

Zastosowanie satelitarnej interferometrii radarowej w badaniach środowiska Górnośląskiego Zagłębia Węglowego

*Application of satellite radar interferometry to environment studies
on Upper Silesian Coal Basin*

Zbigniew PERSKI

This paper presents the application of SAR interferometry in Upper Silesian Coal Basin. This research has been focused on detection of the land subsidence caused by underground coal mining. However, the amount of informations obtained from interferometry was very large and allows using the interferometric data for environmental change detection in waste dumps and open-cast mines. Analysis of interferograms shows that the range and extents of interpreted subsidence pattern strictly correlates with underground mining activity. The

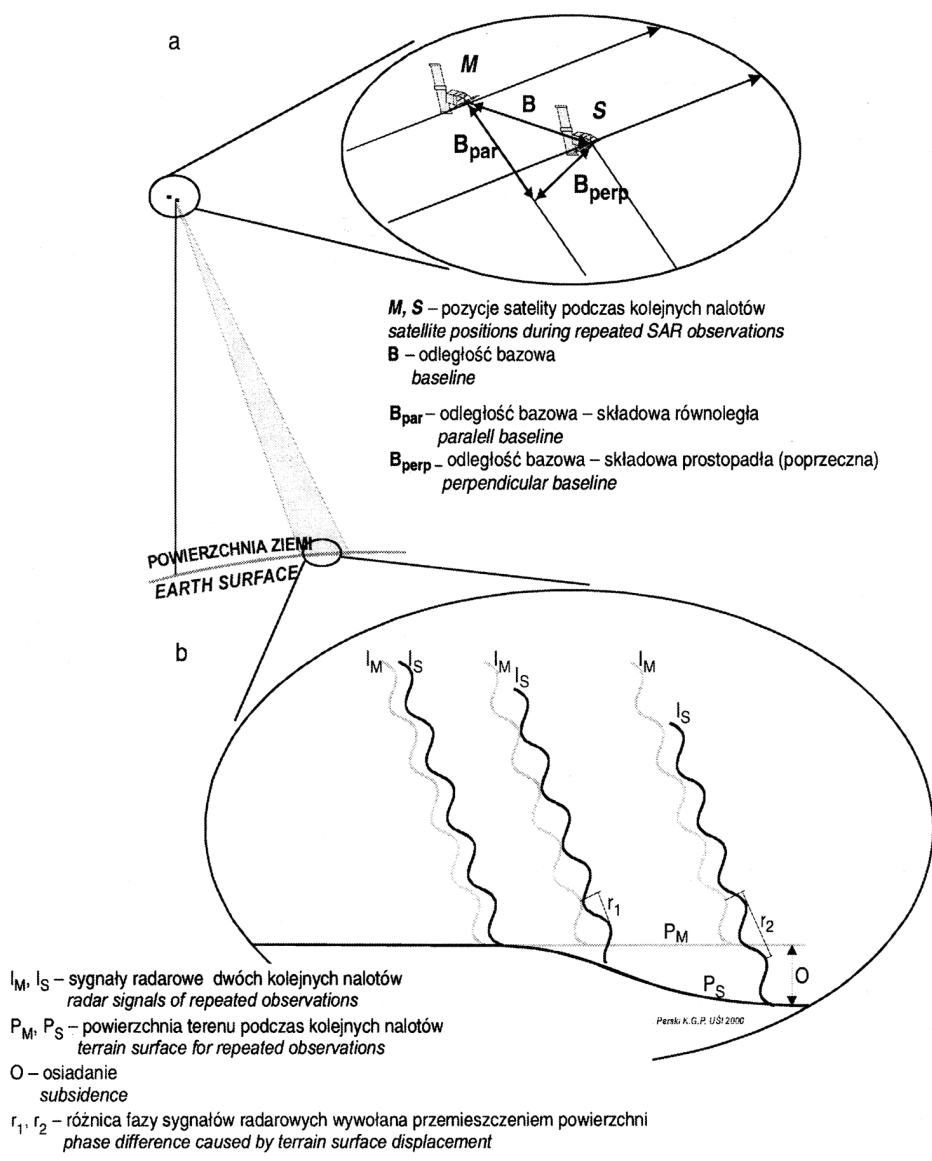
amount of subsidence and the shape and location of subsided areas depend also on local geology, structure and thickness of mined coal seam. On the interferograms of waste-dumping areas, the areas of subsidence due to compaction of waste materials have been interpreted. The interpretation of the composition of interferometric signatures shows its high applicability for change detection in environment in the areas of open-cast mines.

Wstęp

Satelitarna Interferometria Radarowa (InSAR) jest obecnie jedyną metodą pozwalającą na monitorowanie osiadania terenu w ściśle określonym i dokładnie tym samym przedziale czasowym, na obszarze dziesiątek tysięcy kilometrów kwadratowych jednocześnie. Górnośląskie Zagłębie Węglowe (GZW) jest terenem, na którym prowadzona jest na ogromną skalę eksploatacja podziemna węgla. Co więcej, przeważającą część zagospodarowanego górniczo obszaru GZW stanowią tereny gęsto zabudowane, zaludnione i w wysokim stopniu zindustrializowane. Przykłady zastosowania interferometrii satelitarnej wykazują, że dzięki bardzo dobrej jakości danych w obszarach zurbanizowanych, metoda InSAR może stanowić podstawowe, niezależne źródło danych o stanie dynamiki powierzchni na obszarze miast Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego (GOP) jako uzupełniające, a w niektórych przypadkach zastępujące metody geodezyjne (Perski, 1998, 1999, 2000).

Satelitarna Interferometria Radarowa

Satelitarna Interferometria Radarowa to metoda teledetekcyjna wykorzystująca wzajemne przesunięcia fazy sygnału dwóch obrazów radarowych typu SAR (*Synthetic Aperture Radar* — radiolokator obrazowy z anteną syntetyczną) tego samego obiektu, wykonanych sekwencyjnie z nieznacznie różnych pozycji w czasie kolejnych nalotów (ryc. 1). Na podstawie różnic fazy poszczególnych pikseli, wywołanej różną odległością pomiędzy obiektem a anteną SAR na obu obrazach SAR, uzyskuje się, w wyniku cyfrowego przetwarzania obrazów, informację o wartościach względnych rzędnej powierzchni terenu lub jej zmianach w czasie (Zebker, Goldstein, 1986; Pratti i inni, 1994). Rezultatem przetwarzania cyfrowych, satelitarnych sygnałów radarowych SAR jest obraz różnic fazy dwóch zdjęć zwany interferogramem (ryc. 2), gdzie różnice fazy są wizualizowane w postaci sekwencji barwnych, zwanych prążkami interferometrycznymi.



