

UKD 622.333: 622.624.044: 551.44

Wykorzystanie danych SAR do obserwacji deformacji terenu spowodowanych działalnością górniczą w rejonie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Wyniki projektu DORIS (EC-FP7)

Application of SAR data for the monitoring of ground deformations caused by mining activities in the area of the Upper Silesian Coal Basin. The results of DORIS project (EC-FP7)



*Prof. dr hab. Marek Graniczny**



*Mgr inż. Zbigniew Kowalski**



*Mgr inż. Maria Przyłucka**



*Dr inż. Albin Zdanowski**

Treść: W artykule zaprezentowano wykorzystanie metod interferometrii satelitarnej (PSInSAR i DInSAR) dla obserwacji deformacji powierzchni terenu na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW). Prezentowane wyniki zostały pozyskane w trakcie realizacji projektu DORIS (ECFP 7, Grant Agreement n. 242212, www.doris-project.eu). Większość satelitarnych danych interferometrycznych przetworzono w wyspecjalizowanej firmie Tele – Rilevamento Europa – T. R. E, we Włoszech. Dane te pochodziły z różnych satelitów, takich jak: ERS 1 i 2, ENVISAT, ALOS- PALSAR oraz TerraSAR-X i objęły trzy pasma zakresu widma mikrofal (SAR): L, C oraz X. Archiwalne dane pasma C z satelitów Europejskiej Agencji Kosmicznej objęły obserwację przemieszczeń powierzchni terenu w okresie od 1992 do 2010, w dwóch oddzielnych pakietach danych z przedziałów czasowych 1992÷2000 oraz 2003÷2010. Jako obszary testowe dla obserwacji przemieszczeń na terenach zamkniętych kopalń wybrano Kopalnię Węgla Kamiennego „Sosnowiec” i „Saturn”, które zakończyły działalność w 1995 i 1997 r. Pomimo bieżącego wypompowywania wód z zamkniętych kopalni ich poziom podniósł się o kilkadziesiąt metrów. W związku z powyższym, wskutek zmian ciśnienia piezometrycznego i jego oddziaływania na górotwór zaobserwowano podnoszenie powierzchni terenu. Analiza danych z pasm L i X pozwoliła z kolei na śledzenie w ciągu kilku miesięcy przebiegu zmian podziemnego frontu robót, który odzwierciedlał się na powierzchni terenu, na przetworzonych zobrazowaniach radarowych. Analizę taką przeprowadzono w rejonie KWK „Halemba-Wirek”. Najbardziej efektywne w tym zakresie okazały się wysoko rozdzielcze dane TerraSAR-X,

* Państwowy Instytut Geologiczny-Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.

przetwarzane przy pomocy algorytmu SqueeSAR. Serie czasowe PS pasma X pomogły zidentyfikować bardzo niewielkie przemieszczenia, natomiast uzupełniające dane na temat większych przemieszczeń (w zakresie kilkudziesięciu centymetrów) można było uzyskać dzięki analizie prążków interferometrycznych. Uzyskane rezultaty dowiodły, że przemieszczenia powierzchni terenu w rejonie zamkniętych kopalń zachodzą bardzo długo i znacznie przekraczają okres 5 lat, który oficjalnie uznawany jest za granicę bezpieczeństwa i dopuszczają dowolne zagospodarowanie tych obszarów.

Abstract: The application of satellite interferometric methods (PSInSAR and DInSAR) for observations of ground deformations in the Upper Silesian Coal Basin (Southern Poland) is the subject of this paper. The presented results were obtained during implementation of the DORIS project (EC FP7, Grant Agreement n. 242212, www.doris-project.eu). Several InSAR datasets were analysed in this area. Most of them were processed by Tele-Rilevamento Europe - T.R.E. s.r.l. Italy. The sets of data came from different SAR satellites: ERS 1 and 2, ENVISAT, ALOS- PALSAR and TerraSAR-X and cover three different SAR bands (L, C and X). Archival data from C-band European Space Agency satellites ERS and ENVISAT, allowed to obtain information on ground movement from 1992 to 2010 in two separate datasets (1992-2000 and 2003-2010). As an example of ground motion upon inactive mining areas, two coal mines were selected: Sosnowiec and Saturn where exploitation of coal mine stopped in 1995 and 1997, respectively. Despite of well pumping after the closure of the mines, underground waters returned to the natural horizon, raising up several dozen meters; the high permeability of hydrogeological subregion and an insufficient water withdrawal from the abandoned mines. The analysis of interferometric L and X-band data in the Upper Silesia has enabled observation and monitoring of the underground mining front in a period of several months. It was indicated at the example from Halemba-Wirek coal mine. The analysis of the TerraSAR X dataset, processed by SqueeSAR algorithms proved to be the most effective for this purpose. X-band PSI time series can help to identify small, seemingly, negligible movements and are successfully supplemented by fringes when a displacement becomes significant. The obtained results on ground deformation proved that ground motion above the abandoned mines continues long after their closure. Therefore, the existing regulations stating that abandoned mines are considered as fully safe, in five years after mine closure, should be changed. Moreover, it should be emphasized that constructions in these area should be avoided as potential risk exists.

