

Artur Krawczyk

*Katedra Ochrony Terenów Górniczych, Akademia Górniczo Hutnicza Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii
środowiska Al. Adama Mickiewicza 30, 30-059 KRAKÓW artkraw@uci.agh.edu.pl
tel. 617 22 76*

Zbigniew Perski

*Katedra Geologii Podstawowej, Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski,
ul. Będzińska 60, 41-200 SOSNOWIEC, perski@us.edu.pl
tel: 32 291 8381 w.420, 206, fax: 32 2915865*

Zastosowanie satelitarnej interferometrii radarowej na terenach eksploatacji rud miedzi w LGOM

Satelitarna Interferometria Radarowa jest to unikalna metoda pozwalająca na badanie obniżeń terenu w ściśle określonym i dokładnie tym samym przedziale czasowym, na obszarze dziesiątek tysięcy kilometrów kwadratowych jednocześnie. Metoda ta wykorzystuje wzajemne przesunięcia fazy sygnałów radarowych dwóch satelitarnych obrazów SAR (Synthetic Aperture Radar). Jak do tej pory technika ta została już zastosowana na terenie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, gdzie przeprowadzone badania jednoznacznie wykazały pozytywne wyniki dostarczając informacji o rejonie występowania obniżeń, ich zasięgu oraz wielkości. W niniejszym artykule zostaną zaprezentowane wyniki pierwszych w świecie badań nad zastosowaniem tej metody dla obszaru podziemnej eksploatacji rud miedzi w Legnicko - Głogowskim Zagłębiu Miedziowym. W wyniku badań uzyskany został obraz interferometryczny, który przedstawia dwumiesięczne przyrosty obniżeń terenu ponad parcelami eksploatacji. W niniejszym artykule przedstawiono korzyści płynące z zastosowania satelitarnej interferometrii radarowej w dziedzinie ochrony terenów górniczych.

1. Wstęp

Ciągły rozwój technologii teledetekcyjnych umożliwia pozyskiwanie coraz bardziej zróżnicowanych informacji o zjawiskach będących dotychczas domeną badań innych dyscyplin naukowych. Jedną z takich dziedzin jest ochrona terenów górniczych, w której w ostatnich latach w Polsce zaczęto stosować radarowe obrazy satelitarne (Perski 1998). Pozyskanie danych z obrazów radarowych polega na przetwarzaniu różnic fazowych dwóch obrazów, w wyniku czego uzyskujemy z nich jeden obraz interferometryczny. Otrzymany obraz umożliwia obserwację zmian wysokościowych powierzchni terenu. Pierwotnie zdjęcia te wykorzystywano do obserwacji ruchów skorupy ziemskiej (Gabriel i inn., 1989), wywołanych zarówno przez ruchy płyt kontynentalnych jak i wystąpieniem trzęsień ziemi. Bardzo szybko wykazano dużą przydatność obrazów interferometrycznych do obserwacji zmian powierzchni terenu poddanego wpływom eksploatacji podziemnej. Pierwsze, badania na terenie Polski podjęto w 1997 roku na terenie Górnośląskiego Okręgu Przemysłowego (Perski, 1998). Badania te potwierdziły wysoką wiarygodność danych interferometrycznych oraz szczególną ich przydatność do monitoringu środowiska jak i śledzenia zmian dynamiki osiadania terenu. Niniejsza praca jest pierwszym zastosowaniem metody interferometrycznej na obszarze Legnicko - Głogowskiego Okręgu Miedziowego gdzie eksploatacja podziemna podobnie jak na Górnym Śląsku również wywołuje przemieszczenia i deformacje powierzchni terenu.

2. Obszar badań

Na terenie Legnicko – Głogowskiego Zagłębia Miedziowego (LGOM) znajduje się 7 obszarów górniczych, w których prowadzona jest eksploatacja górnicza przez 3 zakłady górnicze. Łącznie obszary górnicze kopalń LGOM zajmują teren ok. 400 km². W zasięgu wpływów bezpośredniej eksploatacji górniczej znajdują się dwa miasta Lubin i Polkowice oraz kilkanaście wsi. W celu ochrony obiektów budowlanych na terenach miejskich oraz szybów górniczych zostały wyznaczone filary ochronne. Prowadzona od początku lat 60-tych eksploatacja rud miedzi spowodowała powstanie niecek obniżeniowych terenu wywołanych zarówno eksploatacją podziemną jak i odwodnieniem górotworu. Wielkości obniżeń na terenie LGOM w obszarach intensywnej eksploatacji prowadzonej najczęściej systemem filarowo-komorowym z zawałem stropu osiągają średnie wartości od 2000 do 2600 mm. Wartość maksymalnego obniżenia w_{max} została zaobserwowana na obszarze górnicyzm „Polkowice II” i wyniosła ona 3380 mm (Popiołek, 1998). Pomiary geodezyjne jak i wyliczenia teoretyczne wskazują, że średnia prędkość ujawniania się tego typu obniżeń nad eksploatacją zawałową nie przekracza 1,25 mm/dobę a maksymalna nie powinna przekroczyć 100% wartości średniej, czyli 2,5 mm/dobę (Ostrowski i inn., 1996).

