

Jaromir Probulski, Andrzej Maksym

Oddział Geologii i Eksploatacji PGNiG SA

Metodyczne podstawy budowania synergicznego pola prędkości dla głębokich badań sejsmicznych w aspekcie interpretacji geologicznej w części karpackiej profilu transkarpackiego – POLCRUST

Artykuł przedstawia zarys metodyki wyznaczania pola prędkości dla głębokich badań sejsmiki refleksyjnej 2D. Zaprezentowany został schemat postępowania dla uzyskania finalnego pola prędkości. Wykonano szereg interpretacji geologicznych, weryfikując zmiany pola prędkości w trakcie przetwarzania danych sejsmicznych. Dzięki zastosowanej metodyce opracowania pola prędkości uzyskano obraz budowy geologicznej w funkcji głębokości z migracji głębokościowej PreSDM. Przedstawione obrazowanie wyników interpretacji sejsmicznej w funkcji głębokości dostarczyło nowych informacji geologicznych, które w istotny sposób wpłynęły na weryfikację budowy strukturalnej skorupy ziemskiej w rejonie badań oraz budowy geologiczno-strukturalnej Karpat. Zaprezentowany został szkic końcowej interpretacji profilu POLCRUST w części karpackiej.

Słowa kluczowe: profil transkarpacki, POLCRUST, model prędkości, PreSDM, centralna depresja karpacka, struktura kwiatowa.

Methodology of building a synergetic velocity model for deep seismic surveys in terms of geological interpretation in parts of the Carpathian Profile – POLCRUST

The purpose of this paper is to outline a methodology of the velocity model determination for deep seismic line. The procedure for calculating the final velocity model is presented. A series of geological interpretations to verify velocity and structural model changes in the course of seismic processing was done. As a result of the applied methodology of velocity model, determination of a structural geological model was obtained from the depth migration PreSDM. The presented results of the seismic interpretation provided a lot of geological information which significantly influenced the verification of the structural construction of the earth's crust in the study area as well as the geological-structural construction of the Carpathians. A final interpretation of the POLCRUST profile in the Carpathians parts was presented.

Key words: Trans Carpathias seismic profile, POLCRUST, velocity model, PreSDM, Carpathians Central Depression, flower structure.

Wprowadzenie

Projekt badawczy prac sejsmicznych 2D profilu transkarpackiego POLCRUST, o długości 240 km, został wykonany na odcinku: południowa granica państwa polskiego–Sannok–Józefów–Hrubieszów metodą refleksyjną i refrakcyjną dla rozpoznania układu strukturalnego pokrywy osadowej i krystalicznej skorupy ziemskiej (rysunek 1). Zaplanowane

w projekcie prace sejsmiczne przeprowadzono w Polsce po raz pierwszy na tak szeroką skalę. W celu realizacji projektu powołano konsorcjum, którego liderem zostało Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo SA w Warszawie dla odcinka karpackiego i Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk dla odcinka lubelskiego. Głównym wykonawcą prac terenowych

oraz w zakresie przetwarzania danych była Geofizyka Toruń SA. Prace sejsmiczne na odcinku profilu poza obszarami

koncesyjnymi PGNiG SA (na odcinku lubelskim) zostały sfinansowane przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska.

Prace terenowe

Prace terenowe były podzielone na dwa odcinki. Pierwszy odcinek profilu (karpacki) od południa przechodził przez koncesje PGNiG SA na długości 130 km, drugi – północny odcinek lubelski, o długości 110 km, leżał poza koncesjami PGNiG SA.

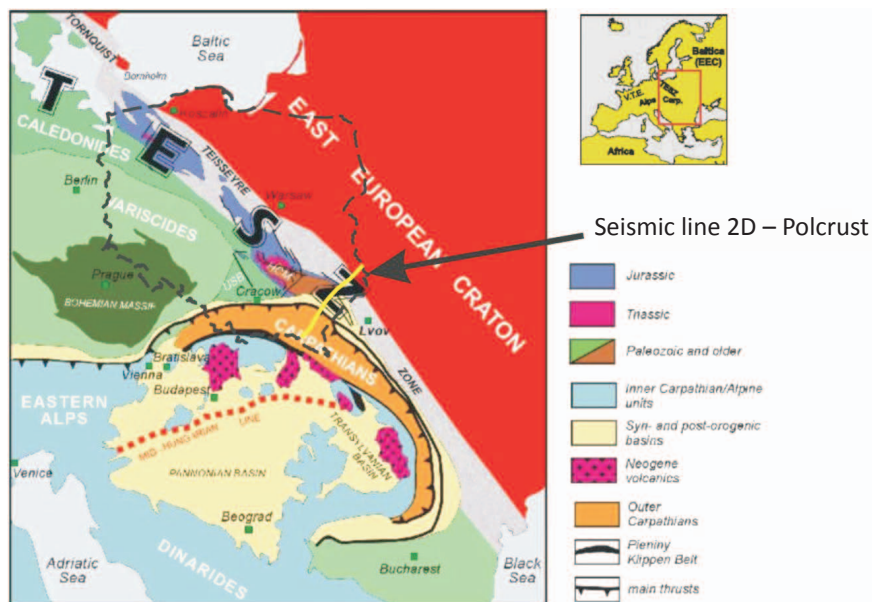
W ramach głębokich prac sejsmicznych wykonano następujące prace terenowe oraz przygotowawcze do dalszych prac procesingowo-interpretacyjnych:

- refleksyjne prace sejsmiczne,
- refrakcyjne prace sejsmiczne,
- pomiar siły ciężkości w redukcji Bouguera wzdłuż linii profilu,
- pomiary magnetotelluryczne w części karpackiej,
- opracowanie krzywych geofizyki otworowej według standardów sejsmicznych,
- wykonanie profilu kartograficzno-geologicznego na odcinku karpackim, na podstawie wykonanych map oraz terenowej weryfikacji.

