości, związanym z utworami permskimi.

W modelu przyjęto wzdłuż całego profilu stałą miąższość (200 m) utworów trzeciorzędowych i czwartorzędowych, ze wzrostem prędkości od 1750 do 1800 m/s. Miąższość utworów mezozoicznych waha się od 1250 m na platformie do ponad 3000 m w synklinorium brzeżnym. Prędkość fal P wynosi 2000 m/s na głębokości 200 m. Następnie zmienia się początkowo dość gwałtownie, potem nieco wolniej, by na głębokości 3000 m osiągnąć 4000 m/s.

Głębokość stropu utworów permskich waha się od 1450 m w NE części profilu do ponad 3000 m w pobliżu strefy kontaktu platform, a miąższość kompleksu wzrasta odpowiednio od 250 do ok. 1000 m. Prędkość fal praktycznie nie zależy od głębokości, a jej średnia w utworach permskich wynosi ok. 5100 m/s.

W kompleksie kambryjsko-sylurskim zostały wydzielone dwie warstwy różniące się prędkościami fal P . Warstwa kambry, w której prędkość zmienia się liniowo od 4850 m/s na głębokości 2000 m do 5400 m/s na głębokości 10 000 m,

Fig. 3. System hodografów pierwszych wstąpień i sejsmiczny model pokrywy osadowej platformy prekambryjskiej wzdłuż profilu 1-VI-66

System of travel-times of refracted P waves and seismic model of the Precambrian Platform sedimentary cover along profile 1-VI-66

1 – punkty strzałowe; 2 – hodografy eksperymentalne; 3 – hodografy teoretyczne; 4 – granice sejsmiczne w modelu pokrywy osadowej; 5 – granica podłoża krystalicznego i prędkość graniczna w km/s; dla otworów: Grudziądz IG1, Prabuty IG1, Pasłek IG1, Młynary 1 i Gładysze 1 przedstawiono podział stratygraficzny z odpowiednimi prędkościami fal P (w km/s); K – kreda; J – jura; T – trias; P – perm; S – sylur; O – ordowik; Cm – kambry; kompleksy sejsmiczne; TQ – trzeciorzęd + czwartorzęd, KJT – kreda + jura + trias, SO – sylur + ordowik

1 – shotpoints; 2 – experimental travel-times; 3 – theoretical travel-times; 4 – seismic boundaries in the sedimentary cover model; 5 – boundaries of the crystalline basement and the boundary velocity in km/s; for boreholes Grudziądz IG1, Prabuty IG1, Pasłek IG1, Młynary 1 and Gładysze 1, stratigraphic division with respective P wave velocities (in km/s) is presented; K – Cretaceous; J – Jurassic; T – Triassic; P – Permian; S – Silurian; O – Ordovician; Cm – Cambrian; seismic complexes: TQ – Tertiary + Quaternary, KJT – Cretaceous + Jurassic + Triassic, SO – Silurian + Ordovician

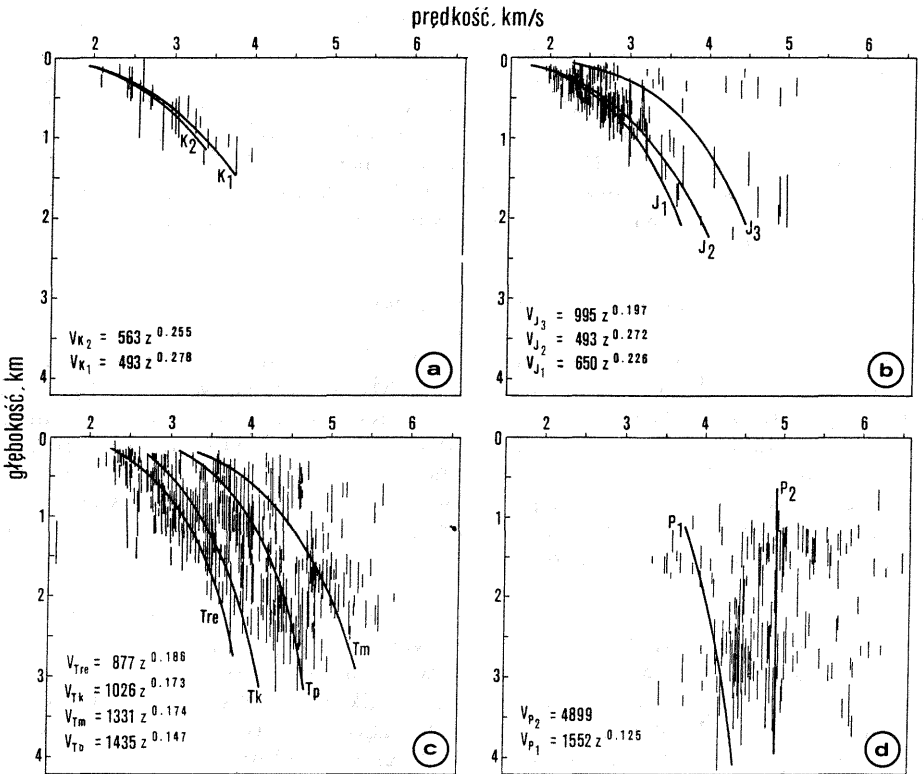


Fig. 4. Prędkości warstwowe osadów monokliny przedsudeckiej w: a – kredzie, b – jurze, c – triasie, d – permie

Layer velocities in sediments of Foresudetic Monocline: a – Cretaceous, b – Jurassic, c – Triassic, d – Permian