Na obniżenia wywołane eksploatacją rudy miedzi nakładają się również zmiany wysokościowe powierzchni terenu powodowane tworzeniem się tzw. wielkopowierzchniowej niecki odwodnieniowej, której średnie wartości obniżeń od rozpoczęcia odwadniania złoża nie przekraczają 300 mm. Maksymalną wielkość obniżeń wywołanych odwodnieniem zanotowano w obszarze górniczym „Lubin I” i wyniosła ona 710 mm. Maksymalna prędkość narastania obniżeń nie przekroczyła 30 mm/rok, czyli około 0,085 mm/dobę (Popiołek, 1997). W praktyce przyjmuje się, że średnia wielkość obniżeń wywołanych odwodnieniem wynosi ok. 7 - 11 mm/rok co daje od 0,018 mm/dobę do 0,03 mm/dobę.

3. Zastosowana metodyka pomiarowa

Do wytworzenia interferogramu zastosowano radarowe obrazy satelitarne typu SAR (Synthetic Aperture Radar) - radarogramy wykonywane sekwencyjnie przez satelitę ERS-1 Europejskiej Agencji Kosmicznej w czasie kolejnych nalołów. Wykonywanie radarogramów przez satelitę ERS-1 polega na rejestracji przez antenę SAR odbitej od powierzchni ziemni fali radarowej. W trakcie rejestracji radarogramu zapisywane są informacje o intensywności odbicia fali oraz o jej fazie w momencie dotarcia do odbiornika. Informacje o intensywności odbicia (inaczej stopnia pochłaniania fali radarowej) przydatne są do tworzenia map zagospodarowania terenu. Natomiast w dziedzinie ochrony terenów górniczych istotną własnością radarogramów jest informacja o różnicach fazy fal odbitych w różnym czasie z tego samego obszaru. Zmiana fazy sygnału na radarogramie o pełny cykl 360° , jest określona przez długość fali radarowej, która w przypadku wymienionych wcześniej satelitów wynosi 5,6 cm (FAO/ESA 1993). Posiadając dwa radarogramy wykonane w różnym czasie można następnie znaleźć wartości fazy o jakie różnią się te dwa sygnały. Otrzymany obraz interferometryczny przedstawia zmiany wysokościowe powierzchni terenu w postaci obrazu interferencyjnego, gdzie zmiana fazy o pełny cykl 360° odzwierciedla ok. 2,8 cm, różnicę wysokości powierzchni terenu jaka powstała w czasie pomiędzy wykonaniem kolejnych radarogramów. Ze względu na kąt padania fali radarowych trzeba uwzględnić poprawkę - zanotowanemu obniżeniu równemu 2,8 cm mierzonemu wzdłuż kierunku padania fali Ziemia-satelita odpowiada obniżenie powierzchni odbijającej o 2,58 cm w kierunku pionowym.

4. Wykonane prace

W ramach prowadzonych badań pozyskano dane o prowadzonej eksploatacji górniczej w latach 1960 - 1994 na obszarze LGOM, oraz mapy powierzchni terenu w skali 1:10000.

Na podstawie opisanych w rozdziale 1 wielkości i prędkości powstawania obniżeń terenu na obszarze LGOM oszacowano, że do wykonania pierwszej interferometrycznej obserwacji obniżeń zostanie przyjęta baza czasowa równa 2 miesiącom. W wyniku badań powinny zostać zaobserwowane niecki obniżeniowe, nad eksploatacją zawałową o średniej wielkości obniżeń ok. 75 mm/60dni (a maksymalne obniżenie nie powinno przekroczyć 150 mm/60 dni). W tym czasie wielkość niecki odwodnieniowej powinna wynieść średnio 1,5 mm/60 dni.

Do analizy w ramach niniejszej pracy zostały wyselekcjonowane dwa radarogramy ERS SAR, spełniające poniższe kryteria:

- warunki meteorologiczne zostały sprawdzone dla stacji Polkowice Dolne, w wybranych dniach nie było pokrywy śnieżnej oraz nie było żadnych opadów,
- interferometryczna odległość bazowa nie większa niż 100 m,
- baza czasowa 60 dni.

