

Nowa generacja programów badań głębokich struktur litosfery; eksperymenty sejsmiczne POLONAISE'97 i CELEBRATION 2000 w Europie Środkowej

Aleksander Guterch*, Marek Grad**

Duży sejsmiczny eksperyment POLONAISE'97 został zrealizowany w maju 1997 r. na obszarze Polski w strefie transeuropejskiego szwu i złożonych struktur związanych z basenem polskim. W badaniach wzięły udział zespoły geofizyczne z Polski, Danii, USA, Litwy, Niemiec, Finlandii, Szwecji i Kanady. Badania przeprowadzono na dużą skalę wzdłuż profili sejsmicznych o łącznej długości około 2000 km, z udziałem 613 stacji sejsmicznych, które wykonały rejestrację fal sejsmicznych wzbudzonych w 64 punktach strzałowych. Jednym z ważniejszych rezultatów badań było stwierdzenie wybitnej asymetrii między maksymalną miąższością pokrywy osadowej w rowie polskim (16–20 km) i skorupowym korzeniem (≈50 km) związanym z TESZ/TTZ. Inny wielki eksperyment sejsmiczny nazwany CELEBRATION 2000 był wykonany w Europie Środkowej w czerwcu 2000 r., na obszarze południowej i wschodniej Polski, Słowacji, Węgier, Austrii, Czech, SE Niemiec oraz częściowo na Białorusi i w Rosji. Sejsmiczny eksperyment CELEBRATION 2000 został zlokalizowany na obszarze południowo-wschodniego obrzeżenia Baltiki (wschodnioeuropejski kraton), południowej części TESZ, struktur inwersyjnych TESZ, orogenu karpackiego, basenu panońskiego i masywu czeskiego. Prace zostały sfinansowane przez międzynarodowe konsorcjum 28 instytucji z 13 krajów z Europy i Ameryki Północnej. Z 1200 aparatów sejsmicznych, które zostały użyte do rejestracji, zdecydowaną większość dostarczyły Centrum Aparaturowe IRIS/PASCAL w Waszyngtonie i Uniwersytet Teksasński w El Paso w USA. Pozostałe aparaty sejsmiczne dostarczyły Kanadyjska Służba Geologiczna, uniwersytet w Kopenhadze w Danii, Instytut Badań Ziemi w Gebze w Turcji i inne organizacje z pozostałych krajów. Całkowita długość profili sejsmicznych wynosi około 9000 km. Wzdłuż profili sejsmicznych zlokalizowano 147 punktów strzałowych.

Słowa kluczowe: sejsmiczny eksperyment POLONAISE'97, CELEBRATION 2000, skorupa ziemska, litosfera, struktura skorupowa, transeuropejska strefa szwu

Aleksander Guterch & Marek Grad — **New generation of deep lithospheric studies; POLONAISE'97 and CELEBRATION 2000 seismic experiments in Central Europe.** *Prz. Geol.*, 48: 1085–1095.

Summary. A large seismic experiment, the POLONAISE'97 project, was conducted in Poland during May 1997 and targeted the deep structure of the Trans European Suture Zone (TESZ) and the complex series of upper crustal features associated with the Polish Basin. It included contributions from the geophysical communities in Poland, Denmark, the USA, Lithuania, Germany, Finland, Sweden and Canada. This large lithospheric seismic experiment deployed 613 instruments to record 64 shots along five profiles with a total length of about 2000 km. One of the most important result is a very distinct asymmetry between the maximum thickness of the sedimentary cover in the Polish Trough (16–20 km) and the crustal root (≈50 km) associated with TESZ/TTZ. Another large scale experiment named CELEBRATION 2000 was carried out in Central Europe during June 2000 in the territory of Southern and Eastern Poland, Slovak Republic, Hungary, Austria, the Czech Republic, SE Germany, and partly in Belarus and Russia. The CELEBRATION 2000 seismic experiment is located in the area of the southern portion of the TESZ region, the margin of Baltica (East European Craton), inversion structures along the TESZ, the Carpathian orogenic belt, the Panonian Basin and the Bohemian Massif. Funding for the CELEBRATION 2000 experiment was made by the International Consortium consisted of 28 institutions from 13 countries in Europe and North America. The majority of the recording instruments was provided by IRIS/PASCAL Instrument Center and the University of Texas at El Paso in the USA, the Geological Survey of Canada, the University of Copenhagen in Denmark, the Earth Research Institute in Gebze (Turkey) and others. The total number was 1200 stations and 147 shot points located along seismic lines of a total length of about 9000 km.

Key words: POLONAISE'97, CELEBRATION 2000 seismic experiments, Earth's crust, lithosphere, crustal structure, Trans European Suture Zone

W strukturze tektonicznej Europy obszar Polski stanowi swoiste laboratorium geodynamiczne, gdzie prekambryjski kraton wschodnioeuropejski łączy się ze strukturami najważniejszych fanerozoicznych cykli diastroficznych. Jest to bez wątpienia obszar o kluczowym znaczeniu dla rozwiązania większości zasadniczych problemów budowy i ewolucji geotektonicznej kontynentu europejskiego. Stąd wzmożone zainteresowanie międzynarodowego środowiska naukowego problemami geodynamicznymi obszaru Polski. Pierwsze oficjalne spotkanie robocze w sprawie zorganizowania międzynarodowego programu badań geodynamicznych kontynentu europejskiego, od Atlantyku po Ural, odbyło się w wrześniu 1991 r. w Domu Zjazdów i Konferencji Polskiej Akademii Nauk

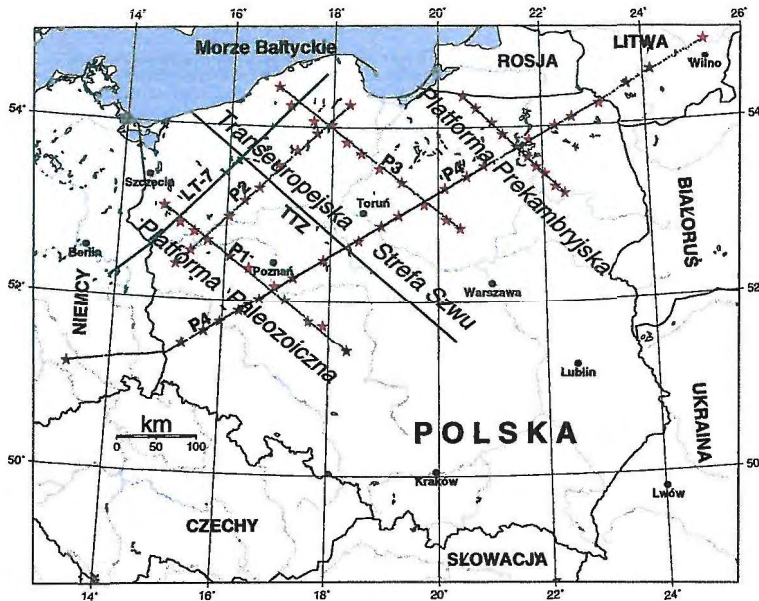
w Jabłonie k. Warszawy. Na tym spotkaniu nakreślone zostały pierwsze plany wspólnych geofizyczno-geologicznych projektów badawczych, których zadaniem byłoby połączenie wielkich geosystemów Europy Zachodniej i Wschodniej, ze szczególnym uwzględnieniem szerokiej strefy kontaktu tych geosystemów na obszarze Europy środkowej i północno-zachodniej. Plany te znalazły się u podstaw ustanowionego przez Europejską Fundację Nauki w Strasburgu w 1992 r. programu badań dzisiaj znanego jako EUROPROBE Project.

Współczesne badania geologiczne i geofizyczne muszą przekroczyć dotychczasową barierę technologiczną i zdecydowanie zwiększyć zasięg dokładnej penetracji głębokich struktur skorupy ziemskiej i litosfery. Przyszły globalny rozwój cywilizacyjny świata będzie oczekiwał od nauk o Ziemi dokładnej wiedzy o strukturze i składzie całej litosfery oraz występujących w niej zasobach naturalnych i energetycznych. Daje temu wyraz inicjatywa podjęta przez Organizację do Współpracy Ekonomicznej i Rozwoju (OECD) wzywająca społeczność międzynarodową, z

*Instytut Geofizyki, Polska Akademia Nauk, ul. Księcia Janusza 64, 01-452 Warszawa

**Instytut Geofizyki, Uniwersytet Warszawski, ul. Pasteura 7, 02-093 Warszawa

Obszar badań



Ryc. 1. Lokalizacja punktów strzałowych i stacji sejsmicznych wzdłuż profili POLONAISE'97 (P1, P2, P3, P4, P5) oraz pozycja profili LT-7 i TTZ. Punkty strzałowe zaznaczono czerwonymi gwiazdkami, stacje sejsmiczne czarnymi kropkami

Fig. 1. Position of shot points and recording stations along POLONAISE'97 profiles (P1, P2, P3, P4, P5) and LT-7, TTZ profiles. Shot points are marked by red stars, recording stations by small black points

zakresu nauk o Ziemi, do konsolidacji i intensyfikacji wspólnych działań zmierzających do dokładnego rozpoznania struktury całej litosfery. Główne przedsięwzięcia naukowe służące temu celowi to głębokie wiercenia i towarzyszące im wielodyscyplinarne nowoczesne badania geofizyczne w otworach oraz nowoczesne głębokie badania sejsmiczne, prowadzone zarówno w układzie dwuwymiarowym, jak i trójwymiarowym. Są to przedsięwzięcia badawcze kosztowne, pod względem technologicznym bardzo złożone i stąd wymagające szerokiej współpracy międzynarodowej. Wyniki badań osiągnięte tymi metodami stanowią podstawę dla wielu specjalizacji z zakresu nauk o Ziemi oraz mają wybitne znaczenie strategiczne, zarówno dla badań podstawowych jak i aplikacyjnych.