K₂ – kreda górna, K₁ – kreda dolna, J₃ – jura górna, J₂ – jura środkowa, J₁ – jura dolna, Tre – retyk, Tk – kajper, Tm – wapien muszlowy, Tp – pstry piaskowiec, P₂ – cechsztyń, P₁ – czerwony spągowiec; z – głębokość w m, V – prędkość w m/s

K₂ – Upper Cretaceous, K₁ – Lower Cretaceous, J₃ – Upper Jurassic, J₂ – Middle Jurassic, J₁ – Lower Jurassic, Tre – Rhaetian, Tk – Keuper, Tm – Muschelkalk, Tp – Buntsandstein, P₂ – Zechstein, P₁ – Rotliegendes; z – depth in m, V – velocity in m/s

jest morfologicznie związana z podłożem krystalicznym, a jej miąższość rośnie w kierunku SW od 200 do 800 m. Bezpośrednio na utworach kambru leżą twory syluru i ordowiku, w których prędkość waha się od 3300 do ok. 5100 m/s, a miąższość dochodzi do 2500 m.

Materiał eksperymentalny pozwolił na ciągle prześledzenie granicy podłoża krystalicznego wzdłuż całego profilu. W północnej części układ kompleksów jest prawie horyzontalny, a grubość pokrywy osadowej wynosi ok. 3000 m. W miarę przesuwania się na południe granica podłoża krystalicznego zaczyna początkowo powoli, a potem coraz gwałtowniej opadać, by w pobliżu strefy kontaktu platform osiągnąć głębokość ponad 9000 m. Prędkość graniczna przyjmuje wartość od 6050 m/s w części NE do 6300 m/s w SW części profilu. Szczegółowe dane dotyczące modelowania dwuwymiarowego i uzyskanych wyników można znaleźć we wcześniejszym opracowaniu profilu 1-VI-66 (W. Klimkowski, 1986).

POKRYWA OSADOWA PLATFORMY PALEOZOICZNEJ

Modelowanie struktury platformy paleozoicznej przeprowadzono na profilu M-9 przebiegającym przez monoklinę przedsudecką. Platforma paleozoiczna zbudowana jest z dwóch podstawowych pięter strukturalnych dolnego, uformowanego ze skonsolidowanego, sfałdowanego i częściowo zmetamorfizowanego podłoża paleozoicznego (konsolidacji kaledońskiej i waryscyjskiej), oraz górnego, zbudowanego z młodszych utworów osadowych.

WYNIKI PIONOWEGO PROFILOWANIA PRĘDKOŚCI

Analizę prędkości warstwowych w utworach osadowych przeprowadzono dla otworów z najbliższego otoczenia profilu M-9 (do odległości ok. 40 km od profilu). W opracowaniu wykorzystano 110 otworów (fig. 1). Rutynowe pomiary sejsmiczne w tych otworach przeprowadzone były w latach 1956–1987. Maksymalna głębokość pomiarów wynosiła ok. 4000 m. Nie uzyskano prędkości warstwowych w utworach podpermских, natomiast przeprowadzono szczegółowszą analizę w zależności od wieku utworów osadowych (dla kolejnych epok, a nie — jak dla osadów platformy prekambryjskiej — okresów). Rezultaty aproksymacji prędkości warstwowych funkcją potęgową, pomierzonych w utworach permsko-mezozoicznych, przedstawiono na fig. 4. W wyrażeniach, opisujących zmianę prędkości warstwowej z głębokością dla poszczególnych epok, prędkość V jest wyrażona w m/s, a głębokość z — w m. Miąższość utworów kenozoicznych w rejonie profilu M-9 wynosi ok. 100–200 m. Prędkość warstwowa waha się od 1500 do 2000 m/s i w mniej szczegółowych opracowaniach można przyjąć prędkość średnią 1850 m/s. W utworach kredy, jury i triasu obserwuje się bardzo wyraźny wzrost prędkości fal P z głębokością. Utwory kredy występują do głębokości 1500 m. Prędkość w nich wzrasta od ok. 2000 m/s przy powierzchni do ok. 3700 m/s na głębokości 1500 m, nie wykazując praktycznie zróżnicowania dla kredy górnej i dolnej. Utwory jury występują na głębokości 100–2000 m, której odpowiada wzrost średniej prędkości warstwowej od ok. 2000 do 3500–4500 m/s, przy czym największe prędkości notuje się dla utworów malmu, a najmniejsze dla liasu. Największe zróżnicowanie prędkości warstwowych występuje w utworach triasowych. Zmieniają się one od 2300–3300 m/s na głębokości ok. 200 m do 3700–5200 m/s na głębokości 3000 m (dla retyku najmniejsze, dla wapienia muszlowego największe). Utwory permu występują w przedziale głębokości ok. 1000–4000 m. Praktycznie nie obserwuje się wzrostu prędkości z głębokością. W utworach czerwonemu spągowca — ok. 4900 m/s, a czerwonego spągowca — ok. 4000 m/s.

POLE FALOWE NA PROFILU M-9

Sejsmiczne badania refrakcyjne na profilu M-9 wykonano w 1973 r. Profil przebiega przez monoklinę przedsudecką w przybliżeniu wzdłuż linii Gostyń — Dolsk — Książ Wielkopolski — Środa — Września. Rejestracje prowadzono na prostoliniowym profilu o długości ok. 130 km. Zlokalizowano na nim 6 punktów strzałowych. Odstęp między nimi wynosił ok. 25 km (siódmy punkt strzałowy PS 147,9 zlokalizowano ok. 20 km na NE od końca profilu).