Ryc. 1. Satelitarna interferometria radarowa i jej geometria: a — konfiguracja satelitów podczas kolejnych obserwacji, b — sposób rejestracji osiadania w postaci różnicy fazy sygnałów radarowych (oprac. na podst. Pratti i inni, 1994; van der Kooij, 1996)

Fig. 1. SAR interferometry and its geometry: a — positions of the satellites during repeated SAR observations, b — recording of the land subsidence by the phase difference of the radar signals (based on Pratti et al., 1994; van der Kooij 1996)

Według Zebker, Goldstein (1986) przesunięcie — różnica fazy interferogramu — jest równe:

$$\Delta\varphi_p = \varphi_{p,2} - \varphi_{p,1}$$

gdzie: $\varphi_{p,1}, \varphi_{p,2}$ — faza odpowiadających sobie pikseli obu obrazów SAR.

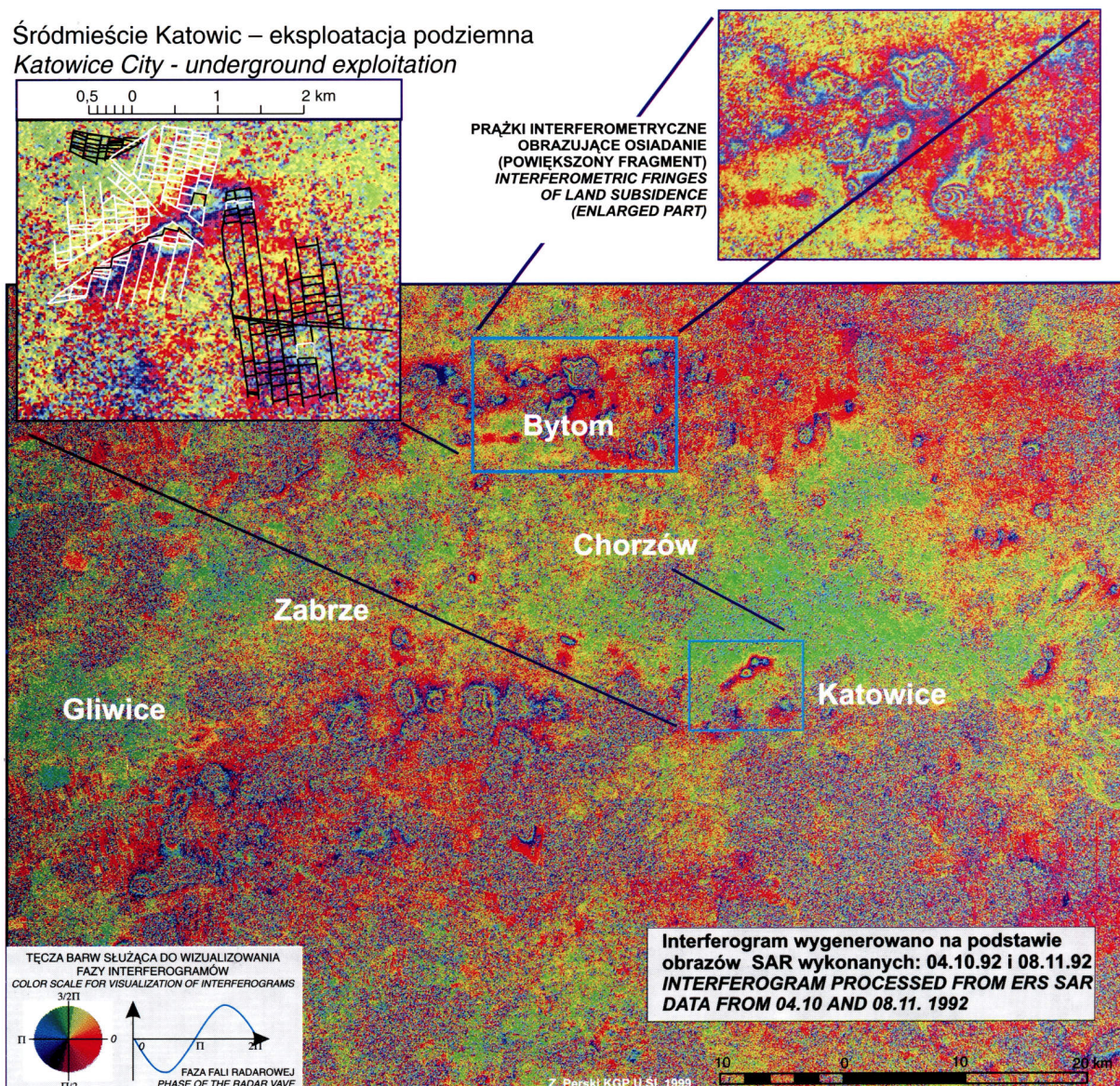
W satelitarnym systemie InSAR dane SAR tego samego obszaru pozyskiwane są podczas kolejnych przelotów satelity nad tym samym obszarem: SIR-C (Zebker, Goldstein, 1986), SEASAT (Li, Goldstein, 1990), ERS-1 (Pratti i inni, 1992), RADARSAT (Atlantis, 1997b). System ten, tzw. *differential interferometry* lub DInSAR, wykorzystuje interwał czasowy Δt pomiędzy wykonaniem kolejnych zobrazowań, który stwarza możliwość zaobserwowania zmian wysokościowych powierzchni terenu i przesunięć poziomych obiektów na niej się znajdujących. W przypadku zo-

brazowań SAR wykonywanych sekwencyjnie, znaczenia nabiera pozioma i pionowa różnica kolejnych pozycji satelity w czasie wykonywania kolejnych zdjęć, którą określa się za pomocą tzw. odległości bazowej B : podłużnej B_{par} i poprzecznej B_{perp} (ryc. 1). Wielkość odległości bazowej jest zależna od tzw. dryfu satelity i warunkuje stosowalność poszczególnych obrazów SAR dla interferometrii.