Problemom tym w odniesieniu do obszaru Polski został poświęcony dokument Ministerstwa Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z 1996 r. *Polityka resortu MOŚZNiL w dziedzinie głębokich badań geologicznych* oraz towarzyszące mu obszernie opracowanie monograficzne przygotowane i opublikowane przez zespół międzyresortowy (Guterch i in., 1996). Zgodnie z tym dokumentem, powołane w 1996 roku Stowarzyszenie dla Głębokich Badań Geologicznych opracowało na zlecenie Departamentu Geologii MOŚZNiL pakiet kilkunastu projektów głębokich badań geologicznych i geofizycznych. Projekty zostały opracowane przez zespół ok. 150 specjalistów reprezentujących zarówno instytucje naukowe jak i przemysłowe.

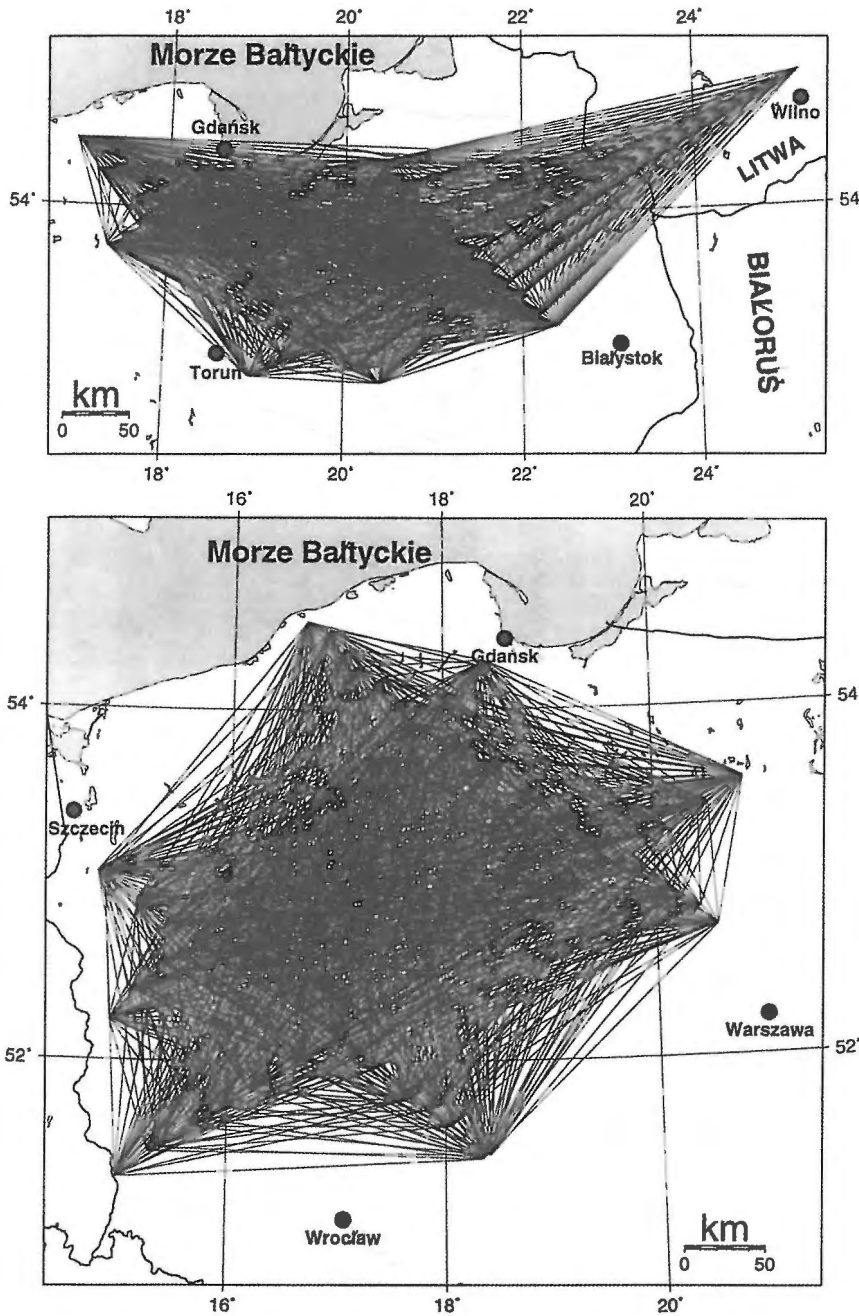
Programy POLONAISE'97 i CELEBRATION 2000 są realizacją planowanych sejsmicznych badań refrakcyjnych i szerokokątowych refleksyjnych ujętych w dokumencie *Polityka resortu MOŚZNiL w dziedzinie głębokich badań geologicznych*.

Strefa kontaktu kratonu wschodnioeuropejskiego z fanerozoiczną strefą mobilną Europy Zachodniej i Środkowej, o rozciągłości ponad 2000 km, przecinająca kontynent europejski od północnego zachodu na południowy wschód — od Wysp Brytyjskich do Morza Czarnego, nosi nazwę szwu transeuropejskiego (*Trans European Suture Zone* — TESZ, Blundell i in., 1992; Gee & Zeyen, 1996; Pharaoh, 1999). Strefa ta być może kontynuuje się dalej w kierunku zachodnim, po drugiej stronie Atlantyku, wchodząc w orogen Appalachów (Keller & Hatcher, 1999). Znana i dyskutowana od kilkudziesięciu lat strefa Teisseyre'a-Tornquista (*Teisseyre-Tornquist Zone* — TTZ) w swoim przebiegu wchodzi w skład tak zdefiniowanego szwu transeuropejskiego. Jednym z najważniejszych problemów geodynamicznych kontynentu europejskiego jest rozpoznanie budowy i właściwości fizycznych litosfery w szeroko rozumianej strefie przejścia od struktur fanerozoicznych Europy Środkowej i Zachodniej do struktur prekambryjskich Europy Wschodniej.

Przejście od struktur fanerozoicznych Europy Środkowej i Zachodniej do struktur prekambryjskich Europy Wschodniej przez strefę TESZ, charakteryzuje się ogromną zmianą właściwości fizycznych skorupy ziemskiej.

Mięszości skorupy na obszarze paleozoicznej Europy Środkowej i Zachodniej wynoszą ok. 30 km, podczas gdy kraton wschodnioeuropejski charakteryzuje się grubą skorupą o miąższościach 45–50 km (np. Guterch i in., 1986). Tomograficzna analiza rozkładu prędkości fal poprzecznych pod kontynentem europejskim (Zielhuis & Nolet, 1994) ujawniła, że transeuropejski szew na obszarze Polski jest bardzo głęboko zakorzeniony w górnym płaszczu Ziemi, oddzielając struktury Europy północno-wschodniej o wysokich prędkościach od struktur Europy południowo-zachodniej o niskich prędkościach fal poprzecznych S. Zmiany te są drastyczne i trudne do interpretacji. Ich konsekwencją jest powstanie w strefie TESZ niezwykle złożonych struktur skorupowych oraz basenu permsko-mezozoicznego i kenozoicznych wyniesień.

Strefa szwu transeuropejskiego na północny zachód od Polski ma charakter rozproszony i nazywana jest „wachlarzem Tornquista” (Berthelsen, 1992), ponieważ od południowego Bałtyku ku NW rozwidła się na kilka gałęzi uskoku, zawartych pomiędzy uskokiem transeuropejskim (północne Niemcy, południowa Jutlandia,) a strefą Sorgenfreia-Tornquista (Skania — północna Jutlandia). W Polsce strefa szwu jest bardziej skoncentrowana, a jej szczególną cechą jest powstanie na jej skorupowych założeniach wyjątkowo głębokiego basenu sedymentacyjnego w permie i mezozoiku z silną inwersją w późnej kredzie i najstarszym trzeciorzędzie. Te cechy decydują o unikatowym charakterze polskiego odcinka TESZ wywołując wzmożone zainteresowanie międzynarodowej społeczności geologów i geofizyków, tym bardziej, że na południowy wschód od dzisiejszych granic basenu polskiego napotykamy na odmienny obraz skorupy na bloku małopolskim, a jeszcze dalej ku Dobrudży i Morzu Czarnemu rozpoznanie jest mocno utrudnione wskutek zanurzenia się strefy pod nasunięcia wschodnich Karpat.



Ryc. 2. Diagram linii łączących punkty strzałowe i stacje sejsmiczne dla profili POLONAISE'97 P1, P2, P3 i P4 (dolna rycina) oraz P3, P4 i P5 (górną rycina), tylko co dziesiąta linia jest pokazana

Fig. 2. Diagram of lines connecting shot points and seismic stations for profiles P1, P2, P3, P4 (lower fig.) and P3, P4, P5 (upper fig.) in the POLONAISE'97 experiment (only every tenth line is shown)

