

Geoinformatyka w naukach geologicznych

Geoinformatics in geological sciences

Marek GRANICZNY, Zbigniew KASINA

The work presents directions to the use of geoinformatics in the resolving of geological problems. Described against this background are basic aspects to the acquisition, processing and interpretation of spatial information on the land as carried out using geophysical methods. A particular focus of attention are the methods of three-dimensional seismic study, seismic tomography and the information-technology aspects of

seismic research. Issues relating to the use of seismic methods in studying the earth at the planetary level are developed, with consideration also being given to the use of the instrumentation of information technology in the processing of seismic data, as well as three-dimensional visualization. The possibilities for using the results of radar imagery in the tectonic analysis of the Carpathians have also been assessed.

Wstęp

Przedstawiona poniżej prezentacja zastosowań geoinformatyki w naukach geologicznych nawiązuje do propozycji Komisji Geoinformatyki PAU traktowania geoinformatyki jako nauki o sposobach gromadzenia, przechowywania, przetwarzania, analizowania i przedstawiania danych, zdefiniowanych w ziemskiej czasoprzestrzeni, przy wykorzystaniu odpowiedniej technologii informatycznej. Przedmiotem badań są zarówno informacje o wymiarach i kształcie Ziemi, jak i informacje o obiektach, zjawiskach i procesach zachodzących na powierzchni Ziemi i w litosferze. Istotne są również wszelkie aplikacje informatyki (jej teorii, metod i technik) do danych zdefiniowanych przestrzennie, niekoniecznie z uwzględnieniem GIS-u.

Zastosowania geoinformatyki w naukach geologicznych w Polsce, dyskutowane i publikowane w ramach działalności Komisji Geoinformatyki PAU, obejmują szeroki krąg zagadnień związanych z:

- predykcją silnych wstrząsów górniczych na podstawie analizy funkcji ryzyka (Cianciara, 1999),
- oceną względnej ilości informacji o tendencji rozwoju procesu pęknięcia górotworu naruszonego eksploatacją górniczą opartą na analizie entropii zmiennej losowej, reprezentującej odstęp czasu między zjawiskami rejestrowanego strumienia emisji sejsmicznej (Cianciara, 2000),

— prognozowaniem potencjalnych skutków przekształceń gleb towarzyszących eksploatacji górniczej za pomocą sztucznych sieci neuronowych (Gruszczynski, 1999),

— odtwarzaniem przestrzennej informacji geologicznej z danych sejsmicznych (Kasina, 1999),

— zwiększaniem dokładności lokalizacji źródeł emisji sejsmicznej na drodze grupowania zjawisk podobnych (Leśniak, 2000),

— zwiększeniem szybkości pomiarów geometrycznych struktur skał na drodze zastosowania metod komputerowej analizy obrazów do pomiarów petrograficznych (Młynarczyk, 2000),

— zastosowaniem metody analizy przestrzennej do poszukiwania, analizowania i modelowania zależności rozmieszczenia i stężenia metali ciężkich od czynników przestrzennych: odległości od źródła zanieczyszczeń (emiterów), ukształtowania i zagospodarowania terenu (zabudowy i roślinności), litologii utworów przypowierzchniowych, gatunków gleb (Magiera, Foryciarz, 2000),

— zastosowaniem metod geostatystyki liniowej (wariogram, kriking, kokriking) i nieliniowej (wariogram wskaźnikowy, kriking wskaźnikowy, symulacja warunkowa — *turning bands*) do przetwarzania danych pochodzących z monitoringu środowiskowego (Namysłowska-Wilczyńska, Wilczyński, 2000),

— zastosowaniem satelitarnych badań georadaro-

wych do rozpoznawania właściwości utworów powierzchniowych Ziemi (Marczak, 2001),

— zastosowaniem metody rozpoznawania obrazów (metody funkcji potencjalnej i metody Kora-3) oraz metody geostatystycznej do określania zasięgu ciał rudnych Zn–Pb (Mastej, 2001),

— zastosowaniem rozpoznawania obrazów (metoda funkcji potencjalnych) w połączeniu z metodami geostatystycznymi do wskazywania nowych potencjalnych obszarów akumulacji węglowodorów (Kotlarczyk i inni, 1999)

Możliwości zastosowania wyników interpretacji zdjęć radarowych do analizy tektonicznej Karpat

Wprowadzenie

O lineamentach wyznaczanych przy pomocy metod teledetekcyjnych i ich znaczeniu w geologii wzmiankowano po raz pierwszy w Polsce w Przeglądzie Geologicznym ponad 20 lat temu (Bażyński, Graniczny, 1978).

Definicja „lineamentu”, którą wprowadził do literatury anglosaskiej W.H. Hobbs (1904, 1912), a ugruntował w dobie satelitów D.W. O’Leary (i inni, 1976) nie uległa jednak zmianie. Dla przypomnienia „*lineament* to możliwa do zinterpretowania cecha liniowa powierzchni (lub ich kompozycja) zorientowana w całości lub na pewnych odcinkach prostoliniowo i odzwierciedlająca prawdopodobnie pewne zjawiska w podłożu”.

Po uzyskaniu w 1978 roku lotniczych materiałów radarowych dokonano ich wstępnej interpretacji, a na terenie Karpat dokonano analizy porównawczej z wynikami interpretacji zdjęć satelitarnych (Doktor, Graniczny, 1982). Z analizy wynikało, że lineamenty radarowe można zidentyfikować jako:

— odpowiadające wydłużonym formom morfologicznym — grzbietom, granicom litologicznym.

— odpowiadające liniom nieciągłości — uskokom lub systemom spękań. Pierwszy rodzaj lineamentów zinterpretowanych na zdjęciach radarowych układa się ukośnie do przebiegu struktur fałdowych przeważnie w systemach dwóch kierunków krzyżujących się pod kątem 50–60°. Symetryczność tych linii i ich stosunek do przebiegu fałdów, w obrębie których występują, pozwala je interpretować jako system ściąg komplementarnych. Drugi dominujący kierunek lineamentów usytuowany jest prostopadle lub lekko ukośnie do kierunku struktury fałdowej. Biorąc pod uwagę, że obraz intersekcyjny tych nieciągłości jest prostoliniowy, należy wnioskować, że większość z nich jest obrazem uskoków i stref spękań o upadzie zbliżonym do pionowego. Na zdjęciach można również zaobserwować nieciągłości o płaszczyznach dużo mniej stromych. Rysują się one jako lineamenty o przebiegu mniej regularnym, wyraźnie zależnym od morfologii.