Korelacja sygnału radarowego — koherencja

Koherencja jest to parametr określający proporcje różnic spektralnych (fazy i natężenia) dla poszczególnych pikseli dwóch obrazów SAR. Od wielkości tego parametru zależy czytelność generowanego interferogramu. Mapa koherencji, obraz przedstawiający w odcieniach szarości wartość koherencji, w bezpo-

Śródmieście Katowic – eksploatacja podziemna
Katowice City - underground exploitation



**METODA WIZUALNEJ INTERPRETACJI WIELKOŚCI OSIADAŃ
NA PODSTAWIE INTERFEROGRAMÓW ERS SAR**
VISUAL INTERPRETATION OF THE SUBSIDENCE
BASED ON INTERFEROMETRIC FRINGES

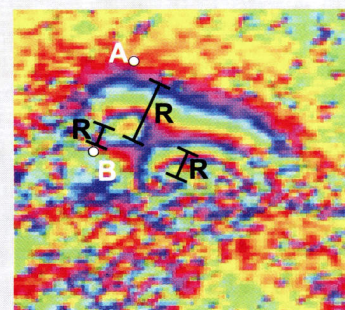
R - Odległość, na której różnica faz jest równa pełnemu
cyklowi 2π czyli 2,58 cm (dla ERS SAR)
R - distance where the phase difference is equal to full cycle of 2π i.e. 2,58 cm (dla ERS SAR)

Faza interferometryczna w punkcie **A**:
Interferometric phase in point **A**:

$\phi = 0$ (brak osiadań) (no subsidence)

Faza interferometryczna w punkcie **B**:
Interferometric phase in point **B**:

$\phi = 2 * 2\pi$ (osiadanie o 5,16 cm) (subsidence = 5.16 cm)



Ryc. 2. Interferogram ERS SAR obszaru GZW. Obraz prążków interferometrycznych przedstawia osiadanie terenu. Dla lokalizacji przedstawiono granice obszarów górniczych oraz dróg głównych. Dolna część rysunku prezentuje sposób wizualnej interpretacji prążków interferometrycznych za pomocą skali barw

Fig. 2. ERS SAR interferogram of Upper Silesian Coal Basin. The pattern of interferometric fringes presents land subsidence caused by underground coal mining. For better location, the mine concession areas and main roads have been superimposed with interferogram. Lower part of the figure presents the method of visual interpretation of interferometric fringes based on color scale

średni sposób ukazuje jakość użytych danych. Wielkość koherencji wskazuje zmiany, jakie dokonały się pomiędzy wykonaniem kolejnych zdjęć, a obszary o słabej koherencji (ciemne) wyznaczają miejsca, w których pierwotna faza sygnału została zmieniona przez czynniki zewnętrzne (por. ryc. 5).

Koherencja γ dwóch zespolonych obrazów SAR v_1 i v_2 określana jest wzorem (Villasenor, Zebker 1992; Cattabeni i inni. 1994; Pratti i inni, 1994):

$$\gamma = \frac{E[v_1 v_2^*]}{\sqrt{E[|v_1|^2] E[|v_2|^2]}}$$

gdzie: $E[.]$ — średnia ważona, czyli wartość prawdopodobieństwa; * — oznacza sprzężenie wartości zespolonych v_1 i v_2 .

Na wartość koherencji największy wpływ mają następujące czynniki (Pratti i inni, 1994).

Odległość bazowa — wywołująca tzw. dekoherencję geometryczną. Jeśli pozycje satelity podczas kolejnych obserwacji tego samego obszaru różnią się od siebie znacznie, wówczas rozmiary piksela terenowego będą inne, co uniemożliwi precyzyjne współrejestrowanie obu zdjęć.

Wielkość szumów sygnału radarowego i zmiany fazy związane z aparaturą, określane stosunkiem sygnału do szumu SNR (*Signal to Noise Ratio*).

Fizyczne zmiany środowiska, jakie zaszły pomiędzy kolejnymi zobrazowaniami SAR. Sygnał radarowy jest falą elektromagnetyczną i dlatego zarejestrowana wartość fazy i natężenia zależy od własności dielektrycznych powierzchni odbijającej (FAO/ESA, 1993). Sucha gleba charakteryzuje się stałą dielektryczną o wartości od 3 do 8, podczas gdy dla gleby wilgotnej wartość ta wynosi około 80. Jeśli jedno ze zobrazowań zostało wykonane w warunkach zwiększonej wilgotności, wówczas interferogram będzie charakteryzował się silnie zmniejszoną koherencją. Fala elektromagnetyczna o długości 5,7 cm (ERS-1 i ERS-2) jest zdolna penetrować jedynie górne partie koron drzew i upraw, przypowierzchniowe partie gleby oraz ulega odbiciu od powierzchni wody. Sprawia to, że w przypadku obserwacji powtarzalnych, faza sygnału cechuje się dużą czułością na najmniejsze zmiany, w związku z czym akweny, obszary leśne, uprawy i inne tereny pokryte bujną roślinnością cechują się słabą koherencją. Dekoherencja — utrata koherencji jest w dużym stopniu uzależniona od czasu, jaki upłynął pomiędzy wykonaniem kolejnych zobrazowań (Villasenor, Zebker, 1992; Usai, Hanssen, 1997).

Słaba koherencja jest również wynikiem zbyt dużej odległości bazowej pomiędzy pozycjami satelity w trakcie wykonywania kolejnych zobrazowań. Graniczną wartością odległości bazowej poprzecznej B_{perp} dla ERS SAR jest 1100 m (Pratti i inni, 1994). Z doświadczeń praktycznych wynika, że dane o odległości bazowej większej niż 600 m wykazują już znaczny spadek koherencji.

Zagadnienie prawidłowej selekcji obrazów ERS SAR

Prawidłowe selekcjonowanie obrazów SAR do interferometrii przeprowadza się tak, by poszczególne pary obrazów SAR przeznaczone do przetwarzania interferometrycznego były zgodne względem siebie geometrycznie i spektralnie, a tym samym zapewniały możliwie najlepszą koherencję interferogramów. Z tego powodu, podczas selekcji należy uwzględnić wpływ następujących czynników powodujących dekoherencję.

1. Krótka baza czasowa zapewniająca stabilną charakterystykę refleksu sygnału radarowego obrazów SAR — do wykrywania osiadań GZW zastosowano bazy czasowe pomiędzy obrazami wynoszące odpowiednio 35 i 70 dni. W celach porównawczych zastosowano również dane o ekstremalnie długiej (1118 dni) i ekstremalnie krótkiej (24 godziny) bazie czasowej.