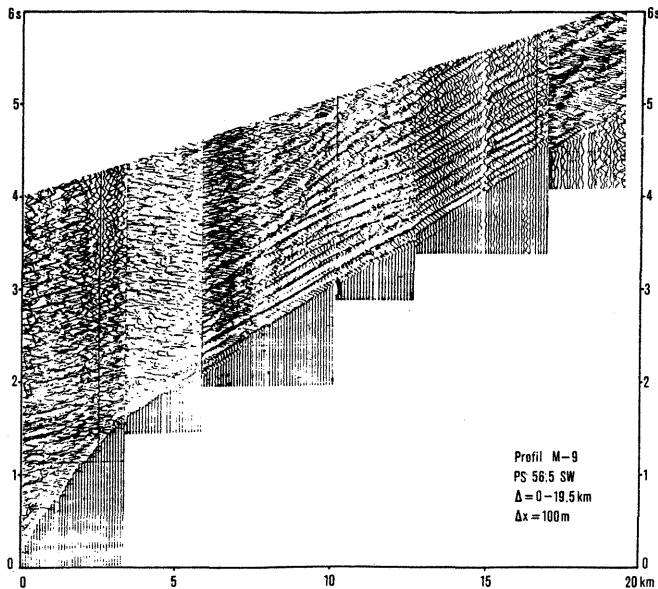


Fig. 5. Przykład rejestracji sejsmicznych na profilu M-9 w odległości 0–19,5 km od PS 56.5 SW; odległość między kanałami $\Delta x = 100$ m

Example of seismic records from SP 56.5 SW on profile M-9 in distance range 0–19.5 km; distance between channels $\Delta x = 100$ m

W niniejszej pracy za początek profilu przyjęto punkt, w którym prowadzone były rejestracje, wysunięty najbardziej w kierunku SW. Odpowiada to odległości –30 km we wcześniejszych opracowaniach (S. Toporkiewicz, 1966–1978, 1984). W wyniku korelacji dla wszystkich gałęzi hodografów wydzielono szereg grup fal refrakcyjnych zarejestrowanych w pierwszych wystąpieniach, w odległości od 0 do ok. 95 km od punktu strzałowego:

- w odległości 1–2 km od punktu strzałowego, tj. w najbliższym jego otoczeniu fala bezpośrednia ma prędkość 1700–2000 m/s, charakterystyczną dla utworów kenozoicznych;

- w odległości 1–5 km od punktu strzałowego w pierwszych impulsach fala ma prędkość pozorną od 3300–3500 do 4000 m/s;

- w odległości 5–25 km od punktu strzałowego fala ma prędkość 4900–5200 m/s. Długość hodografów tej grupy fal wynosi zwykle od 5 do 15 km. Charakterystyczne dla wszystkich gałęzi jest ostre zerwanie ciągłości hodografów tej grupy w odległości od 10 do 25 km od punktu strzałowego. Świadczy to o zmniejszeniu prędkości w niżej występującym kompleksie;

- w odległości od 10–25 do 60 km na wszystkich gałęziach hodografów wydzielono w pierwszych impulsach fale o prędkościach 5300–5400 m/s;

- w NE części profilu długość hodografów wynosi 12–53 km, a prędkości pozorne 5450–5650 m/s;

- na największych odległościach od punktu strzałowego występują w pierwszych impulsach fale refrakcyjne związane ze skonsolidowanym podłożem platformy paleozoicznej. Długość hodografów tej grupy fal wynosi od 20 do 65 km. Charakteryzują się one prędkościami pozornymi od 5800–5900 do 6300–6500 m/s.

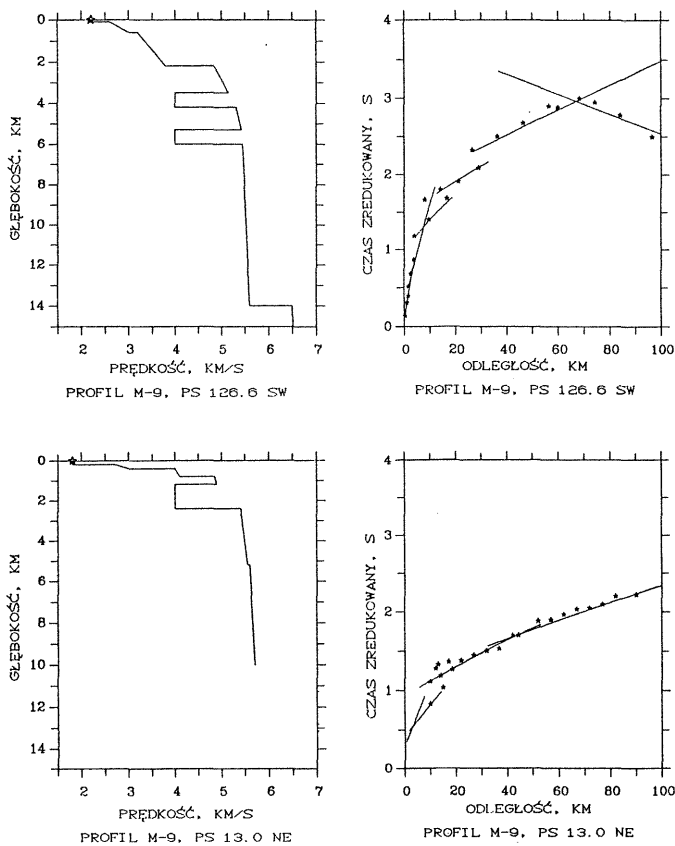


Fig. 6. Przykłady modeli jednowymiarowych i porównanie hodografów eksperymentalnych (gwiazdki) z teoretycznymi (linie ciągłe) dla punktów strzałowych PS 126.6 SW i PS 13.0 NE na profilu M-9
 Examples of one-dimensional models and comparison of experimental (asterisks) and theoretical (solid line) travel-times for SP 126.6 SW and SP 13.0 NE on profile M-9