Materiały, metodyka i zakres badań

Do interpretacji wykorzystano rosyjskie zdjęcia radarowe wykonane przy zastosowaniu systemu bocznego wybierania — TOROS.

Zdjęcia radarowe wyróżniają się kilkoma cechami, które w bardzo pozytywny sposób oddziałują na czytelność elementów rzeźby terenu: boczny kąt padania wiązki promieni radarowych powoduje znaczące podwyższenie czytelności liniowych struktur geologicznych takich jak uskoki, spękania, elementy litologii. Przeglądowość zdjęć radarowych wynikająca ze skali i zdolności rozdzielczej oraz uniwersalność wynikająca z faktu, iż mogą one być wykonywane w dzień i w nocy, jak również podczas występowania pokrywy chmur. Zdecydowanie negatywną cechą tych zdjęć jest ich niska kartometryczność. Wykonane w trakcie interpretacji pomiary na diapozytywach pokazały, że różnica między tymi samymi zidentyfikowanymi obiektami na sąsiednich szeregach dochodzi do 2 cm (2 km w skali zdjęcia) na długości sceny, a po porównaniu z mapą topograficzną nawet do 3 cm (3 km). Niedogodność tę zminimalizowano poprzez przetworzenie scyfrowanej mapki interpretacyjnej każdego zdjęcia radarowego według punktów pasowania.

Jak wynika z powyższej charakterystyki materiałów teledetekcyjnych, które były przedmiotem interpretacji fotogeologicznej, zdjęcia radarowe obok niewątpliwych zalet, dających im przewagę nad innym rodzajem zdalnego obrazowania, mają wady w dużym stopniu zresztą wynikające z określonego systemu radarowego (TOROS), który był do pozyskania tych zdjęć wykorzystany.

Do interpretacji wykorzystano 126 diapozytywów czarno-białych w skali około 1:100 000, możliwie najlepszej jakości, a z sąsiednich szeregów korzystano w miarę potrzeb, np. jeżeli jakiś fragment zdjęcia był słabo czytelny lub pokryty cieniem radarowym. Wyniki po scyfrowaniu przeniesiono na wspólny podkład.

Do analizy statystycznej zostały wykorzystane tylko lineamenty odpowiadające strefom nieciągłości. Mapy i diagramy wykonano za pomocą oprogramowania MAGEST opracowanego przez B. Żuka. Program został opracowany w celu wyliczania gęstości lineamentów w węzłach siatki regularnej.

Wyniki fotointerpretacji

Do celów analizy wykonano szereg przetworzeń na zbiorze ponad 17 000 fotolineamentów. Pierwszym rodzajem przetworzenia było wykonanie mapy gęstości (zagęszczenia) fotolineamentów przy zastosowaniu filtra kołowego o promieniu 3 km. W założeniu ten rodzaj przetworzenia, nie preferujący żadnego z kierunków, powinien pokazać rozkład i natężenia występowania fotolineamentów na całym analizowanym obszarze. W wyniku przetworzenia otrzymano obraz izolinii gęstości fotolineamentów pokazujący główne kierunki struktur obserwowane w Karpatach,

we wschodniej części tzw. kierunek karpacki, w środkowej — tatrzański i zarysowujące się na zachodzie początki struktur o kierunku śląskim. Szczególne zagęszczenia fotolineamentów widoczne we wschodniej części Karpat i na południu obszaru należącego do odcinka „tatrzańskiego” odpowiadają przebiegowi struktur fałdowych. Widoczne w kilku miejscach maksima zagęszczeń wymagają szczegółowej analizy. Z analizy diagramu zbiorczego rozkładu kierunków fotolineamentów na całym analizowanym obszarze Karpat wynika, że lineamenty radarowe grupują się głównie w trzech kierunkach: około 15° , 75° i 155° . Trzeba od razu zauważyć, że nie są to wąskie maksima. Szczególnie rozszerzona jest dominanta reprezentująca azymuty grupujące się w zakresie $15\text{--}30^\circ$. Azymuty grupujące się wokół tych trzech dominant posłużyły jako kierunki, według których dokonano przetworzenia map gęstości fotolineamentów.

Pierwsza mapa gęstości pokazuje obszary, na których dominują fotolineamenty o azymucie $75 \pm 5^\circ$. Widać, że zdecydowana większość tych fotolineamentów występuje w części wschodniej analizowanego obszaru Karpat.

Drugi kierunek fotolineamentów $15 \pm 5^\circ$ (subpołudnikowy) występuje, podobnie jak poprzedni, głównie we wschodniej części analizowanego obszaru, ale można go również zaobserwować w pozostałej części Karpat.

Trzeci kierunek fotolineamentów — $155^\circ \pm 5^\circ$, występuje w całej zachodniej części analizowanego obszaru.

Wykonano również przetwarzanie polegające na tworzeniu map gęstości fotolineamentów grupujących się w dwóch wybranych kierunkach. Jednak ograniczenie wynikające z własności programu MAGEST pozwoliło wyznaczyć obszary występowania tylko jednego z zakładanych systemów komplementarnych tzn. 85° , 155° . W wyniku przetworzenia otrzymano mapę gęstości tych dwóch kierunków, które dominują na zachodnim obszarze analizowanej części Karpat.

Mapy gęstości dają ogólny pogląd na częstotliwość występowania fotolineamentów na całym analizowanym obszarze oraz zagęszczenie fotolineamentów o określonym kierunku na poszczególnych fragmentach Karpat. Nie dają jednak obrazu zmienności kierunków fotolineamentów w zależności od miejsca usytuowania analizowanego fragmentu w schemacie całego badanego obszaru. Próbę odpowiedzi na tak postawione pytanie może dać wykonana analiza rozkładu fotolineamentów na poszczególnych arkuszach map w skali 1:100 000.

Zestawione na jednej planszy (ryc. 1) różne kierunków dla poszczególnych arkuszy map w skali 1:100 000 pokazują charakterystyczną zmienność azymutów i częstotliwości fotolineamentów w zależności od położenia na badanym obszarze Karpat. Warto w tym miejscu nawiązać do wyników analizy tektonicznej wykonanej przez L. Mastellę i E. Szykaruk (1998). Jednym z głównych wniosków charakteryzujących nie-

ciągłości w Karpatach było stwierdzenie, że wszystkie one wykazują regionalną zmienność azymutów. Pierwszy zespół (uskoki prawoskrętne) — od około 10° na wschodzie do około 150° na zachodzie, drugi (uskoki lewoskrętne), odpowiednio od około 60° do około 25° . Trzeci zespół, poprzeczny do struktur regionalnych, obejmuje głównie duże uskoki, które w części zachodniej przybierają azymuty 165° , a na wschodzie około 35° . Podobne wyniki analizy kierunków nieciągłości w Karpatach prezentowane są przez innych autorów zajmujących się zagadnieniami tektoniki nieciągłej w Karpatach, np. M. Jarosiński (1997), W. Zuchiewicz (1997).