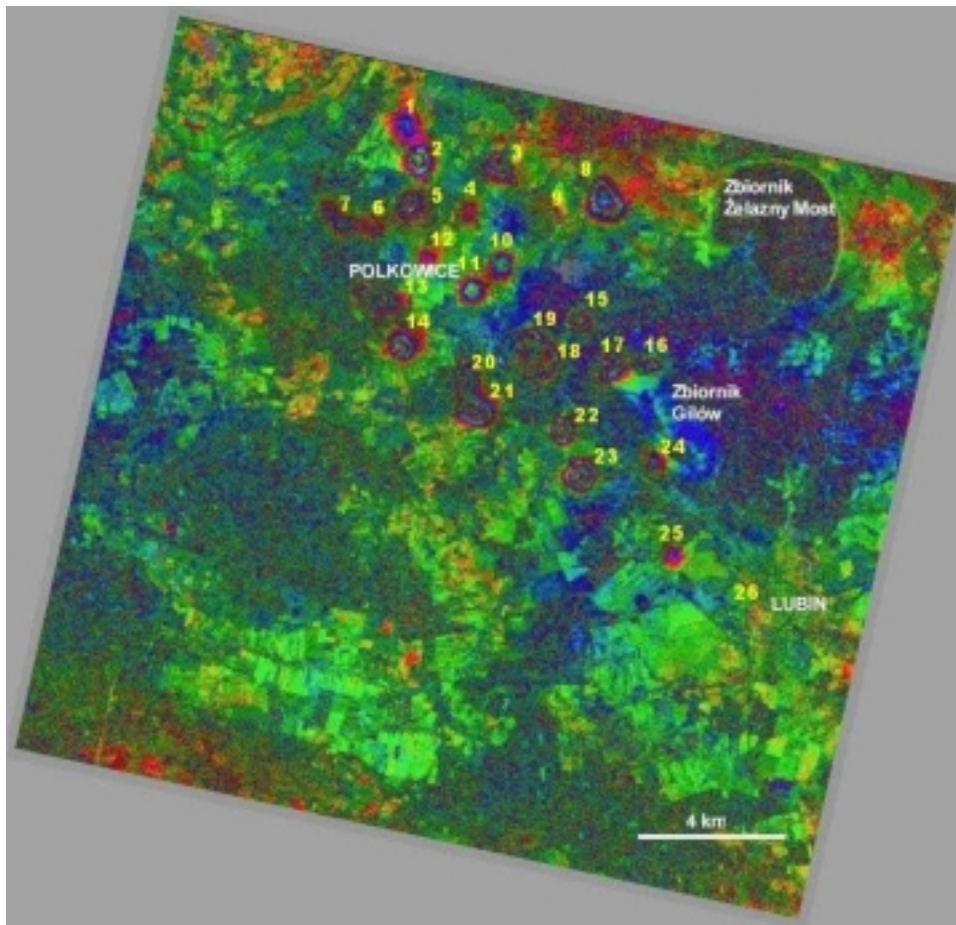
W odniesieniu do powyższych kryteriów wyselekcjonowano ostatecznie dwa obrazy SAR SLC. Niewielkie rozmiary obszaru badań pozwoliły na zamówienie południowo - wschodniej ćwiartki z pełnego kadru obrazu. Radarogramy zostały wykonane podczas fazy D misji satelity ERS-1 tzw.: "second ice phase" zoptymalizowanej dla eksperymentów arktycznych. Satelita pracował w 3-dniowym cyklu obrazowania sekwencyjnego.

Charakterystyka wyselekcjonowanych danych:

<i>Satelita: ERS-1, typ danych: SAR SLC quarter,</i>				
	ORBITA	DATA	Baza czasowa	Bperp
Obraz MASTER	12921	10.01.1994	60 dni	24 m
Obraz SLAVE	13867	11.03.1994		

Za pomocą oprogramowania EarthView (Antalntis, 1997) w Katedrze Geologii Podstawowej UŚ z wyżej przedstawionych radarogramów wykonano jeden interferogram.

Niewielka wartość odległości bazowej i stosunkowo niewielkie deniwelacje terenu pozwoliły na zaniedbanie wpływu topografii terenu na obraz interferometryczny. W niektórych częściach obrazu jest jednak widoczny tzw. efekt atmosferyczny w postaci regionalnego trendu zmiany fazy. Nie wpływa to jednak znacząco na jakość otrzymanych wyników (rys.1).