Oprócz wymienionych fal refrakcyjnych, związanych z pokrywą osadową i granicą podłoża skonsolidowanego, zarejestrowano fale odbite i refrakcyjne, związane z granicami w krystalicznym kompleksie skorupy ziemskiej i z granicą Moho. Ich interpretacja prezentowana była już wcześniej (m.in. A. Guterch i in., 1975, 1986), a w szczególności modelowanie jedno- i dwuwymiarowe będzie przedmiotem innego opracowania. Przykłady sejsmogramów z profilu M-9 przedstawiono na fig. 5.

MODELOWANIE JEDNOWYMIAROWE

Dla każdego punktu strzałowego i wszystkich gałęzi hodografów modele jednowymiarowe dobrano przez zmiany rozkładów prędkości i głębokości granic aż do otrzymania dobrej zgodności hodografów teoretycznych i eksperymentalnych. Metoda ta daje bardzo dobre rezultaty w przypadku płaskich granic i niewielkich niejednorodności horyzontalnych. Dla ośrodków złożonych

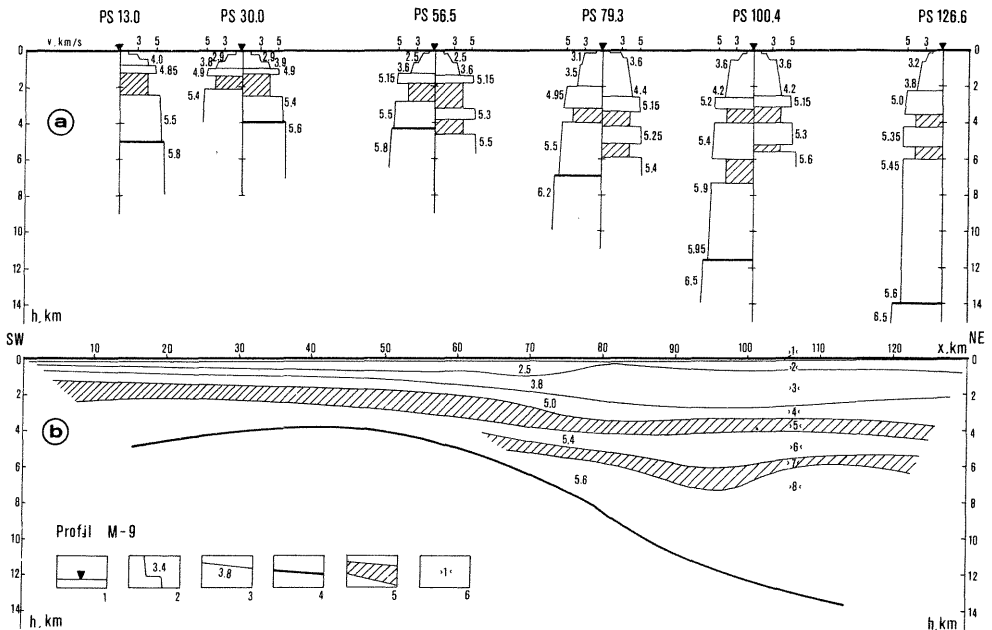


Fig. 7. Jednowymiarowe modelowanie sejsmiczne na profilu M-9: reprezentacja modeli jednowymiarowych (a) i wstępny model dwuwymiarowy struktury (b)

Representation of one-dimensional modelling (a) and preliminary two-dimensional model of the structure (b) on profile M-9

1 – punkty strzałowe; 2 – prędkość w modelach jednowymiarowych w km/s; 3 – granice sejsmiczne we wstępnym modelu dwuwymiarowym i prędkość graniczna w km/s; 4 – granica podłoża skonsolidowanego; 5 – warstwa obniżonych prędkości, prędkość $v_p = 4,0$ km/s; 6 – kolejne warstwy w modelu dwuwymiarowym

1 – shotpoints; 2 – velocity in one-dimensional models in km/s; 3 – seismic boundaries in the preliminary two-dimensional model and the boundary velocity in km/s; 4 – consolidated basement boundary; 5 – low-velocity layer, velocity $v_p = 4,0$ km/s; 6 – consecutive layers in the two-dimensional model

modele jednowymiarowe mogą być jedynie przybliżoną reprezentacją struktury. Należy zwrócić uwagę, że niektóre elementy modelu (np. głębokości granic, prędkości graniczne, strefy obniżonych prędkości) mogą być wyznaczone błędnie i nie mieć odpowiednika w rzeczywistym ośrodku (M. Grad, 1985). Przykłady wybranych modeli jednowymiarowych i porównanie hodografów z profilem M-9 przedstawia fig. 6. Hodografy teoretyczne wykazują zgodność z hodografami eksperymentalnymi i wyjaśniają w szczególności zaburzenia oraz nieciągłości korelacji pierwszych wstąpień.