Nietrudno zauważyć, że wszystkie kierunki wymieniane jako nieciągłości, wraz z ich charakterystyczną cechą zmienności kierunków od zachodu na wschód, znajdują swoje ekwiwalenty w zespołach azymutów fotolineamentów radarowych. Można więc fotolineamenty radarowe, wyznaczone w fotointerpretacji wykonanej w ramach niniejszego opracowania, z dużą dozą prawdopodobieństwa uznać za odzwierciedlenie nieciągłości (uskoków i stref spękań) występujących w Karpatach.

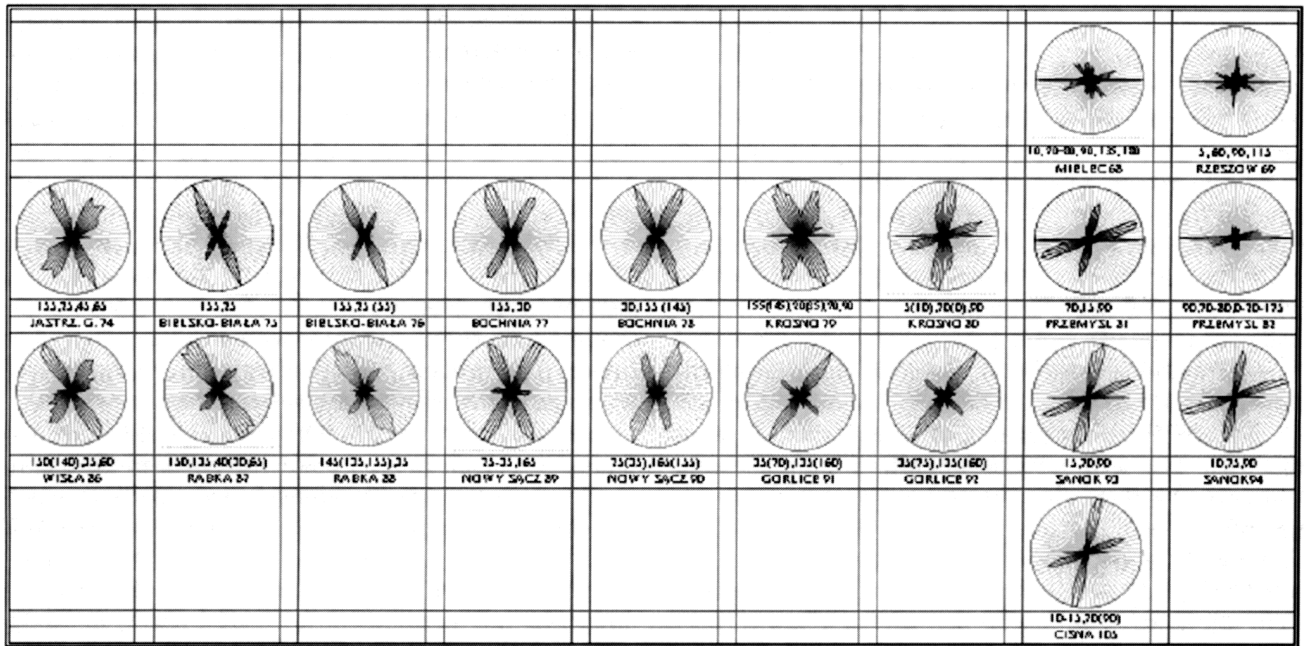
Rozkład i gęstość występowania fotolineamentów, będących odzwierciedleniem zjawisk tektoniki nieciągłej są zmienne i charakterystyczne, jak to zostało zaprezentowane, dla miejsca występowania na analizowanym obszarze. Według wyżej cytowanych autorów analiza obserwowanych systemów nieciągłości, wyraźnych poprzez wzajemny ich stosunek i widoczne zmiany azymutów, daje możliwość odtworzenia kierunków głównych osi kompresji. Wobec tego należy uznać, że możliwa jest również analiza pod tym kątem fotolineamentów, które jak to wyżej stwierdzono można traktować jako odzwierciedlenie linii nieciągłości, a ze względu na ilość zgromadzonego materiału może dostarczyć ciekawych i bogatych wniosków.

Przedstawione wyżej rezultaty analizy fotolineamentów radarowych pokazują w zasadzie tylko możliwości tej metody. Ponieważ prace związane z interpretacją zdjęć radarowych i przetworzeniem ich do formy cyfrowej zajęły prawie 90% czasu przeznaczanego na realizację tematu, można powiedzieć, że rezultaty interpretacji geologicznej, mimo zachęcających wyników, są dopiero pierwszymi próbami wskazującymi drogę dalszych badań.

Wydaje się, że aby w pełni wykorzystać wyniki interpretacji zdjęć radarowych powinno się jeszcze wykonać następujące prace:

— analizę kierunków fotolineamentów w podziale na arkusze mapy w skali 1:50 000. Analiza taka powinna ujawnić szczegółowy rozkład kierunków fotolineamentów — nieciągłości, co z kolei pozwoli na rekonstrukcję pola naprężeń (osi głównej kompresji) dla poszczególnych fragmentów Karpat,

— analizę kierunków fotolineamentów w podziale na jednostki tektoniczne Karpat. Analiza fotolineamentów pod tym kątem powinna pomóc odpowiedzieć na pytanie, czy są jakieś wyraźne zależności rozkładu



Ryc. 1. Rozkład kierunków fotolineamentów radarowych Karpat obliczonych dla poszczególnych arkuszy map w skali 1:100 000. Pod każdym diagramem wypisano wartość azymutu fotolineamentów w kolejności częstotliwości występowania na danym arkuszu. W nawiasach podano kierunki drugorzędne

Fig. 1. Distribution of the directions of radar photolineaments of the Carpathians calculated for different map sheets on the scale 1:100 000. Given under each diagram is the value for the azimuth of photolineaments in the order of their frequency of occurrence on the given sheet. Given in brackets are the secondary directions

fotolineamentów od usytuowania ich na obszarze poszczególnych jednostek tektonicznych,

- szczegółowa analiza porównawcza mapy fotolineamentów i map gęstości (z dodatkowo wykonanymi przetworzeniami dla innych okien filtra) z materiałami geologicznymi (mapy geologiczne, mapy kompleksów litologicznych, mapy tektoniczne),
- analiza prowadząca do wykazania zależności (jeżeli są) wpływu budowy podłoża na tektonikę nieciągłą w jednostkach fałdowych.

