

## Możliwości zastosowania wyników interpretacji zdjęć radarowych do analizy tektonicznej Karpat

Stanisław Doktor\*, Marek Graniczny\*, Zbigniew Kowalski\*, Antoni Wójcik\*\*

**Application of radar images interpretation for tectonic analysis of the Carpathians.** Prz. Geol., 50: 852–860.

*Summary.* Side looking airborne radar (SLAR), Russian images TOROS has been applied for the lineament interpretation of the Carpathians. 126 B&W diapositives were used for interpretation at the scale 1 : 100,000. The results of photointerpretation were transferred at the topographical base maps. Only the lineaments corresponding to the discontinuities zones were selected for statistical analysis, only. Totally, 17,000 lineaments have been analysed. The maps of lineaments density were performed, using wheeled filter, 3-km radius. The picture of the lineament density isolines has been obtained, showing main tectonic structures in the Carpathians area. The bigger lineaments density is observed in the eastern part of the Carpathians. It corresponds to the course of the fold structures in this area, for example within Brzanka–Liwocz fold zone. The biggest lineaments density in the Western Carpathians were registered in some sections of the Magura Unit Nappe. The radar lineaments are grouping in three directions: 15°, 75°, 155°.

The map of lineament density for azimuth 75°±5° showed that majority of such lineaments occur in the eastern part of the Carpathians within the Skolska Unit, and northern section of Silesian Unit. The lineament direction 15°±5° predominate in the eastern part of the Carpathians, too. It is characteristic for eastern section of Silesian Unit and southern section of Dukla Unit. The lineaments interpreted at the radar images could be interpreted as oblique slip faults connected with the fold structures of the Central Carpathians Depression area. This direction is less visible in the other parts of the Carpathians. Third lineaments direction 155°±5° is characteristic for western part of the Polish Carpathians. The areas related to the Magura Nappe are distinguished here. The azimuths of the above mentioned lineaments represent transverse direction to course of this overthrust and indicate dominance of the strike-slip faults. Some it could be identified as faults marked at the geological maps.

The lineaments density maps grouped in two selected directions 85° and 155° were also generated. These two directions dominate in the western part of the Carpathians. The analysis of lineaments distribution at the map sheets in the 1 : 100,000 scale was performed, too. This analysis showed that azimuth 155° is dominant in the western part of the Carpathians upon Bochnia and Rabka. It is accompanied by a secondary direction 15°–25°. In the middle part of the Carpathians two predominant directions occur, 25°–35° and 155°–165°. East from Krosno new directions appear close to meridional and 70° (as small maximum). In the NW part of the Carpathians, there is a marked trend to entrance directions 10°–15° at the cost of second, complementary direction 70°–75°.

The analysis of lineament interpreted at the radar images, show that they reflect the geological structures. The comparison of lineaments with results of tectonic studies in the Carpathians indicates its discontinuous character, mainly faults and fracture zones. They are oblique to the course of the fold structures, mostly in systems of two crossing directions at an angle 50°–60°. They could be interpreted as a system of complementary shears. Lineaments direction, perpendicular or lightly oblique to the course of fold structures, represent mostly the intersection view of faults and fractures dipped vertically or nearly vertically. It is possible to observe at the radar images faults dipping more gently. They could be identified as lineaments of the less regular course, closely related to morphology. Unequivocal identification of lineaments as a discontinuities enable to apply some elements of tectonic analysis for their investigation.

**Key words:** the Carpathians, SLAR, radar image, photogeology, lineament, tectonics

Celem opracowania było wykorzystanie zdjęć radarowych do rozpoznania struktur tektonicznych (głównie nieciągłych) w obrębie jednostek płaszczowinowych na terenie Karpat. Jak wykazały dotychczasowe doświadczenia lotnicze zdjęcia radarowe mogą być niezwykle przydatne dla interpretacji geologicznej w obszarach górskich. Po uzyskaniu w 1978 r. lotniczych materiałów radarowych dokonano ich wstępnej interpretacji, a na terenie Karpat dokonano analizy porównawczej z wynikami interpretacji zdjęć satelitarnych (Doktor & Graniczny, 1982a).

Interpretacją zdjęć radarowych objęto teren Karpat zewnętrznych oraz niewielki fragment Karpat wewnętrznych obejmujący Podhale i Pieniny.

Obszar Karpat zewnętrznych określany również jako Karpaty fliszowe powstał ze sfałdowania piaszczysto-ila-nych osadów wieku od jury do dolnego miocenu oraz nasunięcia ich na rów przedgórski w środkowym i górnym miocenie (Książkiewicz, 1972; Kotlarczyk, 1985; Wójcik, & Jugowiec, 1998). Wyróżnia się tu wiele jednostek strukturalnych o zróżnicowanej budowie wewnętrznej. Najbardziej wewnętrznym elementem jest jednostka magurska w

obrzebie której wyróżnia się cztery podjednostki (krynicką, bystrzycką, raczańską i Siar). W obrębie tej jednostki ogniw piaszkowcowe, jako bardziej odporne i zaznaczające się w rzeźbie, przeważają w obrębie eoceńsko-oligocieńskich i eoceńskich warstw magurskich (piaskowce magurskie i piaskowce z Wątkowej), piaskowców z Piwnicznej, piaskowców ciężkowickich, pasierbieckich i osieleckich. W obrębie kredowo-paleoceńskich warstw inoceramowych można wyróżnić piaskowce z Mutnego, piaskowce z Jaworzynki, piaskowce z Krzyżowej, piaskowce szczawnickie, piaskowce jarmuckie i inne (Wójcik i in., 1996). Jednostka magurska jest nasunięta w zachodniej części na stosunkowo wąską strefę jednostek przedmagurskich, a na wschodzie na jednostkę dukielską, których to osady ukazują się w oknach tektonicznych.

Środkową część polskiego odcinka Karpat zajmuje jednostka śląska, u czoła której wąskim pasem ciągnie się jednostka podśląska. Serie skalne o znacznym udziale piaskowców występują w obrębie warstw godulskich, istebniańskich i krośnieńskich oraz piaskowcach w ciężkowickich, cergowskich i kliwskich (Wójcik i in., 1996). Najbardziej zewnętrzną jednostką skolską (Nowak, 1914; Książkiewicz, 1972) występuje głównie w północnej i wschodniej części polskich Karpat. U czoła nasunięcia karpacciego występuje strefa pofałdowanego miocenu (Książkiewicz, 1972; Ney, 1968; Kotlarczyk, 1985).

\*Państwowy Instytut Geologiczny, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa

\*\*Państwowy Instytut Geologiczny, Oddział Karpacki, ul. Skrzatów 1, 31-560 Kraków

Na terenie zachodniej części Karpat główne struktury fałdowe, jak i przebieg nasunięć układu się wzdłuż kierunku SW–NE. W rejonie między południkiem Kalwarii a doliną Raby struktury fałdowe zmieniają swój przebieg na zbliżony do równoleżnikowego, a od doliny Wisłoki ich przebieg zmienia się na NW–SE (Żyto i in., 1988–1989).

W badaniach geologicznych przy pomocy metod teledetekcyjnych wyznacza się najczęściej na zdjęciach lineamenty. O lineamentach wyznaczanych przy pomocy metod teledetekcyjnych i ich znaczeniu w geologii pisali ponad 20 lat temu Bażyński i Graniczny (1978). Definicja „lineamentu”, którą wprowadził do literatury anglosaskiej Hobbs (1904, 1912), a ugruntował w dobie satelitów O’Leary i in. (1976) nie uległa zmianie. Dla przypomnienia *lineament to możliwa do zinterpretowania cecha linio-wa powierzchni (lub ich kompozycja) w całości lub na pewnych odcinkach zorientowana prostoliniowo i odzwierciedlająca prawdopodobnie pewne zjawiska w podłożu*. W Polsce stosuje się definicję zaproponowaną przez cytowanego zespół geologów amerykańskich. Można ją odnaleźć w opracowaniach Bażyńskiego (1978, 1981) i Ostaficzuka (1978). Bażyński i Graniczny (1978) dodali jednak przedrostek „foto” oznaczający, że termin ten został użyty w znaczeniu interpretacji fotogeologicznej.