Zestawienie modeli jednowymiarowych pokrywy osadowej na profilu M-9 przedstawiono na fig. 7a. Widoczne jest wyraźne zróżnicowanie w rozkładach prędkości w SW (odległości 0–50 km) i NE (odległości 50–120 km) części profilu. We wszystkich modelach pierwszy kompleks o miąższości 100–200 m charakteryzuje się prędkościami 1800–2000 m/s i można go wiązać z utworami kenozoicznymi. W SW części profilu w przedziale głębokości od 200 do 1000–1500 m prędkość rośnie od ok. 2500 do ok. 4000 m/s. W części NE w przedziale głębokości od 200 do ok. 2500 m prędkość rośnie od 2500 do ok. 4400 m/s. Dla całego profilu charakterystyczne jest występowanie stosunkowo cienikiego kompleksu o podwyższonych prędkościach (4900–5200 m/s). Są to utwory cechsztyńskie leżące na głębokości od ok. 1000 m w części SW do ok.

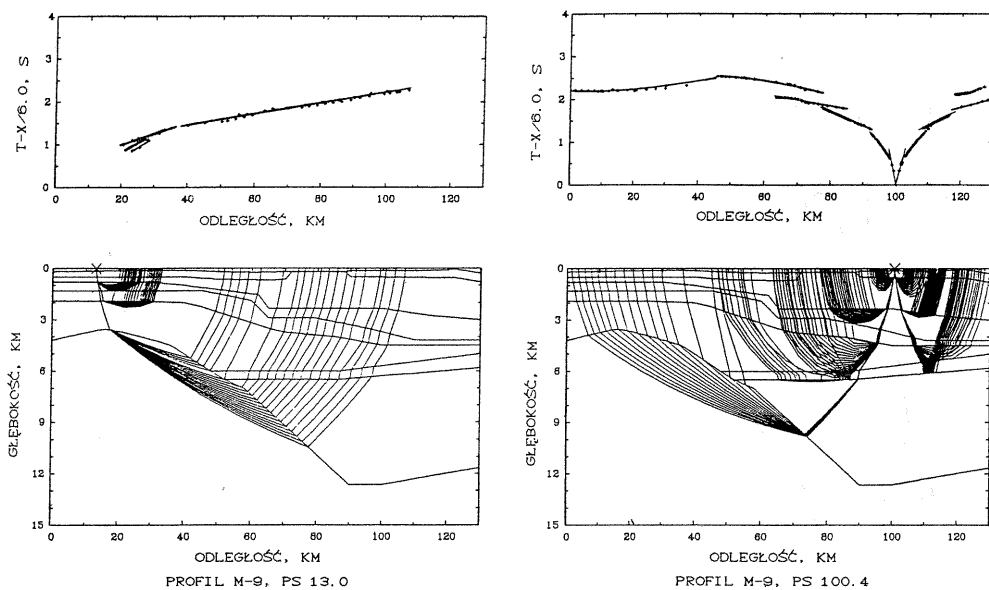


Fig. 8. Przykłady modelowania dwuwymiarowego na profilu M-9; porównanie hodografów eksperymentalnych (linie ciągłe) i teoretycznych (punkty) oraz diagramy promieniowe dla punktów strzałowych PS 13.0 i PS 100.4

Examples of two-dimensional modelling on profile M-9; comparison of experimental (solid line) and theoretical (points) travel-times and ray diagrams for SP 13.0 and SP 100.4

3000–4000 m w części NE profilu. W części SW pod utworami cechsztyńskimi występuje kompleks o obniżonych prędkościach (4000 m/s) i kompleks o prędkości 5400–5500 m/s, a pod nim na głębokości 3000–5000 m kompleks o prędkości ok. 5800 m/s charakterystycznej dla podłoża skonsolidowanego. W części NE pod utworami cechsztyńskimi notowane są na przemian kompleksy o obniżonych i podwyższonych prędkościach (odpowiednio 4000, 5300–5400 i znowu 4000 m/s). Obserwuje się wyraźnie zapadanie podłoża skonsolidowanego od głębokości 5000 do ok. 14 000 m. Równocześnie notowane są znacznie podwyższone prędkości pozorne fal refrakcyjnych z punktów strzałowych rejestrowanych w kierunku SW (od 6200 do 6500 m/s), co również potwierdza nachylenie granicy podłoża.

MODELOWANIE DWUWYMIAROWE

Reprezentacja modeli jednowymiarowych była podstawą określenia wstępnego modelu dwuwymiarowego pokrywy osadowej na profilu M-9. Model struktury przedstawiono w postaci ośmiu warstw zróżnicowanych pod względem prędkości i grubości, tworzących pokrywę osadową spoczywającą na skonsolidowanym podłożu. Pierwsze trzy warstwy tworzą kompleks kenozoiczny-mezozoiczny. Pod kolejną warstwą o dużych prędkościach (utwory cechsztyńskie) występują warstwy obniżonych i podwyższonych prędkości. Granice sejsmiczne i rozkłady prędkości we wstępnym modelu dwuwymiarowym przedstawia fig. 7b. Model ten był wielokrotnie modyfikowany metodą prób i błędów.