Wnioski

Wynik wstępnej analizy kierunków fotolineamentów prowadzi do wniosku pozwalającego traktować fotolineamenty radarowe jako odzwierciedlenie struktur geologicznych, a porównanie wyników analizy kierunków lineamentów z wnioskami z badań tektonicznych przeprowadzonych przez różnych autorów w Karpatach upoważnia do potraktowania fotolineamentów radarowych jako odzwierciedlenie struktur nieciągłych — uskoków i stref spękań, co pozwoli na zastosowanie do ich badania niektórych elementów metodyki analizy tektonicznej.

Rozszerzenie interpretacji o materiały radarowe znajdujące się w posiadaniu słowackich i czeskich służb geologicznych uzupełniłoby obraz rozkładu i zagęszczenia lineamentów radarowych w całych Karpatach zewnętrznych, co dałoby przesłanki do pełniejszej interpretacji tych danych.

Metody geofizyczne jako geoinformatyczne narzędzie przestrzennych badań Ziemi

Integracja wielu dziedzin w jeden system geoinformacyjny ukierunkowany na badanie i prezentację różnego rodzaju zagadnień przestrzennych nie byłaby pełna, gdyby nie obejmowała tych narzędzi przestrzennego rozpoznawania wnętrza Ziemi, których dostarczają metody geofizyczne. Spośród tych metod najwięcej informacji przestrzennej o budowie wnętrza Ziemi i rozkładzie jej parametrów wnoszą metody sejsmiczne. Wiodącą rolę odgrywa tu sejsmika 3-wymiarowa wraz z tomografią sejsmiczną.

Rola metod sejsmicznych w przestrzennych badaniach Ziemi

W metodzie sejsmicznej informację przestrzenną wydobywamy z rejestracji drgań sprężystych, wzbudzanych sztucznie na powierzchni ziemi lub w otworach (wzbudzenia dynamitowe, niedynamitowe wzbudzenia wibratorowe, eksplozje nuklearne), względnie związanych z naturalnymi trzęsieniami ziemi. Interpretacja czasów przebiegu fal sejsmicznych oraz amplitud drgań cząstek ośrodka pozwala odtwarzać budowę Ziemi zarówno w skali globalnej, jak również w skali lokalnej wybranych partii ośrodka (złoże). Przestrzenna informacja o budowie wnętrza Ziemi ma istotne znaczenie zarówno w poszukiwaniach i rozpoznawaniu złóż surowców mineralnych, jak również

w zagadnieniach ochrony środowiska oraz planowania przestrzennego.

W metodzie sejsmicznej wykorzystujemy następujące warianty pomiarów, stwarzających możliwość odtworzenia przestrzennej informacji o budowie ośrodka:

- sejsmika powierzchniowa (wzbudzenia fal i odbiorniki rozmieszczone na powierzchni Ziemi) w wariacie 3-wymiarowym, wykorzystująca fale odbite;

- sejsmika powierzchniowa w wariacie 2-wymiarowym z siatką przecinających się profili; wykorzystujemy fale odbite i refrakcyjne;

- sejsmika otworowa w wariacie pionowych profiliowań sejsmicznych realizowanych na wielu profilach przechodzących przez dany otwór (wzbudzenie na powierzchni Ziemi, odbiorniki rozmieszczone w otworze); wykorzystujemy zarówno fale bezpośrednie, jak i odbite;

- sejsmika międzyotworowa w wariacie przeświełań sejsmicznych (wzbudzenie i rejestracja w otworach) z wykorzystaniem fal bezpośrednich; interpretacja metodą tomografii sejsmicznej.

W sejsmice 3-wymiarowej dla każdego wzbudzenia fal dokonujemy rejestracji drgań w wielu (od kilkudziesięciu do kilkuset) punktach odbioru na powierzchni Ziemi. Wykorzystanie wielu — równomiernie rozmieszczonych na powierzchni Ziemi — punktów wzbudzenia pozwala uzyskać informację przestrzenną o ośrodku z krokiem próbkowania przestrzennego od kilku do kilkunastu metrów w kierunku osi układu kartezjańskiego przy zakresie głębokościowym do kilku kilometrów (ryc. 2).

W sejsmice 2-wymiarowej informację przestrzenną konstruujemy na podstawie informacji dwuwymiarowej z siatki profili sejsmicznych, rozmieszczonych w niewielkich odległościach (od kilkudziesięciu do kilkuset metrów). Ten wariant sejsmiki wykorzystujemy również do badania wnętrza Ziemi do głębokości kilkudziesięciu kilometrów.

Rejestracja i interpretacja fal sejsmicznych, związanych z trzęsieniami ziemi i propagujących w całej objętości kuli ziemskiej, stwarza możliwość odtworzenia budowy Ziemi w skali globalnej: od jądra Ziemi aż do jej skorupy. Ważnym narzędziem interpretacji jest tutaj tomografia sejsmiczna fal refragowanych.

Informacja przestrzenna uzyskiwana metodami sejsmicznymi (Kasina, 1998a, b) obejmuje zarówno dane o kształcie i położeniu (w skali czasowej i głębokościowej) powierzchni rozdziału, jak i dane o przestrzennym rozkładzie prędkości fal podłużnych i poprzecznych, stałych sprężystości, porowatości, współczynnika tłumienia fal sejsmicznych, atrybutów sejsmicznych (atrybuty trasy zespolonej, atrybuty AVO).

