

Współczesna aktywność tektoniczna Tatr i Podhala w świetle wyników badań satelitarnej interferometrii radarowej InSAR i PSInSAR

Zbigniew Perski¹



Recent tectonic activity of the Tatra Mts and Podhale (Poland) studied by InSAR and PSInSAR. *Prz. Geol.*, 56: 1082–1086.

Abstract. The paper presents some preliminary results of PSInSAR (persistent scatterers SAR interferometry) processing of the Tatra Mts. and Podhale area in southern Poland. The research is carried out within the framework of a GEO-IN-SAR project aimed to study the recent tectonic activity of selected locations in Poland. As the input for PSInSAR processing 51 ERS-1/2 SAR scenes has been used by obtaining 50 interferograms covering the period from 1992 to 2000. The resulted few hundred PS (Persistent Scatterers) points show relative 1 mm/year uplift of the Zakopane area in respect to Nowy Targ. However, the preliminary interpretation along the transect Zakopane–Nowy Targ shows more complex pattern suggesting recent activity of some faults.

Keywords: SAR interferometry, vertical earth crust movements, deformation measurements, remote sensing, geodynamics

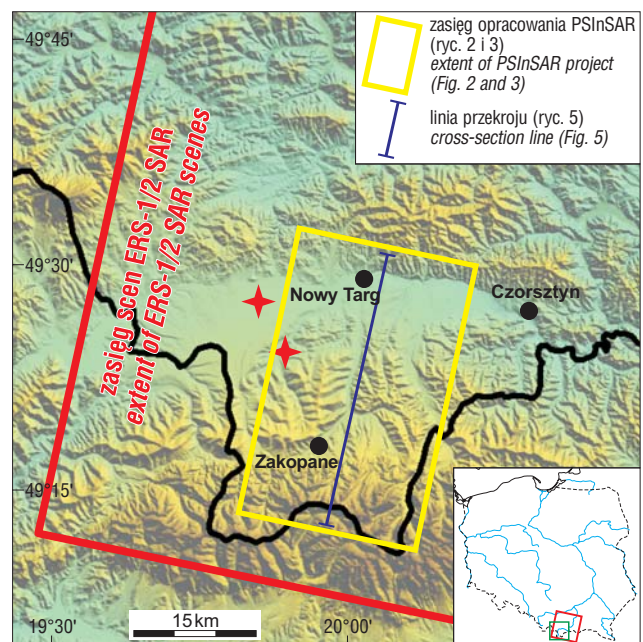
Region Podhala, od północy ograniczony pienińskim pasem skałkowym, a od południa masywem Tatr, charakteryzuje się występowaniem licznych wstrząsów sejsmicznych oraz płytkim występowaniem wód geotermalnych o najwyższej w Polsce temperaturze. Zjawiska te łącznie z wieloma przesłankami geomorfologicznymi świadczą o istnieniu współczesnej aktywności tektonicznej tego obszaru i występowaniu ruchów pionowych. Celem badań prowadzonych przy użyciu techniki InSAR było wykazanie wzajemnej blokowej dynamiki trzech jednostek: masywu Tatr, niecki podhalańskiej i pienińskiego pasa skałkowego. Badania te są prowadzone w ramach projektu GEO-IN-SAR, którego celem jest wykorzystanie najnowocześniejszych osiągnięć satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR) do pomiaru zachodzących współcześnie naturalnych ruchów powierzchni terenu w Polsce i w obszarach przygranicznych. W ramach projektu GEO-IN-SAR zostały wytypowane trzy poligony badawcze:

- ❑ nawiedzony we wrześniu 2004 r. przez silne trzęsienie Ziemi rejon półwyspu Sambia wraz z obszarem Warmii i Pomorza;
- ❑ obszar Wrocławia wraz z terenem rowu tektonicznego Paczkowa, charakteryzujący się występowaniem aktywnych współcześnie uskoku tektonicznych (Perski i in., 2007; Perski & Mróz, 2007);
- ❑ rejon Podhala (ryc. 1).

Geodynamika Tatr i Podhala

Badania geodynamiczne były dotychczas wykonywane na obszarze Tatr (polskich i słowackich) oraz Pienin. Przesłankami do ich podjęcia były obserwacje takich zjawisk geomorfologicznych, jak poprzeczne rowy grzbietowe o świeżych cechach rzeźby, przemieszczenia korytarzy jaskiniowych, a także silne wstrząsy sejsmiczne, np. te w 1995 oraz 2004 r. w zachodniej części Podhala (Guterch i in., 2005).

Na tatrzańskim poligonie geodynamicznym badania metodami geodezyjnymi są prowadzone wzdłuż dwóch głównych trawersów (Makowska & Jaroszewski, 1989; Makowska, 2003): Łysa Polana–Rysy oraz Brzeziny–Świnica.