2. Zbliżony okres wegetacyjny roślin podczas wykonywania kolejnych zobrazowań SAR — wyselekcjonowano obrazy wykonane w okresach powolnego wzrostu roślinności i małych opadów. W warunkach Europy Środkowej są to okresy późne lato-wczesna jesień i późna jesień.

3. Zbliżone warunki atmosferyczne podczas wykonywania kolejnych zobrazowań SAR — do kontroli warunków atmosferycznych wykorzystano dane meteorologiczne (ilość opadów, zachmurzenie, wilgotność gruntu) ze stacji naziemnych IMiGW w Katowicach-Muchowcu, Bieruniu i Głubczycach oraz satelitarne obrazy meteorologiczne z satelitów NOAA-12, NOAA-14, METEOSAT.

4. Stabilna geometria wykonania obrazów — zastosowano pary zobrazowań SAR, których odległość bazowa była mniejsza niż 100 m, natomiast do wytworzenia DTM — mniejsza niż 300 m.

Etapy cyfrowego przetwarzania interferometrycznego danych SAR

Do przetwarzania interferometrycznego zastosowano cyfrowe zapisy obrazów SAR w formacie SLC. Wyselekcjonowane, cyfrowe dane SAR pogrupowano w pary, spełniające kryteria odpowiedniej koherencji i odległości bazowej. Wytypowano również parę obrazów SAR do wygenerowania numerycznego modelu terenu. Przetwarzanie danych prowadzono wieloetapowo, dostosowując poszczególne etapy do metody i celu przetwarzania.

Do wygenerowania interferogramów użyto specjalistycznego oprogramowania EarthView InSAR Workstation 1.1.4 (Atlantis, 1997a), będącego modułem teledetekcyjnego pakietu EarthView Remote Sensing wersja 4.4.1 (Atlantis, 1997b). Testy przetwarzania danych SAR przeprowadzono na stacji roboczej SUN Ultra w środowisku Unix, jednak właściwe przetwarzanie danych prowadzono przy użyciu komputera klasy PC z systemem operacyjnym Windows NT 4.0 Workstation.

Wyniki interferometrycznych badań GZW

Określanie wielkości górniczych deformacji terenu za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej przy użyciu danych ERS SAR

Na interferogramach wielkości osiadania terenu widoczne są w postaci sekwencji barwnych prążków interferometrycznych odpowiadających różnicom fazy (Perski, 1998). Występowanie pełnej sekwencji zmiany barw oznacza zmianę fazy o wartość 2π . Jeśli sekwencja barw powtarza się, oznacza to, że osiadanie wynosi wielokrotność wartości 2π (ryc. 2). Faza interferogramu w miejscach, gdzie nie występuje osiadanie powinna wynosić zero. W większości przypadków obszary te jednak odznaczają się występowaniem pewnej nieznaczącej fazy resztkowej. Jej wielkość jest uzależniona od wpływu omówionych powyżej czynników zewnętrznych i wewnętrznych systemu zmieniających fazę, jak również koherencji i wpływów topografii terenu. Faza resztkowa jest bardzo trudna do całkowitego usunięcia na etapie generowania interferogramu i objawia się w postaci zmiennej barwy obszarów stabilnych na poszczególnych interferogramach. Jednocześnie, zjawiska tzw. osiadania ustalonego i resztkowego są bardzo trudne do wyodrębnienia.

Stosowana w GZW technologia eksploatacji węgla powoduje, że miesięczne osiadanie terenu wynosi około 3 do 15 cm, a w skrajnych przypadkach 4 cm na dobę (Kowalski, 1996). Wydobyte prowadzone jest na obszarach o różnym charakterze zagospodarowania powierzchni terenu, przy czym jest ono najbardziej intensywne pod terenami rolniczymi i leśnymi. Występowanie największego, miesięcznego osiadania towarzyszy zazwyczaj rozwojowi dynamicznego skłonu niecki osiadania. Zjawisko to jest uwarunkowane postępowaniem frontu i ograniczone kształtem pola eksploatacji oraz promienia zasięgu wpływów. Obszary te w GZW z reguły nie przekraczają 9 km^2 . Tak ścisła koncentracja zjawiska sprawia, że prążki interferometryczne o genezie osiadaniowej łatwo jest odróżnić od efektów wywołanych zjawiskami atmosferycznymi, gdyż te powodują zmiany fazy interferogramu na obszarze dziesiątek kilometrów (por. Tarayre, Massonnet, 1994, 1996; van der Kooij i inni, 1996).

Ważnym czynnikiem w analizie zjawisk związanych z postępującą eksploatacją podziemną było odpowiednie dobranie wielkości bazy czasowej obrazów SAR w stosunku do dynamiki zjawiska. W przypadku długich okresów pomiędzy obserwacjami okazało się, że w szczególnych przypadkach powstałe w tym czasie duże przyrosty nachylenia skłonu niecki mogą uniemożliwić prawidłowe określanie przyrostów osiadania.

Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że interferogramy o bazie czasowej 35 lub 70 dni przedstawiają chwilowy stan postępującego procesu osiadania, a obraz prążków interferometrycznych ukazuje rozkład przyrostów (a pośrednio prędkości)

obniżania powierzchni terenu na danym obszarze. Dane interferometryczne dobrze korelują się z obserwacjami geodezyjnymi (Perski, 1999; Perski, Jura, 1999), w świetle których największe osiadanie w jednostce czasu występuje w środkowej części dynamicznego skłonu tworzącej się niecki osiadania. Na interferogramach obszar ten odpowiada występowaniu zespołów koncentrycznych prążków interferometrycznych (Perski, 2000) — powiększony szczegół u góry ryciny 2.