Pierwsza mapa fotolineamentów na obszarze całych Karpat Zachodnich powstała w wyniku współpracy polsko-czechosłowackiej na początku lat 80. (Doktor i in., 1985). Autorzy mapy zwrócili uwagę na dwie grupy fotolineamentów, jedną nawiązującą do przebiegu fałdów oraz drugą, reprezentującą prawdopodobnie przypuszczalne nieciągłości tektoniczne. W ramach pierwszej grupy, zwrócono uwagę na potwierdzenie się wszystkich znanych kierunków fałdów: karpackiego (NW–SE), śląskiego (NE–SW) oraz tatrzańskiego (W–E). Dalsze badania Doktora i in. (1990) wykazały, że główne strefy nieciągłości Karpat Zachodnich charakteryzują się wachlarzowatym rozkładem kierunków NW–SE na zachodzie do NE–SW na wschodzie.

#### Materiały, metodyka i zakres badań

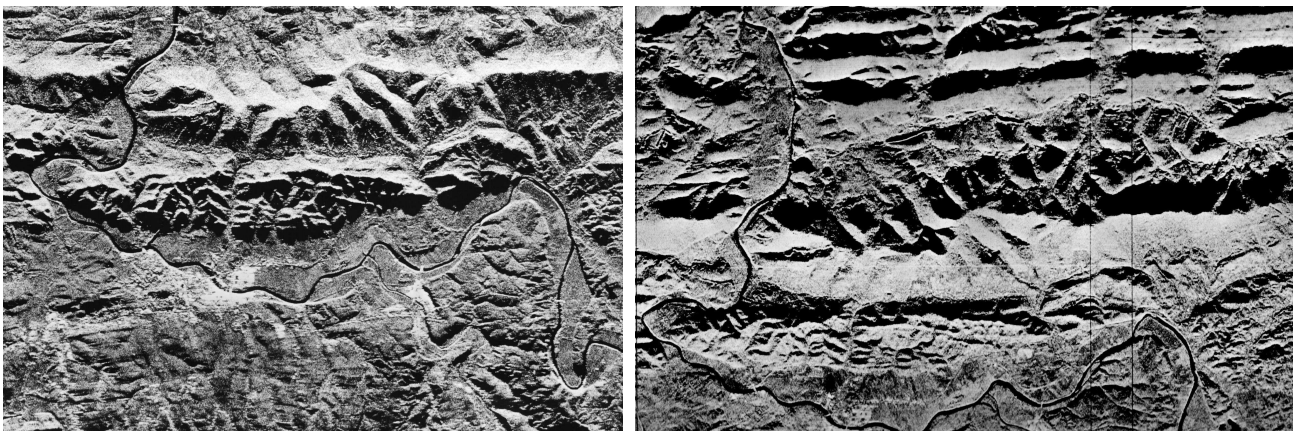
Do interpretacji wykorzystano rosyjskie zdjęcia radarowe wykonane przy zastosowaniu systemu bocznego wybierania — TOROS. Obrazowanie radarowe polega na

emitowaniu przez antenę krótkich impulsów (rzędu 0,1 sek.), a następnie rejestrację tego sygnału odbitego od powierzchni obiektu. Czas nadejścia odbitej fali i natężenie rejestrowanego sygnału zależy od charakterystyki obiektu. Sygnał rejestrowany jest na filmie linia po linii odpowiadającej przebiegowi wiązki skanującej powierzchnię terenu. Szerokość obrazowanego pasa wynosi ok. 15 km. Główne parametry systemu:

- długość emitowanej fali radarowej — 2,6 cm
- szerokość wiązki radarowej — 30 m
- kąt nachylenia anteny (kąt depresji) — 55°
- sygnał nadawany i odbierany spolaryzowany jest horyzontalnie.

Zdjęcia radarowe wyróżniają się kilkoma cechami, które w pozytywny sposób oddziałują na czytelność elementów terenu: boczny kąt padania wiązki promieni radarowych powoduje znaczące podwyższenie czytelności liniowych struktur geologicznych takich jak uskoki, spękania, elementy litologii. Przeglądowość zdjęć radarowych wynika ze skali i zdolności rozdzielczej natomiast uniwersalność — z faktu, iż mogą one być wykonywane w dzień i w nocy oraz podczas występowania pokrywy chmur. Zdecydowanie negatywną cechą tych zdjęć jest ich niska kartometryczność wynikająca z parametrów technicznych systemu (nierównomierność przesuwu filmu, na którym rejestrowany jest obraz i braku dobrej stabilizacji anten), małą dokładności nawigacji (znoszenie samolotu przy sile wiatru powyżej 5 m/sek., wychylenie samolotu na boki, zmiany prędkości lotu samolotu), wpływu ukształtowania powierzchni terenu (radarowy skrót perspektywiczny powodujący zniekształcenia obrazowanych obiektów — efekt „rybiej łuski”, odwrócenie rzeźby — powstanie zjawiska podobnego do efektu pseudostereoskopowego (ryc. 1) oraz powstawanie miejsc nieczytelnych wskutek silnego cienia radarowego, który to efekt był niwelowany przez wielokrotne naloty).

Na kartometryczność zdjęć radarowych wpływ mają głównie dwa pierwsze czynniki, tzn. charakterystyka techniczna systemu oraz mała dokładność nawigacji. Dodatkowo niefortunnym czynnikiem wpływającym na dokładność zdjęcia, wynikającym z charakterystyki systemu TOROS, jest przypadkowość zakłóceń mających wpływ na kartometryczność zdjęcia. Ocena kartometrycz-



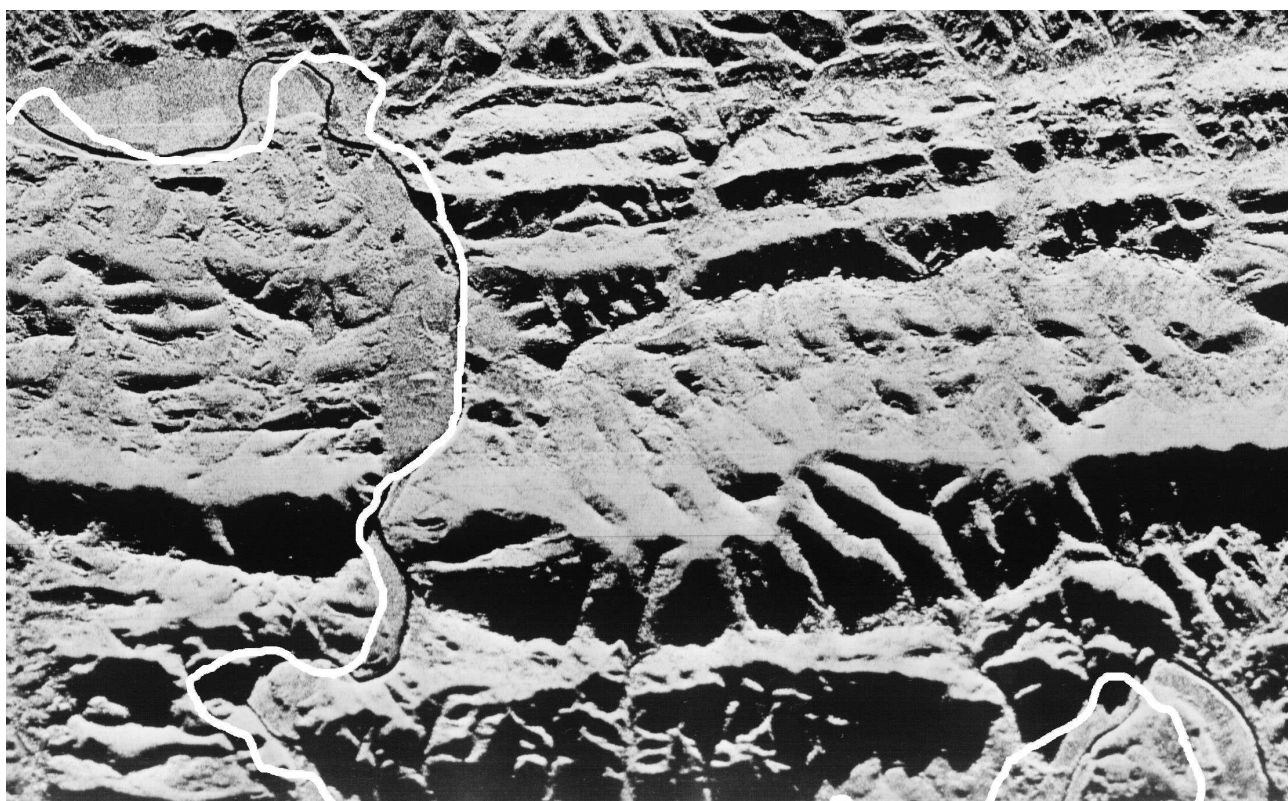
**Ryc. 1.** Zdjęcie radarowe nr 1277 wykonane z prawej burty samolotu, nr 1207 wykonane z lewej burty samolotu — rejon Tyrawy Solnej. Na prawym zdjęciu widoczny efekt odwrócenia rzeźby. Można zauważyć, że oba zdjęcia odwrócone o 180° zamieniają się efektem odwrócenia rzeźby

