

# Osiadania terenu GZW pod wpływem eksploatacji podziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR)

Zbigniew Perski\*

*Satelitarna Interferometria radarowa jest to technika wykorzystująca zdjęcia SAR (Synthetic Aperture Radar), dzięki której uzyskuje się informacje o powierzchni Ziemi przy użyciu różnicy faz sygnałów radarowych docierających do anteny odbiorczej podczas kolejnych obserwacji radarowych tego samego obszaru. Generowanie interferometrycznych map deformacji powierzchni Ziemi z dokładnością centymetrów a nawet milimetrów pozwala na śledzenie zmian związanych z osiadaniami powierzchni wywołanymi różnymi czynnikami. W artykule omówiono podstawy metodyczne satelitarnej interferometrii radarowej, podano również przykłady zastosowań i interpretacji dla osiadań powierzchni nad wyrobiskami podziemnymi na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego.*

**Słowa kluczowe:** SAR, satelitarna interferometria radarowa, osiadania powierzchni, eksploatacja podziemna

Zbigniew Perski — **Surface subsidence of the Upper Silesian Coal Basin (Southern Poland) due to mining, date detected by satellite radar interferometry.** Prz. Geol., 47: 171–174.

*S u m m a r y. Synthetic Aperture Radar Interferometry is a technique for extracting information about the Earth's surface using the phase difference between the signals arriving at the antenna during repeated observations of the same area. SAR interferometry has a high potential for the measurement of land subsidence and other surface changes. The capability of this technique to measure man-induced surface movement to centimetre resolution allows to study the surface changes and subsidence caused by natural and artificial factors. In this paper the principles of methodology of radar interferometry is presented. The new concept for interpretation of differential interferograms is discussed on the example of mining subsidence detection for the Upper Silesian Coal Basin.*

**Key words:** SAR, satellite radar interferometry, surface subsidence, underground mining

Satelitarna interferometria radarowa (InSAR) to technika służąca uzyskiwaniu informacji o powierzchni Ziemi przy użyciu różnicy faz sygnałów radarowych docierających do anteny odbiorczej podczas kolejnych obserwacji radarowych (SAR) tego samego obszaru (Gabriel i in., 1989; Pratti i in., 1994). Satelitarna Interferometria Radarowa wykorzystuje zdjęcia SAR (*Synthetic Aperture Radar* — radar bocznego wybierania z anteną syntetyczną) uzyskane podczas powtarzalnych przelotów satelity nad tym samym obszarem powierzchni Ziemi (*repeat-pass interferometry* — Gens & Ganderen, 1996). Dla satelitów ERS-1 i ERS-2 okres pomiędzy kolejnymi skanowaniami radarowymi tego samego obszaru wynosi 35 dni lub 24 godziny w przypadku użycia danych z obu satelitów ERS-1 i ERS-2 (Solaas i in., 1996).