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru badań na tle obrazu wysokościowego DTED (*Digital Terrain Elevation Data*). Czerwonymi gwiazdkami oznaczono epicentra wstrząsów z listopada 2004 r. (wg Guterch i in., 2005)

Fig. 1. Location of the study area plotted on the elevation data (DTED). Red stars show the epicenters of November 2004 earthquakes (after Guterch et al., 2005)

Trawersy dowiązано do państwowej sieci niwelacji precyzyjnej, biegnącej u podnóża Tatr. Obecnie pomiary geodynamiczne są prowadzone przeważnie techniką GPS. Wyniki tych pomiarów wskazują na występowanie znacznie mniejszej aktywności tektonicznej po polskiej stronie Tatr w stosunku do mierzonej po stronie słowackiej. Według Makowskiej i Jaroszewskiego (1989) współczesna dynamika pionowa Tatr i Podhala jest związana z prawdopodobnym dźwiganiem się południowej części synklinorium podhalańskiego względem części północnej, a ruchy wznoszące u brzegu Tatr nie przekraczają 0,4 mm/rok. Podobną wielkość deformacji (0,4 mm/rok) pomiędzy punktami w Nowym Targu i na Łysej Polanie wykazuje Wyrzykowski (1985). Według Makowskiej (2003) wartości ruchów wznoszących wzdłuż ciągu niwelacyjnego

¹Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec; Zbigniew.Perski@us.edu.pl

Nowy Targ–Zakopane są niewielkie, to znaczy nie przekraczają $+0,2$ mm/rok, natomiast u brzegu Tatr Wysokich ruchy te wynoszą $+0,4$ mm/rok.

Pomiary geodynamiczne są prowadzone również na obszarach sąsiednich, to znaczy po słowackiej stronie Tatr, gdzie stwierdzono ruchy pionowe o prędkości do $+8,4$ mm/rok (Makowska & Jaroszewski, 1989) oraz na poligonie geodynamicznym w rejonie Czorsztyna. Na poligonie czorsztyńskim na podstawie pomiarów z lat 2001–2002 stwierdzono wypiętrzanie się pienińskiego pasa skałkowego w stosunku do Podhala z prędkością 1 mm/rok (Czarnecka, 1986). Natomiast wyniki nowszych badań, z lat 2001–2003, świadczą o obniżaniu się rejonu Czorsztyna w stosunku do jednostek sąsiednich z prędkością ok. $0,78$ mm/rok (Olszak & Szponar, 2004), przy czym ruch ten jest najprawdopodobniej związany z oddziaływaniem zbiornika i zapory czorsztyńskiej (Czarnecka, 2004).