**Fig. 1.** Radar image no. 1277 made from the right side of the fuselage and no. 1207 from the left side of the fuselage, covering the Tyrawa Solna region. On the right image effect of the relief inversion could be observed

ności zdjęć wykonanych systemem TOROS (Kaczyński, 1975) przeprowadzona w Instytucie Geodezji i Kartografii pozwoliła określić średni błąd zniekształceń wzdłuż linii lotu na ok. 120 m w terenie, a prostopadłe do linii lotu ok. 490 m.

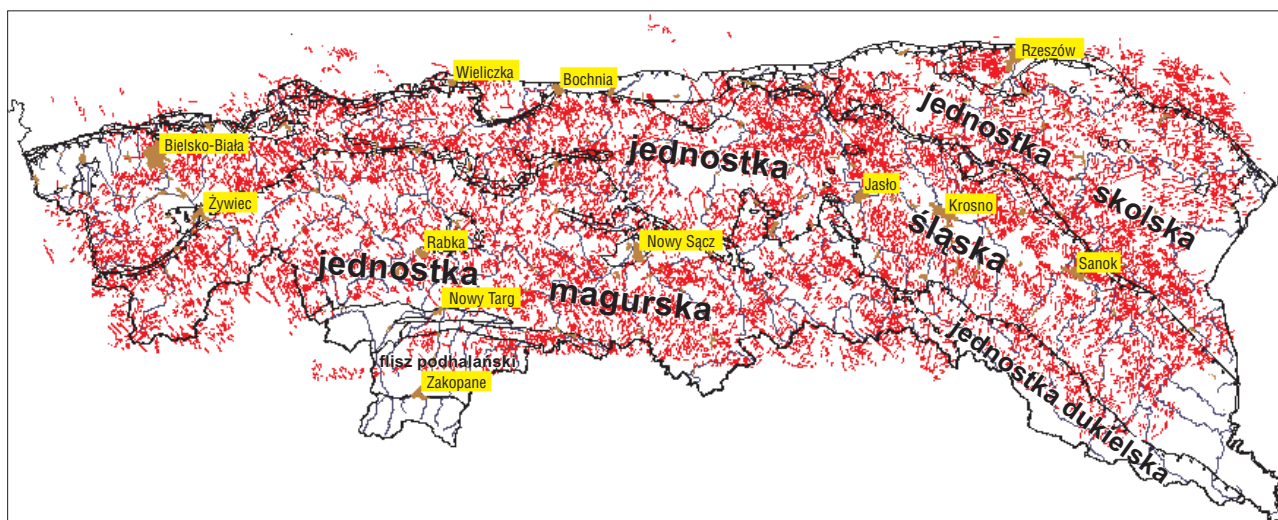
Wykonane w trakcie interpretacji pomiary na diapozytywach pokazały, że różnica między tymi samymi zidentyfikowanymi obiektami na sąsiednich szeregach dochodzi do 2 cm (2 km w skali zdjęcia) na długości sceny, a po porównaniu z mapą topograficzną nawet do 3 cm (ryc. 2).

Niedogodność tą minimalizowano poprzez przetworzenie scyfrowanej mapki interpretacyjnej każdego zdjęcia radarowego według punktów pasowania. Cały obszar Karpat w obrębie granic Polski, pokrywa ok. 260 zdjęć radarowych. Ze względu na specyfikę wykonywania zdjęć radarowych, polegający na wykonywaniu kolejnych równoległych nalołów z jednoczesnym wykonywaniem obrazowania z obydwu stron (burt) lecącego samolotu, większa część obszaru była pokryta dwukrotnie. W konsekwencji powstało wiele pasów zdjęć w różnym stopniu pokrywających ten sam teren. Dlatego do interpretacji wykorzy-



Ryc. 2. Nałożony przebieg rzeki San ze zdjęcia nr 1207 na fragment zdjęcia nr 1172. Przykład zniekształceń powstających podczas obrazowania radarowego

Fig. 2. Example of disturbances appearing at the radar imagery, section of the San River from image no. 1207 superimposed at the image no. 1172



Ryc. 3. Mapa fotolineamentów radarowych Karpat interpretowanych ze zdjęć radarowych w skali 1 : 100 000

Fig. 3. Map of the lineaments interpreted at the radar images of the Carpathians in the scale 1 : 100,000

stano jako główne sceny, 126 diapozytywów czarno-białych w skali 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. Podczas interpretacji zdjęć radarowych wydzielano tylko fotolineamenty: odpowiadające strukturom nieciągłym oraz granicom litologicznym. Wyniki po scyfrowaniu przeniesiono na wspólny podkład i uzyskano mapę fotolineamentów radarowych Karpat (ryc. 3), która mogła być wykorzystana do analizy statystycznej.

Mapy zagęszczenia fotolineamentów i diagramy wykonano przy pomocy oprogramowania MAGEST opracowanego przez B. Żuka. Program został opracowany w celu wyliczenia gęstości lineamentów w węzłach siatki regularnej. Gęstość jest liczona w oknie filtru — obrotowym lub stacjonarnym. Przez filtr rozumie się obszar zdefiniowany przez użytkownika w postaci prostokąta, kwadratu, elipsy lub koła. W celu wyliczenia gęstości zostaje dokonany podział lineamentów na elementarne odcinki zorientowane, których długość określa w zależności od założonych efektów użytkownik. Ilość zliczonych w zdefiniowanym oknie filtra elementarnych odcinków zorientowanych określa gęstość lineamentów zapisywaną w węzle siatki regularnej.

### Wyniki fotointerpretacji

Zdjęcia radarowe dostarczają wiele danych dotyczących tektoniki, a szczególnie w obszarach o takiej charakterystyce morfologicznej, jak Karpaty. Dotychczas wykonywane opracowania w mniejszym czy większym stopniu wykorzystujące dane uzyskane z interpretacji zdjęć radarowych przeważnie traktowały fotolineamenty jako przejaw konkretnych zjawisk, którym próbowano dawać określone interpretacje geologiczne lub określone cechy

budowy geologicznej podłoża (Doktór & Wilczyński, 1981; Doktór & Graniczny, 1982b).

W wyniku interpretacji lotniczych zdjęć radarowych Karpat wydzielono ponad 17 000 lineamentów (ryc. 3). Na załączonej mapie są widoczne miejsca pozbawione, lub w niewielkim stopniu pokryte lineamentami, które odpowiadają nieczytelnym lub słabo czytelnym na zdjęciach radarowych obszarom kotlin czy dużych dolin rzecznych (ryc. 3, 4).

Dla otrzymanego zbioru wykonano wiele przetworzeń. Pierwszym rodzajem przetworzenia było wykonanie mapy gęstości fotolineamentów przy zastosowaniu filtru kołowego o promieniu 3 km (ryc. 5).