Rola tomografii sejsmicznej w przestrzennych badaniach Ziemi

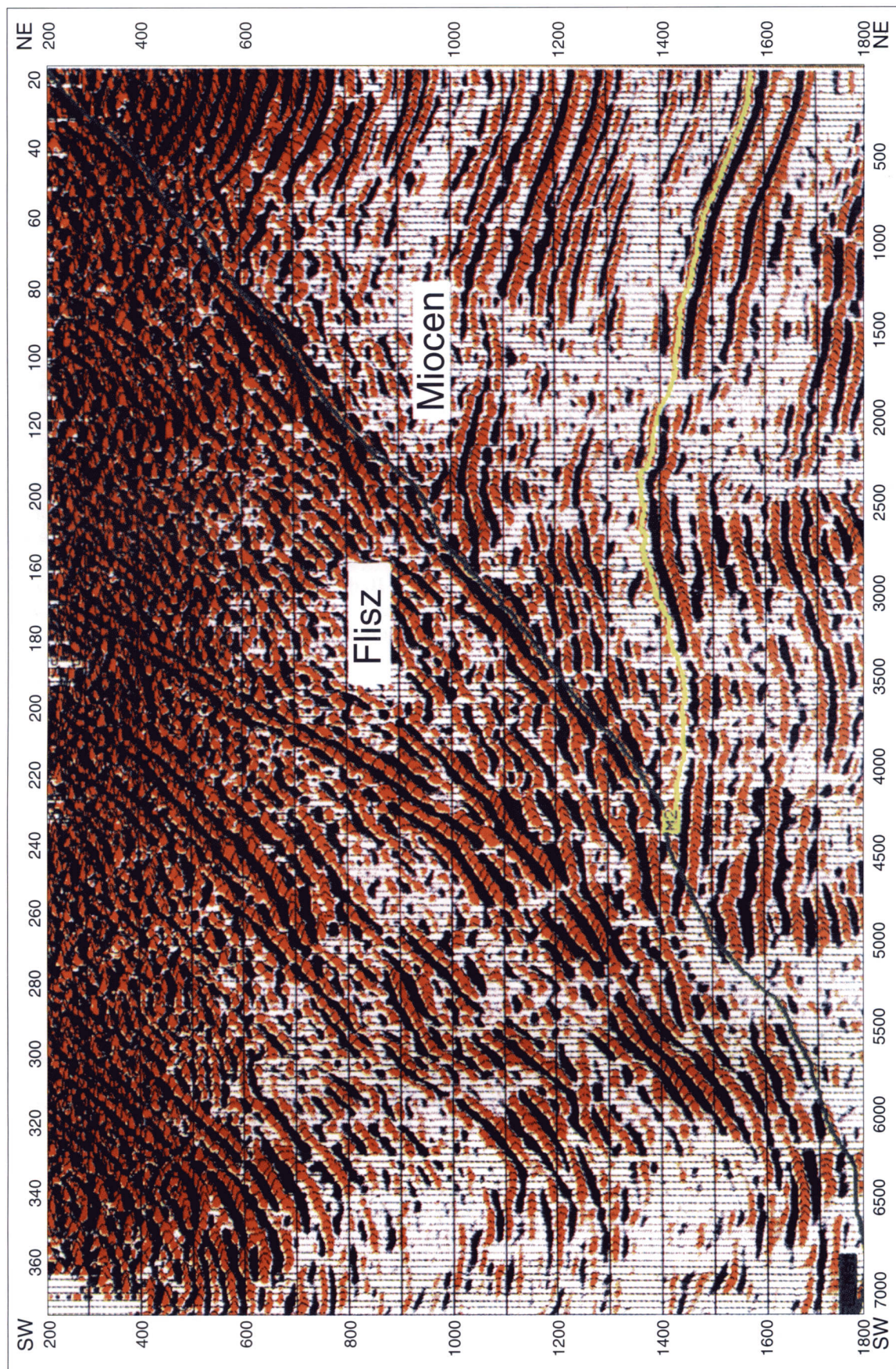
Istotą tomografii sejsmicznej jest odtwarzanie rozkładów prędkości fal sejsmicznych (czasem rozkładów tłumienia fal sejsmicznych) w części ośrodka prześwie-

tlanego falami sprężystymi (ryc. 3 i 4). Rodzaj interpretowanych fal sejsmicznych (fale bezpośrednie, fale refragowane, fale odbite, fale czołowe, fale dyfrakcyjne) oraz wzajemne położenie punktów wzbudzenia fal (na powierzchni ziemi, w otworze) i punktów odbioru fal (na powierzchni Ziemi, w otworze) określają typ tomografii (m.in. tomografia refleksyjna, refrakcyjna, dyfrakcyjna, tomografia otworowa). Pola prędkości określone są w procesie tomograficznej inwersji zarejestrowanych czasów przebiegu fal sejsmicznych; natomiast pola tłumienia interpretowane są w procesie inwersji amplitud fal sejsmicznych. Odtworzone w procesie inwersji tomograficznej pola prędkości i tłumienia mogą być wykorzystane do interpretacji budowy geologicznej ośrodka (rozpoznanie litologii, struktur geologicznych, identyfikacja medium nasycającego, określanie porowatości ośrodka oraz stanu naprężeń skał) (Kasina, 2001). Tomografia sejsmiczna może być wykorzystana zarówno do badania budowy Ziemi w skali globalnej, jak i do szczegółowego badania wybranych partii ośrodka (np. rozpoznawanych lub eksploatowanych złóż); stanowi podstawowe narzędzie monitoringu sejsmicznego wykorzystywanego głównie w procesie wtórnej eksploatacji złóż ropy naftowej (*Enhance Oil Recovery — EOR*). Tomografia zastosowana do interpretacji trójwymiarowych zdjęć sejsmicznych dostarcza informacji o przestrzennej budowie ośrodka i przestrzennym rozkładzie jego parametrów.

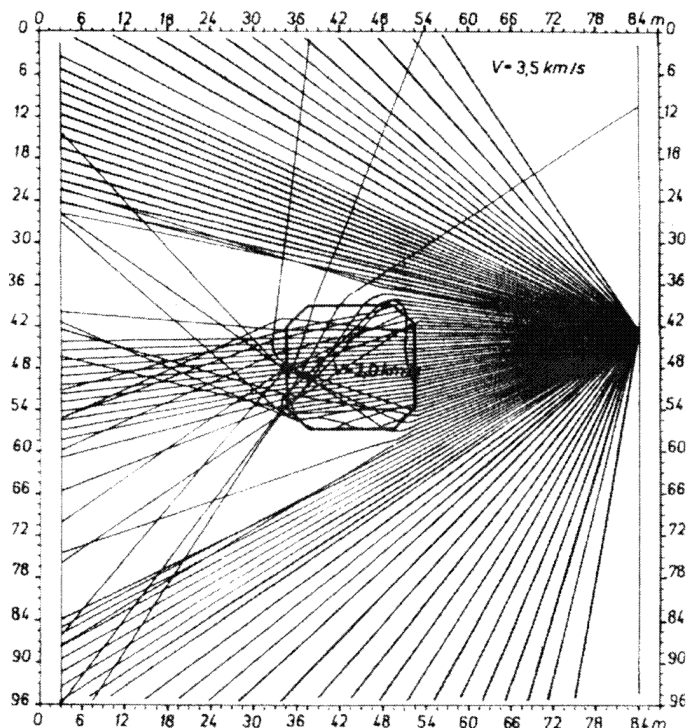
Rola metod sejsmicznych w przestrzennym rozpoznaniu budowy Ziemi na obszarze Polski