Metodyka i przetwarzanie danych satelitarnych SAR

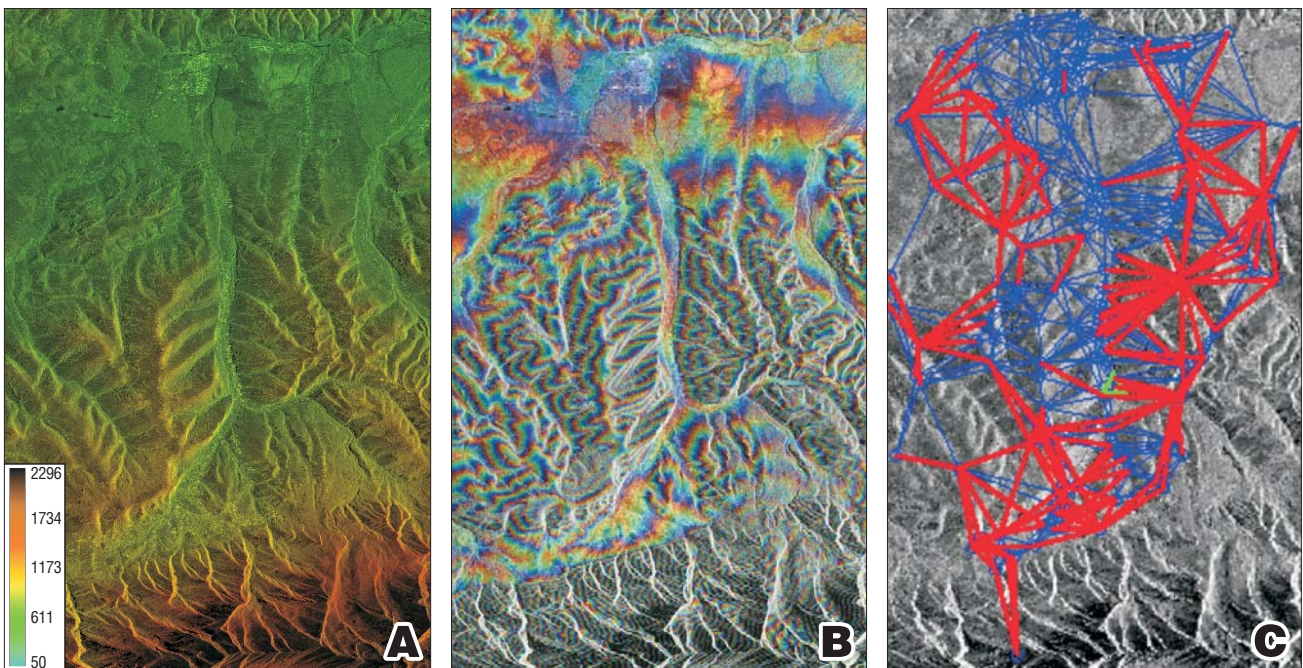
Interferometria SAR (InSAR) to technika służąca do uzyskiwania informacji dotyczących względnych danych wysokościowych na podstawie różnic faz satelitarnych zobrażeń mikrofalowych SAR (*Synthetic Aperture Radar*), rejestrowanych w różnym czasie. Największe ograniczenia metody InSAR wynikają z tzw. dekorelacji czasowej, która jest związana ze zmianami właściwości elektromagnetycznych obrazowanego fragmentu terenu w czasie. Kolejnym ograniczeniem metody InSAR jest występowanie składowej fazy wywołanej zjawiskami atmosferycznymi, które w przypadku pojedynczego lub kilku interferogramów są bardzo trudne lub wręcz niemożliwe do usunięcia. Z powodu wymienionych ograniczeń praktyczne użycie tej metody jest zredukowane do wykorzystywania danych o małych bazach czasowych, badania zjawisk o dużych deformacjach zachodzących w czasie pomiędzy kolejnymi rejestra-

cjami i badania obszarów pozbawionych roślinności, przy czym do konstrukcji interferogramów mogą być użyte jedynie takie pary obrazów, które zostały zarejestrowane w tych samych bądź bardzo zbliżonych warunkach atmosferycznych.

Ominięcie podstawowych ograniczeń metody InSAR okazało się możliwe dzięki zastosowaniu metod punktowych, polegających na selekcji rozpraszaczy stabilnych na podstawie kryterium niezmienności amplitudy w czasie (jak najmniejsza dyspersja). Pierwsze tego typu metody zostały opracowane w końcu lat 90. XX wieku przez zespół POLIMI z Politechniki w Mediolanie (Ferretti i in., 2001). Metody te wykorzystują właściwości naturalnych reflektorów radarowych, zwanych rozpraszaczami stabilnymi PS (*Persistent Scatterers, Permanent Scatterers*), stąd ich nazwa PSInSAR (*Persistent Scatterers SAR interferometry*). Rozpraszacze takie, których właściwości opisał Perski i in. (2007), charakteryzują się bardzo stabilną fazą sygnału radarowego, niewrażliwą na zmiany geometrii obrazowania oraz warunki atmosferyczne. Dzięki zastosowaniu nowej metody można dokonywać pomiarów nawet na terenach rolniczych, nieprzydatnych do badań za pomocą klasycznej metody InSAR (Ketelaar i in., 2005). W polskojęzycznej literaturze podstawy metodyczne i teoretyczne szczegółowo przedstawili Perski i Mróz (2007) oraz Porzycyca i Leśniak (2007).