Pomiary sejsmiczne profilu transkarpackiego wykonała Geofizyka Toruń SA, według zatwierdzonego projektu prac sejsmicznych [9] oraz sporządzonego projektu technicznego tych prac [11].

Podstawowe parametry przyjęte dla wykonania prac akwizycyjnych były wyznaczone na podstawie doświadczeń uzyskanych z głębokich sondowań przeprowadzonych w Finlandii [5] oraz wielu wcześniejszych prac doświadczalnych w Polsce, gdzie głównie badano pojedyncze rekordy sejsmiczne o dużych czasach rejestracji (30÷40 s). Z powodu obiecujących wyników otrzymanych we wcześniejszych badaniach doświadczalnych zdecydowano się na wykonanie

zdzjęcia badawczego 2D, dla którego przyjęto parametry przedstawione w tabelicy 1.



Rys. 1. Lokalizacja prac sejsmicznych 2D (mapa podkładu z CELEBRATION 2000 [1])

Niewątpliwie na wysoką jakość uzyskiwanych zapisów wpływ miało wykorzystanie długiego offsetu (10 485 m) oraz wykonanie trzykrotnego wzbudzenia vibratorowego o czasie emisji 30 s. Te czynniki spowodowały, że zaistniała możliwość znaczącego podniesienia stosunku sygnał/szum nie tylko w strefie płytkiej, ale również na znacznych głębokościach, rzędu kilkudziesięciu kilometrów. Dodatkowo wyjątkowo zgodna współpraca podwykonawców projektu oraz wysokie kwalifikacje pracowników i dobra organizacja pracy po stronie wykonawcy – Geofizyki Toruń SA. sprzyjały sprawnemu przebiegowi prac pod względem logistycznym.

Przetwarzanie danych sejsmicznych

Jednym z istotnych punktów przetwarzania podstawowego, obejmującego operacje do migracji czasowej po składaniu włącznie, jest zdefiniowanie zasad rozdzielenia fal użytecznych od zakłóceń. Ten proces rozdzielenia możemy prawidłowo wykonać w pewnym zakresie offsetowym oraz głębokości, wyrażonej pierwotnie w domenie czasu. Z jednej strony mamy do czynienia z płytką strefą od powierzchni terenu do około 300 m, gdzie występuje małe pokrycie sejsmiczne, ale tutaj z pomocą przychodzą

pomiary strefy małych prędkości – SMP. Zdrugiej zaś strony od pewnej głębokości również nie możemy określić optymalnego pola prędkości ze względu na ograniczenia offsetowe, duże wartości prędkości składania i spadającą jakość odbieranego sygnału. Dlatego należało pozyskać niezależne od sejsmiki informacje o prędkości ośrodka z innych badań geofizyki poszukiwawczej, a następnie odnaleźć zależność pomiędzy zadaniem parametrem a polem prędkości [8].

Tablica 1. Podstawowe parametry badań sejsmicznych na profilu POLCRUST – odcinek karpacki

Geometria rozstawu	odległość między punktami odbioru		30 m
	odległość między punktami wzbudzenia		60 m
	liczba kanałów w rozstawie czynnym		700
	liczba odbiorników na kanał		12
	krotność nominalna		175
	offset minimalny		15 m
	offset maksymalny		10 485 m
	typ rozstawu		środkowy – symetryczny
	konfiguracja rozstawu [m]		10 485-15-0-15-10 485
	warunki brzegowe rozstawu		rozstaw skrajny
	pozycja punktu wzbudzenia		między kanałami
Rejestracja	aparatura		telemetryczna I/O System Two/Image
	typ odbiorników		geofony SM-24
Wzbudzenie	wibratorowe	typ źródła	wibrator Mark IV – siła nacisku 48030 lb
		parametry sweepu	3 × 30 s
	dynamitowe	parametry wzbudzenia dynamitowego	4÷8 kg/otw.
Dane statystyczne	liczba profili		1
	długość linii wzbudzenia		130,020 km
	całkowita liczba punktów wzbudzenia		2168
	długość linii odbioru		129,990 km
	całkowita liczba punktów odbioru		4334
Rozpoznanie strefy małych prędkości	metoda pomiaru		mikroprofilowanie prędkości
	liczba pomiarów		32
	głębokość otworów		50÷60 m
	źródło wzbudzenia		spadający ciężar

W opracowaniu wykorzystano trzy niezależne metody badawcze używane w geofizyce stosowanej: profilowe badania grawimetryczne (rysunek 3), badawcze sondowania magnetotelluryczne MT (rysunek 4) oraz sejsmiczne prace refrakcyjne z tematu CELEBRATION 2000 [1, 2, 3]. Skorzystano także z wyników badań refrakcyjnych wykonanych w trakcie realizacji tego przedsięwzięcia [6]. Wyniki przedstawionych powyżej prac zintegrowano poprzez opracowanie synergicznego rozwiązania pola prędkości [8].