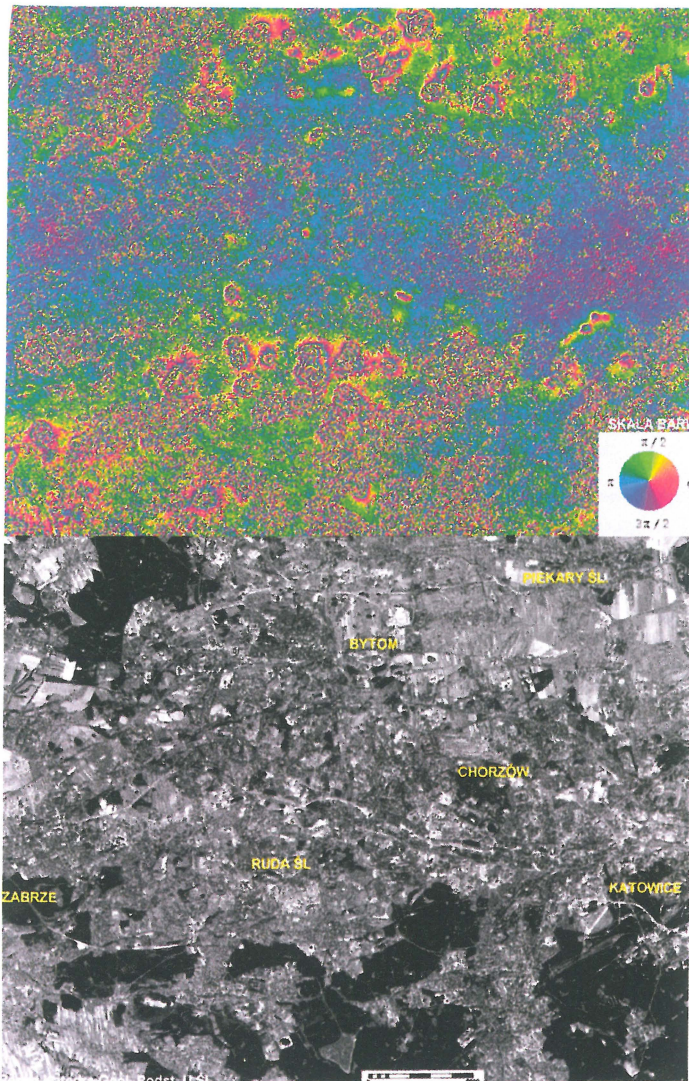
Interferogram (ryc. 1) to obraz różnic faz poszczególnych pikseli dwu obrazów SAR. Różnice fazy przedstawia się standardowo za pomocą odpowiedniej skali barw (ryc. 1, 2) gdzie pełna sekwencja kolorów odpowiada zmianie fazy sygnału radarowego o 360 stopni ( $2\pi$ ). Do wytworzenia interferogramu są potrzebne dwa obrazy SAR: tzw. *master image* i *slave image* (p. tab.1). Jeśli oba obrazy zostały wykonane z dokładnie tej samej pozycji, różnice fazy poszczególnych pikseli wskazywać będą na niewielkie pionowe zmiany powierzchni terenu powstałe w czasie jaki upłynął pomiędzy wykonaniem kolejnych obrazów. Obserwowana na interferogramie zmiana fazy o pełny cykl ( $360^\circ$  czyli  $2\pi$ ) odpowiada połowie długości fali sygnału radarowego (Massonett, 1997). W przypadku satelitów ERS-1 i ERS-2 długość fali wykorzystywanej przez urządzenie SAR wynosi 5,6 cm (FAO/ESA 1993), czyli pełna sekwencja prążków interferometrycznych (zmiana

fazy o  $360^\circ$ ) przedstawia zmianę powierzchni terenu o 2,8 cm w kierunku do satelity (Coulson, 1996).

## Interferometryczny obraz osiadań terenu

Interferogram przedstawia wartości osiadań w ściśle określonych — krótkich interwałach czasowych. Uzyskany obraz jest złożony z przylegających do siebie pikseli, dla danych ERS SAR wielkość pojedynczego piksela wynosi ok. 25 m. Rastrowy charakter danych interferometrycznych sprawia, że nie jest konieczna interpolacja danych, jak to ma miejsce w przypadku pomiarów naziemnych. 35-dniowy cykl obrazowania radarowego SAR tego samego obszaru umożliwia bardzo precyzyjne śledzenie procesu osiadania, jednorazowo dla obszaru kilku tysięcy kilometrów kwadratowych (standardowy obraz ERS SAR ma wymiary 100 x 100 km). Zjawiska osiadań górniczych na Górnym Śląsku są opisywane na podstawie interpolacji wartości obniżenia punktów mierzonych metodami niwelacji geodezyjnej. Pomiarów tych dokonuje się standardowo w interwałach 6. miesięcznych (w szczególnych przypadkach częściej) na podstawie zastabilizowanych punktów wzdłuż linii pomiarowych. Badania te służą przede wszystkim weryfikacji parametrów niecki osiadań obliczanych z wzorów empirycznych, na podstawie wielkości eksploatacji podziemnej (Kwiatek, 1997). Ze względów technicznych tyczenie linii pomiarowych jest uwarunkowane pokryciem terenu (zabudowa, uprawy, obszar leśny) i możliwościami technicznymi przedsiębiorstwa. Wdrażane w ostatnim czasie techniki GPS pozwalają na znacznie uproszczenie i przyspieszenie pomiarów naziemnych. Podobnie jak w przypadku metod tradycyjnych, wyniki pomiarów GPS podlegają standardowej procedurze interpolacji, co w przypadku danych InSAR jest zbyt ciężkie. W dziedzinie zastosowania interferometrii do wykrywania zmian związanych z działalnością człowieka powstały dotychczas prace opisujące wykrywanie osiadań na obsza-