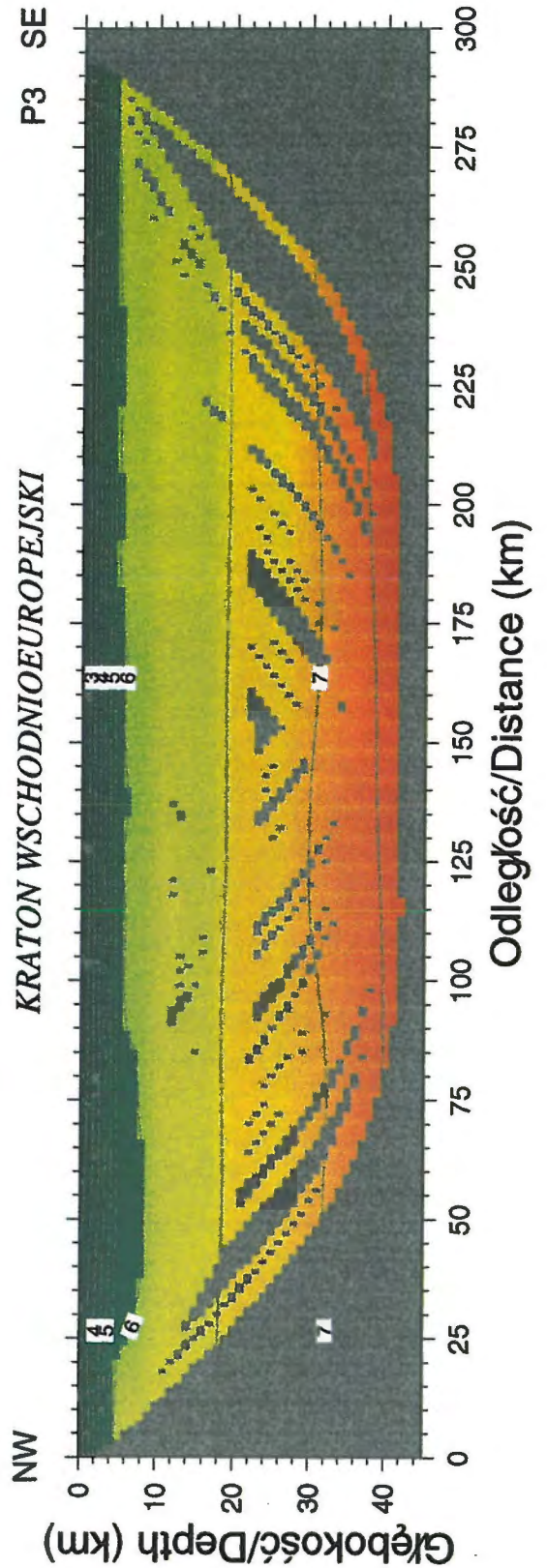
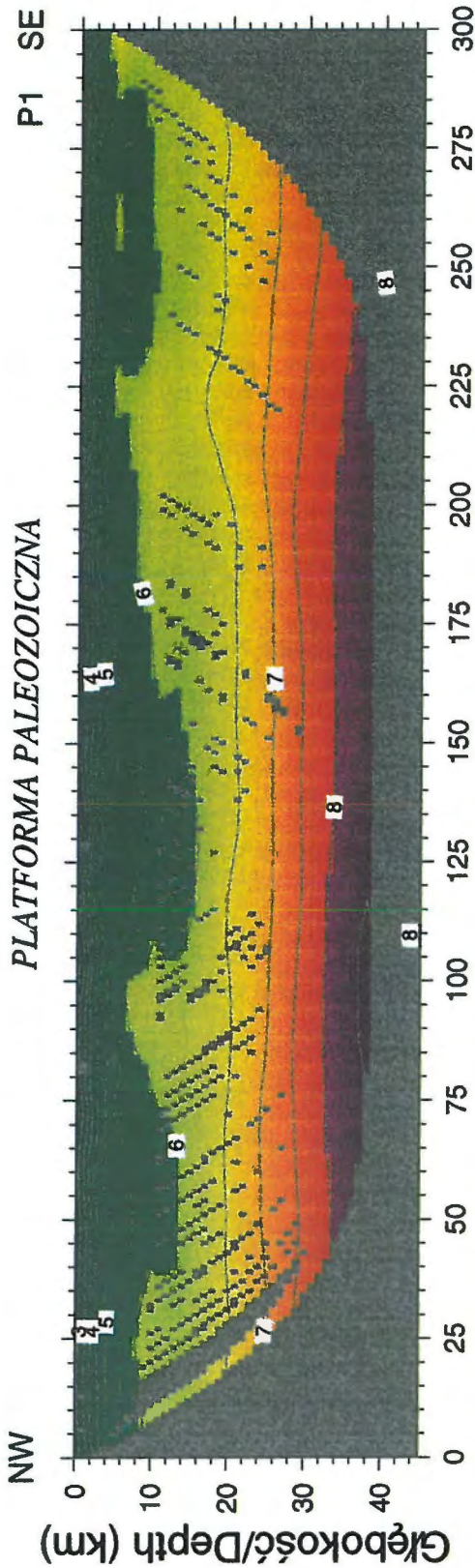
Głębokie sondowania sejsmiczne wykonane na obszarze Polski do 1996 r., których wyniki przedstawiono w wielu publikacjach (np. Guterch i in., 1983; 1984; 1986; 1994; Guterch & Grad, 1996) wskazują na niezmiernie skomplikowaną i złożoną strukturę skorupy ziemskiej. W ogólności, miąższość skorupy ziemskiej na obszarze basenu polskiego w świetle tych wyników zmienia się od 30–35 km na obszarze monokliny przedsudeckiej, do 42–47 km na platformie wschodnioeuropejskiej, i do około 50 km w strefie Teisseyre'a-Tornquista — w strefie maksymalnej subsydencji basenu permsko-mezozoicznego.

Permsko-mezozoiczny basen polski rozpościerający się między granicą państwa na zachodzie, brzezną strefą kratonu wschodnio-europejskiego na północy i północnym wschodzie, wypiętrzonymi Górami Świętokrzyskimi na południowym wschodzie oraz blokiem górnośląskim, Sudetami i ich przedpolem na południu i południowym zachodzie, charakteryzuje się wybitnie anomalnymi właściwościami fizycznymi skorupy ziemskiej. Między innymi, głębokie sondowania sejsmiczne, wykonane na profilu LT-7, wykazały po raz pierwszy, że skały o prędkościach fal sejsmicznych P mniejszych od 6,0 km/s mogą sięgać aż do głębokości około 20 km (Guterch i in., 1994), przy głębokości granicy Moho wynoszącej tylko około 30 km. Powstaje zasadnicze pytanie — jakiego typu skorupa ziemska występuje w basenie polskim? Jaki jest zasięg przestrzenny ośrodka o tak niskich prędkościach fal P? Aby odpowiedzieć przynajmniej na niektóre aspekty tych i wielu innych pytań, w 1997 r. przeprowadzono na obszarze basenu polskiego szczegółowe badania głębokich struktur litosfery metodami sejsmicznymi w ramach międzynarodowego projektu POLONAISE' 97 (*Polish Lithosphere ONsets – An International Seismic Experiment*). W czerwcu 2000 roku zrealizowano kolejny wielki międzynarodowy eksperyment sejsmiczny CELEBRATION 2000 (*Central European Lithospheric Experiment Based on Refraction 2000*) w Polsce południowo-wschodniej z przedłużeniem profili sejsmicznych na obszar krajów sąsiednich. Rycina na okładce pokazuje pozycje głównych profili sejsmicznych w obydwu projektach.

Międzynarodowy eksperyment sejsmiczny POLONAISE' 97

Sejsmiczne badania refrakcyjne i szerokokątowe refleksyjne w projekcie POLONAISE' 97, zrealizowane w maju 1997 r. na obszarze Polski północnej, środkowej i zachodniej, objęły swoim zasięgiem skorupę ziemską i dolną litosferę do głębokości około 120 km. Sejsmiczne prace eksperymentalne zostały wykonane wzdłuż 5 profili o łącznej długości około 2000 km. Lokalizacja profili została przedstawiona na ryc. 1. Rejestracje sejsmiczne wykonano w układzie metodycznym, możliwie najdokładniejszym, z odległościami między punktami rejestracyjnymi 1–3 km. Odległości między punktami strzałowymi zmieniały się w przedziale 15–35 km. Ogółem zlokalizowano na wszy-

POLONAISE '97



Ryc. 3. Tomograficzne modele dwuwymiarowe rozkładu prędkości fal podłużnych P dla profili P1 i P3 POLONAISE'97 otrzymane metodą inwersji hodografów pierwszych impulsów (Guterch i in., 1999). Linie ciągłe oznaczają izolinie jednakowych prędkości fal P w km/s. Izolinia 6 km/s określa w przybliżeniu podłoże krystaliczne skorupy ziemskiej. Izolinia 8 km/s wyznacza w przybliżeniu granicę Moho

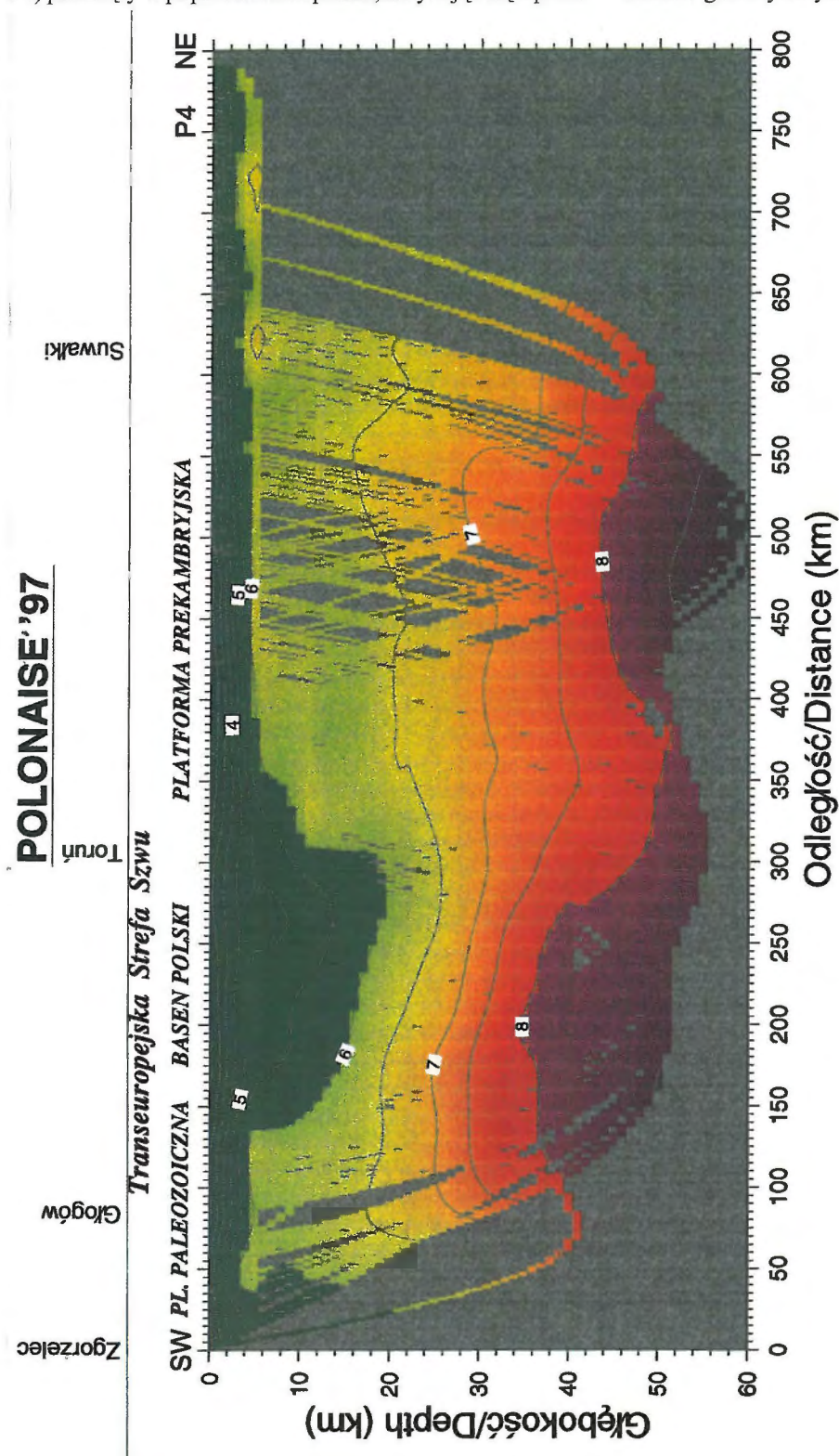
Fig. 3. Two-dimensional P-wave tomographic velocity models along the POLONAISE profiles P1 and P3. The contoured velocity isolines are in km/s. The 6 km/s velocity isoline is interpreted as representing the top of the crystalline basement. The Moho may be represented by the 8.0 km/s velocity isoline