Bardzo ważnym elementem dochodzenia do finalnego pola prędkości jest wzięcie pod uwagę – już na etapie wykonywania pierwszych analiz prędkości – trendów zmian prędkości w polu sumowania sekcji sejsmicznej. Dlatego też w pierwszym etapie prac uwzględniono w analizach AV krzywą rozkładu prędkości estymowanej z pola siły ciężkości, pomierzonego wzdłuż profilu grawimetrycznego (rysunek 3).

Dzięki temu otrzymano prędkości sumowania, gdzie został zweryfikowany i uwzględniony trend prędkości, który niesie również informację o rozkładzie mas we wnętrzu ziemi.

W dalszych etapach przetwarzania danych sejsmicznych oraz interpretacji geologicznej ze szczególnym uwzględnieniem prędkości ośrodka użyto schematu metodycznego wyznaczania finalnego pola prędkości oraz migracji głębokościowej przed sumowaniem (rysunek 2). Schemat ten ilustruje podział wykonywanych prac na poszczególne czynności. Na samym początku wyznaczany jest wstępny model prędkości, przy którego tworzeniu wykorzystano badania terenowe, wyniki pomiarów grawimetrycznych, magnetotellurycznych oraz pomiarów prędkości średnich w otworach [8]. Następnie ten model zastosowano do weryfikacji już wyznaczonych sum (rysunek 5) oraz migracji czasowej po sumowaniu. Po zakończeniu standardowego przetwarzania

wykonano pierwszą interpretację geologiczną w dziedzinie czasu, ograniczając się na tym etapie tylko do głównych granic rozdziału gęstości i prędkości z punktu widzenia danych geologicznych i pomierzonych parametrów geofizycznych. Po przeprowadzeniu tej interpretacji pole prędkości było interpolowane wzdłuż wyznaczonych granic i przygotowane do następnego etapu migracji czasowej, tym razem już migracji przed składaniem. Wynik tej migracji został oceniony pod kątem poprawności geometrii granic interpretacji strukturalnej oraz ponownie sprawdzony z wykorzystaniem układu refleksów na sumie (rysunek 5).

W kolejnym kroku nastąpił najtrudniejszy etap przetwarzania i interpretacji danych sejsmicznych – budowanie modelu geologicznego w dziedzinie głębokości. Na samym początku wykonano interpretację geologiczną w wyniku migracji czasowej przed sumowaniem, a następnie – pionową transformację

z czasu do głębokości. Uzyskany w ten sposób model w funkcji głębokości skorygowano ze względu na występowanie anomalii prędkości. Poprawność modelu granic w głębokości korygowano na podstawie wykonanego zrównoważonego przekroju geologicznego z uwzględnieniem miąższości oraz rozciągłości warstw. Korektę tę wykonano ręcznie, biorąc pod uwagę wielkość zmian prędkości w funkcji głębokości. W celu weryfikacji otrzymanego modelu prędkościowo-strukturalnego wykonano migrację głębokościową po sumowaniu i dalszą edycję przyjętych granic sejsmicznych w głębokości. W ten sposób skonstruowano model startowy w dziedzinie głębokości, użyty do migracji głębokościowej przed składaniem. Następnie model ten był modyfikowany zgodnie z kolejnymi iteracjami migracji głębokościowej aż do uzyskania końcowego modelu prędkości (rysunek 6) oraz końcowego wyniku migracji głębokościowej przed składaniem (rysunek 7).

Interpretacja geologiczna wyników prac

Autorzy za duże osiągnięcie wykonanych badań uważają uzyskanie wiarygodnego obrazu sejsmicznego do głębokości około 25÷30 km. Obraz ten został zweryfikowany na podstawie wyników głębokiej sejsmiki refrakcyjnej, badań grawimetrycznych i magnetotellurycznych. Otrzymany wynik ujawnił kształt bloku małopolskiego skorupy ziemskiej (rysunek 6, 7) i uwidoczniał duże deformacje tektoniczne. W spągowej części tego bloku można zauważyć ślady licznych procesów kompresyjnych w formie nasunięć oraz uskoki pierwotnie ekstensyjne, które w wyniku reaktywacji tworzą później system uskoków przesuwczych. Uskoki te widoczne są na powierzchni – w rejonie Roztocza, na wysokości Józefowa [7], oraz obserwowane są także w płytkiej strefie miocenu autochtonicznego na przedgórzu Karpat, np. w strefie zrębu Ryszkowej Woli. Następnym istotnym osiągnięciem było zdefiniowanie południowej granicy bloku małopolskiego. Skartowano ją na podstawie pomiarów magnetotellurycznych (rysunek 4) oraz dużej zmiany pola prędkości sumowania (rysunek 6) i wyników badań głębokiej refrakcji.

Kolejnym elementem geologiczno-strukturalnego rozpoznania na obszarze badań było potwierdzenie występowania warstwy o niskiej oporności w centralnej części Karpat, w strefie poniżej granicy pomiędzy jednostką śląską i skolską [10], oraz niskiej wartości anomalii siły ciężkości w redukcji

Bouguera (około -60 mGal) w centralnej depresji karpackiej. Stwierdzona zmiana parametrów skał została rozpoznana na podstawie przebiegu granic sejsmicznych w obszarze badań. Na podstawie uzyskanych informacji można wnioskować o istnieniu nieznanymi utworów osadowych o znacznej miąższości, występujących na głębokości około 14÷16 km, nienależących do podłoża. Występowanie w Karpatach tej miąższej strefy pokrywa się również ze zwiększoną miąższością warstw paleogenu (głównie warstw krośnieńskich) w strefie centralnej depresji karpackiej.