\*Katedra Geologii Podstawowej, Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec, perski@us.edu.pl



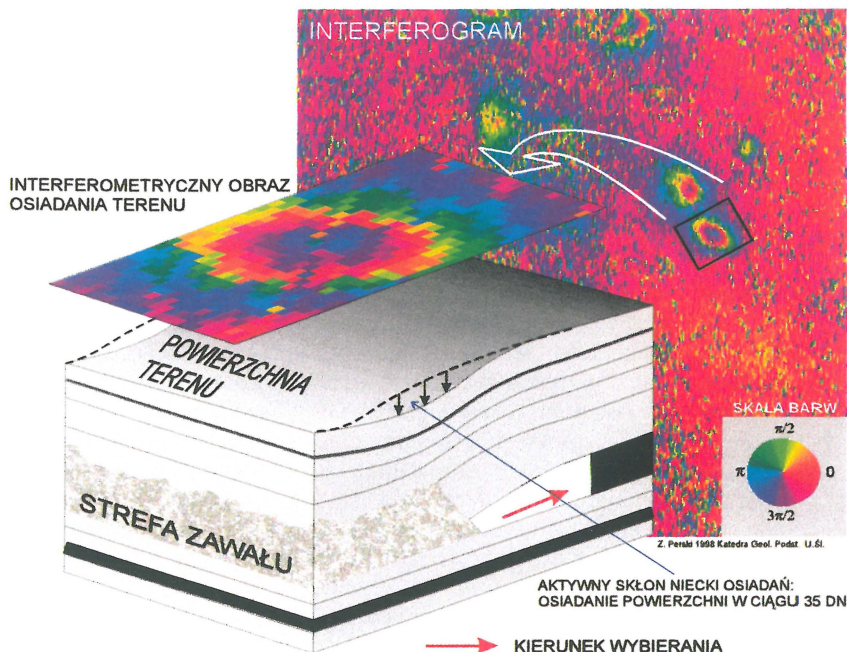
←

Ryc. 1. Interferogram przedstawiający zmiany powierzchni terenu na Górnym Śląsku w czasie 35 dni (03.09.93–08.10.93). Interferogram wygenerowano na podstawie satelitarnych obrazów SAR uzyskanych z satelity ERS-1. Dla porównania przedstawiono ten sam obszar na panchromatycznym zdjęciu SPOT wykonanym 19.08 1996

Fig. 1. The Interferogram showing surface changes in Upper Silesia during 35 days (03.09.93–08.10.93). The Interferogram have been generated from two SAR images acquired by ERS-1 satellite. For comparison, the same area is presented on panchromatic SPOT image acquired in 19.08 1996

zach zurbanizowanych (Haynes i in., 1997) oraz na obszarach wydobywania ropy naftowej i gazu ziemnego (van der Kooij, 1997). Zastosowanie interferometrii do śledzenia wpływu górnictwa węglowego było po raz pierwszy prezentowane przez Ostaficzuka (1995), a po raz pierwszy