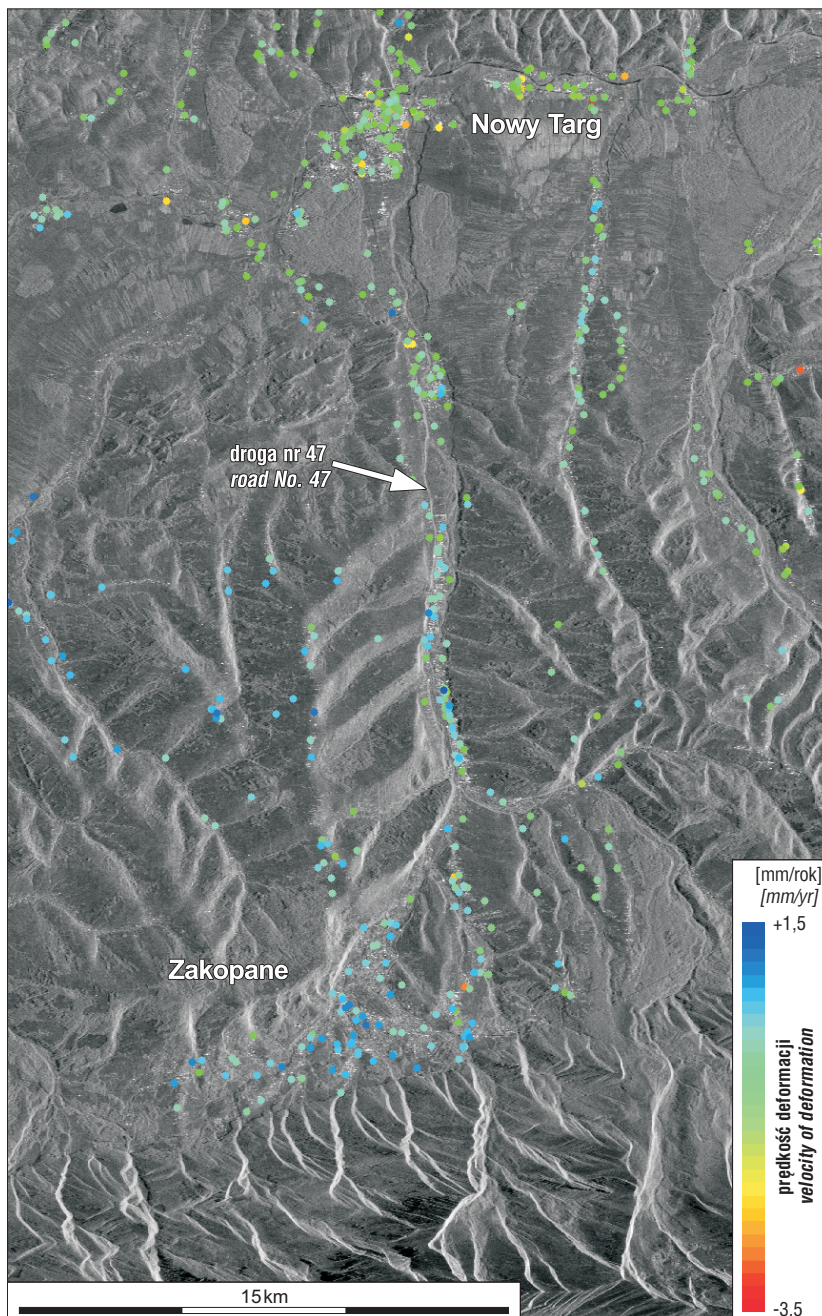
Przetwarzanie danych z obszaru Tatr i Podhala

Zbiór punktów PS z obszaru Tatr i Podhala pozyskano w wyniku przetworzenia serii 51 obrazów SAR, zarejestrowanych przez satelity ERS-1 i ERS-2 (ryc. 1). Seria ta obejmuje rejestracje wykonane w ciągu 7 i pół roku, tj. od 18.06.1992 r. do 17.12.2000 r. Z uwagi na ograniczenia techniczne przetwarzaniem danych objęto jedynie wytypowany obszar badań (ryc. 1, 2). Do przetwarzania danych wykorzystano implementację metody PSInSAR, opraco-



Ryc. 2. Przetwarzanie danych (lokalizacja na ryc. 1): **A** — numeryczny model terenu DTED-2 w projekcji radarowej, **B** — interferogram InSAR (prążki przedstawiają topografię terenu), **C** — sieć PSC (czerwone segmenty zostały odrzucone w trakcie przetwarzania danych, zielony trójkąt — punkt referencyjny)

Fig. 2. Data processing (for the location see Fig. 1): **A** — digital elevation data DTED-2 in radar coordinates, **B** — SAR interferogram (the fringe pattern show elevation variations), **C** — PSC network (red segments were rejected during the adjustment, green triangle — reference point)



←

Ryc. 3. Rozmieszczenie punktów PS na tle radarowego obrazu amplitudowego obszaru badań. Kolory punktów odpowiadają prędkości względnej deformacji [mm/rok] obliczonej na podstawie modelu liniowego deformacji

Fig. 3. The spatial distribution of PS points plotted on radar amplitude image. The colors of the points reveal the deformation velocity [mm/yr]

Mała liczba punktów i ich rozmieszczenie (ryc. 3) zostały zdeterminowane przez występowanie nielicznych rejonów zabudowy, która zwykle zachowuje właściwości rozpraszaczy stabilnych. Dziwi nieco brak punktów na obszarze wychodni skalnych w masywie Tatr. Może być to spowodowane: a) nieprawidłowo usuniętą składową topograficzną, b) błędami współrejestracji obrazów, c) zbyt wysoką dyspersją amplitudy, spowodowaną dłuższym aniżeli na innych obszarach zaleganiem pokrywy śnieżnej.