kich profilach 63 punkty strzałowe, w tym 59 na obszarze Polski, 3 na Litwie i 1 w Niemczech.

Głównym zadaniem wykonanych badań było dokładne rozpoznanie wewnętrznej budowy skorupy ziemskiej: układu strukturalnego, identyfikacji głównych nieciągłości skorupowych i rozkładu prędkości fal sejsmicznych wewnątrz skorupy. Dwa profile biegnące równoległe do struktur geologicznych spełniły to zadanie, odpowiednio: dla platformy wschodnio-europejskiej (profil P3) i dla pasma waryscyjskiego (profil P1). Profile poprzeczne (P2 i P4) przecięły w poprzek basen polski, krzyżując się z profi-

lami podłużnymi. Natomiast profil P5 przeciął wyniesienie mazursko-suwalskie.

W pracach rejestracyjnych wzięło udział 613 nowoczesnych aparatów sejsmicznych z 10 organizacji naukowych w Stanach Zjednoczonych, Kanadzie i Europie Zachodniej oraz własnych. Rejestracje przeprowadzono w dwóch rozstawach, ogółem w 792 punktach. Prace te wykonało 30 zespołów dwu- lub trzyosobowych. Ponadto, w pracach rejestracyjnych wzięło udział dodatkowo 5 wielokanałowych sejsmicznych aparatów refleksyjnych z przedsiębiorstw geofizycznych — Geofizyka Kraków i Geofizyka Toruń.



Wybrane wyniki

Sejsmiczne dane refrakcyjne i szerokokątowe refleksyjne otrzymane w eksperymencie POLONAISE'97 są wyjątkowo wysokiej jakości, z reguły z pierwszymi impulsami i późniejszymi fazami łatwo korelującymi się w całych przedziałach rejestracji. Maksymalne odległości z poprawną rejestracją fal sejsmicznych sięgają 500–600 km. W tak dużych odległościach od punktów strzałowych rejestrują się już fale, które penetrują dolną litosferę do głębokości około 100–120 km.

Ze względu na zmienny zasięg basenu polskiego profile sejsmiczne w eksperymencie POLONAISE'97 zostały tak zlokalizowane, aby scharakteryzować basen nie tylko w jego osiowej strefie, lecz by sięgnąć

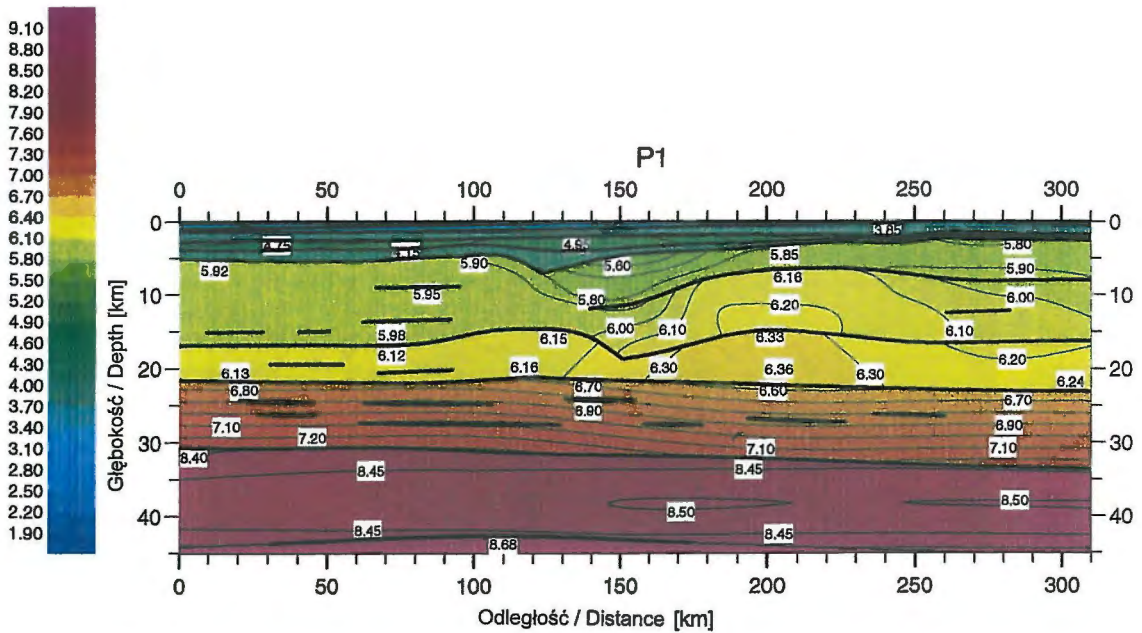


Ryc. 4. Tomograficzny model dwuwymiarowy rozkładu prędkości fal podłużnych P dla profilu P4 POLONAISE'97 otrzymany metodą inwersji hodografów pierwszych impulsów (Guterch i in., 1999). Linie ciągłe oznaczają izolnie jednakowych prędkości fal P w km/s. Izolinia 6 km/s określa w przybliżeniu podłoże krystaliczne skorupy ziemskiej. Izolinia 8 km/s wyznacza w przybliżeniu granicę Moho

Fig. 4. Two-dimensional P-wave tomographic velocity model along the POLONAISE'97 profile P4. The contoured velocity isolines are in km/s. The 6 km/s velocity isoline is interpreted as representing the top of the crystalline basement. The Moho may be represented by the 8.0 km/s velocity isoline

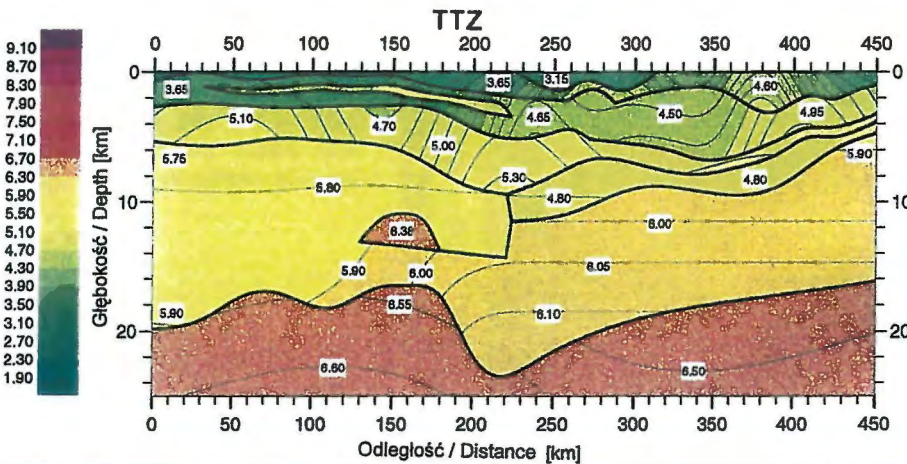
również daleko na północny wschód i południowy zachód, na obrzeżające go bloki skorupowe. Dzięki zgromadzeniu ponad 600 aparatów sejsmicznych można było wykonać jednocześnie rejestracje na poszczególnych profilach w

układzie podłużnym, a także w układzie przestrzennym (ryc. 2). Otrzymany w ten sposób bogaty zbiór rejestracji sejsmicznych, podłużnych i nie podłużnych, uzupełniony danymi z wcześniej zrealizowanych profili LT-2, LT-7, i



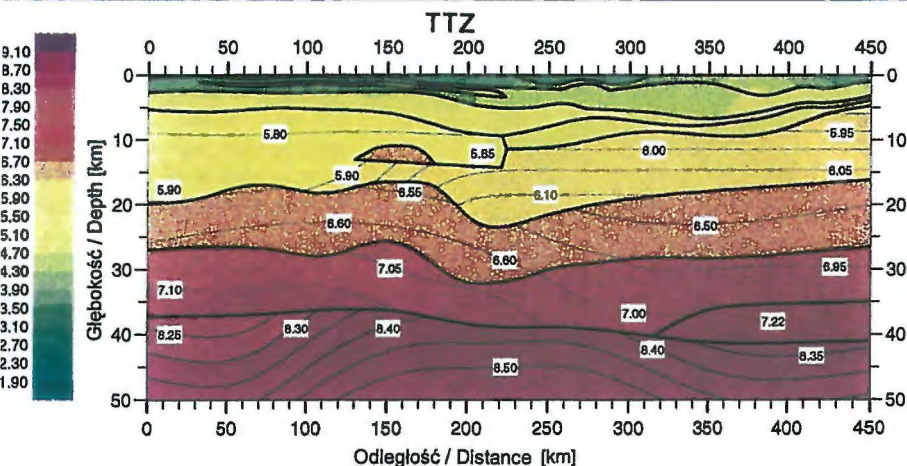
Ryc. 5. Dwuwymiarowy model prędkościowy skorupy ziemskiej dla profilu P1 POLONAISE'97 (Jensen i in., 1999). Prędkości fal sejsmicznych w km/s