Rys. 1. Liczba i rozmieszczenie dynamicznych niecek obniżeniowych

Już etap przetwarzania wstępnego pokazał, że wyselekcjonowane dane prezentują bardzo wysoką jakość, manifestującą się w postaci wartości koherencji bliskich 1. Tak wysoka jakość danych interferometrycznych dla podobnych obszarów rolnych jest, ze względu na warunki klimatyczne, rzadkością w Europie Środkowej, nawet w przypadku baz czasowych 35 dni (Perski 1999a).

W pierwszym etapie przetwarzania zdecydowano się na interferometryczne przetwarzanie całej ćwiartki radarogramu. Umożliwiło to sprawdzenie gdzie dokładnie znajdują się miejsca występowania obniżenia terenu dla wyselekcjonowania ostatecznego fragmentu obrazu do przetwarzania. Stwierdzono, że prążki interferometryczne wywołane obniżeniami terenu występują jedynie w północnej części, co doskonale koreluje się z zasięgiem obszarów górniczych LGOM. Ostatecznie do właściwego przetwarzania wybrano obszar 1580 x 1530 pikseli.

Następnie zarówno radarogramy jak i interferogram zostały zaimportowane do środowiska Systemu Informacji o Terenie Górniczym (Popiołek 1993, Piwowarski i Krawczyk, 1999) i tam została dokonana interpretacja danych. W trakcie przetwarzania znaczącym problemem okazało się wpasowanie niezwykle precyzyjnego co do wartości składowej pionowej obrazu interferometrycznego w układ współrzędnych poziomych x,y dla których dokładność wyznaczania ograniczona jest wielkością piksela równą 20 m na 20 m.

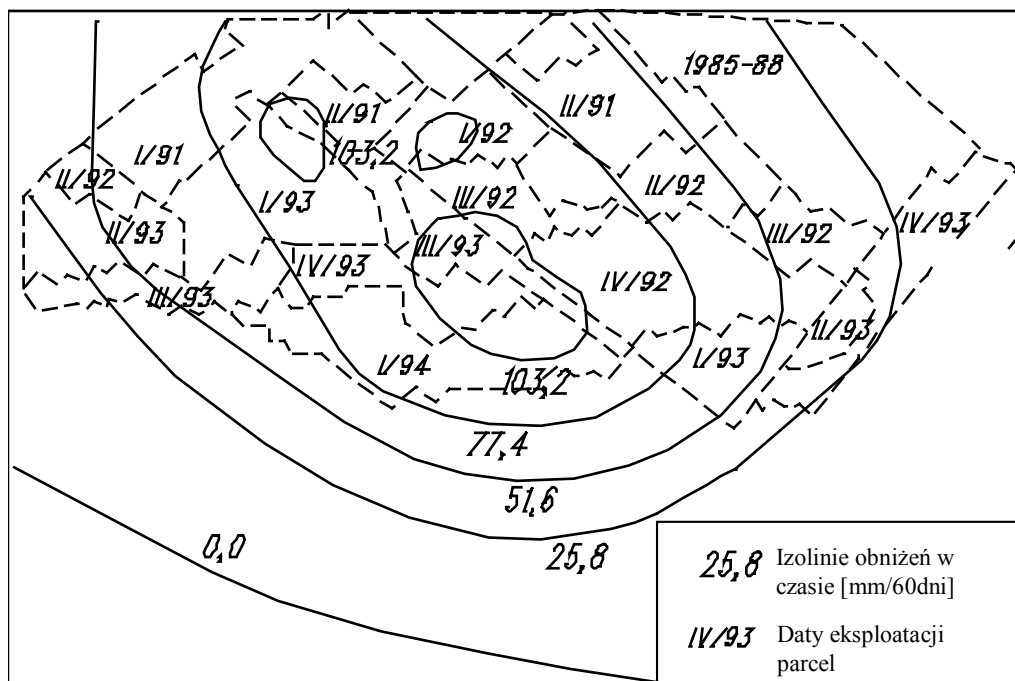
5. Powiązanie otrzymanych interferogramów z prowadzoną eksploatacją górniczą

W wyniku analizy interferogramu zlokalizowano 26 dynamicznych skłonów niecek obniżeniowych. Po wpasowaniu interferogramu w układ współrzędnych „Pieszkowice” przystąpiono do analizy korelacji występowania niecek obniżeniowych z parcelami eksploatacji. W wyniku analizy ustalono, że centra 24 niecek obniżeniowych występują na granicach eksploatacji prowadzonej w IV kwartale 1993 roku i I kwartale 1994. Natomiast pozostałe dwie niewielkie niecki obniżeniowe zaobserwowano w sąsiedztwie starych zrobów. Na „OG Sieroszowice I” zaobserwowano