Podczas przetwarzania danych za referencyjną przyjęto scenę SAR zarejestrowaną 19 października 1997 r. W celach kontrolnych przeprowadzono przetwarzanie danych również ze sceną referencyjną z 16 maja 1996 r. Rezultaty tego przetwarzania potwierdziły prawidłowość wcześniej uzyskanych wyników.

waną przez naukowców Uniwersytetu w Delft (Perski & Mróz, 2007) oraz oprogramowanie interferometryczne DORIS również wykonane na Uniwersytecie w Delft (Kampes i in., 2004).

Do usunięcia z interferogramów składowej topograficznej wykorzystano jednosekundowy (ok. 30 m), numeryczny model terenu DTED poziom 2 (udostępniony dzięki współpracy z Wojskowym Instytutem Geodezji i Kartografii). Konieczność usunięcia składowej topograficznej wynikała z obecności dużych deniwelacji terenu.

Współrejestracji danych SAR dokonano metodami tradycyjnymi (Kampes i in., 2004), z wykorzystaniem optymalizacji rozmieszczenia punktów (Perski, 2007).

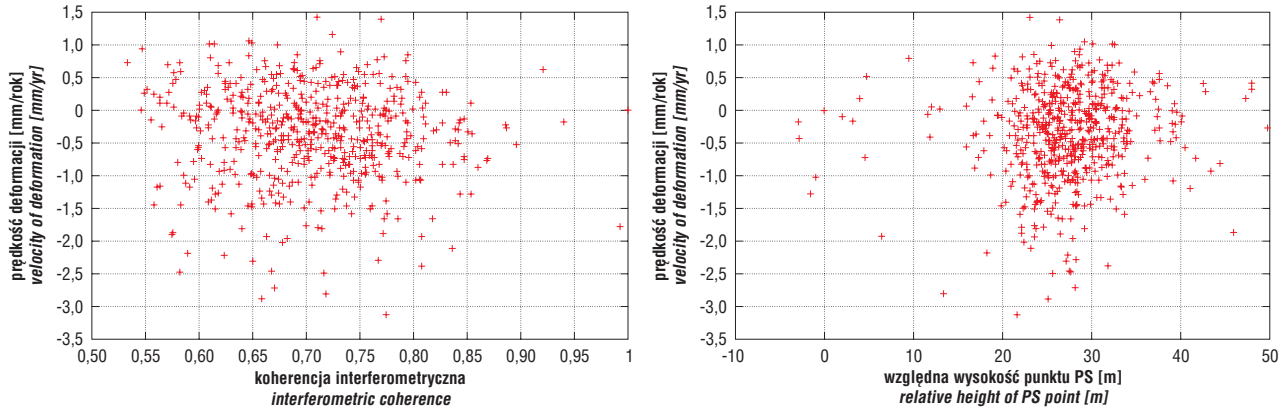
W wyniku opracowania uzyskano zbiór ponad 800 punktów PS na obszarze Nowego Targu i Zakopanego oraz wiele punktów rozsianych wzdłuż drogi nr 47 (tzw. Zakopianki), a także w części wschodniej obszaru, w okolicach Białki Tatrzańskiej.

Otrzymana sieć PSC (ryc. 3) jest stosunkowo uboga, rozwinięta wzdłuż sieci dróg i w zasadzie stanowi jeden ciąg. Taki kształt sieci jest bardzo niekorzystny i powoduje narastanie błędów pomiędzy przeciwległymi końcami obszaru badań (Leijen i in., 2006). Zazwyczaj prowadzi to do powstawania błędów rozwijania fazy, a następnie nieprawidłowej dekompozycji fazy na składowe: deformację, wysokość względną oraz tzw. opóźnienie atmosferyczne. Jak już wspomniano, w celu maksymalnego wyeliminowania błędów obliczenia składowej wysokościowej usunięto ją już na etapie obliczania interferogramów, w wyniku czego pozostała część składowej wysokościowej pochodzi od wysokości budynków, które stanowią rozpraszacze sygnału, ale nie są uwzględniane w DTED. Analiza obliczonej składowej topograficznej wykazała brak systematycznych trendów, zwłaszcza wzdłuż kierunku N-S. Świadczy to o prawidłowym przeprowadzeniu dekompozycji fazy (ryc. 4).