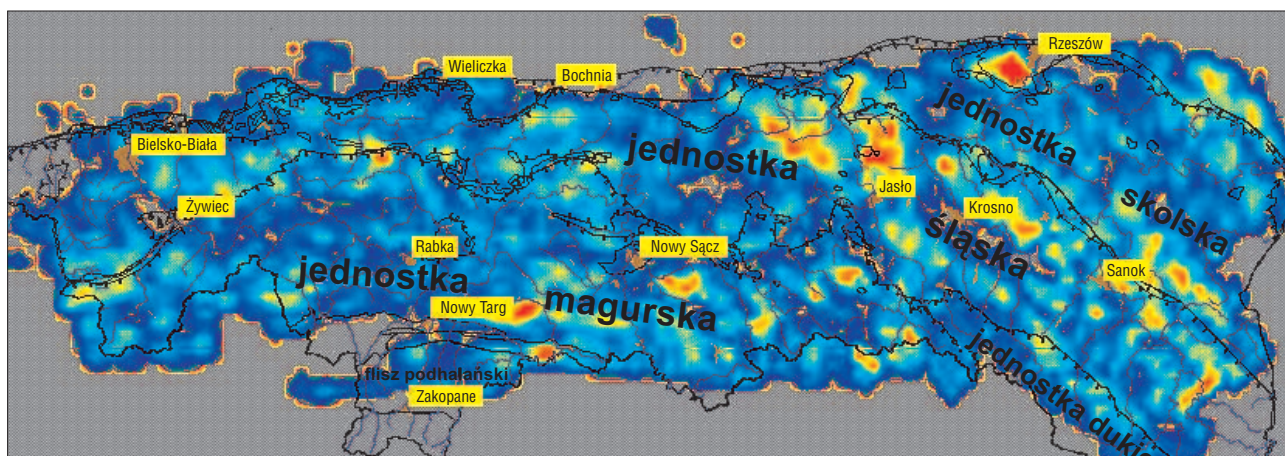
W założeniu ten rodzaj przetworzenia, nie preferujący żadnego z kierunków, pokazał rozkład i natężenia występowania fotolineamentów na całym analizowanym obszarze. Otrzymano obraz izolinii gęstości fotolineamentów pokazujący główne strefy występowania struktur tektonicznych na terenie Karpat, gdzie można wyróżnić kilka obszarów cechujących się wyraźnym zagęszczeniem fotolineamentów (ryc. 5). Szczególnie zagęszczenia fotolineamentów jest widoczne we wschodniej części Karpat. Widoczne w rejonie Rzeszowa duże zagęszczenie występowania fotolineamentów może wynikać z nałożenie się fotolineamentów z różnych kalek fotointerpretacyjnych, gdyż w tym miejscu zbiegały się szeregi zdjęciowe uzyskane z nalotów o kierunku NW–SE z części wschodniej Karpat i równoleżnikowych z zachodniej. Nie można jednak wykluczyć innych przyczyn i występujące w rejonie Rzeszowa, jak i w kilku innych miejscach maksima zagęszczeń wymagają szczegółowej analizy.

W zachodniej części Karpat można wyróżnić dwie lub trzy strefy o zwiększonej gęstości fotolineamentów. Pierwsza taka strefa dowiązuje do nasunięciem jednostki magurskiej i przedmagurskiej na jednostkę śląską. Obszary o podwyższonej gęstości stwierdzono w rejonie Koniakowa,



Ryc. 4. Fragment zdjęcia nr 828. Rejon Kotliny Nowotarskiej. Widoczne różnice w odwzorowaniu radarowym obszarów o bogatej morfologii — obszary fliszu magurskiego (północna część zdjęcia) i słabo czytelne tereny kotliny nowotarskiej

Fig. 4. Example of interpretation of image no. 1207 — Nowy Targ Kettle. Large differences in radar signal are visible, between areas of differentiated morphology (Magura Flysh) and relatively flat areas, west from Nowy Targ



**Ryc. 5.** Mapa gęstości fotolineamentów radarowych Karpat. Filtr kołowy,  $r = 3$  km  
**Fig. 5.** Map of the radar lineaments density of the Carpathians, rotated filter,  $r = 3$  km

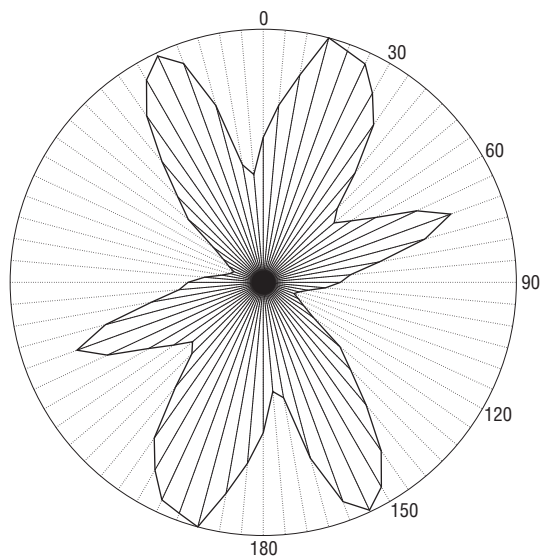
na wschód od Żywca oraz między Kalwarią a Myślenicami (ryc. 5). Występują one w strefach, gdzie na mapach geologicznych znaczone są uskoki o cechach zrzutowo-przesuwczych (Żytko i in., 1988–1989). W czasie szczegółowej analizy rozkładu kierunków fotolineamentów radarowych dla zachodniej części Karpat stwierdzono, że dominującym jest kierunek  $150^{\circ}$ – $155^{\circ}$  oraz komplementarny względem jego kierunku  $25^{\circ}$ – $40^{\circ}$ . Na tle Karpat Zachodnich rejon Koniakowa wyraźnie zaznaczający się na mapie gęstości (ryc. 5) jest najprawdopodobniej związany z przebiegiem nasunięć, gdyż duży udział mają tu lineamenty o kierunku  $75^{\circ}$ , czyli prawie równoległe do przebiegu nasunięć w tym obszarze (ryc. 7) oraz lineamenty o kierunku  $155^{\circ}$  (ryc. 9, 10).

Na terenie jednostki magurskiej obszary o podwyższonej gęstości są zachowane w postaci izolowanych stref. Na zachodzie taka strefa zaznacza się w rejonie masywu Wielkiej Raczy oraz na południe od Babiej Góry, co wydaje się mieć związek z strefami nasunięć podjednostki bystrzyckiej na raczańskiej. Znaczne zagęszczenie fotolineamentów o przebiegu zbliżonym do równoleżnikowego występuje w strefie od Nowego Targu po dolinę Popradu, przy czym największą liczebnie grupę fotolineamentów zarejestrowa-

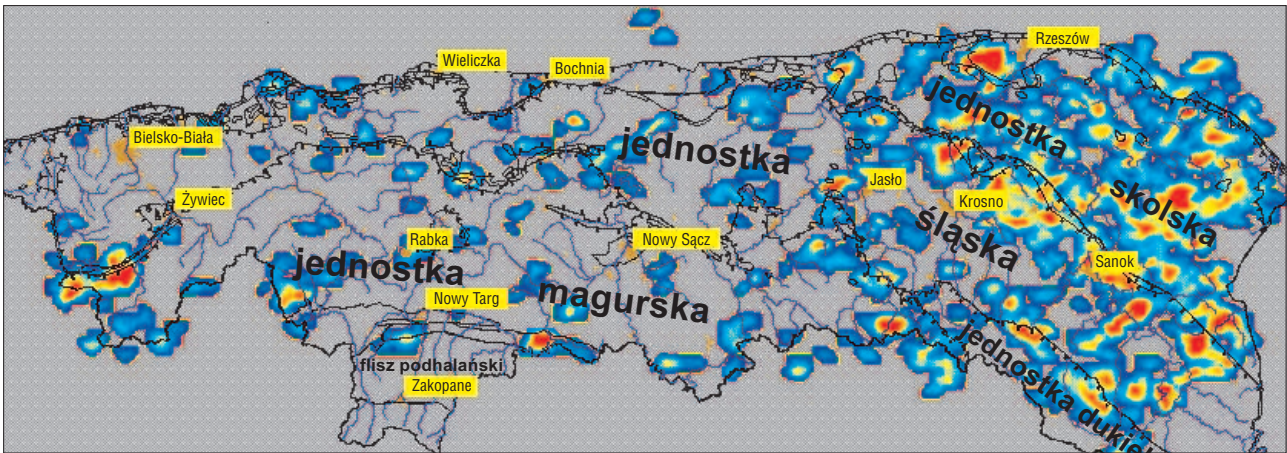
no w obrębie pasma Lubania zbudowanego w przewodzie z gruboławicowych piaskowców magurskich. W tym obszarze trudno doszukać się bezpośrednich związków w budowie powierzchniowej, natomiast przebieg strefy o podwyższonej liczebności fotolineamentów wyraźnie dowiązuje do wyznaczonej przez Żytko (1999) depresji w podłożu Karpat. Duże zagęszczenie fotolineamentów stwierdzono na terenie Pienin (ryc. 5). Obszarem wyróżniającym się na terenie jednostki magurskiej są tereny położone na SE od Nowego Sącza wzdłuż strefy nasunięcia podjednostki bystrzyckiej na raczańskiej. We wschodniej części jednostki magurskiej obszary o zwiększonej liczebności fotolineamentów układają się wzdłuż stref o kierunku SW–NE od Krynicy do Folsza (ryc. 5), co najprawdopodobniej może mieć związek z linią uskokuwą „Ruźbachów” (wschodniotatrzańska) lub strefą Murań–Jasło (Żytko, 1999) oraz dowiązuje do wyraźnej depresji w podłożu Karpat (Żytko, 1999) i strefy maksymalnych gradientów nachylenia powierzchni podłoża skonsolidowanego (Rytko & Tomasz, 1999).