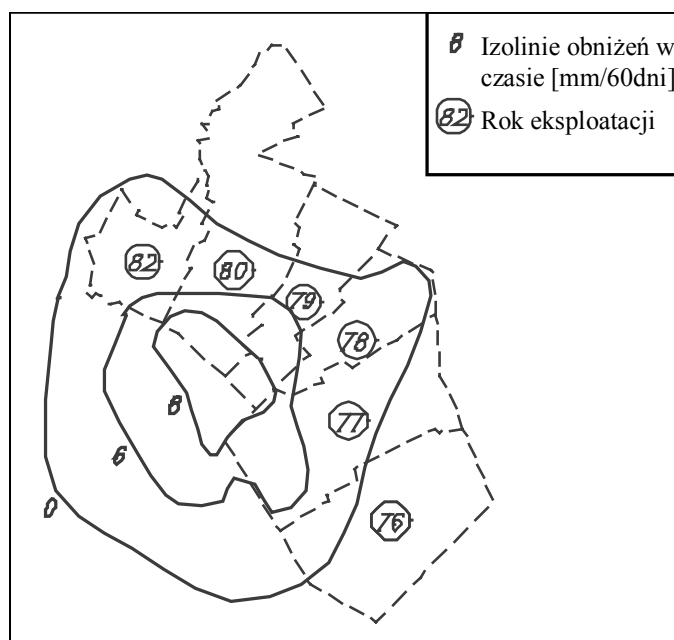
4 dynamiczne niecki obniżeniowe nr: 1, 2, 5, 7. Żadna z tych niecek nie przekroczyła 70 mm/60dni. Ogólnie, w badanym okresie obniżeniom został poddany teren o powierzchni ok. 342,8 ha.

Na terenie „OG Polkowice II” zaobserwowano 6 niecek obniżeniowych nr: 6, 13, 14, 20, 21, 22 oraz 12. Na tym terenie górniczym najgłębszą dynamiczną niecką obniżeniową jest niecka numer 21. Osiągnęła ona w ciągu 60 dni obniżenie ok. 110 mm. Na rysunku 2 przedstawiono omawianą nieckę oraz kształt i rozmieszczenie parcel eksploatacji.