Jednym z ważniejszych wniosków dotyczących budowy geologicznej omawianego obszaru jest rozpoznanie uskoków prostopadłych do przebiegu elementów tektonicznych oraz elementów geometrycznych o typie struktur kwiatowych, a także stwierdzenie istnienia nasunięć pozasekwencyjnych, które są powodem powstawania nietypowego układu granic refleksyjnych na badanym profilu transkarpackim [4].

Ostatnim ważnym wnioskiem wynikającym z głębokich badań sejsmicznych jest brak potwierdzenia istnienia subdukcji pod Karpatami. Zarówno obraz sejsmiczny, uzyskany z badań refleksyjnych, jak i wyniki badań refrakcyjnych stwierdzają występowanie granic sejsmicznych o niewielkim nachyleniu w kierunku na NNE. Przedstawiony układ refleksów potwierdza istnienie wielkiego rowu tektonicznego w strefie centralnej depresji karpackiej.

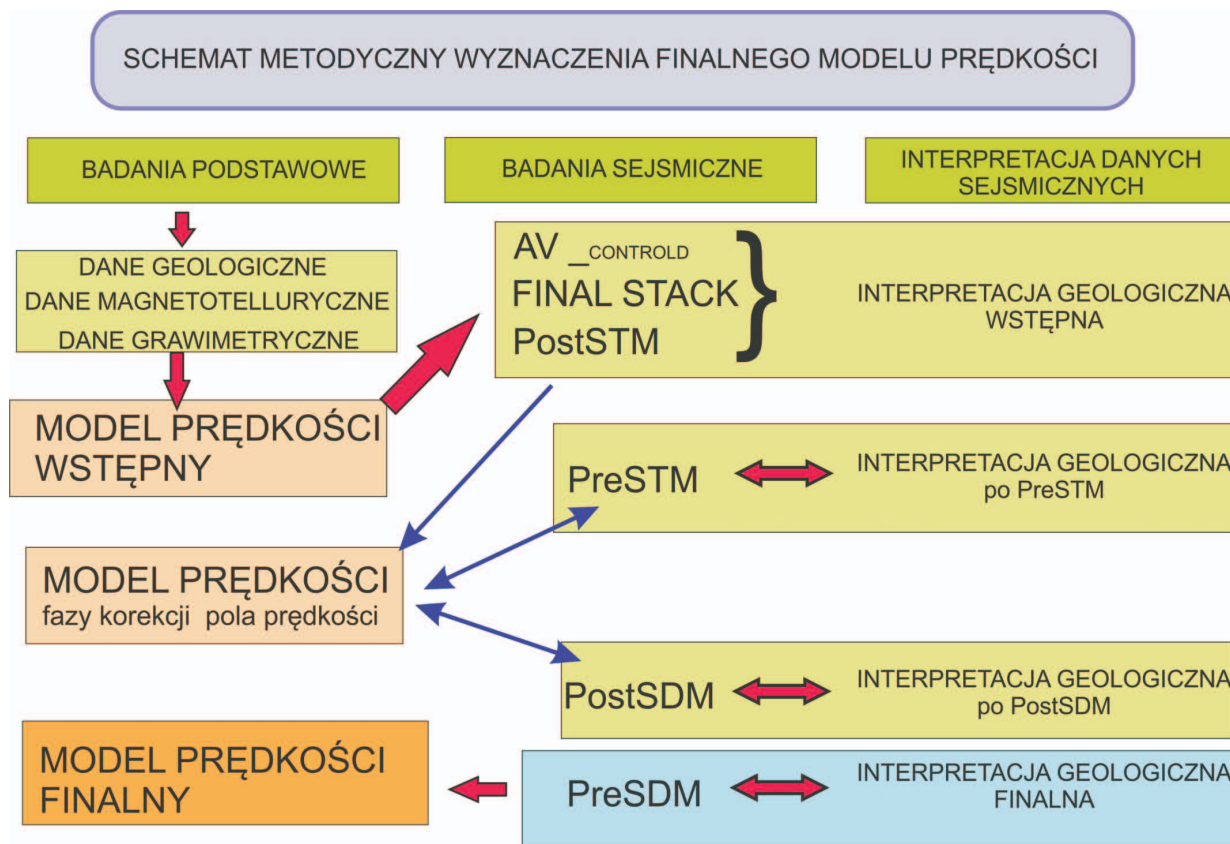
Podsumowanie

Opracowanie profilu transkarpackiego POLCRUST przyniosło spodziewane wyniki w zakresie interpretacji jakościowej i ilościowej kompleksowych danych geofizycznych.