Bardzo interesujący obraz otrzymano dla wschodniej części Karpat (ryc. 5), gdzie obszary o podwyższonej gęstości fotolineamentów układają się w pewne strefy. Największe ich zagęszczenie na tle Karpat występuje w strefie przebiegu fałdu Brzanka–Liwocz oraz między Jasłem a zatoką Pilzna. Na wschód od południka Jasła strefa radarowych układa się prawie równoległe do przebiegu głównych struktur tektonicznych, wzdłuż stref o przebiegu NW–SE. Jedną z nich przebiega wzdłuż północno-wschodnich granic Dołów Jasielsko-Sanockich (Na NE od Krosna), a druga na południe od Jasła i jest usytuowana w południowej części Dołów Jasielsko-Sanockich, a ku wschodowi nakłada się na nasunięcie jednostki dukielskiej na śląską. Przy bliższej i szczegółowej analizie można zauważyć, że strefa ta przesuwana stopniowo idąc od zachodu z fałdów północnych na coraz bardziej południowe, aż do nasunięcia dukielskiego na wschodzie.

Kolejna strefa o podwyższonej liczbie lineamentów pokrywa się z przebiegiem nasunięcia śląsko-podśląskiego w rejonie Sanoka (ryc. 5). We wschodniej części Karpat występują też słabiej zaznaczające się strefy zagęszczonych fotolineamentów o przebiegu SW–NE. Zaznacza się to w obszarze przygranicznym w rejonie działu wodnego Sanu i Strwiąża. W okolicach Przemysła podwyższona liczebność fotolineamentów można wiązać z nasunięciem

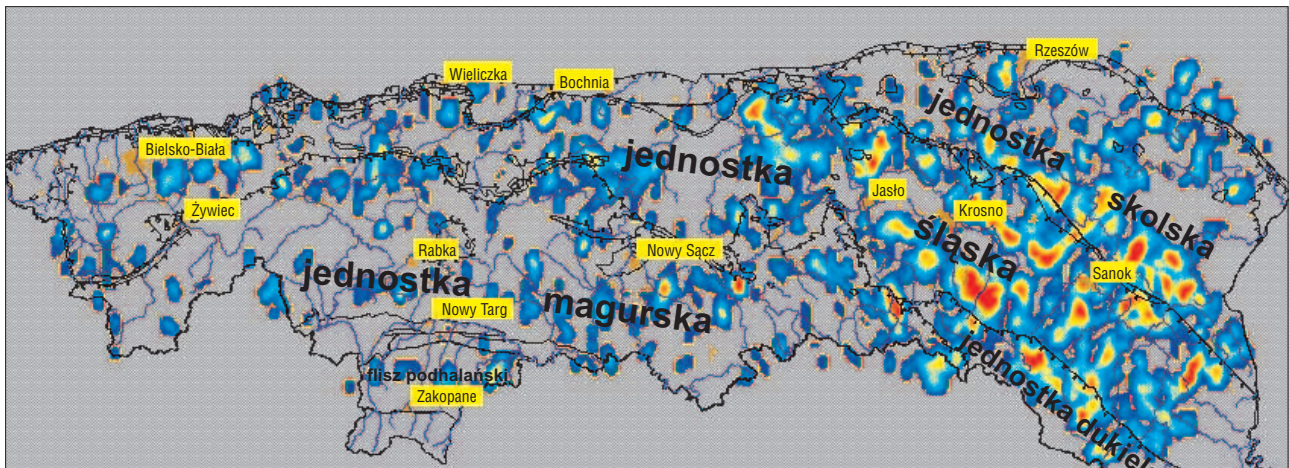


**Ryc. 6.** Rozkład kierunków fotolineamentów radarowych dla całego obszaru Karpat  
**Fig. 6.** Distribution of the radar lineaments in the Carpathians



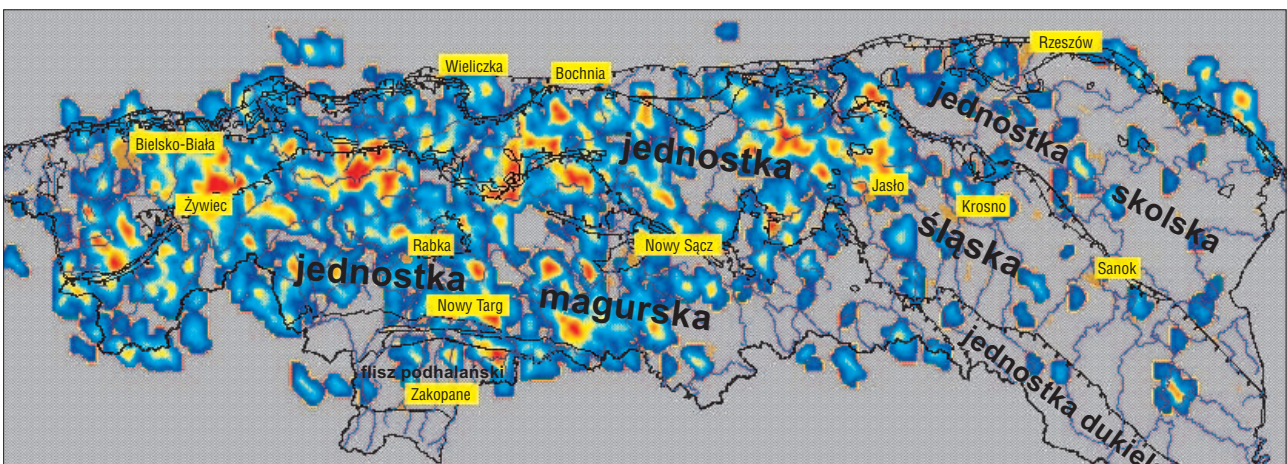
**Ryc. 7.** Mapa gęstości fotolineamentów radarowych Karpat z analiz kierunków. Filtr prostokątny, 2x4 km o nachyleniu 15°. Kierunek fotolineamentów 75°, długość elementarnych odcinków zorientowanych = 1 km, oczko siatki regularnej 2 km

**Ryc. 7.** Map of the radar lineaments density of the Carpathians with directional analysis, rectangular filter, 2x4 km, dipping 75° (lineament azimuth 15°), elementary oriented unit = 1 km, size of regular network 2 km



**Ryc. 8.** Mapa gęstości fotolineamentów radarowych Karpat z analiz kierunków. Filtr prostokątny, 2x4 km o nachyleniu 75°. Kierunek fotolineamentów 15°, długość elementarnych odcinków zorientowanych = 1 km, oczko siatki regularnej 2 km

**Fig. 8.** Map of the radar lineaments density of the Carpathians with directional analysis, rectangular filter, 2x4 km, dipping 15° (lineament azimuth 75°), elementary oriented unit=1 km, size of regular network 2 km



**Ryc. 9.** Mapa gęstości fotolineamentów radarowych Karpat z analiz kierunków. Filtr prostokątny, 2x4 km o nachyleniu 115°. Kierunek fotolineamentów 155°, długość elementarnych odcinków zorientowanych = 1 km, oczko siatki regularnej 2 km

**Fig. 9.** Map of the radar lineaments density of the Carpathians with directional analysis, rectangular filter, 2x4 km, dipping 115° (lineament azimuth 155°), elementary oriented unit=1 km, size of regular network 2 km

karpackim oraz strefą jednostek miocenu sfałdowanego występujących przed czołem nasunięcia karpackiego.