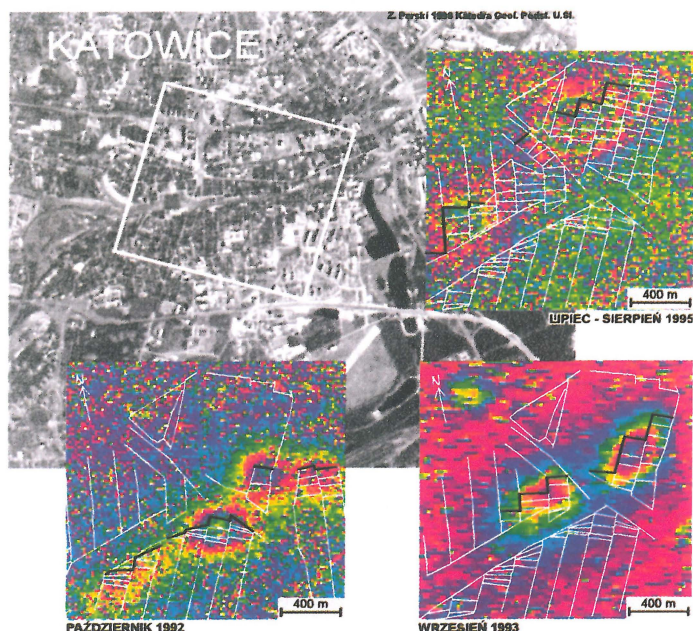
testowane w Wielkiej Brytanii na obszarze Selby Coalfield (Stow & Wright, 1997). Test możliwości zastosowania techniki InSAR w Górnos Śląskim Zagłębiu Węglowym został przeprowadzony w czasie 01.09.1997–15.02.1998 we współpracy z Europejskim Centrum Badań Kosmicz-



←

Ryc. 2. Schemat przedstawiający związki pomiędzy zmianą powierzchni terenu obserwowaną na interferogramie a rozwojem aktywnego skłonu niecki osiadania związane go z osiadaniem górotworu. Maksymur zmian powierzchni terenu obserwowane n interferogramie odpowiada najszybciej obniżającej się części skłonu niecki

Fig. 2. Scheme showing the difference of surface change detected on interferogram as the development of subsidence through Maximal surface changes on interferogram are related to the areas of the highest velocity of downwarping on the active slope of subsidence through.



Ryc. 3. Interferogramy ERS SAR przedstawiające osiadanie terenu na obszarze śródmieścia Katowic w wybranych okresach z lat 1992, 1993 i 1995. Białymi liniami przedstawiono schemat eksploatacji podziemnej w pokładzie 501. Czarne linie obrazują lokalizację frontu eksploatacji w okresie obserwacji interferometrycznej. Czarno-białe, zdjęcie satelitarne SPOT, wykonane 19.08.1996 przedstawia lokalizację obszaru prezentowanego na interferogramach

Fig. 3. ERS SAR interferograms presenting the subsidence of the centre of Katowice city during 35 and 70-days periods in 1992, 1993 and 1995. White lines: the scheme of mine workings in the coal seam no 501; black lines — locations of the longwall faces in the time period presented on interferogram. The panchromatic SPOT image acquired in 19.08.1996 showing the location of the study area

nych Europejskiej Agencji Kosmicznej (Perski, 1998a). Wyniki tego testu pokazały, że Górnos Śląskie Zagłębie Węglowe, w którym na szeroką skalę jest prowadzona eksploatacja podziemna doskonale nadaje się do wdrażania metodyki InSAR. Jako region silnie zaludniony zurbanizowany i uprzemysłowiony jest jednym z niewielu miejsc na świecie gdzie praktyczne zastosowanie satelitarnej interferometrii radarowej może przynieść wymierne korzyści ekonomiczne, zwłaszcza w dziedzinie ochrony środowiska.