Fig. 5. 2-D velocity model of the Earth's crust along the POLONAISE'97 profile P1 (Jensen i in., 1999). Velocity of seismic waves in km/s



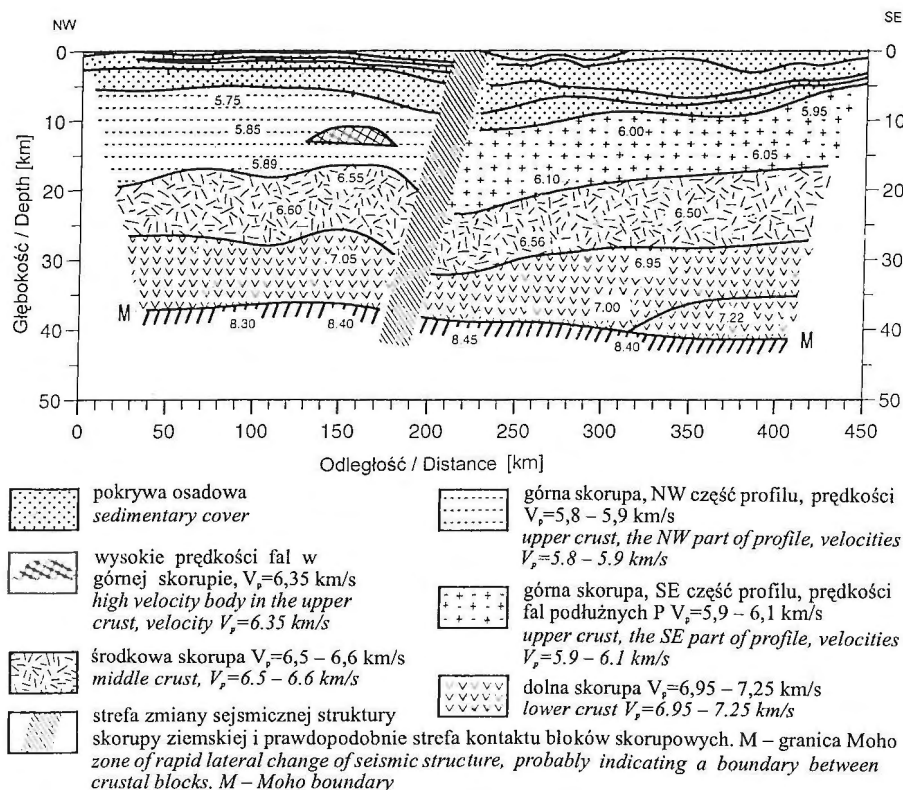
TTZ pozwoli na przeprowadzenie przestrzennej interpretacji głębokiej struktury skorupy ziemskiej basenu polskiego oraz północno-wschodniej części platformy prekambryjskiej.

Tomograficzne modele rozkładu prędkości fal podłużnych P przykładowo dla profili P1 i P3



Ryc. 6. Dwuwymiarowy model prędkościowy górnej skorupy i całej skorupy ziemskiej wzdłuż profilu TTZ. Grube linie oznaczają granice sejsmiczne, cienkie linie określają izolnie prędkości fal podłużnych P w km/s (Grad i in., 1998)

Fig. 6. The 2D velocity model of the upper crust and whole crustal structure along TTZ profile. Thick lines are velocity discontinuities, thin lines are P-wave velocity isolines in km/s (Grad et al., 1998)



Ryc. 7. Schemat struktury skorupy ziemskiej wzdłuż profilu TTZ (Grad i in., 1999)
 Fig. 7. Simplified sketch of the derived crustal structure along TTZ profile (Grad et al., 1999)

oraz P4 (lokalizacja na ryc. 1) otrzymane metodą inwersji hodografów pierwszych impulsów (Hole, 1992) zostały przedstawione na ryc. 3 i 4. Linie ciągłe oznaczają izoliny prędkości w km/s. Dwie izoliny prędkości 6,0 km/s oraz 8,0 km/s można w przybliżeniu interpretować odpowiednio, jako granicę podłoża krystalicznego oraz granicę Moho. Modele te wskazują na wybitnie blokową budowę skorupy ziemskiej, eksponując wyraźne zróżnicowanie jej struktury, i to zarówno pięter górnych, jak i dolnych z granicą Moho łącznie. Jest to wstępny obraz struktury skorupy ziemskiej na profilach POLONAISE'97 (Guterch i in., 1999), ale najbardziej obiektywny, ponieważ jest oparty na modelowaniu wyłącznie tylko pierwszych wstępień fal refrakcyjnych.

Głównym elementem górnego piętra tomograficznego modelu rozkładu prędkości fal P w skorupie na profilu P4 (ryc. 4) jest występowanie w przedziale odległości ~150–300 km głębokiego basenu, w którym skały o prędkościach <6,0 km/s sięgają głębokości do 16–20 km. Widać wyraźną asymetrię basenu: stosunkowo łagodne nachylenie w jego części południowo-zachodniej, oraz ostre ograniczenie od strony północno-wschodniej, które określa jednoznacznie krawędź platformy prekambryjskiej na trzechsetnym kilometrze profilu P4 w rejonie Torunia. Skorupa platformy paleozoicznej (0–150 km profilu) wyraźnie dzieli się na część górną o stosunkowo małym gradientie prędkości (między izoliniami 6 i 7 km/s) oraz wysokogradentową dolną skorupę (między izoliniami 7 i 8 km/s). W części północno-wschodniej, na obszarze platformy prekambryjskiej (~350–800 km profilu) gradienty prędkości w piętrze krystalicznym są wyraźnie mniejsze, osiągając zbliżone wartości w piętrze górnym, środkowym

i dolnym. Głębokość tak zdefiniowanej granicy Moho zmienia się w szerokim przedziale wartości, od ok. 32 km na platformie paleozoicznej, do ok. 42 km na platformie prekambryjskiej, osiągając maksymalną głębokość ok. 50 km w strefie Teisseyre'a-Tornquista (ok. 300 km profilu). Asymetryczny basen, o maksymalnej głębokości ok. 20 km, jest bardzo wyraźnie przesunięty na SW względem depresji granicy Moho sięgającej 50 km głębokości i przesuniętej na NE pod krawędź platformy prekambryjskiej.

Podstawą dla szczegółowej charakterystyki fizycznej skorupy ziemskiej są wyniki modelowania sejsmicznych pól falowych metodą promieniową (Červený & Pšenčík, 1983), która pozwala na wyznaczenie granic sejsmicznych prędkości granicznych i gradientów prędkości fal sejsmicznych. Model skorupy ziemskiej otrzymany tą metodą dla profilu P1 w eksperymencie POLONAISE'97 jest przedstawiony na ryc. 5. Profil P1 jest zlokalizowany w strefie frontu deformacji waryscyjskich (ryc. 1). Skorupa ziemska na tym profilu ma w zasadzie budowę 2-warstwową, o całkowitej miąższości 30–32 km. Górne piętro skorupowe sięgające do głębokości 16–22 km charakteryzuje się anomalnie niskimi prędkościami fal sejsmicznych, nie większymi w ogólności niż 6,0–6,1 km/s. A zatem staropaleozoiczne podłoże skorupy może sięgać w tym rejonie nawet do głębokości 22 km. Dolne piętro, o średniej miąższości tylko około 10 km, charakteryzuje się dużymi prędkościami fal P zawierającymi się w przedziale 6,6–7,3 km/s, a nawet 7,5 km/s. Ponadto, dolne piętro skorupowe na profilu P1 charakteryzuje się bardzo silną „sejsmiczną refleksyjnością” i dużymi gradientami prędkości fal sprężystych P. Prędkość fal sejsmicznych P na granicy Moho, doskonale udokumentowana, jest nieoczekiwanie duża i wynosi około 8,4 km/s (Jensen i in., 1999).

Opierając się na wymienionych właściwościach fizycznych skorupy ziemskiej na profilu P1 zostały wydzielone strefy transparentne i laminacyjne w skorupie tej części basenu polskiego. Problemem podstawowym jest ściśle określenie typu skorupy ziemskiej na obszarze platformy paleozoicznej zachodniej Polski oraz zrozumienie natury staropaleozoicznego podłoża sięgającego maksymalnej głębokości około 20 km.

Kolejnym 2-wymiarowym sejsmicznym modelem skorupy ziemskiej otrzymanym metodą promieniową, który charakteryzuje strukturę skorupy basenu polskiego, jest model z profilu TTZ przedstawiony na ryc. 6 oraz jego schematyczna interpretacja na ryc. 7. Profil TTZ biegnie od Trzebiatowa nad Bałtykiem do Tomaszowa Mazowiec-

kiego w przybliżeniu wzdłuż osi maksymalnej subsydencji rowu polskiego (ryc. 1), równoległe do krawędzi platformy prekambryjskiej. Niskie prędkości fal sejsmicznych P ($v_p \leq 6,0$ km/s) także i na tym profilu sięgają maksymalnej głębokości około 20 km. Prędkości fal sejsmicznych na granicy Moho są również duże i wynoszą 8,3–8,4 km/s. Głębokość granicy Moho, wyznaczająca całkowitą grubość skorupy ziemskiej, zmienia się wzdłuż profilu TTZ od 35 km na NW do około 43 km na południowo-wschodnim końcu profilu (Grad i in., 1999). Miąższość skorupy ziemskiej na profilu TTZ nie osiąga maksymalnej grubości skorupy charakterystycznej dla rowu polskiego, ponieważ profil biegnie po skłonie granicy Moho zanurzającej się pod platformą prekambryjską. Ta sytuacja geometryczna granicy Moho w rowie polskim została bardzo dobrze udokumentowana na wyżej omówionym tomograficznym modelu skorupy na profilu P4 w eksperymencie POLONAISE'97 (ryc. 4).