Wyniki i ich wstępna interpretacja

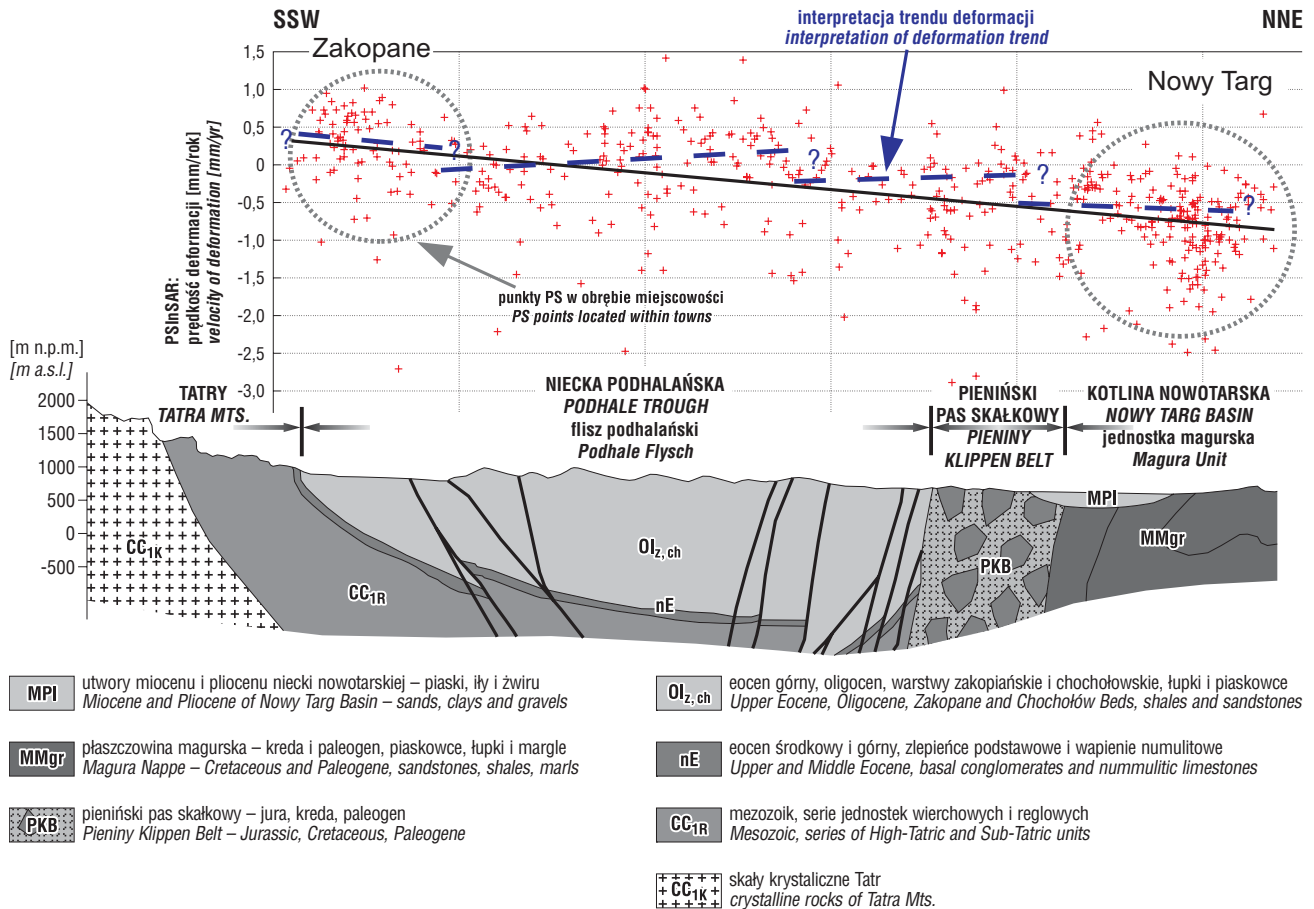
W efekcie obliczeń i po wstępnej filtracji otrzymano 738 punktów PS (z początkowego zbioru ponad 800). Z dalszych analiz wykluczono punkty o koherencji niższej niż 0,5. Punkty te były obarczone dużymi błędami rozwijania fazy lub dekompozycji fazy. Ostatecznie do dalszych analiz wykorzystano 569 PS. Duże skupiska PS są związane z gęstą zabudową Nowego Targu i Zakopanego. Obliczono średnią wartość prędkości pionowego ruchu

podłoża obu miejscowości. W stosunku do punktu referencyjnego (ryc. 2) średnia prędkość przemieszczania się obszaru Nowego Targu wynosi $-0,75$ mm/rok, a Zakopanego $+0,3$ mm/rok. Wynika z tego, że względna prędkość ruchu okolic Zakopanego w stosunku do Nowego Targu wynosi ok. 1 mm/rok. Poza wymienionymi miejscowościami większość PS jest zlokalizowana wzdłuż drogi nr 47, co skłania do przesłedzenia zmian prędkości deformacji na odcinku pomiędzy Nowym Targiem a Zakopanem (ryc. 3). Z uwagi na niewielką liczbę punktów referencyjnych,