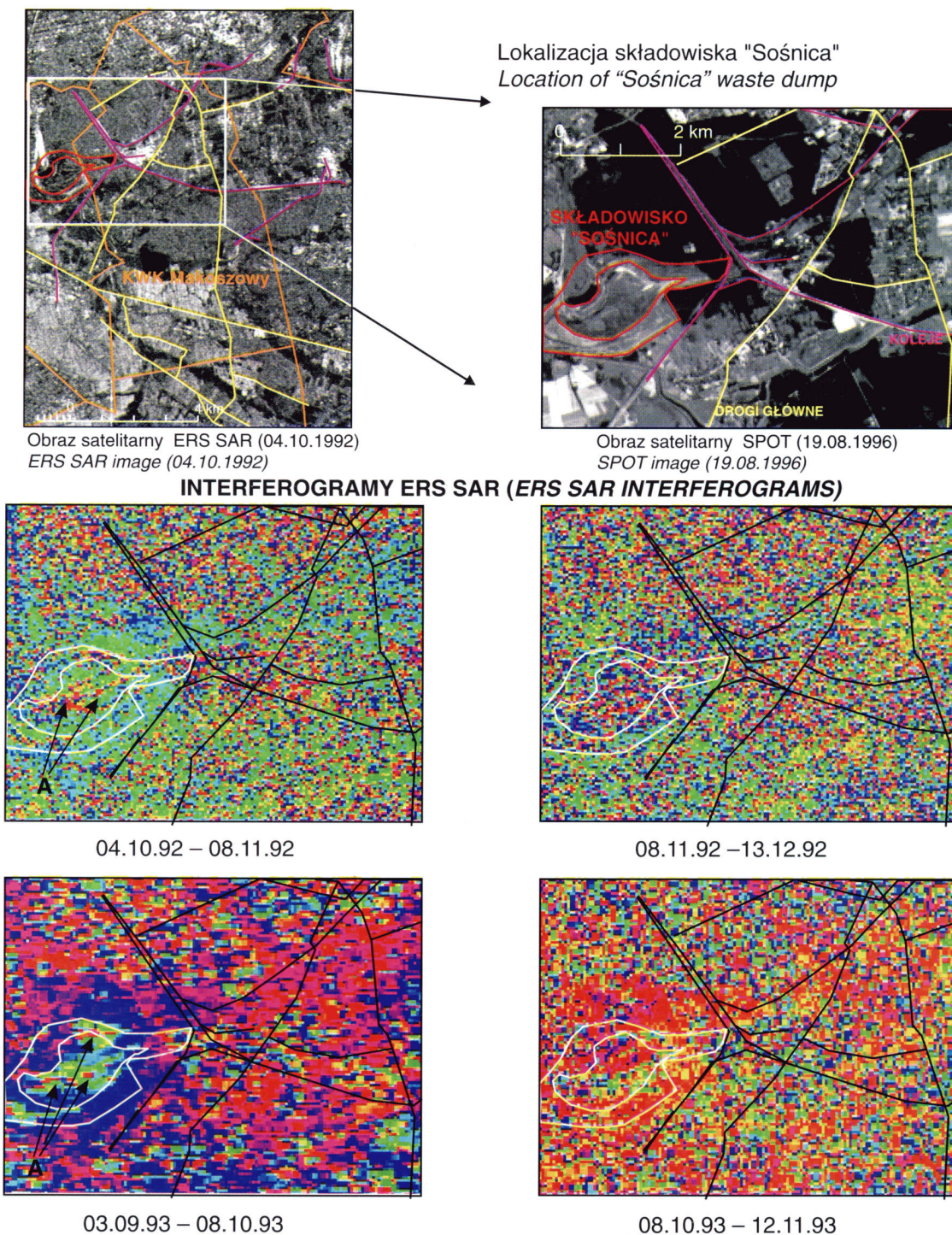
Interferometryczny obraz górniczego osiadania terenu na obszarze śródmieścia Katowic i lotniska Muchowiec ujawnił, że przyrosty osiadania na dynamicznym skłonie niecki osiadania widoczne były na interferogramach jako eliptyczna koncentracja prążków interferometrycznych migrująca ku NW za przemieszczającym się frontem eksploatacji (ryc. 2). Rozpoznano, że ujawnianie się wpływu robót górniczych na powierzchni następowało po upływie około 4 miesięcy. Jak wykazały badania, duży wpływ na przyspieszenie osiadania miało w tym przypadku osłabienie górotworu wywołane występowaniem starych wyrobisk, nawet z końca XIX w. (Perski, 1999). W części południowej miasta obserwowano na interferogramach wpływy eksploatacji w odległości odpowiadającej 6-miesięcznemu postępowi ścian. Dłuższe w tym przypadku opóźnienie wystąpienia osiadania wynikało z innego nadkładu złoża, zbudowanego tu z karbońskich warstw orzeskich.

Dynamika powierzchni składowisk odpadów poeksploatacyjnych na obszarze GZW

Podczas opracowywania interferogramów z obszaru GOP i ROW (Rybnickiego Okręgu Węglowego) stwierdzono występowanie prążków interferometrycznych także na obszarach składowisk odpadów poeksploatacyjnych. Szczególnie dobrze widoczne są prążki interferometryczne na obszarze składowisk „Sośnica” koło Zabrze oraz „Kościełek” koło Pawłowic.

Składowisko „Sośnica” (ryc. 3) ma powierzchnię około $1,6 \text{ km}^2$. Zdeponowano w nim 50 mln ton odpadów, głównie tzw. kamienia dołowego — złożonego ze skał karbońskich, ilowców i mułowców oraz podrzędnie piaskowców (Cempel i inni, 1998). Na interferogramie przedstawiającym składowisko w październiku 1992 r., widoczny jest wydłużony zespół prążków interferometrycznych odpowiadający około 1/2 cyklu interferometrycznej różnicy fazy. Centrum obszaru objętego ruchem powierzchni wykazuje dekoherencję spowodowaną przez proces zdeponowania odpadów. Kolejność i liczba prążków pozwalają stwierdzić, że zaobserwowana zmiana powierzchni składowiska o wartości 1,82 cm jest osiadaniem części składowiska wywołanym kompaktacją oraz mechanicznym zagęszczeniem świeżo zdeponowanych odpadów. Interferogram z września 1993 potwierdza kontynuację zaobserwowanego zjawiska na nieco większym obszarze (ryc. 3).