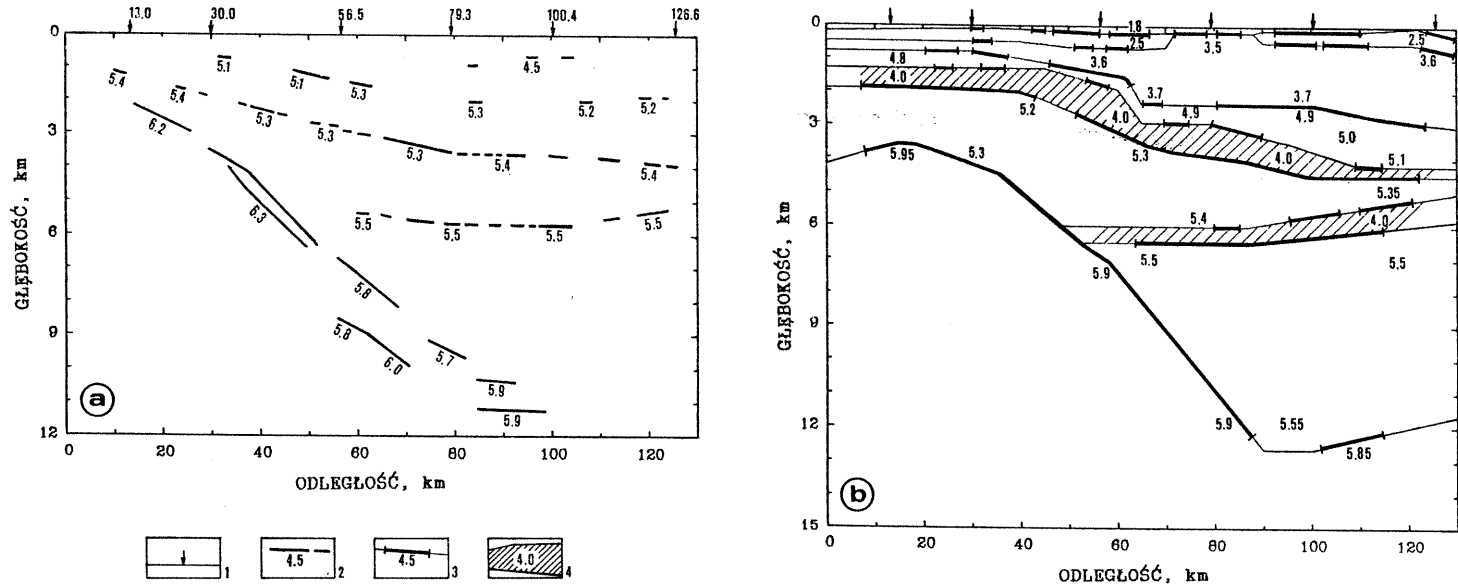


Fig. 9. Sejsmiczna struktura pokrywy osadowej na profilu M-9

Seismic structure of sedimentary cover on profile M-9

a – przekrój sejsmiczny (S. Toporkiewicz, 1984); b – model dwuwymiarowy

1 – punkty strzałowe; 2 – sejsmiczne granice refrakcyjne i prędkość graniczna w km/s (S. Toporkiewicz, 1984); 3 – fragmenty granic wyznaczone na podstawie dwuwymiarowego modelowania fal refrakcyjnych i prędkość w km/s; 4 – strefy obniżonych prędkości i prędkość w km/s

a – seismic cross section (S. Toporkiewicz, 1984); b – two-dimensional model

1 – shotpoints; 2 – seismic refraction boundaries and the boundary velocity in km/s (S. Toporkiewicz, 1984); 3 – fragments of boundaries determined on the basis of two-dimensional modelling of refracted waves and the boundary velocity in km/s; 4 – low-velocity zones and velocity in km/s

Poczynając od powierzchni, dla kolejnych warstw i granic refrakcyjnych zmieniano rozkłady prędkości i kształt granic aż do uzyskania zgodności hodografów eksperymentalnych i teoretycznych. Przykłady wyników modelowania dwuwymiarowego przedstawiono na fig. 8. Dla dwóch punktów strzałowych porównano tu hodografy eksperymentalne i teoretyczne, obliczone dla ostatniej wersji modelu. Zamieszczono również diagramy promieniowe pokazujące bieg promieni sejsmicznych w złożonym modelu struktury. Dwuwymiarowy model sejsmiczny na profilu M-9 przedstawiono na fig. 9b.

PODSUMOWANIE I DYSKUSJA WYNIKÓW

W kinematycznym modelowaniu dwuwymiarowym na profilach 1-VI-66 i M-9 otrzymano sejsmiczne modele pokrywy osadowej. Granice sejsmiczne i rozkłady prędkości określono na podstawie hodografów fal refrakcyjnych tworzących kompletny układ z punktami wzajemnymi. W modelu nie zostały uwzględnione krótkie fragmenty korelujących się fal bez gałęzi wiążących. Dotyczy to głównie górnej części pokrywy osadowej, dla której system rejestracyjny nie pozwolił na szczegółową interpretację, ze względu na zbyt duże odległości między punktami strzałowymi. Modele dwuwymiarowe są więc pewną generalizacją i reprezentują tylko główne elementy sejsmicznej struktury pokrywy osadowej.