Rys. 2. Niecka obniżeniowa nr 21

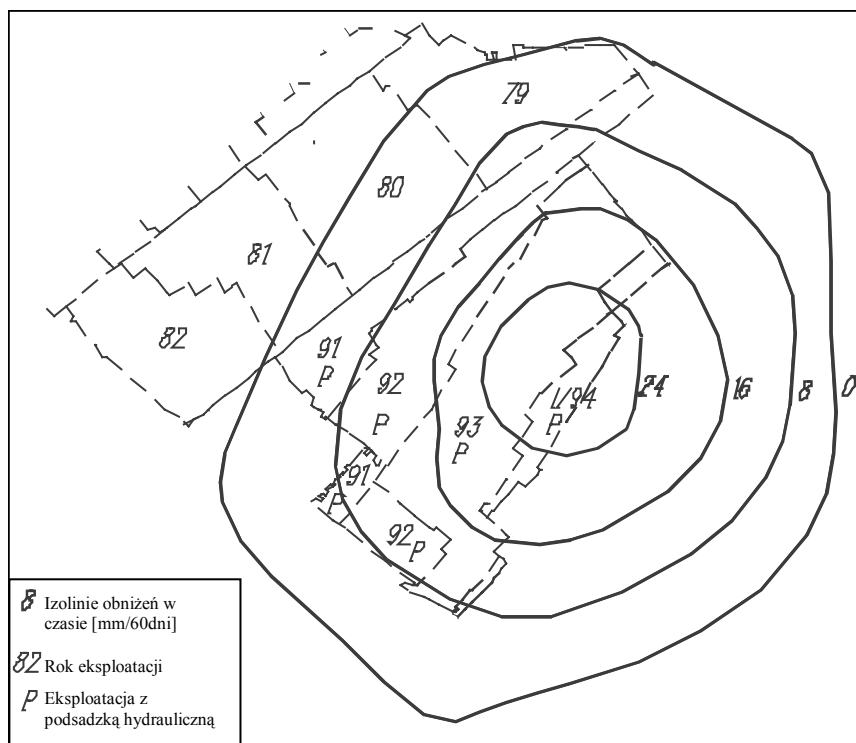


Tak jak niecka 21 wszystkie pozostałe były bezpośrednio związane z eksploatacją przełomu lat 1993 - 1994. Zaobserwowano również jedną stosunkowo płytką nieckę nr 12 nie związaną z bieżącą eksploatacją. Niecka ta wykształciła się nad obszarem eksploatacji z lat 1976 – 1982 (rys. 3). Pewnym wyjaśnieniem może być informacja, że w roku 1994 w bezpośrednim sąsiedztwie starych zrobów była wykonywana rozcinka złoża przygotowująca parcele do eksploatacji w latach 1995 – 1998. Pozwała to na wysunięcie hipotezy o związku występowania omawianej niecki z przygotowaniem złoża do eksploatacji.



Rys. 3. Niecka obniżeniowa nr 12

Na terenie „OG Rudna I” zaobserwowano 9 niecek obniżeniowych. Ze względu na prowadzenie przez „O/ZG Rudna” eksploatacji w filarze ochronnym miasta Polkowice porównano tempo przyrostu obniżeń w obszarze filaru w stosunku do obniżeń na pozostałym terenie. Jak wykazała analiza interferogramu w czasie badań w filarze była prowadzona eksploatacja, która spowodowała powstanie dwóch dynamicznych skłonów niecek obniżeniowych nr 10 i 11. Średnie obniżenie tych niecek wyniosło ok. 25 mm/60dni. Wszystkie pozostałe niecki, na obszarze „O/ZG Rudna”, których powstanie bezpośrednio wiąże się z eksploatacją z lat 1993/94 osiągnęły średnie obniżenie ponad 50 mm/60dni. Poniżej na rysunku 4 przedstawiono nieckę numer 10.



Rys. 4. Niecka obniżeniowa nr 10

Ponadto na omawianym obszarze, pomiędzy szybami R-VII i R-IX zarejestrowano największą pod względem obszaru, pojedynczą nieckę obniżeniową nr 8. Obejmuje ona swym zasięgiem ok. 199 ha.

W OG „Lubin” zaobserwowano wystąpienie 6 dynamicznych skłonów niecek obniżeniowych nr 16, 23, 24, 25 i 26. Niecka nr 26 wystąpiła na granicy Obszarów Górniczych „Lubin I” i „Małomice I”. Wszystkie pozostałe niecki wykształciły się w granicach OG „Lubin I”. Najgłębszą zarejestrowaną niecką jest niecka numer 23, która w ciągu 60 dni osiągnęła głębokość około 110 mm.

Na obszarach górniczych „Rudna II” i „Radwanice Wschód” w pierwszym kwartale 1994 nie zaobserwowano żadnych niecek obniżeniowych.

6. Szczegółowe wnioski z przeprowadzonych badań w LGOM

1. Omawiana metodę pomiarów obniżeń możemy zakwalifikować jako nie geodezyjną technikę pomiarów deformacji ciągłych terenu wywołanych górnictwem eksploatacją podziemną.
2. Wpasowanie interferogramów w istniejące górnicze mapy powierzchni terenu, które wykonywane są w skalach 1:10.000 i większych jest bardzo trudne do wykonania - bardziej przydatne do tego celu są mapy w skalach 1:25.000 i mniejszych.
3. Do interpretacji całego obszaru LGOM obecnie wystarczy pozyskanie 1/4 kadru obrazu satelitarnego. W przypadku podjęcia w przyszłości eksploatacji w pn. części OG „Sierszowice I” oraz wschodniej części OG „Małomice I” konieczne byłby pozyskiwanie całego kadru obrazu satelitarnego.
4. Zaobserwowano 24 dynamiczne skłony niecek obniżeniowych, których powstanie wiąże się bezpośrednio z prowadzeniem eksploatacji ostatniego kwartału 1993 roku i pierwszego kwartału 1994 roku.
5. Wszystkie zaobserwowane niecki obniżeniowe nadają się do dalszej interpretacji. Ze względu na rodzaj zagospodarowania terenu, przede wszystkim z uwagi na tereny leśne, niecki charakteryzują się różnym poziomem trudności w ich interpretacji.

6. Zaobserwowane niecki obniżeniowe nad terenami eksploatowanymi systemem zawałowym w ciągu 2 miesięcy osiągnęły maksymalną wartość ok. 110 mm/60dni (1,83 mm/dobę) i nie przekroczyły przewidywanej wartości maksymalnej 2,5 mm/dobę.