Dla całego zbioru fotolineamentów wykonano diagram rozkładu kierunków na całym analizowanym obszarze Karpat. Z wykonanego zbiorczego diagramu rozkładu kierunków fotolineamentów wynika, że lineamenty radarowe grupują się w trzech kierunkach: ok.  $15^\circ$ ,  $75^\circ$  i  $155^\circ$  (ryc. 6).

Należy tu podkreślić, że są to szerokie maksima. Szczególnie jest rozszerzona dominanta reprezentująca kierunki grupujące się w zakresie  $15^\circ$ – $30^\circ$ . Kierunki grupujące się wokół tych trzech dominant posłużyły jako kierunki, według których dokonano przetworzenia map gęstości fotolineamentów.

Mapa gęstości fotolineamentów dla kierunku  $75 \pm 5^\circ$  pokazała, że zdecydowanie przeważają we wschodniej części obszaru Karpat na terenie jednostki skolskiej i północnej części jednostki śląskiej (ryc. 7). Największe wartości otrzymano dla strefy nasunięcia śląskiego i dukielskiego. W tym obszarze kierunki fotolineamentów są przeważnie poprzeczne w stosunku do przebiegu struktur fałdowych. Poza wschodnią częścią Karpat, wyraźnie podwyższona strefa fotolineamentów o kierunku  $75^\circ$  występuje w okolicach Koniakowa (ryc. 7), gdzie fotolineamenty przeważnie dowiązują do przebiegu nasunięć w tej części Karpat, a szczególnie do nasunięcia magurskiego i podmagurskiego. Podobny związek można znaleźć na południe od Babiej Góry, gdzie kierunek ten nawiązuje do przebiegu złuskowań i nasunięć, a w Pieninach do przebiegu głównych struktur.

Kierunek fotolineamentów  $15^\circ \pm 5^\circ$  (subpołudnikowy) przeważa również we wschodniej części obszaru Karpat i jest on charakterystyczny dla wschodniej części jednostki śląskiej i południowej części jednostki dukielskiej (ryc. 8), gdzie osiąga on największe wartości częstotliwości występowania.

Elementy liniowe występujące na zdjęciach radarowych mogą być tu interpretowane jako poprzeczne uskoki zrzutowo-przesuwcze, które związane są głównie z strukturami fałdowymi występującymi na terenie Centralnej Depresji Karpackiej. W pozostałej części Karpat kierunek ten też występuje, lecz częstotliwość jego jest znacznie niższa (ryc. 8). Wyniki te są zgodne z wnioskami Zuchewicza (1997), którego osie maksymalnej kompresji obliczone dla poprzecznych spękań w utworach młodszych od kredy

układają się NE–SW do NNE–SSW, to jest niemal prostopadle do rozciągłości nasunięć i osi fałdów, co ma miejsce we wschodniej części Karpat.

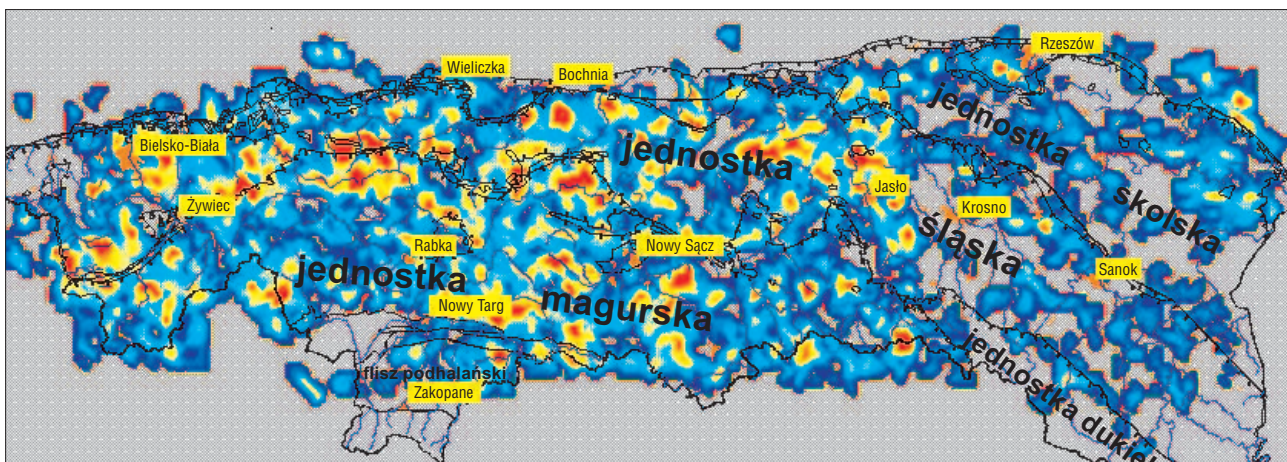
Trzeci kierunek fotolineamentów —  $155^\circ \pm 5^\circ$  jest charakterystyczny dla obszaru zachodniej części Karpat polskich (ryc. 9). Przy czym wyróżniają się tu obszary związane ze strefą nasunięcia magurskiego. Kierunki obserwowanych fotolineamentów są poprzeczne do przebiegu tego nasunięcia i wskazują na dominację uskoków przesuwczych, z których część można zidentyfikować z uskokiemi znacznymi na mapach geologicznych.

Wykonano również przetwarzanie polegające na tworzeniu map gęstości fotolineamentów grupujących się w dwóch wybranych kierunkach (ryc. 10).

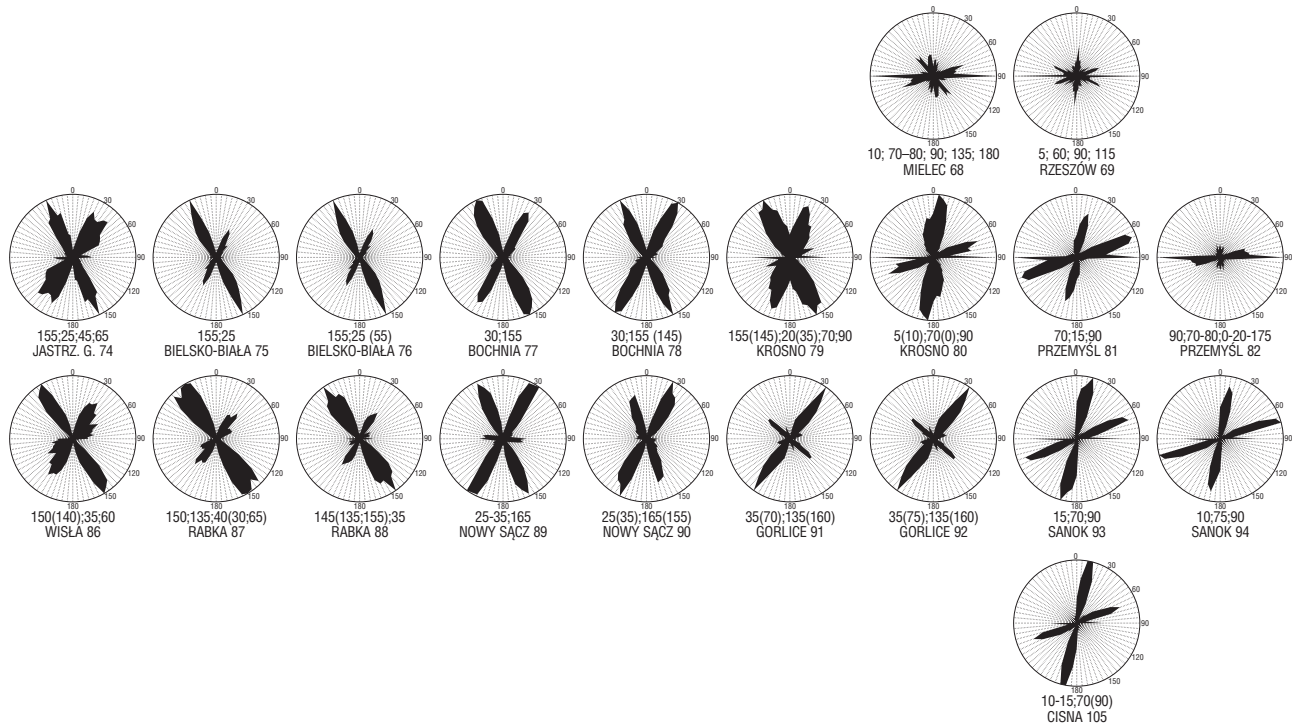
Z załączonej róży kierunków wynika, że zdecydowana większość fotolineamentów grupuje się w dominanty o trzech kierunkach i to tak rozłożonych, że można je interpretować jako dwa systemy komplementarne  $15^\circ$ ;  $75^\circ$ – $85^\circ$ ;  $155^\circ$  (kierunek ok.  $75^\circ$ – $85^\circ$  reprezentujący szeroką grupę kierunków, byłby wspólny dla obu systemów). Dlatego zaprojektowano przetwarzanie ze skokiem filtra  $60^\circ$ , który odpowiada zakładanemu kątowi pomiędzy fotolineamentami mającymi być odzwierciedleniem systemu nieciągłości komplementarnych. Ograniczenie wynikające z własności programu MAGEST pozwoliło wyznaczyć obszary występowania tylko jednego z zakładanych systemów komplementarnych tzn.  $85^\circ$ ;  $155^\circ$ . Otrzymano mapę gęstości tych dwóch kierunków, które dominują na zachodnim obszarze analizowanej części Karpat. Mapa ta pokazuje że występuje tu typowy układ uskoków poprzecznych.