Model osadów na profilu 1-VI-66 przedstawiony został na fig. 3. Ze względu na brak rejestracji w bezpośredniej bliskości punktów strzałowych, uzyskane materiały pozwalają jedynie na interpretację ogólnych rysów regionalnych budowy pokrywy osadowej, bez możliwości rozpoznania struktur mniejszych. Głębokość podłoża krystalicznego zmienia się od ok. 3000 m na platformie do ponad 9000 m w synklinorium brzeżnym. Prędkość średnia w nadkładzie waha się odpowiednio od 2900 do 4100 m/s, a prędkość graniczna fali refrakcyjnej w podłożu od 6050 do 6300 m/s. W modelu pokrywy osadowej zostały wyróżnione kompleksy: kenozoicznie-mezozoiczny i kambryjsko-sylurski, rozdzielone kompleksem o podwyższonej prędkości (ok. 5100 m/s), związanym z utworami permskimi. Na platformie zarówno prędkość średnia, jak i głębokość występowania podłoża w modelu wykazują zgodność z wynikami z głębokich wierceń. Otrzymany model zbliżony jest również do wyników wcześniejszych opracowań, a różnice, występujące na krótkich odcinkach, wynikają głównie z łączenia segmentów profilu w metodzie izochron (A. Wojas, 1979).

Model sejsmicznej struktury pokrywy osadowej na profilu M-9 przedstawiono na fig. 9b. Niektóre fragmenty modelu nie mają odpowiednika w obserwowanym polu falowym, a wynikają jedynie z formalnej konieczności przedłużenia granic i kompleksów. Dlatego też na fig. 9b grubą kreską zaznaczono udokumentowane fragmenty granic, dla których obserwuje się w polu sejsmicznym związane z nimi fale. Wyniki potwierdzają główne elementy przekroju uzyskane we wcześniejszych opracowaniach (S. Toporkiewicz, 1966–1978, 1984), a w szczególności położenie stropu utworów cechsztynu (o prędkościach ok. 5000 m/s), granic w starszym paleozoiku (o prędkościach ok. 5300 i 5500 m/s) oraz podłoża (o prędkości 5900–6000 m/s). Porównanie przedstawiono na fig. 9a i b. Głębokość podłoża rośnie w kierunku NE od ok. 3000 do ok. 12 000 m. Znaczne zmiany głębokości granic sejsmicznych w przedziale odległości 55–65 km mogą być interpretowane jako strefa rozłamowa.

Modelowanie kinematyczne na obydwu profilach pozwoliło na obiektywną i jednolitą interpretację wyników badań refrakcyjnych. Zweryfikowano dane dotyczące rozkładów prędkości i miąższości kompleksów starszego paleozoiku.

Instytut Geofizyki
Uniwersytetu Warszawskiego
Warszawa, ul. Pasteura 7
Nadesłano dnia 27 stycznia 1989 r.

PIŚMIENNICTWO

- ČERVENÝ V., PŠENČIK I. (1981) – Two-dimensional seismic ray package SEIS81. Uniwersytet Karola, Praga.
- ČERVENÝ V., PŠENČIK I. (1983) – SEIS83 – Numerical modelling of seismic wave fields in two-dimensional laterally ranging layered structures by the ray method. In: Documentation of earthquake algorithms. (ed. E.R. Engdahl). WDC(A) for solid Earth Geophysics (Boulder). Report SE-35, 36–40.
- GRAD M. (1976) – Model głębokiej struktury skorupy ziemskiej platformy wschodnioeuropejskiej na obszarze północno-wschodniej Polski. *Acta Geoph. Pol.*, **24**, p. 139–145, nr 2.
- GRAD M. (1980) – Determination of deep tectonic disturbances in the Earth's crust based on the interpretation of waves reflected in near-critical region. *Publ. Inst. Geoph. Pol. Acad. Sc.*, A-8 (130), p. 33–49.
- GRAD M. (1985) – A note on the application of the Wiechert-Herglotz method and modelling in studies of the Earth's crust by deep seismic sounding. *Acta Geoph. Pol.*, **33**, p. 259–268, nr 3.
- GRAD M. (1986) – Seismic P-wave velocities of the East European Platform in Poland. *Acta Geoph. Pol.*, **34**, p. 21–29, nr 1.
- GRAD M. (1987) – Prędkości fal sejsmicznych w pokrywie osadowej platformy wschodnioeuropejskiej. *Kwart. Geol.*, **31**, p. 97–114, nr 1.
- GUTERCH A. (1977) – Structure and physical properties of the Earth's crust in Poland in the light of new data of DSS. *Publ. Inst. Geoph. Pol. Acad. Sc.*, A-4 (115), p. 347–357.
- GUTERCH A., MATERZOK R., PAJCHEL J., PERCHUĆ E. (1975) – Sejsmiczna struktura skorupy ziemskiej wzdłuż VII profilu międzynarodowego w świetle badań metodą głębokich sondowań sejsmicznych. *Prz. Geol.*, **23**, p. 153–163, nr 4.
- GUTERCH A., GRAD M., MATERZOK R., PERCHUĆ E., TOPORKIEWICZ S. (1986) – Wyniki sejsmicznych badań głębokiej struktury skorupy ziemskiej obszaru Polski. 1969–1985. *Publ. Inst. Geoph. Pol. Acad. Sc.*, A-17 (192).
- KLIMKÓWSKI W. (1986) – Modelowanie rozkładu prędkości fal sejsmicznych w skorupie ziemskiej. *Arch. Inst. Geof. UW. Warszawa*.
- KUBICKI S., RYKA W., ZNOSKO J. (1972) – Tektonika podłoża krystalicznego prekambryjskiej platformy w Polsce. *Kwart. Geol.*, **16**, p. 523–545, nr 3.
- MIKOŁAJCZAK A. (1967) – Dokumentacja badań sejsmicznych. Temat: Regionalne profile sejsmiczne na lata 1966–1967. *Arch. PBG. Warszawa*.
- MŁYNARSKI S. (1982) – Budowa głębokiego podłoża w Polsce na podstawie sejsmicznych badań refrakcyjnych. *Kwart. Geol.*, **26**, p. 285–296, nr 2.
- MŁYNARSKI S. (1984) – The structure of deep bedrock in Poland on the basis of refraction results. *Publ. Inst. Geoph. Pol. Acad. Sc.*, A-13 (160), p. 87–100.
- SKORUPA J. (1974) – Mapa sejsmiczna Polski. *Wyd. Geol. Warszawa*.
- TOPORKIEWICZ S. (1966–1978) – Dokumentacja z badań sejsmicznych w rejonie Monokliny Przedśudeckiej. *Arch. Przeds. Geof. Kraków*.