Ryc. 4. Analiza danych. Korelacja prędkości deformacji względem koherencji (wykres lewy) i składowej wysokościowej obliczonej metodą PSInSAR (wykres prawy)

Fig. 4. Data analysis. Correlation between relative deformation velocity and coherence (left) and relative height derived from PSInSAR (right)



Ryc. 5. Rzut rozkładu prędkości względnych deformacji na płaszczyznę przekroju geologicznego (lokalizacja na ryc. 1). Schematyczny przekrój geologiczny opracowano na podstawie prac Sikory (1980), Watychy (1974) i Chowańca (2006)

Fig. 5. Distribution of relative deformations projected on geological cross section (for the location see Fig. 1). Generalized geological cross section based on data after Sikora (1980), Watycha (1974) and Chowaniec (2006)

wszystkie, którymi dysponowano, zostały wykorzystane do analizy deformacji. Na podstawie wstępnej analizy stwierdzono, że prędkość deformacji w niewielkim stopniu zmienia się w kierunku WNW-ESE, stąd w celu podniesienia statystycznej istotności wyników wszystkie punkty rzutowano na linię profilu wzdłuż trasy nr 47. Wzdłuż linii tej poprowadzono również przekrój geologiczny. Dla tak zestawionych danych wykreślono za pomocą funkcji liniowej linię trendu (ryc. 5). Wyznaczony trend wskazuje na występowanie względnego podnoszenia obszaru zakopiańskiego w stosunku do nowotarskiego o ok. 0,995 mm/rok. Bardziej wnikliwa analiza prędkości deformacji wzdłuż profilu może wskazywać na istnienie kilku anomalii (ryc. 5). Ich porównanie z przekrojem geologicznym może sugerować aktywność kilku uskoku, których skrzydła południowe ulegają wypiętrzaniu. Zbyt mała liczba punktów na zachód i na wschód od linii profilu nie pozwala na określenie biegu tych uskoku. W pobliżu kontaktu pienińskiego pasa skałkowego z jednostką magurską rysuje się anomalia prędkości deformacji, która zmniejsza się o ok. 0,4 mm/rok. Dwie podobne anomalie można zlokalizować w obrębie fliszu podhalańskiego. Co ciekawe, jeśli przyjąć, że anomalie te są związane z aktywnością uskoku, obniżaniu ulegają północne skrzydła poszczególnych bloków, z wyjątkiem bloku graniczącego z masywem tatrzańskim, którego ruch wydaje się być odwrotny do pozostałych.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono jedynie bardzo ogólnikowy opis i interpretację otrzymanych prędkości przemieszczeń. Wyniki są wstępne i wymagają dalszego opracowania. Zbadano tylko jeden obszar na podstawie pojedynczej serii danych, stąd przedstawiona próba ich interpretacji, choć jest zgodna z wiedzą na temat dynamiki tego obszaru, ma charakter spekulacyjny. Dalsze prace będą polegać przede wszystkim na weryfikacji wyników poprzez porównanie ich z wynikami przetwarzania tego samego zestawu danych SAR przy zmienionych parametrach, takich jak inna scena referencyjna lub punkt referencyjny. Opracowane zostaną obszary Czorsztyna, jak i sam masyw tatrzański. Konieczna jest także wnikliwa analiza i weryfikacja założonych punktów odniesienia dla konstrukcji sieci PS oraz zasadność użycia modelu liniowego. Planuje się także wykonanie testów z innymi modelami deformacji oraz algorytmami adaptacyjnymi (tj. pozwalającymi testować wiele modeli).

Otrzymane wartości deformacji są znacznie wyższe od mierzonych geodezyjnie (Makowska, 2003). W chwili obecnej bez wnikliwej analizy danych trudno jednoznacznie stwierdzić, z czego wynikają te rozbieżności. Przyczyn może być kilka:

- krótki okres obserwacji;
- źle dobrany punkt referencyjny i zbyt rzadka sieć PSC o małej liczbie segmentów;
- błędy filtracji atmosfery i składowej wysokościowej;
- wpływ naturalnych ruchów nietektonicznych i tectogenicznych.

W metodzie PSInSAR wykorzystywana jest właściwość danych, jaką jest obecność rozpraszaczy stabilnych. Roz-

mieszczenia i liczby rozpraszaczy nie można określić przed przetworzeniem danych. Rozpraszacze reprezentują bowiem obiekty o dobrej, co prawda, charakterystyce odbicia sygnału radarowego, ale o bardzo różnej genezie i mechanice przemieszczeń (Perski i in., 2007). Potrzebne jest ponadto opracowanie efektywnej i wiarygodnej metodyki porównywania danych PSInSAR z danymi niwelacyjnymi.