7. Wnioski ogólne

Wykonane badania skłoniły autorów do przeprowadzenia rozważań dotyczących szerszego aspektu wykorzystania interferometrii satelitarnej w ochronie terenów górniczych. Można zwrócić uwagę tutaj na pewne korzyści oraz ograniczenia prezentowanej metody badań. Jednak przed przejściem do ich omówienia niezbędnym elementem jest uwypuklenie trzech szczególnie istotnych własności tej metody:

1. **Niezależność pomiaru** zarówno zakłady górnicze jak i gminy położone na terenach górniczych mogłyby wykorzystać do pozyskiwania informacji o rejonie występowania obniżeń, ich zasięgu oraz wielkości,
2. **Koszt pomiaru** w przypadku zdjęć satelitarnych to koszt zakupu dwóch radarogramów wynoszący aktualnie ok. 8000 zł, a na podstawie okresowej umowy cena spada od 20% do 40%,
3. **Częstotliwość wykonywanych pomiarów** - radarogramy określonego obszaru Kuli Ziemskiej obecnie są możliwe do wykonania w interwałach 35 dniowych.

W praktyce możemy przyjąć, że zastosowanie tej metody może przynieść następujące korzyści:

1. jak wykazano można monitorować prowadzenie eksploatacji w filarach ochronnych miast,
2. niezwykle łatwe jest stworzenie na podstawie interferogramów map izolinii obniżeń w ciągu badanego okresu czasu a ciągłość pozyskiwania informacji może wydatnie podnieść dokładność wykreślenia map eksploatacji dokonanej,
3. szczególnie atrakcyjna możliwość uzyskania stosunkowo wysokiej (tzn. w porównaniu do cykli rocznych lub dwuletnich) częstotliwości tanio wykonywanych pomiarów obniżeń, co umożliwi prowadzenie monitoringu tempa przyrostu obniżeń.

Oczywiście podejmując kroki w celu stałego stosowania metody do badań obniżeń terenu należy mieć na uwadze pewne uwarunkowania omawianej metody. Na pewno pierwszy okres badań musi zostać poświęcony na wykonanie interpretacji obszarów i okresów najlepszej stosowności metody. Ponadto istnieją pewne zależności od techniki satelitarnej:

1. zachowanie stałej bazowej - pozycje satelity podczas kolejnych pomiarów tego samego obszaru powinny być identyczne, w rzeczywistości pomimo najlepszego spośród istniejących systemów kontroli orbity satelitów ESA, występujące odchyłki orbit są wielokrotnie zbyt duże dla interferometrii,
2. rejestracja danych musi być wcześniej zamawiana, gdyż urządzenie SAR nie pracuje w sposób ciągły,
3. decyzje ESA dotyczące kontynuacji programu satelitarnych obserwacji radarowych,
4. przypadkowa utrata/awaria satelity,

Kolejną cechą omawianej metody jest zależność wykonywanych pomiarów od warunków wykonywania zdjęcia:

1. ogólnie warunki atmosferyczne mają bardzo istotny wpływ na jakość interferogramów, zjawiska atmosferyczne takie jak pokrywa śnieżna, wszelkiego typu opady atmosferyczne bardzo utrudniają wykonanie wiarygodnego interferogramu,
2. ze względu na długość fali lasy skutecznie przesłaniają możliwość penetracji terenu przez stosowane fale radarowe, ponadto intensywna wegetacja w okresie wiosennym niekorzystnie wpływa na jakość interferogramu (Perski 1999a),

Ostatnim czynnikiem który już był tutaj wcześniej omawiany jest niska dokładność pomiarów poziomych co powoduje, że uzyskane obrazy interferogramów są dość trudne do prawidłowego wpasowania w lokalny układ współrzędnych.

Analizując powyższe ograniczenia należy również mieć na uwadze, że już 10 lat upłynęło od wystrzelenia pierwszego europejskiego cywilnego satelity ERS-1 przeznaczonego do wykonywania satelitarnych zdjęć radarowych. Przez ten okres czasu zdjęcia radarowe jak i interferometryczne znalazły szereg zastosowań, m.in. do monitoringu ruchów skorupy ziemskiej, obserwacji aktywności wulkanicznej, budowy modelu terenu, monitoringu upraw rolniczych i obserwacji przyrodniczych. Tak szeroka gama zastosowań radarogramów stała się przyczyną podjęcia decyzji przez ESA nad dalszą kontynuacją programu obserwacji radarowych naszego globu. W 1995 roku wystrzelono drugiego satelitę tego samego typu o nazwie ERS-2. W 1999 roku satelita ERS-1 zakończył swoją misję. Obecnie przygotowany jest następcą satelity ERS-2, satelita Envisat-1. Perspektywa kontynuacji obserwacji radarometrycznych stwarza przesłanki do podjęcia działań zmierzających do eliminacji dotychczasowych ograniczeń metody. Na przykład ewentualne zastosowanie naziemnych reflektorów radarometrycznych (o znanych współrzędnych) w czasie wykonywania radarogramu pozwoliłoby na znaczne poprawienie jakości wpasowania interferogramu w wybrany układ współrzędnych. Zamawianie zdjęć satelitarnych na krótko przed ich wykonaniem daje pewność co do warunków atmosferycznych i przyrodniczych (wegetacja, pokrywa śnieżna).