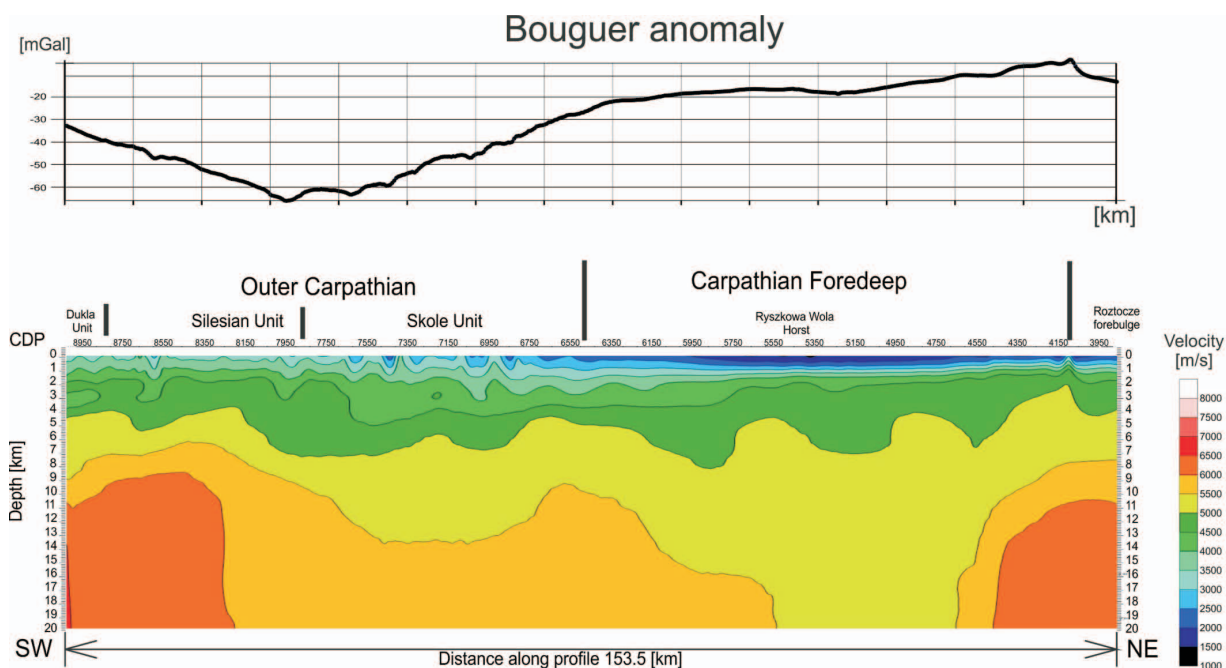
Badania te wnoszą duży wkład do rozpoznania i weryfikacji budowy geologicznej tej części Polski. Bardzo ważnym wnioskiem wynikającym z tych badań jest

potrzeba kontynuowania prac, aby uzyskać więcej informacji geologicznych dotyczących historii geodynamicznej tego

rejonu, które pozwolą na przestrzenną geometryzację procesów geologicznych.