Mapy gęstości dały ogólny pogląd na częstotliwość występowania fotolineamentów oraz ich zagęszczenia o określonym kierunku. Nie dają jednak obrazu zmienności kierunków fotolineamentów w zależności od miejsca usytuowania analizowanego fragmentu obszaru na terenie Karpat. Próbę rozwiązania części tego problemu dała analiza rozkładu fotolineamentów na poszczególnych arkuszach map w skali 1 : 100 000. Zestawione róże kierunków dla poszczególnych arkuszy map pokazały zmienność kierunków i częstotliwości fotolineamentów w zależności od ich położenia w Karpatach (ryc. 11).

Na podstawie róży kierunków stwierdzono, że dla arkuszy w zachodniej części Karpat od granicy z Czechami



**Ryc. 10.** Mapa gęstości fotolineamentów radarowych Karpat z analizą kierunków. Filtr prostokątny, obrotowy  $2 \times 4$  km ze skokiem  $60^\circ$ . Kierunki fotolineamentów  $15^\circ$ ;  $155^\circ$ , długość elementarnych odcinków zorientowanych = 1 km, oczko siatki regularnej 2 km  
**Fig. 10.** Map of the radar lineaments density of the Carpathians with directional analysis, rectangular filter, rotated  $2 \times 4$  km, pitch  $60^\circ$  (lineament azimuths  $15^\circ$ ;  $155^\circ$ ), elementary oriented unit = 1 km, size of regular network 2 km



**Ryc. 11.** Rozkład kierunków fotolineamentów radarowych Karpat obliczonych dla poszczególnych arkuszy mapy w skali 1 : 100 000. Nazwy arkuszy wg *Mapy topograficznej Polski w skali 1 : 100 000*, wydanie turystyczne. Numery arkuszy w układzie „1942”. Pod każdym diagramem podano wartość kierunku fotolineamentów w kolejności częstotliwości występowania na danym arkuszu. W nawiasach kierunki drugorzędne

**Fig. 11.** Distribution of the radar lineaments in the Carpathians calculated for separate map sheets at the scale 1 : 100,000. Map sheets named according to the *Topographic map of Poland at the scale 1 : 100,000*, touristic edition. Numbers of map sheets according to “1942” projection system. In each diagram values of the lineaments azimuths are presented in order of their frequency, secondary directions are indicated in brackets

po Bochnię i Rabkę dominującym kierunkiem fotolineamentów jest kierunek ok.  $155^\circ$  i towarzyszy mu drugorzędny kierunek przybliżony do kierunków w zakresie ok.  $15^\circ$ – $35^\circ$ . Wyjątek stanowi arkusz Jastrzębie, gdzie obydwa kierunki osiągają prawie jednakową wartość (ryc. 11). W dolnym szeregu arkuszy, obejmujących południową część Karpat polskich, jeszcze lepiej są widoczne wielkości maksimum w granicach od  $140$ – $150^\circ$ . Otrzymane dane wyraźnie korespondują z wynikami pomiarów naprężeń skorupy ziemskiej *in situ* w głębokich otworach wiertniczych wykonanych przez Jarosińskiego (1997), który zwrócił uwagę, że w zachodnim segmencie Karpat kierunki NW i NNW są przeważającymi kierunkami największej kompresji poziomej.

Dla środkowej części Karpat, obejmujących arkusze między Bochnią a Krosnem oraz Rabką i Nowym Sączem, dwie grupy kierunków osiągają wyrównane proporcje dominant  $25^\circ$ – $35^\circ$  i  $155^\circ$ – $165^\circ$ , a jedynie na arkuszach Gorlice i Jasło (Gorlice 92) dominują fotolineamenty o kierunku  $25^\circ$ – $35^\circ$ .

Na wschód od Krosna można zaobserwować te same dwie grupy kierunków znajdujące się w szerokich dominantach, na których ujawniają się dwa nowe kierunki, jeden zbliżony do południkowego (rozszerzenie dominanty NNE w kierunku N) oraz drobne maksimum  $70^\circ$ , które na arkuszach przy wschodniej granicy ma już bardzo wyraźnie zarysowaną dominantę występującą razem z kierunkiem subpołudnikowym  $5^\circ$ – $10^\circ$ . Przy północnej granicy Karpat na arkuszu Przemysł wyraźnie widoczna jest para kierunków  $15^\circ$  i  $70^\circ$  oraz równoleżnikowy, który zarysowuje się już od arkusza Krosno (ryc. 11). W kierunku wschodnim przy samej granicy kierunki te są mało wyra-

źne. Arkusze Mielec i Rzeszów położone w strefie nasunięcia karpackiego, reprezentują stosunkowo duże rozproszenie kierunków, poza wąskim ale wysokim maksimum równoleżnikowym widocznym również na poprzednio omawianych diagramach.

Na diagramach obrazujących kierunki fotolineamentów, w NS części obszaru Karpat a obejmującym m.in. arkusze Sanok, Lesko (Sanok 94) oraz Cisna, zaznacza się tendencja do zwiększania się udziału kierunków w przedziale  $10^\circ$ – $15^\circ$ , „kosztem” drugiego, komplementarnego —  $70^\circ$ – $75^\circ$ .

Z przedstawionego materiału wynika, że zmiana dominant fotolineamentów rozkłada się wachlarzowo od  $155^\circ$  na zachodzie poprzez  $75^\circ$  do  $10^\circ$ – $15^\circ$  na wschodzie. Zespoły kierunków fotolineamentów radarowych wyraźnie korespondują z wynikami analizy tektonicznej wykonanej przez Mastellę i Szykaruk (1998), którzy charakteryzując nieciągłości w Karpatach wykazali regionalną zmienność kierunków uskoki od ok.  $10^\circ$  na wschodzie (uskoki prawoskrętne) do ok.  $150^\circ$  na zachodzie oraz drugi zespół uskoki (leuoskrętne) odpowiednio od ok.  $60^\circ$  do ok.  $25^\circ$ . Wyróżnili także trzeci zespół, przecyenny do struktur regionalnych, obejmujący głównie duże uskoki, które w części zachodniej przybierają kierunki  $165^\circ$ , a na wschodzie ok.  $35^\circ$ . Podobne wyniki analizy kierunków nieciągłości w Karpatach są prezentowane u innych autorów zajmujących się zagadnieniami tektoniki nieciągłej w Karpatach, np. Jarosiński (1997), Zuchiewicz (1997).