Składowisko „Kościełek” położone na obszarze

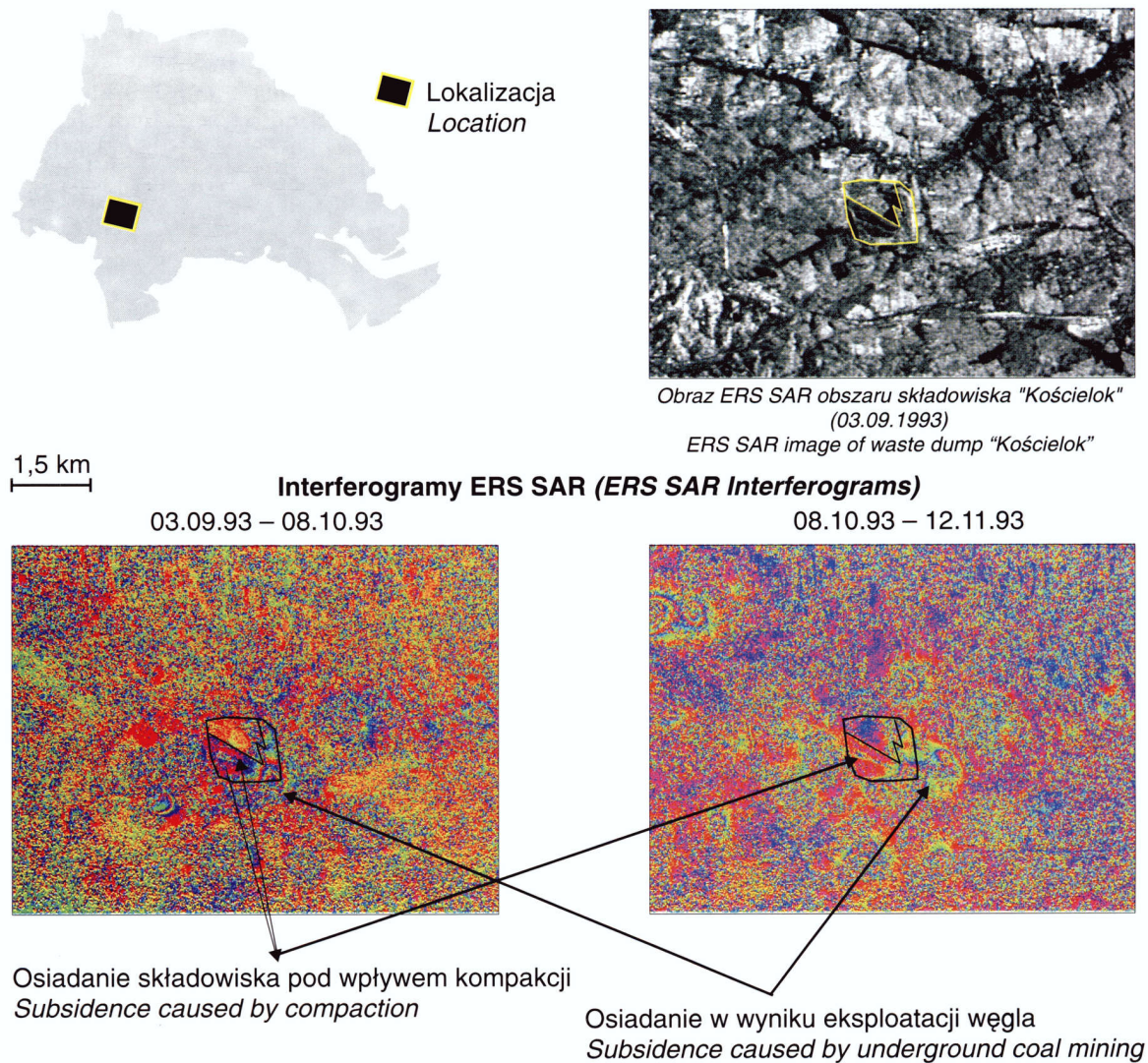


A – Strefa osiadania składowiska pod wpływem kompaktacji
(zone of subsidence due to compaction of waste material)

Ryc. 3. Interferometryczny obraz dynamiki osiadania składowiska „Sośnica”
Fig. 3. The interferometric image of the subsidence dynamics in „Sośnica” waste-dump

ROW, jedno z największych w GZW, ma powierzchnię około 2 km² i średnią wysokość 15 m. Zdeponowano w nim dotychczas 27 mln m³ odpadów poeksploatacyjnych — w ostatnim okresie głównie pochodzących z przeróbki węgla (Iwaszenko, Janus, 1998). Na interferogramach z lat 1992 i 1993 (ryc. 4) zaobserwowano na obszarze składowiska owalny zespół prąż-

ków interferometrycznych tworzących pełną sekwencję. Kolejność i liczba prążków w cyklu wskazują, że są one wynikiem procesu osiadania zdeponowanych odpadów o przyrostach około 2,58 cm/35 dni, gdyż podobnie jak w przypadku składowiska „Sośnica” prowadzone było tutaj sztuczne zagęszczanie odpadów uzupełniające naturalną kompaktację.



Ryc. 4. Interferometryczny obraz dynamiki składowiska „Kościelok” na obszarze ROW

Fig. 4. The interferometric image of the subsidence dynamics of „Kościelok” waste-dump in Rybnik Coal Mining Area

Dynamika zmian powierzchni terenu związanych z eksploatacją odkrywkową

W ramach analizy interferogramów obszaru GZW podjęto próbę analizy zmian powierzchni terenu na obszarze dużych odkrywkowych kopalń piasków podsadzkowych we wschodniej części GZW. Uzyskano negatywne wyniki, co jest spowodowane faktem, że eksploatacja piasków odbywa się koparkami, wąskim frontem eksploatacyjnym wzdłuż stromych ścian wyrobiska, przez co jest trudna do zarejestrowania w układzie pikseli satelitarne obrazu radarowego. Intensywne i przypadkowe zmiany powierzchni odkrytki wskutek ruchu maszyn powodują dekoherencję nawet w krótkich okresach. Po zastosowaniu bardziej złożonych procedur uzyskano możliwość wyróżnienia stref aktywności inżynierskiej na obszarze wyrobisk. Przeprowadzono analizę map koherencji metodą tzw. wskaźników interferometrycznych (Wegmüller i inni, 1995). Metoda ta polega na wytworze-

niu obrazu wskaźników interferometrycznych poprzez kompozycję barwną RGB obrazów uzyskanych w wyniku interferometrycznego przetwarzania danych SAR. W kanale czerwonym przedstawiono koherencję interferometryczną, a w kanale zielonym — uśrednione natężenie obrazów SAR (M_{av}):

$$M_{av} = (M_{mast} + M_{slav})/2$$

gdzie: M_{mast} , M_{slav} — natężenie obrazów odniesienia (*master*) i dostosowanego (*slave*).

Kanał niebieski wykorzystano do prezentacji różnicy natężenia obrazów (*master*) i (*slave*):

$$M_{diff} = M_{mast} - M_{slav}$$

W obrazie wskaźników interferometrycznych dla obszaru kopalni Jaworzno-Szczakowa ujawnia się zasięg wyrobiska, strefy aktywności wydobywczej — charakteryzujące się słabą koherencją oraz zasięg zalewisk i podmokłości poeksploatacyjnych (ryc. 5).