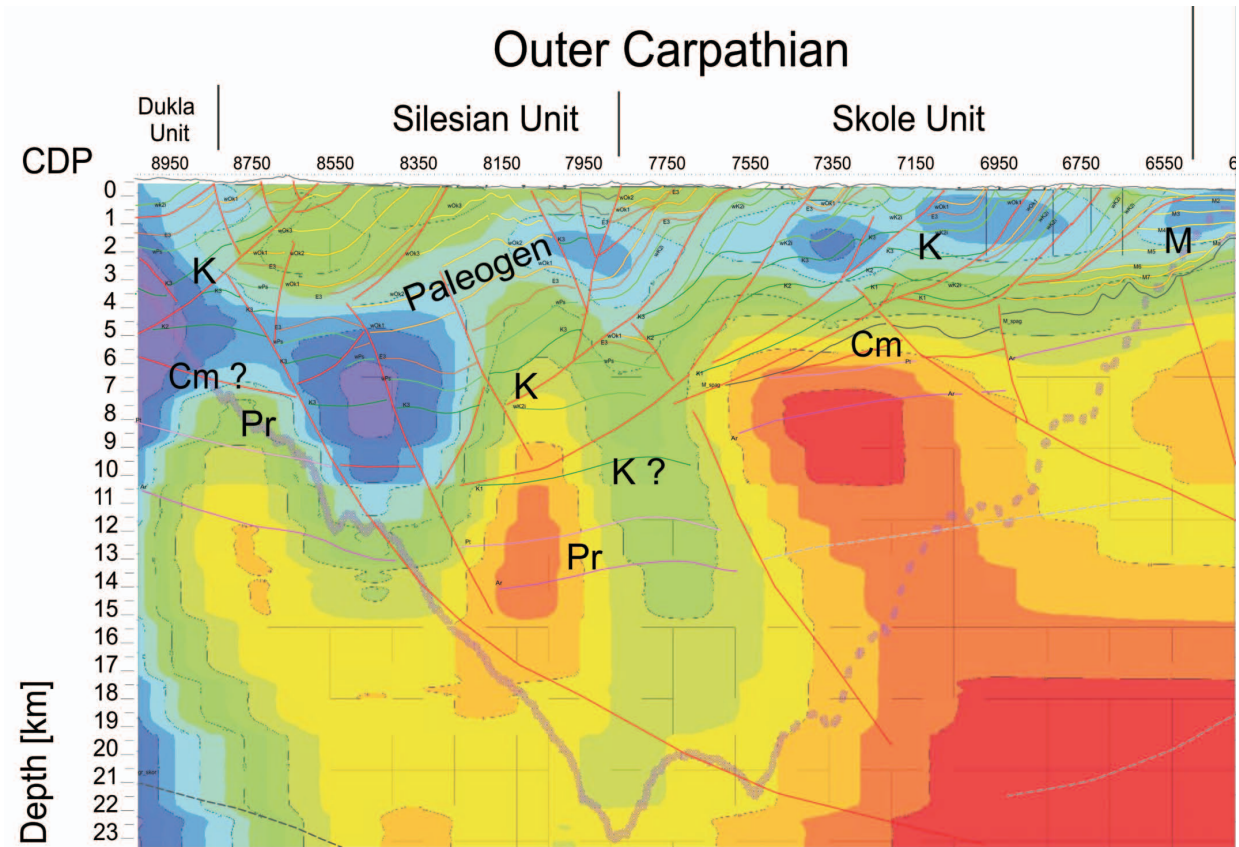


Rys. 2. Schemat przyjętego postępowania do uzyskania końcowego pola prędkości

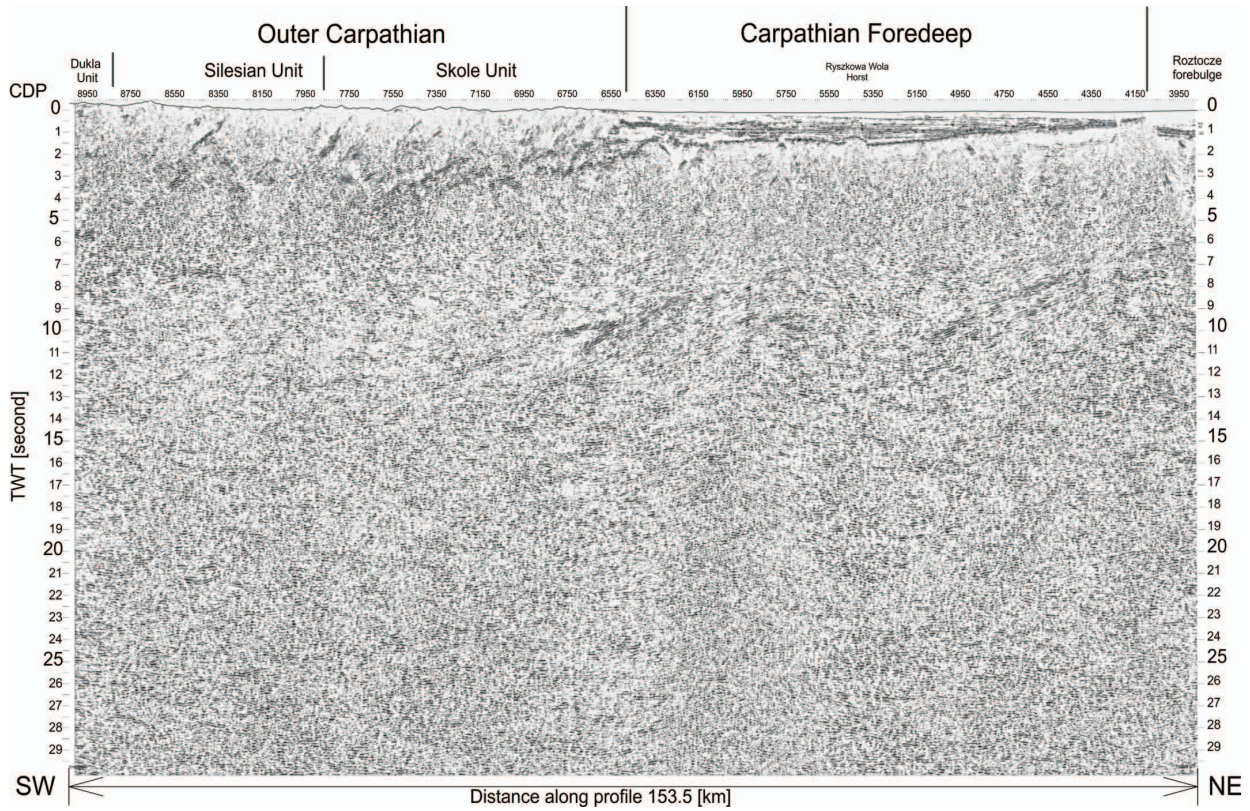


Gravimetric velocity model

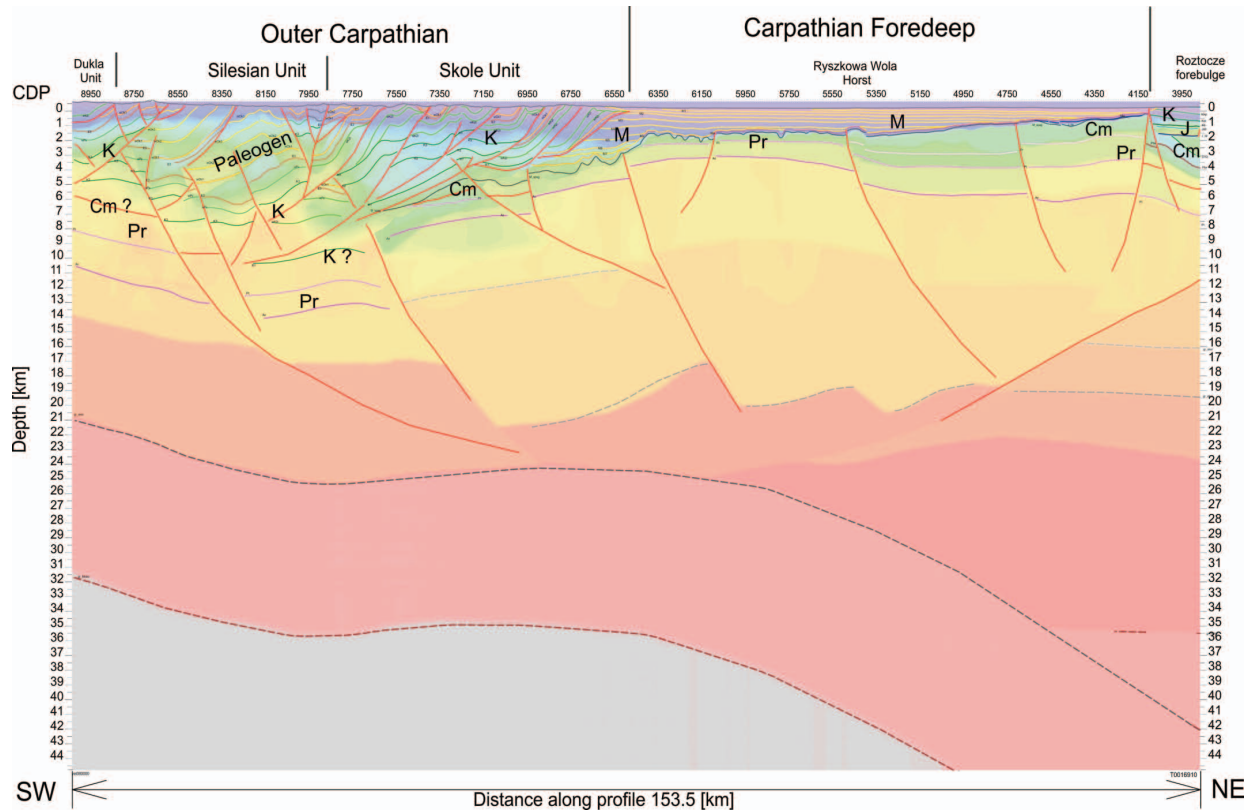
Rys. 3. Wstępny model prędkości interwałowych wyznaczony metodą