Wszystkie kierunki wymieniane jako nieciągłości, wraz z ich charakterystyczną cechą zmienności kierunków od



zachodu na wschód znajdują swoje ekwiwalenty w zespołach kierunków fotolineamentów radarowych. Charakterystyczna zmienność kierunków od zachodu na wschód pozwala fotolineamenty radarowe z dużą dozą prawdopodobieństwa uznać za odzwierciedlenie zjawisk tektoniki nieciągłej (uskoki i strefy spękań) w Karpatach. Wyniki te nie potwierdzają sugestii Mastelli i Szyrkaruk (1998) co do wieku uskoków o określonym kierunku (zwłaszcza gdy pierwszy i trzeci zespół mają prawie identyczne kierunki), a raczej zgodne są z wynikami pomiarów współczesnego pola naprężeń Jarosińskiego (1997) co sugeruje ich młodą aktywność związaną z młodym późno neogeńsko-czwartorzędowym wypiętrzaniem.

Przedstawione wyżej rezultaty analizy fotolineamentów radarowych pokazują możliwości tej metody. Rezultaty interpretacji geologicznej są dopiero pierwszymi próbami wskazującymi drogę dalszych badań. Planuje się wykonać m.in. 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. Analiza kierunków fotolineamentów w podziale na jednostki tektoniczne Karpat powinna pomóc odpowiedzieć na pytanie, czy są jakieś wyraźne zależności rozkładu 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, litologiczne, mapy tektoniczne) pozwoli do wykazania zależności wpływu budowy podłoża na tektonikę nieciągłą w jednostkach fałdowych.

### Wnioski

Wyniki prezentowanej analizy kierunków przebiegu fotolineamentów radarowych prowadzą do wniosku, że są one odzwierciedleniem struktur geologicznych. Z przeprowadzonych badań wynika, że fotolineamenty radarowe można identyfikować jako odpowiadające wydłużonym formom morfologicznym — grzbiutom, granicom litologicznym oraz liniom nieciągłości.

Porównanie wyników analizy kierunków fotolineamentów z wnioskami z badań tektonicznych przeprowadzonych przez różnych autorów w Karpatach upoważnia do potraktowania fotolineamentów radarowych, jako odzwierciedlenie struktur nieciągłych — uskoków i stref spękań. Ten rodzaj fotolineamentów 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 ścieżek komplementarnych. Kierunek fotolineamentów o przebiegu prostoliniowym usytuowany prostopadle lub lekko ukośnie do kierunku struktury fałdowej jest w większości intersekcyjnym obrazem nieciągłości o charakterze uskoków i stref spękań o upadzie zbliżonym do pionowego. Na zdjęciach można również zaobserwować nieciągłości o płaszczyznach dużo mniej stromych. Rysują się one jako fotolineamenty o przebiegu mniej regularnym wyraźnie zależnym od morfologii. Jednoznaczna identyfikacja fotolineamentów jako linii nieciągłości pozwala na zastosowanie do ich badania niektórych elementów analizy

tektonicznej. Analiza obserwowanych systemów nieciągłości daje możliwość odtworzenia kierunków głównych osi kompresji, a ilość zgromadzonego materiału może dostarczyć ciekawych wniosków.

Mapy gęstości oraz róże kierunków fotolineamentów są bardzo dobrym narzędziem do analizy materiałów powstających w wyniku fotointerpretacji zdjęć radarowych.

### Literatura

- BAŻYŃSKI J. 1978 — Kierunki zastosowania teledetekcji w geologii w Polsce. Pr. Inst. Geod. i Kart., 25: 65–83.
- BAŻYŃSKI J. & GRANICZNY M. 1978 — Fotolineamenty i ich znaczenie w geologii. Pr. Geol., 26: 288–296.
- DOKTÓR S., DORNIĆ J., GRANICZNY M. & REICHWALDER P. 1985 — Structural elements of Western Carpathians and their Foredeep on the basis of satellite interpretation. Kwart. Geol., 29: 129–138.
- DOKTÓR S. & GRANICZNY M. 1982 — Geologiczna interpretacja zdjęć satelitarnych i radarowych wschodniej części Karpat. Kwart. Geol., 26: 231–245.
- DOKTÓR S. & GRANICZNY M. 1982 — Zdjęcia satelitarne jako źródło informacji pośredniej o wglębnych strukturach geologicznych. Pr. Geol., 30: 666–671.
- DOKTÓR S., GRANICZNY M., KUCHARSKI R., MOLEK M. & DĄBROWSKA B. 1990 — Wglębna budowa geologiczna Karpat w świetle kompleksowej analizy teledetekcyjno-geofizycznej. Pr. Geol., 38: 469–475.
- DOKTÓR S. & WILCZYŃSKI M.S. 1981 — Wstępne dane o tektonice permomezozoiku LZW w świetle prac fotointerpretacyjnych. Pr. Geol., 29: 72–76.
- HOBBS W.H. 1904 — Lineaments of the Atlantic Border region. Geol. Soc. Amer. Bull., 15: 483–506.
- 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. Pr. Geol., 45: 1078–1079.
- KACZYŃSKI R. 1979 — Sprawozdanie techniczne z pracy pt.: Doradztwo naukowe i zorganizowanie wykonania przez ekipę radiocika obrazów radarowych południowej części Polski. Arch. IGiK, Warszawa.
- KOTLARCIK J. 1985 — Evolution of the Carpathian tectogene in the Miocene. Guide to Exc. 4, C-BGA, 13th Congress, Cracow, Poland.
- KSIĄŻKIEWICZ M. 1972 — Budowa geologiczna Polski. T. IV. Tektonika, cz. 3. Karpaty. Wyd. Geol.
- MASTELLA L. & SZYRKARUK E. 1998 — Analysis of the fault pattern in selected areas of the Polish Carpathians. Geol. Quart., 42: 263–267.
- NEY R. 1968 — Rola rygla krakowskiego w geologii zapadliska przedkarpackiego i rozmieszczeniu złóż ropy i gazu. Pr. Geol. Kom. Nauk Geol. PAN, Oddz. w Krakowie, 45: 7–61.
- NOWAK J. 1914 — Jednostki tektoniczne polskich Karpat wschodnich. Arch. Nauk., Lwów, dz. 2, t. 2, z. 2. Lwów.
- O'LEARY D.W., FRIEDMAN J.D. & POHN. H.A. 1976 — Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms. Geol. Soc. Amer. Bull., 87: 1463–1469.
- OSTAFICZUK S. 1981 — Lineamenty jako odwzorowanie zjawisk tektonicznych na tle wybranych przykładów w Polsce. Biul. Geol. UW, 29: 195–267.
- RYŁKO W. & TOMAŚ A. 1999 — Obraz skonsolidowanego podłoża Karpat w świetle badań magnetotelurycznych. Pr. Państw. Inst. Geol., 168: 195–206.
- WÓJCIK A. & JUGOWIEC M. 1998 — The youngest member of the folded Miocene in the Andrychów region (Southern Poland). Pr. Geol., 46: 763–770.
- WÓJCIK A., KOPCIOWSKI R., MALATA T., MARCINIEC P. & NESCIERUK P. 1996 — Propozycja podziału jednostek litostratigraficznych Karpat zewnętrznych. Przew. 67 Zj. Pol. Tow. Geol. w Szczyrku.
- ZUCHIEWICZ W. 1997 — Distribution of jointing within Magura Nappe, West Carpathians, Poland, in the light of statistical analysis. Pr. Geol., 45: 634–638.
- ŻYTKO K. 1999 — Symetryczny układ późnoalpejskich rysów podłoża północnych Karpat oraz ich przedpola i zagórza; szew orogenu i kratonu. Pr. Państw. Inst. Geol., 168: 165–192.
- ŻYTKO K. (red.) 1988–1989 — Geological Map of the Western Outer Carpathians and their Foreland. [In:] Geological Atlas of the Western Outer Carpathians and their Foreland. Państw. Inst. Geol.