W celu wyjaśnienia procesów geologicznych kształtujących kontynent europejski niezbędne jest rozpoznanie struktury i ewolucji strefy kontaktu kratonu wschodnioeuropejskiego z mobilną strefą Europy Zachodniej. Strefa ta ma rozciągłość około 2000 km i przecina kontynent europejski od północnego zachodu na południowy wschód, od Morza Północnego do Morza Czarnego. Nosi ona nazwę szwu transeuropejskiego (*Trans European Suture Zone — TESZ*). Z pozycją tego szwu pokrywa się w znacznej części na obszarze Polski strefa Teisseyre'a-Tornquista (*Teisseyre-Tornquist Zone — TTZ*), oddzielająca obszar platformy paleozoicznej Europy Centralnej i Zachodniej od struktur prekambryjskich Europy Wschodniej. Tomograficzna inwersja prędkości fal poprzecznych pod kontynentem europejskim potwierdziła, że omawiany szew jest głęboko zakorzeniony w górnym płaszczu Ziemi, oddzielając wysokoprędkościowe struktury Europy północno-wschodniej od niskoprędkościowych (poniżej 6,0 km/s) struktur Europy Południowo-Zachodniej.

W roku 1997 zostały przeprowadzone na terenie Polski szczegółowe badania głębokich struktur litosfery metodami sejsmicznymi w ramach międzynarodowego projektu **POLONAISE'97** (**P**olish **L**ithosphere **O**Nsets — **A**n **I**nternationale **S**eismic **E**xperi-



Ryc. 2. Sekcja sejsmiczna z regionu nasunięcia fliszu Karpat na utwory miocenu
 Fig. 2. Seismic section in the region of Carpathian flysch thrust over Miocene deposits



Ryc. 3. Model strefy o obniżonej prędkości (model pustki) z wykreślonymi trajektoriami promieni sejsmicznych dla wybranego punktu wzbudzenia w wariancie prześwietlań międzyotworowych

Fig. 3. The model of low velocity zone (the void model) with seismic ray trajectories for selected shot point in the variant of transmission measurements between wells

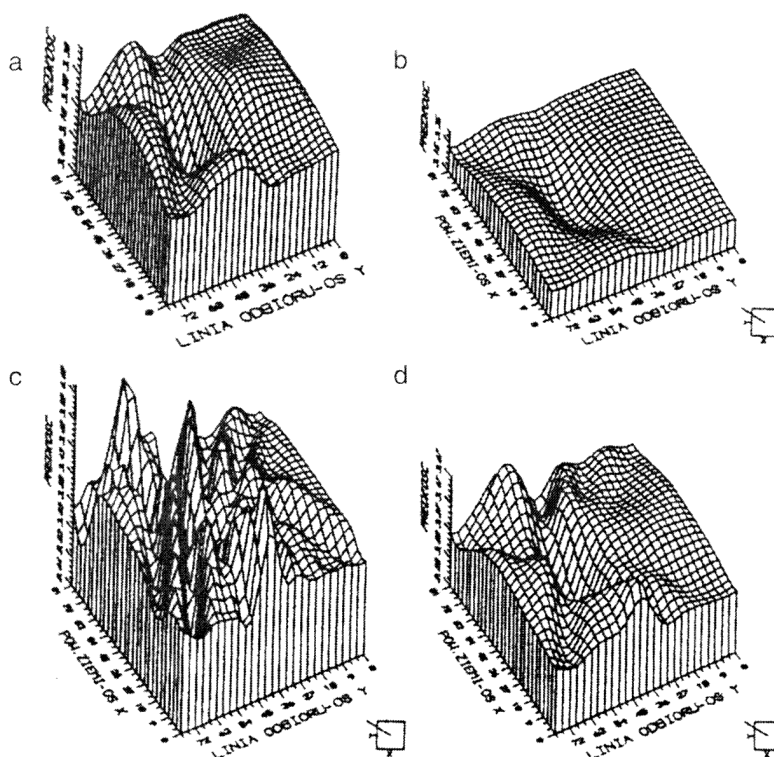
ment). W ramach tego projektu wykonano badania refrakcyjne i szerokokątowe refleksyjne, obejmujące swoim zasięgiem skorupę ziemską i dolną litosferę do głębokości około 100 km. Prace sejsmiczne zostały wykonane wzdłuż 5 profili o łącznej długości około 2000 km. Odległości między punktami strzałowymi zmieniały się w przedziale 15–35 km. W pracach rejestracyjnych wzięło udział 613 aparatów sejsmicznych z 10 organizacji naukowych w Stanach Zjednoczonych, Kanadzie i Europie Zachodniej. Podczas eksperymentu POLONAISE'97 uzyskano około 55 000 tras sejsmicznych.

Porównując obrazy falowe z dwóch profili (P1 i P4), oddzielonych strefą szwu transkontynentalnego, możemy zauważyć zasadnicze różnice w sejsmicznym polu fal odbitych od granic w środkowej i dolnej skorupie z granicą Moho (rozdzielającą dolną skorupę od górnego płaszcza Ziemi) włącznie.

Do interpretacji danych pomiarowych z eksperymentu wykorzystano modelowanie sejsmiczne oparte na trzech metodach: inwersji tomograficznej, inwersji i metodzie promieniowej oraz czystej metodzie

promieniowej. Tomograficzne modele rozkładu prędkości fal podłużnych (fal P) dla rozważanych czterech profili (P1, P2, P3, P4) otrzymano metodą inwersji hodografów pierwszych wstąpień. Izolinie prędkości 6,0 km/s oraz 8,0 km/s można w przybliżeniu interpretować odpowiednio jako granicę podłoża krystalicznego oraz granicę Moho. Modele potwierdzają wybitnie blokową budowę skorupy ziemskiej. Głębokość granicy Moho zmienia się w szerokim przedziale wartości od około 32 km na platformie paleozoicznej do około 42 km na platformie prekambryjskiej, osiągając maksymalną głębokość około 50 km w strefie Teisseyre'a-Tornquista.

Badania w projekcie POLONAISE'97 są częścią europejskich programów badawczych znanych jako **EUROPROBE Project** oraz **Palaeozoic Amalgamation of Central Europe (PACE)** koordynowanych przez Europejską Fundację Naukową w Strasburgu oraz Komisję Europejską w Brukseli. Kontynuacją tych badań jest projekt **CELEBRATION 2000 Project** (Central European Lithospheric Experiment Based on Refraction 2000).