Jak widać z niniejszych rozważań możliwości wykorzystania opisanej technologii nie zostały jeszcze wyczerpane a dotychczasowe efekty wskazują na duże możliwości praktycznego wykorzystania interferometrii w ochronie terenów górniczych w LGOM.

Literatura

Atlantis.: *EarthView InSAR version 1.1.0 User's Guide*, Atlantis Scientific Inc., Ontario, 1997.

ESA 1995: *Satellite Radar in Agriculture*. ESA raport SP-1185, (red: Tan-Duc Guyenne), 1-71, Noordwijk.

Gabriel A. K., Goldstein R. M., Zebker H. A. *Mapping small elevation changes over large areas: differential radar interferometry* Journal of Geophysical Research: Solid Earth and Planets, Vol. 94, No. B7, pages 9183 -9191; July 10, 1989.

Kwiatek J. (red.): *Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych*. Wyd. GIG, Katowice, 1997.

Massonnet D., Feigl K. L.: *Radar interferometry and its application to the changes in the Earth's surface*. Reviews of Geophysics, Vol. 36, No. 4, 1998.

Ostrowski J. i inni.: *Dynamika ujawniania się bezpośrednich wpływów dokonanej eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu O/ZG Rudna* AGH Kraków 1997 praca niepublikowana

Ostrowski J (red.): *Ochrona środowiska na terenach górniczych*. Wyd. Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Kraków 1998.

Perski Z.: *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, No. 7, 1998.

Perski Z., Jura D.: *ERS SAR Interferometry for Land Subsidence Detection in Coal Mining Areas*. Earth Observation Quarterly No.63, 1999.

Perski Z. 1999a: Zakres interpretowalności osiadań terenu za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). *Archiwum Fotogrametrii i Teledetekcji* vol. 9, 191-201

Perski Z.: *ERS InSAR data for Geological Interpretation of Mining Subsidence in Upper Silesian Coal Basin in Poland*. Second International Workshop on ERS SAR Interferometry FRINGE '99, <http://www.esrin.esa.it/fringe99/> (30 Mar. 2000), 1999

Piwowarski W., Krawczyk A. *Koncepcja Geoprzeźrznego Systemu Informacji o Terenie Górniczym* Mat. V Konferencji - "Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych" Szczyrk 1999

Popiołek E.: *Ochrona terenów górniczych* skrypt AGH nr 1172 Kraków 1989 r.

Popiołek E. i inn. Projekt PB 376/9/91 *Przeciwdziałanie szkodom górniczym w oparciu o numeryczne metody optymalizacji wydobycia złóż kopaliny użytecznych* KBN Zespół S6 AGH Kraków 1993 (maszynopis)

Popiołek E. i inn.: *Analiza rozwoju wielkopowierzchniowej niecki obniżeniowej terenu na obszarze LGOM wywołanej odwodnieniem warstw trzeciorzędowych i czwartorzędowych* AGH, Kraków 1997 praca niepublikowana

Popiołek E.: *Analiza dotychczasowych wpływów eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu LGOM w oparciu o wyniki obserwacji geodezyjnych od początku eksploatacji do 31.12.1997 obszarze wywołanej odwodnieniem warstw trzeciorzędowych i czwartorzędowych* AGH, Kraków 1998 praca niepublikowana

Stow R., Reddish D., Wright P., Peace S, Doyle G.S., Wilkinson A.J., Ingg M.R.: *Geotechnical applications of SAR interferometry*, Second International Workshop on ERS SAR Interferometry FRINGE '99, <http://www.esrin.esa.it/fringe99/> (30 Mar. 2000), 1999.

Strozzi T., Tosi L., Wegmüller U., Galgaro A.: *Monitoring Land Subsidence in the Euganean Geothermal Basin with Differential SAR Interferometry*, Second International Workshop on ERS SAR Interferometry FRINGE '99, <http://www.esrin.esa.it/fringe99/> (30 Mar. 2000), 1999.