### Interpretacja interferometrycznego obrazu osiadań terenu

Przestrzenne analizy interferogramów, map eksploatacji podziemnej i wyników pomiarów obniżenia powierzchni wykazują pełną zgodność lokalizacji prążków interferometrycznych i obszarów występowania osiadań dla tego samego przedziału czasowego (Timmen i in., 1996, van der Kooj, 1997; Stow & Wright, 1997; Perski & Jura, 1998). W przypadku postępującej eksploatacji podziemnej, proces osiadania występuje na powierzchni po ok. 3–14 miesiącach od momentu eksploatacji a ruchy obniżające znikają po upływie ok. 2 lat (Borecki, 1980). Interferogram obejmujący okres 35 dni przedstawia więc jedynie stan chwilowy postępującego procesu osiadania. W obrazie

prążków interferometrycznych zapisane zostają jedynie zjawiska zachodzące na aktywnym skłonie tworzącej się niecki osiadań (ryc. 2). Największe wartości osiadania (centra koncentrycznych prążków interferometrycznych) występują w środkowej części aktywnego skłonu tworzącej się niecki osiadań i identyfikują obszary najszybciej obniżające się. Z powyższych obserwacji wynika, że interferometryczny obraz osiadań terenu jest bardzo dobrym wskaźnikiem przestrzennego rozkładu prędkości obniżania terenu. W przypadku osiadań związanych z eksploatacją otworową koncentryczne prążki interferometryczne w bezpośredni sposób pokażą obniżający się obszar powierzchni oraz pozwolą określić wielkość obniżenia w ściśle określonym czasie. Dla otworowej eksploatacji gazu ziemnego dobre wyniki uzyskuje się na podstawie danych obejmujących dłuższe okresy (van der Kooj, 1997). Parametrami dającymi się bezpośrednio odczytać z rozkładu prążków interferometrycznych są: chwilowa krzywizna skłonu niecki (na podstawie szerokości prążków) rzeczywisty, chwilowy zasięg wpływów eksploatacji (na podstawie wielkości obszaru występowania prążków interferometrycznych) dla eksploatacji podziemnej: szerokość i kształt aktywnego skłonu niecki osiadań (na podstawie szerokości i kształtu prążków interferometrycznych).

### Interferometryczny obraz górniczych osiadań terenu na obszarze śródmieścia Katowic

W latach 1992–1996 na obszarze śródmieścia Katowic była prowadzona, przez KWK Katowice, podziemna eksploatacja węgla w pokładzie 501 (górnos Śląska seria piaskowcowa, Namur B, C). Miąższość eksploatowanej warstwy wynosiła 2,5 m, a wydobycie węgla było prowadzone na głębokości ok. 300 m pod powierzchnią terenu metodą ścianową, systemem trzech ścian eksploatacyjnych z podszadką hydrauliczną. Ponad frontem eksploatacji o sumarycznej długości 700 m i postępującego ok. 25 m miesięcznie, tworzył się aktywny skłon niecki osiadań. Porównanie mapy eksploatacji pokładu 510 z danymi InSAR pozwala na precyzyjną analizę dynamiki procesu osiadania na omawianym obszarze.

Interferogramy (ryc. 3) obejmują okresy 35 dni: październik 1992 i wrzesień 1993 oraz 70 dni: sierpień 1995 i zostały wygenerowane na podstawie danych SAR z satelitów ERS-1 i ERS-2 (tab. 1).

Opracowania interferometryczne zostały porównane z danymi górniczymi KWK Katowice — z mapą eksploatacji pokładu 501 (ryc. 3). Aktywny skłon niecki osiadań jest widoczny jako owalna — eliptyczna koncentracja

Tab. 1. Zestawienie podstawowych parametrów satelitarnych obrazów SAR użytych do wygenerowania prezentowanych interferogramów (por. ryc. 3)

Obraz 1 („master”)			Obraz 2 („slave”)			Okres
satelita	nr. orbity	data	satelita	nr. orbity	data	
ERS-1	06880	08.11.92	ERS-1	06389	04.10.92	35 dni
ERS-1	11661	08.10.93	ERS-1	11160	03.09.93	35 dni
ERS-1	20751	04.07.95	ERS-2	02080	13.09.95	70 dni

prążków migrująca ku NW. Znajdujący się w jej centrum najszybciej obniżający się obszar (ok. 2,8 cm/35 dni) występuje ponad środkiem wypadkowego frontu eksploatacji (por. ryc. 2 i 3) i jest w stosunku do niego przesunięty o ok. 80 m, tj. o równowartość kwartalnego postępu ścian eksploatacyjnych.