Istotnym elementem przekroju skorupy ziemskiej na profilu TTZ (ryc.7) jest strefa kontaktu bloków skorupowych występująca na dwóchsetnym kilometrze w rejonie Torunia, potwierdzona także znaną w tym rejonie anomalią grawimetryczną Bouguera.

Kolejnym profilem sejsmicznym charakteryzującym basen polski, ale zlokalizowanym już na prekambryjskim podłożu skorupowym, jest profil P3 z eksperymentu POLONAISE'97. Profil P3 zlokalizowany na platformie prekambryjskiej północno-zachodniej Polski (ryc. 1) biegnie w przybliżeniu równoległe do brzegu platformy w odległości około 50 km na NE od jej krawędzi. Sejsmiczny model skorupy ziemskiej dla profilu P3 jest przedstawiony na ryc. 8 (Środa i in., 1999). Właściwości fizyczne skorupy ziemskiej na profilu P3 różnią się zasadniczo od poprzednio dyskutowanych modeli z profili P1 i TTZ. Granica podłoża krystalicznego o typowej prędkości około 6,1 km/s występuje na głębokości 4–5 km. Głębokość nieciągłości Moho, charakteryzującej się typową prędkością fal sejsmicznych 8,0–8,1 km/s, zmienia się od 38 km na północno-zachodnim krańcu profilu do około 45 km na południowo-wschodnim odcinku profilu P3. Krystaliczny kompleks skorupy ziemskiej na profilu P3 ma wyraźnie trójpiętrową budowę. Kolejne piętra charakteryzują się prędkościami fal sejsmicznych odpowiednio: 6,1–6,3 km/s, 6,5–6,7 km/s i 7,0–7,2 km/s. Tak więc, właściwości fizyczne głębokiego podłoża skorupowego tej części basenu polskiego różnią się zasadniczo od analogicznych własności określonych dla obszaru przedsudeckiego.

Nowe sejsmiczne modele skorupy ziemskiej przedstawione w niniejszym artykule określają i definiują w sposób ścisły drastyczne zmiany właściwości fizycznych skorupy na obszarze od struktur waryscyjskich zachodniej Polski do struktur prekambryjskich Polski północno-wschodniej przez strefę TESZ. Głębokość granicy Moho na obszarze platformy paleozoicznej w zachodniej Polsce wynosi 30–33 km wzrastając do 35–50 km w strefie rowu polskiego i 40–50 km na platformie prekambryjskiej w Polsce północno-wschodniej. Prędkości fal sejsmicznych w basenie polskim pozostają bardzo niskie ($< 6,0$ – $6,1$ km/s) aż do maksymalnych głębokości 20–22 km. Zatem pokrywa osadowa w basenie polskim może osiągać miąższości nawet około 20 km. W podłożu tak zdefiniowanego wielkiego basenu sedymentacyjnego na obszarze Pol-

ski występują prawdopodobnie silnie zmetamorfizowane skały osadowe albo skały pochodzenia wulkanicznego. Pokrywa osadowa w basenie polskim spoczywa bezpośrednio na dolnym piętrze skorupy ziemskiej o miąższości zaledwie 10–15 km. Dolna skorupa na obszarze basenu polskiego charakteryzuje się bardzo wysokimi prędkościami fal sejsmicznych (6,6–7,5 km/s), wysokimi pionowymi gradientami prędkości oraz bardzo silną sejsmiczną „refleksyjnością”, która świadczy o subhoryzontalnej laminacji tego piętra skorupowego. Przyjmuje się, że sejsmiczna „refleksyjność” dolnego piętra skorupy ziemskiej pozostaje w ścisłym związku z jej tektoniczną i geologiczną historią. Prawdopodobnie pokaledońska i powaryscyjska przebudowa skorupy, związana z ekstensją całej litosfery, spowodowała wyeliminowanie formalnych skorupowych korzeni górskich i wykreowała dolne piętro skorupowe w postaci warstwy laminacyjnej (Blundell i in., 1992). W tej sytuacji strefa przejścia od dolnej skorupy do górnego płaszcza Ziemi, czyli nieciągłości Moho, jest jedną z najbardziej krytycznych stref w litosferze i najtrudniejszą do interpretacji. Ten region odpowiada prawdopodobnie, w znacznym stopniu, za styl procesów tektonicznych wyrażających się na powierzchni orogunami, basenami sedymentacyjnymi, ryftami, jak również procesami formującymi zasoby mineralne.

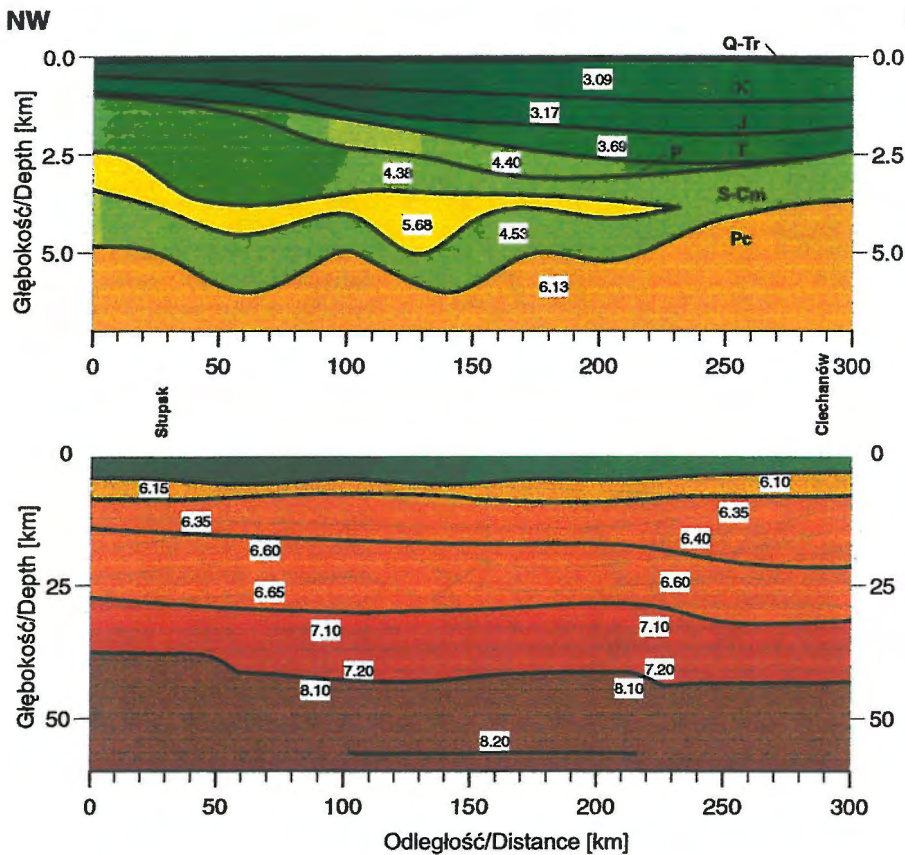
Obserwuje się bardzo wyraźną asymetrię między maksymalną miąższością pokrywy osadowej i skorupowym korzeniem (granica Moho) w strefie rowu polskiego. Silna asymetria basenu polskiego sprawia wrażenie, że jest to „pół rów” według definicji Berthelsena (1998), który być może został uformowany podczas karbońsko-permskiej ekstensji tego obszaru. Prędkości fal sejsmicznych na obszarze platformy paleozoicznej w Polsce zachodniej i środkowej wzdłuż profili równoległych do krawędzi kratonu wschodnio-europejskiego są wyjątkowo duże (około 8,4 km/s), podczas gdy na profilach prostopadłych do tej krawędzi są normalne i wynoszą około 8,2 km/s (np. profil LT-7, Guterch i in., 1994). Być może jest to związane z anizotropią górnego płaszcza Ziemi.

Dalszym istotnym postępowaniem w głębokim rozpoznaniu struktury i ewolucji litosfery w strefie TESZ będzie przygotowywana już przestrzenna (3-wymiarowa) interpretacja wszystkich danych sejsmicznych z eksperymentu POLONAISE'97 i z poprzednio wykonanych profili sejsmicznych na obszarze basenu polskiego.

Międzynarodowy eksperyment sejsmiczny CELEBRATION 2000

Pomyślna realizacja i osiągnięte wyniki w projekcie POLONAISE'97 skłoniły wiele zespołów naukowych z Europy, Stanów Zjednoczonych i Kanady do udziału w następnym przedsięwzięciu badawczym tego typu, zaproponowanym przez stronę polską na obszarze Europy Środkowej. Wielka operacja sejsmiczna, znana jako CELEBRATION 2000 została przeprowadzona w dniach od 1 czerwca do 3 lipca 2000 r. na obszarze południowej i wschodniej Polski, Słowacji, Węgier, Austrii, Czech i południowo-wschodnich Niemiec oraz częściowo także na Białorusi i w Rosji.