lokalnej zbieżności na podstawie pomierzonej anomalii siły ciężkości w redukcji Bouguera z parametrami pomierzonymi w otworach i estymacji pola na podstawie sondowań MT



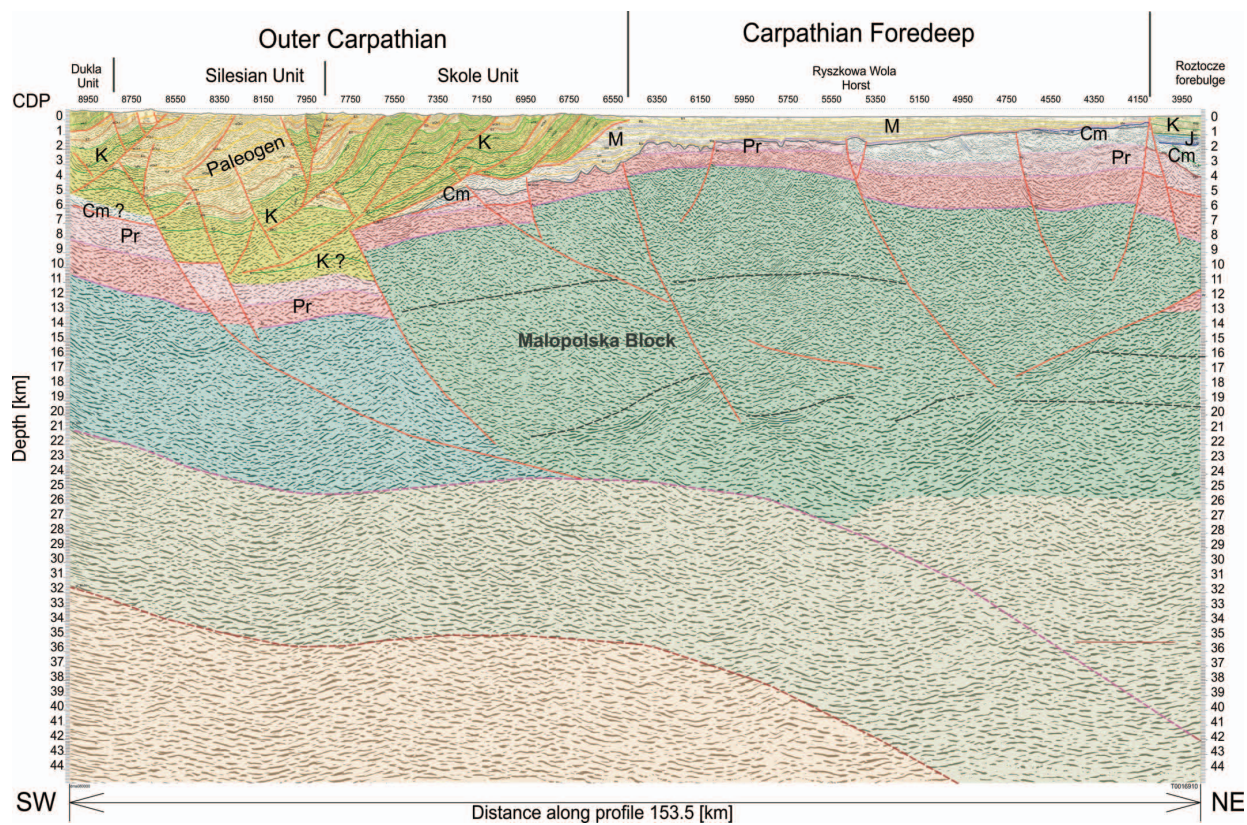
Rys. 4. Rozkład pionowy oporności wyznaczony na podstawie sondowań MT wzdłuż linii profilu