W omawianym przypadku wpływ robót górniczych na powierzchnię wystąpił po upływie 4 miesięcy. Tak krótki okres może być tłumaczony stosunkowo płytką eksploatacją oraz występowaniem w nadkładzie skał karbonu ok. 50 m czwartorzędowych aluwii doliny Rawy. Duży wpływ miało tu również osłabienie górotworu wywołane występowaniem starych zrobów (niektóre z końca XIX w.).

Interferogram z października 1992 r. przedstawia również zakończenie wydobywania w części południowej (ryc. 3). W tym przypadku wpływy eksploatacji pojawiły się po ok. 6 miesiącach. Opóźnienie wystąpienia osiadań może wynikać z innej budowy nadkładu, zbudowanego wyłącznie z warstw karbońskich (wchodnia utworów warstw orzeskich).

Wielkości osiadań zarejestrowane w wyniku pomiarów naziemnych okazują się być w praktyce nieporównywalne z osiadaniem zarejestrowanymi metodą interferometrii radarowej. Z uwagi na zmienną w czasie prędkość obniżania terenu pomiary realizowane w interwałach sześciomiesięcznych wykazują znacznie uśrednione wartości w stosunku do chwilowych osiadań zarejestrowanych interferometrycznie.

### Wnioski

Osiadania powierzchni terenu wywołane przez eksploatację górnictwem dają się bardzo dobrze mierzyć na podstawie danych satelitarnych. Nowa technika badawcza pozwala po raz pierwszy przedstawić przestrzenną charakterystykę osiadań w ściśle określonym, i na całym obszarze tym samym, czasie.

Interpretacja interferogramów może w znaczący sposób zwiększyć precyzję poznania dynamiki osiadań powierzchni, ich rzeczywistych zależności od budowy geologicznej nadkładu, szybkości eksploatacji, sposobu kierowania stropem i geometrii wyrobisk górniczych. Rozważania teoretyczne pozwalają sądzić, że obserwacja zmian prędkości osiadania na interferogramach z następujących po sobie interwałów czasowych może pozwolić na wykrycie niebezpiecznego narastania naprężeń w górotworze. Opracowanie metodyki badań interferometrycznych, szczególnie w zakresie interpretacji interferogramów może, oprócz lepszego poznania zjawisk deformacji górotworu, przyczynić się do poprawy bezpieczeństwa eksploatacji, lepszej ochrony obiektów budowlanych na powierzchni terenu, zmniejszenia niekorzystnego wpływu górnictwa na środowisko, a także ułatwić planowanie dużych przedsięwzięć inżynierskich na terenach górniczych. W Katedrze Geologii Podstawowej Uniwersytetu Śląskiego jest realizowany we współpracy z Europejską Agencją Kosmiczną pilotażowy projekt zastosowania interferometrii SAR dla obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Jego zadaniem jest zbadanie, przy użyciu zdjęć SAR, przestrzennej charakterystyki osiadań wywołanych eksploatacją, jak również, przy współdziałaniu przemysłu węglowego, zweryfikowanie modeli matematycznych osiadań i map prognostycznych obniżenia terenu dla dużych obszarów. Specyfika satelitarnej interferometrii radarowej stwarza unikalną szansę na określenie dynamiki procesu osiadania

oraz śledzenie zmian środowiska geologicznego towarzyszących przesuwałemu się frontowi eksploatacji. W ramach testów (Perski, 1998b) zostało wykonanych 10 interferogramów obejmujących 35 i 70-dniowe interwały czasowe z lat 1992, 1993 i 1995 dla całego obszaru objętego eksploatacją węgla kamiennego. Trwają prace interpretacyjne tych danych na podstawie górniczych map eksploatacji podziemnej.