Ryc. 4. Trójwymiarowe wyniki interpretacji tomografii prostoliniowej dla wariantu pustki i różnych wartości parametru więzów, nałożonych w procesie inwersji tomograficznej

Fig. 4. 3-D results of straightline tomography interpretation for the case of void and different values of constraint parameter used in tomographic inversion process

Aspekty informatyczne przetwarzania przestrzennych danych geofizycznych

Istotną cechą procesu akwizycji danych sejsmicznych 2D i 3D oraz procesu przetwarzania tych danych jest operowanie dużą ilością informacji. Pojedyncza trasa sejsmiczna zapisywana w jednym punkcie odbioru ma długość (w przypadku sejsmiki poszukiwawczej) około 6 sekund przy kroku próbkowania 1–2 ms; zawiera więc 6000 lub 3000 liczb rzeczywistych zapisywanych w postaci binarnej. Przy każdym wzbudzeniu fali rejestrujemy zwykle od kilkudziesięciu do kilkuset tras sejsmicznych. Dla typowego zdjęcia sejsmicznego liczba punktów wzbudzenia sięga od kilkuset do kilku tysięcy. Wykonanie jednej, ale bardzo zaawansowanej, procedury przetwarzania danych sejsmicznych zdjęcia 3D (tzw. procedury migracji) wymaga aktualnie czasu około kilkudziesięciu godzin pracy najwyższej klasy superkomputera wieloprocesorowego. Konieczne jest również dysponowanie dużymi pamięciami RAM, pamięciami dyskowymi, szybkimi transmisjami danych. Do realizacji wielu procedur przetwarzania i interpretacji wykorzystujemy interaktywne stacje robocze, spełniające następujące wymagania: pamięć RAM 512 MB, obszar wymiany 1 + GB, zaawansowane karty graficzne (ZX/CG6, GXT-150M).

Zaawansowane przetwarzanie dużej ilości danych sejsmicznego zdjęcia 3D wymaga zastosowania wielu narzędzi informatycznych, spośród których najszerze zastosowanie znalazły:

- sieci neuronowe, wykorzystywane głównie do edycji danych (m.in. usuwanie zakłóceń i błędów zapisów) oraz do procesu automatycznego punktowania wstąpień fal (w celu określania czasów przebiegu fal sejsmicznych);

- algorytmy genetyczne oraz algorytmy wyzarcia symulowanego (*simulated annealing*), wykorzystywane do rozwiązywania problemów optymalizacji;

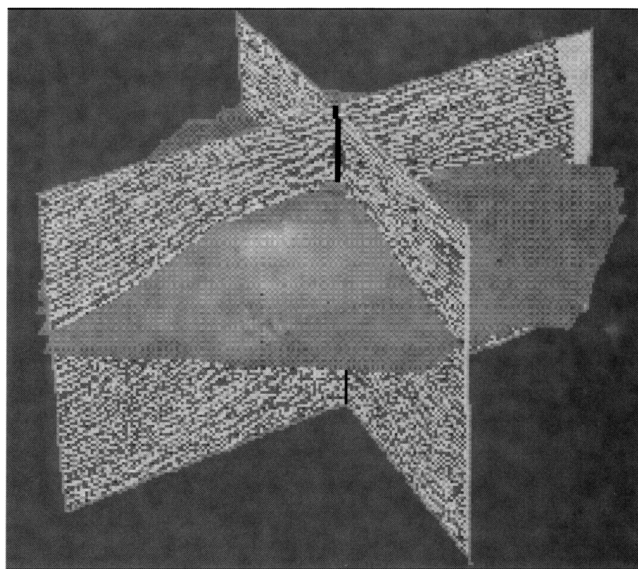
- kryteria informatyczne (np. kryterium minimum entropii stosowane w procesach dekonwolucji, poprawiających stosunek sygnału do zakłóceń).

Wizualizacja i interpretacja trójwymiarowych danych sejsmicznych

Do najbardziej zaawansowanych narzędzi wizualizacji i interpretacji trójwymiarowych danych sejsmicznych należą *SeisCube* (sześcian sejsmiczny) oraz *Earth Cube* (sześcian Ziemi). Programy te są instalowane na stacjach roboczych (SunOS, Solaris, IBM, SGI Indigo). *SeisCube* wraz z *EarthCube* stwarzają następujące możliwości prezentacji i interpretacji danych 3-D:

- wyodrębnienie objętości roboczej z całej objętości danych,
- trójwymiarowa prezentacja wybranej objętości danych w skali czasowej lub głębokościowej,
- wybór jednego z ośmiu typów prezentacji sześcianu, ukazujących różne jego ściany,

- szybka prezentacja kolejnych sekcji sejsmicznych (forma animacji) wzdłuż różnych osi sześcianu,
- cięcie sześcianu wzdłuż dowolnej linii zaznaczonej na jego ścianie,
- wyodrębnianie danych poniżej płaszczyzny uskokowej,
- prezentacja wybranych z objętości danych horyzontów z zawartymi między nimi sekcjami sejsmicznymi,
- wizualizacja wybranych uskoków wraz z zawartymi między nimi sekcjami sejsmicznymi,
- wizualizacja wybranych horyzontów wraz z wybranymi płaszczyznami uskokowymi i przekrojami sejsmicznymi,
- wizualizacja płaszczyzn uskokowych,
- prezentacja horyzontu wraz z płaszczyzną uskoku w wersji przenikania,
- prezentacja horyzontu z zastosowaniem gradacji kolorów w celu rozróżnienia głębokości,
- prezentacja horyzontu z nałożonymi danymi sejsmicznymi,
- prezentacja horyzontu wraz z układem przecinających się przekrojów sejsmicznych (ryc. 5),



Ryc. 5. Trójwymiarowa prezentacja horyzontu wraz z układem przecinających się przekrojów sejsmicznych

Fig. 5. 3-D display of horizon with the set of intersecting seismic sections

- prezentacja horyzontu wraz z nałożoną mapą atrybutu,
- prezentacja sekcji sejsmicznych oraz ich atrybutów (trasy kwadraturowe, polaryzacji pozornej, fazy chwilowej, kosinusa fazy chwilowej, częstotliwości chwilowej),
- prezentacja rozkładów prędkości,
- prezentacja amplitud z pewnego przedziału,
- prezentacja powierzchni w postaci siatek,
- prezentacja przekroju sejsmicznego wraz z otworem i wynikami karotażu lub stratygrafii,
- jednoczesna prezentacja wielu horyzontów wraz z otworami,

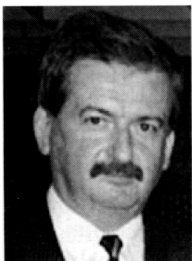
— prezentacja powierzchni oświetlanych z różnych punktów.