Podsumowanie

Z przedstawionych metodycznych opracowań interferogramów z terenu GZW wynika, że interferometryczny obraz górniczego osiadania terenu może być wykorzystywany do pomiarów, interpretacji i opisu przyrostów osiadania w celu określania zagrożeń i planowania przestrzennego w różnych skalach.

W skali lokalnej może być stosowany wobec konkretnego obszaru górniczego, miasta lub gminy. Wówczas, w połączeniu z bazą danych na temat eksploatacji, oraz na podstawie map geologicznych i wyników pomiarów geodezyjnych, można wyznaczyć niektóre wskaźniki deformacji i na ich podstawie prognozować wpływy eksploatacji na bezpieczeństwo obiektów.

W skali regionalnej może być stosowany w odniesieniu do dużego obszaru administracyjnego, np. województwa lub spółki węglowej. W skali regionalnej możliwe jest wyznaczanie zasięgów obszarów podlegających osiadaniu i szacowanie wzajemnych relacji pomiędzy skutkami eksploatacji na różnych głębokościach i w różnych kopalniach.

W artykule przedstawiono metodykę i sposoby interpretacji danych InSAR na obszarach górnictwa węgla kamiennego. W czasie prac nad projektem, a także studiów literaturowych wyłoniła się możliwość zastosowania opracowanej metodyki również w innych dziedzinach działalności wydobywczej. Duże kopalnie odkrywkowe, takie jak np. KWB Bełchatów, stanowią przyszłe perspektywiczne obszary badań InSAR. Przewodzona tam eksploatacja na dużą skalę powoduje liczne deformacje powierzchni, takie jak wypiętrzanie skał spągowych, osuwiska, jak również osiadanie związane z odwadnianiem i tworzeniem leja depresji.

Ważnym elementem badań interferometrycznych kopalń odkrywkowych może stać się również monitoring dynamiki powierzchni składowisk skał nadkładu oraz stabilności podłoża w ich otoczeniu.

Na obszarze Polski, tereny perspektywiczne do badań interferometrycznych stanowią eksploatowane metodami otworowymi złoża soli kamiennej, siarki, gazu ziemnego, ropy naftowej oraz wód podziemnych, w tym wód geotermalnych.

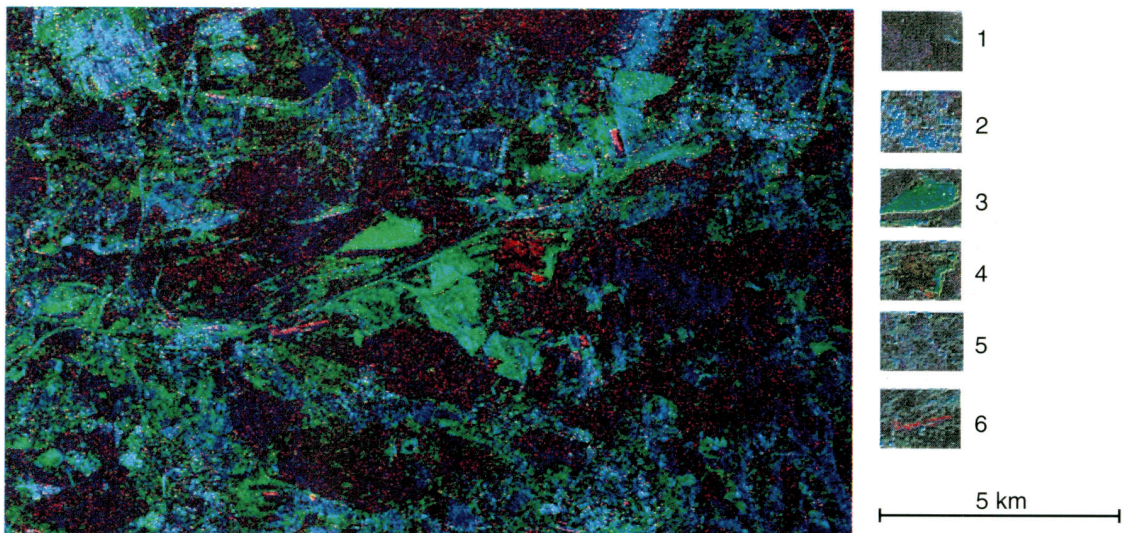
Otworowa eksploatacja soli kamiennej na obszarze Wieliczki spowodowała znaczne osiadanie powierzchni, w latach 70. dochodzące nawet do 3 m rocznie. Stwierdzone niecki i zapadliska o średnicy kilkuset metrów i głębokości 1–3 m mogą stanowić doskonały poligon dla badań interferometrycznych. Próbę badań tego obszaru podjęto obecnie w ramach realizowanego w Katedrze Geologii Podstawowej międzynarodowego projektu AO-3127 stanowiącego kontynuację monitoringu osiadania GZW.

Wnioski

Osiadanie terenów górniczych GZW jest wykrywalne za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej. Monitorowanie tego osiadania jest możliwe przy użyciu danych z satelitów ERS-1 i ERS-2.

Za pomocą metody InSAR można z dużą precyzją wyznaczyć rzeczywisty zasięg obszarów poddawanych obniżaniu, a także określać wielkość przyrostów obniżania.

Interferogramy stanowią całkowicie nowe źródło danych, które w bardzo precyzyjny sposób przedstawia przestrzenną zmienność przebiegu procesu osiadania na dużym obszarze i w tym samym czasie. Dzięki tym cechom obrazy InSAR stanowią doskonały ma-



Ryc. 5. Obraz wskaźników interferometrycznych obszaru kopalni piasku podsadzowego Jaworzno-Szczakowa. Obraz wygenerowano w oparciu o dane InSAR obejmujące okres 4 X 92–8 XI 92: 1 — lasy, 2 — obszary zabudowane, 3 — obszar wydobywania piasków, 4 — aktywność wydobywcza w październiku 1992 r., 5 — pola uprawne, 6 — zbiorniki wodne

Fig. 5. Interferometric signatures composition of Jaworzno-Szczakowa sand open-cast mine. The image has been generated from InSAR data from 4 X 92 and 8 XI 92: 1 — forests, 2 — built-up areas, 3 — sand pitting area, 4 — pitting activity in October 1992, 5 — arable lands, 6 — lakes

teriał do geologicznej interpretacji osiadania. Cyfrowy charakter wyników analiz InSAR sprawia, że mogą one być szybko i efektywnie wykorzystywane w systemach GIS. Metoda InSAR nadaje się również do badań dynamiki powierzchni składowisk odpadów poeksploatacyjnych — osiadania wywołanego kompaktacją deponowanych odpadów. Przy użyciu metody wskaźników interferometrycznych można śledzić zmiany użytkowania terenu na obszarach eksploatacji odkrywkowej.