- TOPORKIEWICZ S. (1984) — The structure of the consolidated basement of the Palaeozoic Platform in south-west Poland. Publ. Inst. Geoph. Pol. Acad. Sc., A-13 (160), p. 101–117.
- WOJAS A. (1979) — Zbiorcza dokumentacja badań sejsmicznych refrakcyjnych. Temat: Polska centralna, lata 1965–1978, reinterpretacje w latach 1977–1979. Arch. PBG. Warszawa.

Мареk ГРАД, Тран ТРУНГ ДОАН, Веслав КЛИМКОВСКИ

СЕЙСМИЧЕСКИЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАДОЧНОЙ ТОЛЩИ ВДОЛЬ РАЗРЕЗА ЧЕРЕЗ ДОКЕМБРИЙСКУЮ И ПАЛЕОЗОЙСКУЮ ПЛАТФОРМЫ

Резюме

В статье представлены результаты одно- и двухмерного моделирования сейсмической структуры осадочного чехла на профилях 1-VI-66 и М-9 (фиг. 1). В моделировании сложных многослойных сред использован динамической лучевой метод, а также результаты сейсмического каротажа скорости в глубоких буровых скважинах.

Сейсмические границы и распределения скорости определены на основании годографов преломленных волн, образующих комплектную систему с взаимными точками. Полученные модели представляют основные элементы сейсмической структуры осадочного чехла.

Глубина кристаллического фундамента на профиле 1-VI-66 изменяется от около 3000 м на платформе до свыше 9000 м в береговом синклинии (фиг. 3). Средняя скорость изменяется соответственно от 2900 до 4100 м/с, а скорость преломленной волны в кристаллике от 6050 до 6300 м/с. В модели осадочной толщи выделены два комплекса: кайнозойско-мезозойский и кембрийско-силурийский, разделенные слоем повышенных скоростей (ок. 5100 м/с), связанным с пермскими отложениями. Основными элементами сейсмической модели на профиле М-9 являются (фиг. 9): граница кровли цехштейновых отложений (со скоростями около 5000 м/с), границы в старшем палеозое (со скоростями около 5300 и 5500 м/с), а также основание (со скоростью 5900–6000 м/с). Глубина основания увеличивается в направлении СВ от около 3000 до около 12 000 м.

Сравнение с результатами предыдущих интерпретаций материалов из профилей 1-VI-66 и М-9 подтверждает основные элементы разрезов осадочной толщи. Проведенное двухмерное моделирование сделало возможной объективную интерпретацию полученных результатов. Сделана также верификация данных касающихся распределения скоростей и мощностей слоев отложений старшего палеозоя.

Marek GRAD, Tran TRUNG DOAN, Wiesław KLIMKOWSKI

SEISMIC MODELS OF SEDIMENTARY COVER OF THE PRECAMBRIAN AND PALAEOZOIC PLATFORMS IN POLAND

S u m m a r y

Results of one and two-dimensional modelling of sedimentary cover structure of the Precambrian and Palaeozoic platforms in Poland are presented. The modelling was based on materials of seismic studies along refraction profiles M-9 and 1-VI-66 and seismic profiling in boreholes. In

two-dimensional modelling, a method of dynamical ray tracing in complex media was applied. The models of sediment structure was determined for both profiles, including pre-Permian formations, and the boundary of the basement.

On profile 1-VI-66 the depth of the crystalline basement ranges from about 3 km in the platform region to more than 9 km in the marginal synclinorium (Fig. 3). The mean velocity in the overburden varies, respectively, from 3200 to 4200 m/s, and the refracted wave boundary velocity in the basement from 6050 to 6300 m/s. In the sedimentary cover model we distinguished Cainozoic-Mesozoic and Cambrian – Silurian complexes, separated by a higher velocity layer (some 5100 m/s) associated with the Permian formations.

On profile M-9 the depth of basement of 5900-6000 m/s velocity increases in the NE direction from about 3 to 12 km. The mean velocity in the sedimentary complex changes from 3900 to 4900 m/s, respectively. Underneath the Zechstein formations, having a velocity of some 5000 m/s, we detected the presence of boundaries in the Older Palaeozoic, having velocities of some 5300 and 5500 m/s, and also layers of lower velocity (Fig. 9).

As a result of modelling made for the two profiles we obtained two-dimensional models of the sedimentary cover and its basement. Theoretical travel-times show a very good agreement with experimental ones (of the order of 0.05–0.1 s). Also the synthetic seismograms show a qualitative agreement in amplitudes of the main groups of refracted and reflected waves. The two-dimensional modelling with the use of the ray tracing method in a complex medium made it possible to determine and identify refraction boundaries and low-velocity layers in the Older Palaeozoic.

The results obtained were compared with ealier studies.

Translated by Marek Grad