Podsumowanie

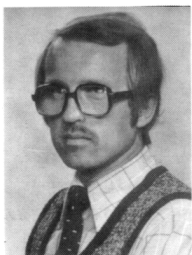
Biorąc pod uwagę zakres przestrzennej informacji o Ziemi, uzyskiwanej w procesie akwizycji, przetwarzania i interpretacji za pomocą metod geofizycznych oraz udział narzędzi informatycznych w przetwarzaniu, wizualizacji i interpretacji danych geofizycznych należy uznać metody geofizyczne za ważne geoinformacyjne narzędzie przestrzennych badań Ziemi i ważny element systemu geoinformacyjnego ukierunkowanego na badanie i prezentację różnego rodzaju zagadnień przestrzennych.

Literatura

- Bażyński J., Graniczny M., 1978: *Fotolineamenty i ich znaczenie w geologii*, Przegląd Geologiczny, nr 5.
- Doktor S., Graniczny M., 1982: *Geologiczna interpretacja zdjęć satelitarnych i radarowych wschodniej części Karpat*, Kwartalnik Geologiczny, t. 26, nr 1.
- Cianciara B., 1999: *Emisja sejsmiczna jako nośnik informacji o rozwoju procesu pękania górotworu*, Geoinformatica Polonica, nr 1, Kraków.
- Cianciara B., 2000: *Zastosowanie entropii do badania ilości informacji zawartej w strumieniu emisji sejsmicznej górotworu*, Geoinformatica Polonica, nr 2, Kraków.
- Guterch A., Grad M., 1999: *Sejsmiczne badania głębokich struktur litosfery na obszarze Polski*, Materiały V Konferencji Naukowo-Technicznej, Kraków, 23 VI 1999.
- Guterch A., Grad M., Thybo H., Keller G. R., 1999: *Seismic Structure of the Paleozoic Platform along POLONAISE'97 profile P1 in northwestern Poland*, Tectonophysics, nr 314, 123–143.
- Gruszczynski S., 1999: *Ocena zagrożenia gleb w rejonach górniczych za pomocą sztucznych sieci neuronowych*, Geoinformatica Polonica, nr 1, Kraków.
- Hobbs W.H., 1904: *Lineaments of the Atlantic Border region*, Geol. Soc. Amer. Bull., vol. 15.
- Hobbs W.H., 1912: *Earth features and their meaning*, Macmillan Co. New York.
- Jarosiński M., 1997: *Directions of contemporary horizontal compression in the Polish Outer Carpathians*, Przegląd Geologiczny, nr 10.
- Kasina Z., 1998a: *Przetwarzanie sejsmiczne*, Wydawnictwo Centrum PPGSMiE PAN, Kraków.
- Kasina Z., 1998b: *Metodyka badań sejsmicznych*, Wydawnictwo Instytutu GSMiE PAN, Kraków.
- Kasina Z., 1999: *Recovering spatial geological information from seismic data*, Geoinformatica Polonica, nr 1, Kraków.
- Kasina Z., 2001: *Tomografia sejsmiczna*, Wydawnictwo Instytutu GSMiE PAN, Kraków.
- Kotlarczyk J. i inni, 1999: *Rozpoznawanie obrazów w prospekcji stref naftowych w cenomanie i malmie synklinorium Nidy*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, t. 15, z. specjalny, Kraków.
- Leśniak A., 2000: *Grupowanie zjawisk podobnych w sejsmologii inżynierskiej*, Geoinformatica Polonica, nr 2, Kraków.
- Magiera J., Foryciarz K., 2000: *Analiza przestrzenna rozkładu metali ciężkich w glebach Nowej Huty (Kraków)*, Geoinformatica Polonica, nr 2, Kraków.
- Mastej W., 2001: *Zastosowanie metod rozpoznawania obrazów i metod geostatystycznych do wskazywania cynkowo-olowiowych ciał rudnych w złożu Trzebionka z rejonu śląsko-krakowskiego*, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, t. 17, z. 2, Kraków.
- Młynarczuk M., 2000: *Zastosowanie metod komputerowej analizy obrazów do pomiarów petrograficznych*, Geoinformatica Polonica, nr 2, Kraków.
- Marczak H., 2001: *Zastosowanie satelitarnych badań georadarowych do rozpoznawania właściwości utworów przypowierzchniowych Ziemi*, Sprawozdanie z posiedzeń naukowych Komisji Geoinformatyki PAU.
- Mastella L., Szykaruk E., 1998: *Analysis of the fault pattern in selected areas of the Polish Carpathians*, Geol. Quart., vol. 42(3), 263–267, Warszawa.
- Namysłowska-Wilczyńska B., Wilczyński A., 2000: *Badania geostatystyczne rozkładu zawartości metali ciężkich w gruntach*, Geoinformatica Polonica, nr 2, Kraków.
- O'Leary D.W. i inni., 1976: *Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms*, Geol. Soc. Amer. Bull., vol. 87, no. 10.
- Zuchiewicz W., 1997: *Distribution of jointing within Magura Nappe, West Carpathians, Poland, in the light of statistical analysis*, Przegląd Geologiczny, t. 45, nr 6, 634–638.



Doc. dr hab. Marek Graniczny. Dyrektor ds. służby geologicznej w Państwowym Instytucie Geologicznym. Od roku 1976 pracował w Zakładzie Fotointerpretacji Zdjęć Satelitarnych i Lotniczych (obecnie Zakład Fotogeologii). Zajmuje się wykorzystaniem metod teledetekcyjnych w problematyce ochrony środowiska. Od 1993 r. jest



Prof. dr hab. inż. Zbigniew Kasina. Profesor zw. Akademii Górniczo-Hutniczej (Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Zakład Geofizyki). Autor 68 publikacji z zakresu geofizyki stosowanej; specjalizuje się w cyfrowym przetwarzaniu

głównym koordynatorem i współwykonawcą badań geosrodowiskowych na pograniczu polsko-litewskim (Pas Jadzwingów). Jest współautorem *Atlas — Geology for Environmental Protection and Territorial Planning in the Polish–Lithuanian Cross-Border Area*, który został nagrodzony przez Ministra Środowiska. Jest członkiem Komitetu Badań Kosmicznych i Satelitarnych PAN, Komitetu Badań Morza PAN oraz Komisji do Spraw Ocen Oddziaływania na Środowisko przy MOŚZNiL. Autor 185 publikacji; e-mail: mgra@pgi.waw.pl

danych sejsmicznych. Autor monografii pt. *Tomografia sejsmiczna* (wyd. 2001 r.) oraz dwóch podręczników: *Przetwarzanie sejsmiczne*, *Metodyka badań sejsmicznych*. Członek Komitetu Geofizyki PAN, Komitetu Nauk Geologicznych PAN oraz Komitetu Geoinformatyki PAU; e-mail: kasina@geol.agh.edu.pl