Badania sfinansowano w ramach projektu badawczego Ministerstwa Nauki nr 4T12E04329 Zastosowanie metod interferometrii radarowej InSAR do badania naturalnych ruchów powierzchni terenu w Polsce oraz projektu badawczego ESA: C1P.3915.

Literatura

- CHOWANIEC J. 2006 — Budowa Geotermalnego Ośrodka Rehabilitacyjno-Rekreacyjnego w Bukowinie Tatrzańskiej (Podhale). *Globenergia. Odnawialne źródła energii*, 4.
- CZARNECKA K. 1986 — Uwarunkowania strukturalne współczesnych ruchów tektonicznych pienińskiego pasa skałkowego w rejonie Czorsztyna. *Prz. Geol.*, 34: 556–560.
- CZARNECKA K. 2004 — Próby interpretacji wyników badania współczesnej dynamiki pienińskiego pasa skałkowego w okolicy Czorsztyna. [W:] Czarnecki K., *Badania geodynamiczne pienińskiego pasa skałkowego w rejonie Czorsztyna*. P.Warsz.: 83–99.
- FERRETTI A., PRATI C. & ROCCA F. 2001 — Permanent scatterers InSAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39: 8–20.
- GUTERCH B., LEWANDOWSKA-MARCINIAK H. & NIEWIADOMSKI J. 2005 — Earthquakes recorded in Poland along the Pieniny Klippen Belt, Western Carpathians. *Acta Geophys. Pol.*, 53: 27–45.
- KAMPES B.M., HANSEN R.F. & PERSKI Z. 2003 — Radar Interferometry with Public Domain Tools. Third International Workshop on ERS SAR Interferometry, 'FRINGE03', Frascati, Italy, 1–5 Dec 2003, CDROM.
- KETELAAR G., VAN LEIJEN F., MARINKOVIC P. & HANSEN R., 2005 — On the use of point target characteristics in the estimation of low subsidence rates due to gas extraction in Groningen, The Netherlands. *Proceedings of FRINGE 2005, Frascati (Italy) 28 November – 2 December 2005*.
- LEIJEN F.J.V., PERSKI Z. & HANSEN R.F. 2006 — Error propagation and data quality assessment for ASAR persistent scatterer interferometry. *European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Dresden, Germany, 16–18 May 2006, CDROM.
- MAKOWSKA A. 2003 — Dynamika Tatr wyznaczana metodami geodezyjnymi. *Inst. Geod. Kartogr., Ser. Monograficzna*, 6: 1–201.
- MAKOWSKA A. & JAROSZEWSKI W. 1987 — O współczesnych ruchach pionowych w Tatrach i na Podhalu. *Prz. Geol.*, 35: 506–512.
- OLSZAK T. & SZPUNAR R. 2004 — Badania ruchów pionowych na pienińskim poligonie geodynamicznym metodą niwelacji precyzyjnej w latach 2001–2002. [W:] Czarnecki K., *Badania geodynamiczne pienińskiego pasa skałkowego w rejonie Czorsztyna*. P.Warsz.: 13–30.
- PERSKI Z., HANSEN R. & MARINKOVIC P. 2008 — Deformation of the Margin of Sudety Mountains (Southern Poland) Studied by Persistent Scatterers Interferometry. *Fifth International Workshop on ERS/Envisat SAR Interferometry, 'FRINGE07', Frascati, Italy, CDROM*.
- PERSKI Z., KETELAAR G. & MRÓZ M. 2007 — Interpretacja danych Envisat/ASAR o przemiennej polaryzacji na obszarach zurbanizowanych w kontekście charakterystyki stabilnych rozpraszaczy (persistent scatterers). *Arch. Fotogrametrii i Teledetekcji*, 16: 467–482.
- PERSKI Z. & MRÓZ M. 2007 — Zastosowanie metod interferometrii radarowej InSAR do badania naturalnych ruchów powierzchni terenu w Polsce. *Projekt GEO-IN-SAR. Arch. Fotogrametrii i Teledetekcji*, 17: 613–624.
- PORYCHKA S. & LEŚNIAK A. 2007 — Przetwarzanie obrazów radarowych techniką PSInSAR. *Arch. Fotogrametrii i Teledetekcji*, 17: 661–670.
- SIKORA W. 1980 — Przekrój geologiczny Kraków–Zakopane 1: 50 000, *Wyd. Geol.*
- WATYCHA L. 1974 — Szczegółowa mapa geologiczna Polski, Ark. (1048) Czarny Dunajec. *Wyd. Geol.*
- WYRZYKOWSKI T. 1985 — Mapa prędkości współczesnych pionowych ruchów powierzchni skorupy ziemskiej na obszarze Polski. *Inst. Geod. Kartograf.*