Schematyczny szkic geologiczny obszaru badań CELEBRATION 2000 został przedstawiony na ryc. 9. Szczegółowymi schematami sejsmicznych prac pomiarowych objęte zostały wszystkie najważniejsze jednostki tektoniczne i znane struktury geologiczne Europy Centralnej,



SE najnowszej generacji typu Texans firmy RefTek w USA. Na całym obszarze Europy Środkowej objętym badaniami przygotowano 147 punktów strzałowych. Rekordowa ilość zgromadzonych aparatów sejsmicznych oraz wyjątkowo duża ilość punktów wzbudzania fal sejsmicznych spowodowały, że jest to największy eksperyment sejsmiczny tego typu na świecie, zrealizowany z wyjątkową dokładnością. Schemat sejsmicznych prac eksperymentalnych w projekcie CELEBRATION 2000 został przedstawiony na ryc. 10. Wszystkie planowane sejsmiczne prace pomiarowe zostały w pełni wykonane. Cel główny przedsięwzięcia badawczego został osiągnięty. Całkowita długość profilu sejsmicznych wynosi około 9000 km. Dzięki zastosowaniu oryginalnej metodyki badań, z udziałem rekordowej ilości aparatów sejsmicznych, będzie możliwa konstrukcja przestrzennego obrazu litosfery dla większości badanych struktur geologicznych południowej i południowo-wschodniej Polski, w nawiązaniu do wiodących struktur kontynentu europejskiego. Pełne wyniki badań, po ich opracowaniu i interpretacji, będą miały uniwersalne znaczenie zarówno dla badań podstawowych, jak i aplikacyjnych.

Ryc. 8. Dwuwymiarowy model prędkościowy górnej skorupy i całej skorupy ziemskiej na profilu P3 POLONAISE'97 (Środa et al., 1999). Górna rycina: przekrój pokrywy osadowej, także z innych studiów: Q-Tr — czwartorzęd, trzeciorzęd; K — kreda; J — Jura; T — trias; P — perm; S-Cm — sylur-kambr; Pc — prekambry

Fig. 8. The velocity model for profile P3 POLONAISE'97 (Środa et al., 1999). Top: cross section of the sedimentary cover derived from others studies: Q-Tr — Quaternary and Tertiary; K — Cretaceous; J — Jurassic; T — Triassic; P — Permian; S-Cm — Silurian to Cambrian, Pc — Precambrian

od kratonu wschodnioeuropejskiego, ze szczególnym uwzględnieniem jego południowo-zachodniego obrzeżenia, przez górotwór świętokrzyski, blok małopolski, strefę dyslokacyjną Grójca, strefę Kraków-Lubliniec, polsko-słowackie Karpaty, basen pannoński, strefę przedalpejską w Austrii i masyw czeski. Jest to obszar o niezwykle złożonej historii geologicznej i największych kontrastach w budowie litosfery kontynentu europejskiego, będący swego rodzaju węzłem geotektonicznym Europy. Miąższość skorupy ziemskiej na badanym obszarze zmienia się od około 25 km w basenie pannońskim do około 55 km w strefie TTZ w południowo-wschodniej Polsce.

W pracach eksperymentalnych CELEBRATION 2000 wzięło udział 28 instytucji z Polski, Austrii, Białorusi, Czech, Danii, Finlandii, Kanady, Niemiec, Rosji, Słowacji, Turcji, Węgier i USA. Do przeprowadzenia prac rejestracyjnych zdołano zgromadzić 1200 nowoczesnych automatycznych stacji sejsmicznych, w tym 800 aparatów

Eksperyment sejsmiczny CELEBRATION 2000 został zrealizowany z inicjatywy Stowarzyszenia dla Głębokich



Ryc. 9. Szkic geologiczny obszaru badań w eksperymencie sejsmicznym CELEBRATION 2000. MHL — środkowowęgierski lineament

Fig. 9. Geological sketch of the CELEBRATION 2000 area under study. MHL — Mid-Hungarian Line

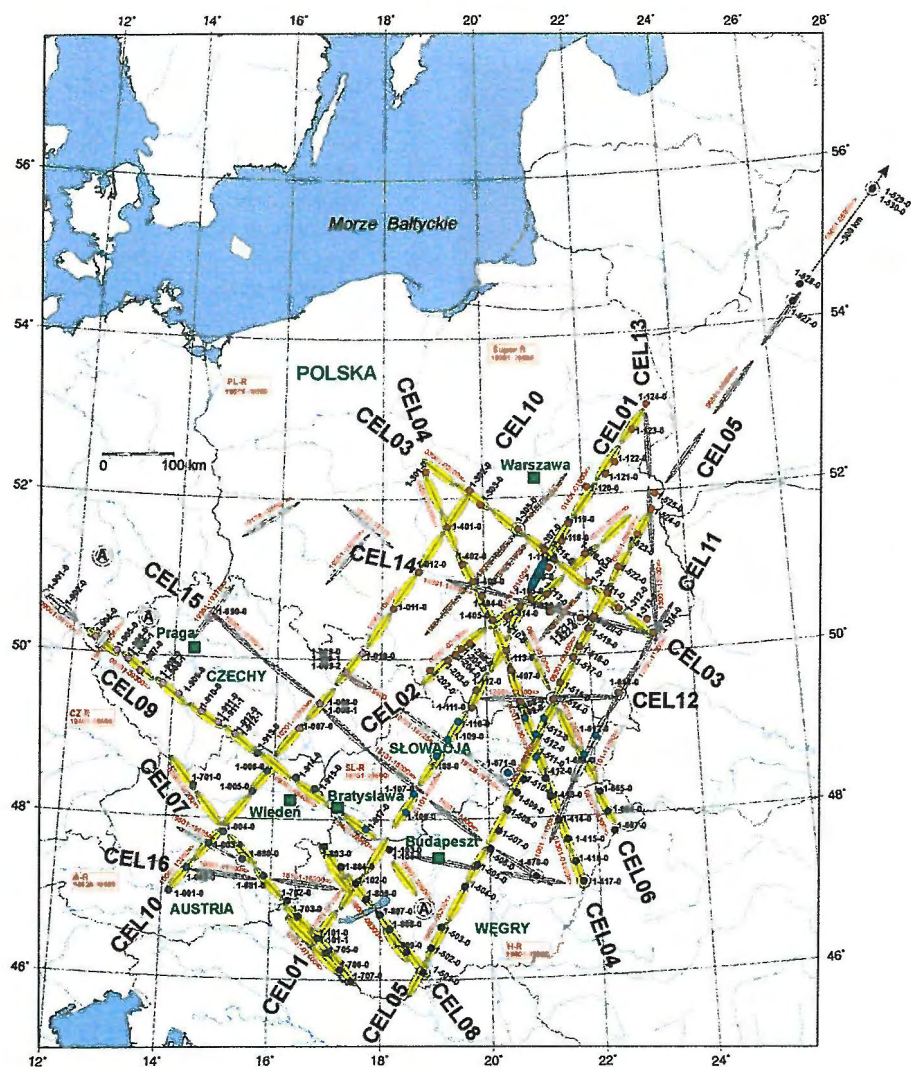


Podsumowanie

Sejsmiczne badania głębokiej struktury skorupy ziemskiej i dolnej litosfery wykonane w ramach projektów POLONAISE'97 i CELEBRATION 2000 objęły swoim zasięgiem około 70% obszaru Polski. Obydwa projekty zalicza się do największych przedsięwzięć badawczych tego typu, jakie kiedykolwiek zostały przeprowadzone na świecie. Także pod względem metodycznym są to przedsięwzięcia nowatorskie.

Wykonane badania są uznanym przykładem niezwykle efektywnej współpracy międzynarodowej, dzięki której udało się połączyć elementy unikalnej metodyki prac, wzbogaconej przez użycie rekordowej ilości wyłącznie nowoczesnych aparatów sejsmicznych i ograniczenie do minimum czasu realizacji zadań. Dzięki połączeniu tych elementów koszty planowanych prac zostały zmniejszone wielokrotnie. W eksperymencie CELEBRATION 2000, zrealizowanym przy użyciu 1200 aparatów sejsmicznych, wzięło udział 28 instytucji z Europy i Ameryki Północnej. Kluczowe znaczenie miał udział ekipy ze Stanów Zjednoczonych reprezentującej Uniwersytet Teksański i organizację IRIS (*Incorporated Research Institutions for Seismology*) w Waszyngtonie. Strona amerykańska udostępniła całą produkcję najnowszych aparatów sejsmicznych typu Texans firmy RefTek, które w znacznej części były użyte po raz pierwszy w eksperymencie CELEBRATION 2000. Otrzymane dane sejsmiczne w obydwu projektach spełniają najwyższe standardy techniczne i dokumentacyjne. Dane te nawet po wielu latach, wraz z pojawieniem się nowych możliwości interpretacyjnych i komputerowych, będą w pełni aktualne.

Cel główny zrealizowanych programów badań został osiągnięty. Złożony proces modelowania głębokich struktur skorupy ziemskiej i dolnej litosfery jest realizowany wyłącznie przy użyciu nowoczesnych procedur interpretacyjnych. Już otrzymane i spodziewane wyniki mają kluczowe znaczenie dla zbadania budowy i ewolucji skorupy ziemskiej od północno-zachodniej Polski po Karpaty włącznie. Przedstawiony system nowoczesnych profili sejsmicznych POLONAISE'97 i CELEBRATION 2000, uzupełniony w następnych latach dodatkowymi profilami obejmującymi Przedśudecie i Sudety oraz obszary przyległe w Czechach i w Niemczech, stworzy głębokie ramy tektonofizyczne dla 3-wymiarowej interpretacji geofizycznej i geologicznej litosfery całego obszaru Polski. Tego typu programy są już planowane bądź realizowane, w wię-



Ryc. 10. Lokalizacja punktów strzałowych (kółka) oraz stacji rejestracyjnych (punkty) wzdłuż profili CELEBRATION 2000

Fig. 10. Position of shot points (circles) and recording stations (points) along CELEBRATION 2000 profiles