Rys. 5. Część karpacka profilu transkarpackiego – suma końcowa



Rys. 6. Końcowy model prędkości wykorzystany do migracji PreSDM



Rys. 7. Końcowy model geologiczny zinterpretowany na głębokościowej sekcji sejsmicznej przed składaniem (PreSDM)

Prosimy cytować jako: Nafta-Gaz 2015, nr 9, s. 665–672

Artykuł nadesłano do Redakcji 7.07.2015 r. Zatwierdzono do druku 28.07.2015 r.

Literatura

- [1] Grad M., Guterch A., Keller G. R., Janik T., Hegedus E., Vozár J., Slaczka A., Tiira T., Yliniemi J.: *Lithospheric structure beneath trans-Carpathian transect from Precambrian platform to Pannonian basin: CELEBRATION 2000 seismic profile CEL05*. J. Geophys. Res. 2006, vol. 111, B03301.
- [2] Janik T., Grad M., Guterch A., Czuba W., Dadlez R., Gaczynski E.: *Seismic structure of the lithosphere between the East European Craton and the Carpathians from the net of Celebration 2000 profiles in SE Poland*. Geol. Q. 2010, vol. 53, s. 141–158.
- [3] Janik T., Grad M., Guterch A., Dadlez R., Yliniemi J., Tiira T., Keller G. R., Gaczynski E., Celebration Working Group: *Lithospheric structure of the Trans-European Suture Zone along the TTZ-CEL03 seismic transect (from NW to SE Poland)*. Tectonophysics 2005, vol. 411, s. 129–156.
- [4] Jankowski L., Probulski J.: *Rozwoj tektoniczno-basenowy Karpat zewnętrznych na przykładzie budowy geologicznej złoź Grabownica, Strachocina i Łodyna oraz ich otoczenia*. Geologia 2011, t. 37, z. 4, s. 555–583.
- [5] Kukkonen I. T., Lahtinen R. (eds.): *Finnish Reflection Experiment. FIRE 2001–2005*. Special Paper 43, Geological Survey of Finland, 2006.
- [6] Malinowski M., Guterch A., Narkiewicz M., Probulski J., Maksym A., Majdanski M., Sroda P., Czuba W., Gaczynski E., Grad M., Janik T., Jankowski L., Adamczyk A.: *Deep seismic reflection profile in Central Europe reveals complex pattern of Paleozoic and Alpine accretion at the East European Craton margin*. Geophysical Research Letters 2013, vol. 40, s. 3841–3846, DOI:10.1002/grl.50746.
- [7] Narkiewicz M., Maksym A., Malinowski M., Grad M., Guterch A., Petecki Z., Probulski J., Janik T., Majdanski M., Sroda P., Czuba W., Gaczynski E., Jankowski L.: *Transcurrent nature of the Teisseyre-Tornquist Zone in Central Europe: results of the POLCRUST-01 deep reflection seismic profile*. International Journal of Earth Sciences 2015, vol. 104, issue 3, s. 775–796.
- [8] Probulski J.: *Modelowanie pola predkosci w aspekcie migracji czasowej i glebokosciowej w Karpatach na obszarze koncesji „Sobniow–Kombornia–Rogi”*. Sprawozdania z posiedzeń komisji naukowych. PAN Oddz. w Krakowie, t. XLV/1, Wydawnictwo i Drukarnia „Secesja”, 2003. s. 245–249.
- [9] Probulski J., Pawlus E., Pyzik M., Wolanska M., Guterch A., Grad M.: *Projekt badawczy prac sejsmicznych 2D profilu transkarpackiego temat: granica panstwa–Sanok–Jozefow, metoda refleksyjna i refrakcyjna dla rozpoznania układu strukturalnego pokrywy osadowej i krystalicznego kompleksu skorupy ziemskiej. Czesc Karpat i przedgorza Karpat oraz czesc lubelska*. Jasło, czerwiec 2008.
- [10] Stefaniuk M., Ostrowski C., Targosz P., Wojdyla M.: *Some problems of magnetotelluric and gravity structural investigations in the Polish Eastern Carpathians*. Geologia 2009, t. 35, s. 7–46.
- [11] Zubrzycka E.: *Projekt techniczny badan geofizycznych na profilu transkarpackim (czesc karpacka)*. Geofizyka Toruń 2010.



Dr inż. Jaromir PROBULSKI
Specjalista w Dziale Nadzoru Prac Geofizycznych.
PGNiG S.A. Oddział Geologii i Eksploatacji
ul. Kasprzaka 25 a
01-224 Warszawa
E-mail: jaromir.probulski@pgnig.pl

Mgr inż. Andrzej MAKSYM
Dyrektor ds. geologii Oddziału Geologii i Eksploatacji.
PGNiG S.A. Oddział Geologii i Eksploatacji
ul. Kasprzaka 25a
01-224 Warszawa
E-mail: andrzej.maksym@pgnig.pl