Podziękowania. Autor składa serdeczne podziękowania panu Profesorowi Stanisławowi Ostaficzukowi za zainicjowanie banej serdecznie dziękuję za udostępnienie materiałów do badań, jak również sprzętu komputerowego i specjalistycznego oprogramowania. Gorące podziękowania składam personelowi ośrodka ESA ESRIN, a szczególnie dr. Juergowi Lichteneggerowi, Steve Coulsonowi, Gianni Calabresi, Massimo Barbieri. Dziękuję dyrekcji Katowickiego Holdingu Węglowego SA i dyrekcji Kopalni Węgla Kamiennego „Katowice-Kleofas” za udostępnienie archiwalnych danych na temat eksploatacji górniczej. Szczególnie serdeczne podziękowania składam mgr. inż. Janowi Ogórkowi i dr. Tadeuszowi Pytlarzowi za okazaną pomoc w udostępnianiu danych, jak również liczne uwagi i dyskusje.

Dokończenie prac badawczych związanych z rozprawą doktorską, której efektem jest m in. niniejszy artykuł, zostało sfinansowane przez Komitet Badań Naukowych w ramach grantu 9T12B 015 16.

Literatura

- Atlantis, 1997a: *EarthView version 4.4.1. User's Guide*, Atlantis Scientific Inc., Ontario.
- Atlantis, 1997b: *EarthView InSAR version 1.1.0 User's Guide*, Atlantis Scientific Inc., Ontario.
- Cattabeni M., Monti-Guarnieri A., Rocca F., 1994: *Estimation and Improvement of Coherence in SAR Interferograms*, Proceedings of IGARSS '94, Pasadena, 720–722.
- Cempiel E., Grabowska K., Sowa M., 1998: *Wpływ składowiska odpadów KWK „Sośnica” na wody powierzchniowe i podziemne*, VII Konferencja nt: Problemy geologii w ekologii i górnictwie podziemnym, Prace GIG, nr 24, Katowice, 17–29.
- FAO/ESA 1993: *Radar Imagery: Theory and interpretation. Lecture notes*, Lichtenegger J., Raney R.K., Schumman R. (eds), FAO Remote Sensing Centre Series, no. 67, 103, Rome, 1–103.
- Iwaszenko A., Janus I., 1998: *Ekologiczne aspekty składowania odpadów powęglowych na terenie Rybnickiego Okręgu Węglowego*, VII Konferencja nt: Problemy geologii w ekologii i górnictwie podziemnym, Prace GIG, nr 24, Katowice, 47–53.
- Kooij, M. van der, Halsema D. van, Groenewoud W., Mets G.J., Overgaauw B., Visser P., 1996: *SAR Land Subsidence Monitoring*, Dutch Remote Sensing Board NRSP-2, Delft, 95–13. [niepublikowane]
- Kowalski A., 1996: *Wpływ eksploatacji na deformacje powierzchni na przykładzie eksploatacji KWK Staszic*, Mat. Konf. Szkoły Eksploatacji Podziemnej, Katowice, 139–152.
- Li, F.K., Goldstein, R.M., 1990: *Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars*, I.E.E.E. Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Houston, vol. 28, 88–96.
- Perski Z., 1998: *Applicability of ERS-1 and ERS-2 InSAR for Land Subsidence Monitoring in the Silesian Coal mining region, Poland*, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 32, 7, Budapest, 555–558.
- Perski Z., 1999: *Osiadania terenu GZW pod wpływem eksploatacji podziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR)*, Przegląd Geologiczny, nr 2, Warszawa, 171–174.
- Perski Z., Jura D., 1999: *ERS SAR Interferometry for Land Subsidence Detection in Coal Mining Areas*, Earth Observation Quarterly, vol. 63, Noordwijk, 25–29.
- Perski Z., 2000: *Zastosowanie satelitarnej interferometrii radarowej do określania dynamiki i zasięgu górniczych deformacji terenu na przykładzie wybranych obszarów Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*, Prace Wyd. Nauk o Ziemi US, nr 8 [w druku].
- Pratti, C., Rocca, F., Monti-Guarnieri, A., 1992: *SAR interferometry experiments with ERS-1*, Proceedings of the First ERS-1 Symposium, Cannes, 211–218.
- Pratti C., Rocca F., Monti-Guarnieri A. Pasquali P., 1994: *Report on ERS-1 SAR interferometric techniques and applications*, ESA report 10179/93/YT/I/SC, Frascati, 1–122 [niepublikowane].
- Tarayre H, Massonnet D., 1994: *Effects of a refractive atmospheric processing*, Proceedings of IGARSS'94, Pasadena, 717–719.
- Villasenor J., Zebker H., 1992: *Temporal decorrelation in repeat-pass radar interferometry*, Proceedings of IGARSS'92, Houston, 941–943.
- Wegmüller U., Werner c.l., Nuesch D., Boreaud M., 1995: *Land-Surface analysis using ERS-1 SAR Interferometry*, ESA Bull., no. 81, Paris, 30–37.



Dr Zbigniew Perski (ur. 1970 r.) jest absolwentem Kierunku geologia o specjalności geologia poszukiwawcza na Wydziale Nauk o Ziemi Uniwersytetu Śląskiego. Od roku 1997 zajmuje się zastosowaniem satelitarnej interferometrii radarowej oraz teledetekcji radarowej w badaniach geologicznych i środowiskowych. W 2000 r.

obronił pracę doktorską pt.: *Zastosowanie satelitarnej interferometrii radarowej do określania dynamiki i zasięgu górniczych deformacji terenu na przykładzie wybranych obszarów Górnośląskiego Zagłębia Węglowego*, która stanowi pierwsze tego typu w kraju opracowanie. Jest zatrudniony w charakterze adiunkta w Katedrze Geologii Podstawowej Uniwersytetu Śląskiego; ul. Będzińska 60 41-200 Sosnowiec, tel: 32 2918381 w. 420, perski@us.edu.pl,