Badań Geologicznych. Koordynatorami całego projektu byli autorzy niniejszej pracy. Centrum koordynacyjne i dyspozycyjne dla całego eksperymentu mieściło się w bazie technicznej przedsiębiorstwa GEOFIZYKA Kraków w Krakowie- Płaszowie. Wykonawcami programu badań były w Polsce Stowarzyszenie dla Głębokich Badań Geologicznych oraz Instytut Geofizyki Polskiej Akademii Nauk i Uniwersytetu Warszawskiego. Głównymi wykonawcami sejsmicznych prac polowych były przedsiębiorstwa geofizyczne GEOFIZYKA Kraków i GEOFIZYKA Toruń. W całej operacji sejsmicznej CELEBRATION 2000 wzięło udział około 1000 geofizyków inżynierów i techników. Kluczowym problemem w sprawnym przeprowadzeniu tego typu operacji na obszarze około 0,5 miliona km² jest łączność. Bez telefonii komórkowej i łączności internetowej byłoby to zadanie trudne, wręcz niemożliwe do poprawnej realizacji. Według zgodnej opinii amerykańskich i europejskich środowisk naukowych, bardzo złożone pod względem organizacyjnym i logistycznym przedsięwzięcie badawcze, realizowane na obszarze ośmiu krajów, koordynowane i kierowane przez polskie instytucje, przebiegło niezwykle sprawnie. Przygotowania do realizacji projektu CELEBRATION 2000 trwały 2,5 roku.

kszym lub mniejszym zakresie, w niektórych krajach świata. Przykładem może być francuski program *The scientific programme for 3D geological and geophysical imaging of France's subsurface — 3D FRANCE*. W Stanach Zjednoczonych jest dyskutowany nowy program badań tektonosfery *USArray* (Levander i in., 1999). Program ten zmierza do realizacji opracowania w ciągu 10 lat 3-wymiarowo geofizyczno-geologicznego obrazu tektonosfery całego obszaru Stanów Zjednoczonych. Jest to w USA jeden z priorytetowych projektów, którego zadaniem jest zbudowanie podstaw dla dalszego rozwoju cywilizacyjnego w wielu aspektach — od dokumentacji zasobów mineralnych i ich genezy do określenia hazardu sejsmicznego i ewolucji Ziemi. Znaczenie i koszty tego programu, aktualnie jeszcze dyskutowanego, są porównywalne do przedsięwzięcia jakim w badaniach kosmicznych jest teleskop Hubble'a.

Nadrzędnym celem tego typu programów badawczych jest lepsze zrozumienie podstaw fizycznych kinematycznej ewolucji litosfery i możliwe jednoznaczne określenie właściwości fizycznych głębokich struktur w strefach kolizji bloków litosferycznych i wewnątrzkontynentalnej subdukcji. Dalszym celem jest interpretacja różnic w stylu tektonicznym obszaru badań, jako wyrazu litosferycznych kontrastów strukturalnych, a w konsekwencji przyspieszenie procesu formowania nowej litosferycznej tektoniki kontynentów. Istotnym zadaniem jest również wyjaśnienie związku wielkich basenów sedymentacyjnych rozwiniętych nad strefami osłabień litosfery (np. TESZ) ze strukturami o potencjalnym znaczeniu dla akumulacji węglowodorów.

Projekt badawczy POLONAISE'97 był finansowany wspólnie przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej na zlecenie Departamentu Geologii Ministerstwa Środowiska oraz przez Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo. Prace sejsmiczne na obszarze Litwy były finansowane przez Litewską Służbę Geologiczną, a na obszarze Niemiec przez Geoforschungszentrum w Poczdamie. Duńska Rada Badań Naukowych finansowała udział w projekcie POLONAISE'97 zespołu Uniwersytetu w Kopenhadze. Projekt CELEBRATION 2000 jest finansowany przez Komitet Badań Naukowych w ramach prac badawczo-rozwojowych objętych projektem celowym zamawianym 06/21/99 przy dofinansowaniu i na wniosek Ministerstwa Środowiska. Część prac w projekcie CELEBRATION była finansowana także przez Polskie Górnictwo Naftowe i Gazownictwo. Istotny wkład do wykonania obydwu projektów wniósł Instytut Geofizyki PAN, bez którego udziału realizacja badań byłaby niemożliwa. Również Instytut Geofizyki UW uczestniczył w przedstawionych programach badawczych w ramach własnych środków finansowych.

Wszystkie zagraniczne zespoły naukowe, które uczestniczyły w badaniach na obszarze Polski były dotowane z własnych źródeł finansowych. W szczególności, znaczący wkład do realizacji obydwu programów badań wniosła Narodowa Fundacja Naukowa w Waszyngtonie w USA, w ramach porozumienia i współpracy z Polską Akademią Nauk.

Wszystkim wymienionym instytucjom i osobom, które przyczyniły się do realizacji obydwu projektów, POLONAISE'97 i CELEBRATION 2000, należą się słowa szczególnego podziękowania. Na szczególne podkreślenie zasługuje również wspaniała atmosfera współpracy wszystkich ekip działających na ogromnym obszarze badań obejmującym Polskę, Słowację, Węgry, Austrię, Czechy, Niemcy, Białoruś i Rosję. Powodzenie w reali-

zacji tego typu projektów badawczych wymagało absolutnej dyscypliny czasowej i precyzyjnego wykonywania ustalonych procedur. Tym rygorom podporządkowały się wszystkie zespoły badawcze pracujące na obszarze około 0,5 miliona km². Wreszcie słowa uznania należy wyrazić przedsiębiorstwom GEOFIZYKA Kraków i GEOFIZYKA Toruń za wysoce profesjonalne i znakomite wykonanie bardzo trudnych sejsmicznych prac polowych.

Literatura

- BERTHELSEN A. 1992 — From Precambrian to Variscan Europe. [In:] Blundell, D., Freeman, R., Mueller, S. (eds.), *A Continent Revealed: The European Geotraverse*. Cambridge University Press, Cambridge: 153–164.
- BERTHELSEN A. 1998 — The Tornquist Zone northwest of the Carpathians: an intraplate pseudosuture. *Geol. Foren. Förh.*, 120: 223–230.
- BLUNDELL D. J., MUELLER S. & FREEMAN R. (eds.) 1992 — *A Continent Revealed: The European Geotraverse Project*. Cambridge University Press.
- ČERVENÝ V. & PŠENČIK I. 1983 — SEIS83 — numerical modelling of seismic wave fields in 2-D laterally varying layered structure by the ray method. [In:] E. R. Engdahl (Editor), *Documentation of Earthquake Algorithm, World Data Cent. A for solid Earth Geophysics*, Boulder, Re. SE-35: 36–40.
- GEE D. G. & ZEYEN H. J. (eds.) 1996 — *EUROPROBE 1996 – Lithospheric Dynamics: Origin and Evolution of Continents*. Publ. by the EUROPROBE Secretariate, Uppsala University.
- GRAD M., JANIK T., YLINIEMI J., GUTERCH A., LUOSTO U., KOMMINAHO K., ŚRODA P., HOENIG K., MAKRIŠ J. & LUND C.-E. 1999 — Crustal structure of the Mid-Polish Trough beneath TTZ seismic profile. *Tectonophysics*, 314: 145–160.
- GUTERCH A., GRAD M., MATERZOK R. & TOPORKIEWICZ S. 1983 — Structure of the Earth's crust of the Permian basin in Poland. *Acta Geophys. Pol.*, 31: 121–138.
- GUTERCH A., GRAD M., MATERZOK R., PAJCHEL J., PERCHUĆ E. & TOPORKIEWICZ S. 1984 — Deep structure of the Earth's crust in the contact zone of the Palaeozoic and Precambrian Platform and the Carpathian Mts. in Poland. *Acta Geophys. Pol.*, 32: 25–41.
- GUTERCH A., GRAD M., MATERZOK R. & PERCHUĆ E. 1986 — Deep structure of the Earth's crust in the contact zone of the Palaeozoic and Precambrian Platforms in Poland (Tornquist-Teisseyre Zone). *Tectonophysics*, 128: 251–279.
- GUTERCH A., GRAD M., JANIK T., MATERZOK R., LUOSTO U., YLINIEMI J., LÜCK E., SCHULZE A. & FÖRSTE K. 1994 — Crustal structure of the transition zone between Precambrian and Variscan Europe from new seismic data along LT-7 profile (NW Poland and eastern Germany). *C.R. Acad. Sc. Paris*, 319, s. II: 1489–1496.
- GUTERCH A. & GRAD M. 1996 — Seismic structure of the Earth's crust between Precambrian and Variscan Europe in Poland. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.*, M-18 (273): 67–73.
- GUTERCH A., GRAD M., THYBO H., KELLER R. & POLONAISE Working Group. 1999 — POLONAISE'97 — an international seismic experiment between Precambrian and Variscan Europe in Poland. *Tectonophysics*, 314: 102–122.
- HOLE J. A. 1992 — Non-linear high resolution three-dimensional seismic travel time tomography. *J. Geophys. Res.*, 97: 6553–6562.
- JENSEN S. L., JANIK T., THYBO H. & POLONAISE'97 Working Group 1999 — Seismic structure of the Palaeozoic Platform along POLONAISE'97 profile P1 in northwestern Poland. *Tectonophysics*, 314: 123–143.
- KELLER G. R. & HATCHER R. D., Jr. 1999 — A summary of crustal structure along the Appalachian Ouachita orogenic belt in North America: a comparison with the TESZ. *Tectonophysics*, 314: 43–68.
- LEVANDER A., HUMPHREYS E.D., GORAN E., MELTZER A. S. & SHEARER P.M. 1999 — Proposed Project Would Give Unprecedented Look Under North America. *EOS, Transactions, AGU*, 80: 245–251.
- PHARAOH T. C. 1999 — Palaeozoic terranes and their lithospheric boundaries within the Trans-European Suture Zone (TESZ): a review. *Tectonophysics*, 314, 17–41.
- ŚRODA P. & POLONAISE'97 Working Group, 1999 — P- and S-wave velocity model of the southwestern margin of the Precambrian East European Craton; POLONAISE'97, profile P3. *Tectonophysics*, 314: 175–192.
- ZIELHUIS A. & NOLET G. 1994 — Deep Seismic Expression of an ancient plate boundary in Europe. *Science*, 265: 79–81.