Autor składa serdeczne podziękowania Europejskiej Agencji Kosmicznej za udostępnienie materiałów do badań, jak również za udostępnienie sprzętu komputerowego i specjalistycznego oprogramowania. Dziękuję dyrekcji Katowickiego Holdingu Węglowego SA i dyrekcji Kopalni Węgla Kamiennego „Katowice” za udostępnienie archiwalnych danych na temat eksploatacji górnictwem. Szczególnie serdeczne podziękowania składam mgr inż. J. Ogórkowi i dr T. Pytlarzowi za okazaną pomoc w udostępnianiu danych jak również liczne uwagi i dyskusje. Dziękuję również dr D. Jurze za pomoc w szczegółowej interpretacji danych górniczych i dyskusje.

### Literatura

- BORECKI M. (red.) 1980 — Ochrona powierzchni przed szkodami górnictwem. Wyd. Śląsk, Katowice: 1–967.
- COULSON S.N. 1996 — SAR Interferometry with ERS. *Earth Space Rev.*, 5: 9–16.
- GENS R. & GENDEREN J.L. VAN 1996 — SAR interferometry — issues, techniques, applications. *International J. Remote Sensing*, 17: 1803–1835.
- GABRIEL A.K., GOLDSTEIN R.M. & ZEBKER H.A. 1989 — Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *J. Geoph. Res.*, 94: 183–19191.
- HAYNES M., CAPES R., LAWRENCE G., SMITH A., SHILSTON D. & NICHOLLS G. 1997 — Major Urban Subsidence Mapped by Differential SAR Interferometry. *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, Italy, <http://florence97.ers-symposium.org/data/hanssen/index.html>.
- van der KOOIJ M. 1997 — Land Subsidence Measurements at the Belridge Oil Fields from ERS InSAR Data. *Proceedings of the Third ERS Symposium*, Florence, Italy, <http://florence97.ers-symposium.org/data/vanderkooij/index.html>.
- KWIATEK J. (red.) 1997 — Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych. Wyd. GIG, Katowice: 1–726.
- FAO/ESA 1993 — Radar Imagery: Theory and interpretation. Lecture notes. (Lichtenegger J. Raney R.K., Schumman R.), *FAO Remote Sensing Centre Series*, Rome 67, 103: 1–103.
- MASSONNET D. 1997 — Satellite Radar Interferometry, *Scientific American* no.2, <http://www.sciam.com/0297issue/0297massonnet.html>.
- OSTAFICZUK S. 1995 — Interferometrii and its possible application in geology. *FORGES Remote Sensing Group Meeting*, Warsaw 16–18.10.95 (referat).
- PERSKI Z. 1998a — Applicability of InSAR for land subsidence: monitoring of the coal mining region, Upper Silesia, Poland, *ESA report*, Frascati: 1–23.
- PERSKI Z. 1998b — 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*, 32: 555–558.
- PERSKI Z. & JURA D. 1998 (w druku) — ERS SAR Interferometry for Land Subsidence Detection in Coal Mining Areas, *Earth Observation Quarterly*.
- 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.
- SOLAAS G., GATELLI F. & CAMPBELL G. 1996 — Initial testing of ERS Tandem data quality for In SAR applications, *ESA RS/ED96.D002/1.0*: 1–54.
- STOW R. & WRIGHT P. 1997 — Mining Subsidence Land Surveying by SAR Interferometry, 1997 ERS-symposium, Florence, <http://earth1.esrin.esa.it/florence/papers/data/stowetal/index.html>.
- TIMMEN L. YE X., REIGBER C., HARTMAN R., FIXSEL T., WINZER W. & KNOCH-WEBER J. 1996 — Monitoring of Small Motions in Mining Areas by SAR Interferometry, *FRINGE 96, ESA Workshop on Applications of ERS SAR Interferometry*, Zurich, <http://www.geo.unizh.ch/rs/FRINGE96/papers/timmen-et-al/index.html>.