Key words:

InSAR, deformacja powierzchni terenu, górnictwo, wody podziemne, DInSAR, PSInSAR, Górnośląskie Zagłębie Węglowe (GZW)

Słowa kluczowe:

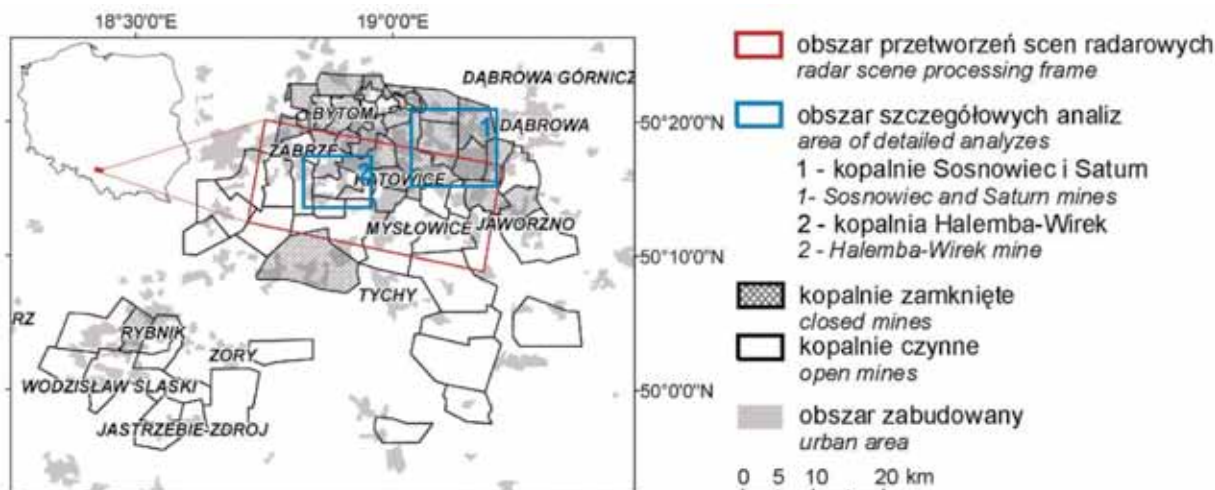
InSAR, ground deformations, mining, groundwaters, monitoring, DInSAR, PSInSAR, Upper Silesian Coal Basin

1. Wprowadzenie

Celem projektu DORIS (www.doris-project.eu) było stworzenie serwisu internetowego umożliwiającego dostęp do informacji na temat monitoringu, przewidywania mobilności i deformacji powierzchni terenu w różnej skali czasowej i przestrzennej oraz różnych warunkach fizjograficznych uzyskanych przy zastosowaniu technik teledetekcyjnych. W szczególności skoncentrowano się na dwóch rodzajach deformacji terenu spowodowanych osiadaniem oraz powierzchniowymi ruchami masowymi. W tym celu na terenie Europy wybrano tereny testowe charakteryzujące się odmien-

ną typologią, budową geologiczną i dynamiką przemieszczeń. Projekt był realizowany na terenie pięciu krajów: Hiszpanii, Polski, Szwajcarii, Węgier i Włoch. W przypadku Polski zaproponowano Górnośląskie Zagłębie Węglowe (GZW) i skupiono się na problematyce osiadania terenu.

Aktualnie na obszarze GZW jest czynnych ponad trzydzieści Kopalń Węgla Kamiennego (KWK), które eksploatują rocznie około 70 milionów ton węgla. Teren testowy objęty badaniami projektu DORIS objął centralną część GZW, gdzie funkcjonują czynne kopalnie w pobliżu Katowic, Zabrze i Rudy Śląskiej (rys. 1)



Ryc. 1. Lokalizacja badanego obszaru Górnośląskiego Zagłębia Węglowego
Fig. 1. Location of the study area in the Upper Silesian Coal Basin

Podziemna eksploatacja górnictwa jest przyczyną osiadań powierzchni terenu, które sięgają kilku centymetrów na miesiąc, ale w niektórych przypadkach nawet do centymetra w ciągu jednego dnia. Działalność górnictwa, prowadzona od przeszło 200 lat, spowodowała zaburzenie równowagi górotworu, a powstałe naprężenia powodują na wszystkich powierzchniach wyrobiska pojawianie się sił działających w kierunku powstałej w górotworze pustki. Siły te określa się ogólną nazwą naprężenia górotworu. Naprężenie górotworu powoduje pękanie i odpajanie skał na powierzchniach wyrobiska, doprowadzając niejednokrotnie do jego uszkodzenia, a nawet zniszczenia. Intensywność tej działalności zależy od:

- czynników naturalnych, tj. głębokości położenia wyrobiska, własności fizykochemicznych skał, w których je wykonano, zaburzeń tektonicznych i stosunków wodnych,
- charakteru samego wyrobiska, tj. jego wielkości, kształtu, sposobu drażenia, itp., a więc zależnych od człowieka projektującego i wykonującego wyrobisko górnictwa.

W efekcie tych zjawisk dochodzi do przekształceń powierzchni terenu, takich jak:

- osiadania terenu (zapadliska i niecki osiadań). Są one zazwyczaj związane z podziemną eksploatacją węgla.
- podtopienia i zalewiska.
- wstrząsy górotworu.

Systematyczne obserwacje sejsmiczne prowadzone są na Górnym Śląsku od około 60 lat. Główny Instytut Górnictwa (GIG) w Katowicach prowadzi rejestr wstrząsów górniczych na podstawie danych otrzymywanych z Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmicznej (GRSS) oraz Sejsmologicznej Sieci Górniczej (KSS).

Zagrożenia związane z osiadaniami na terenie GZW są zazwyczaj związane z podziemną eksploatacją górnictwa. W takich przypadkach na powierzchni terenu powstają liczne zagłębienia i zapadliska, których głębokość może sięgać dziesiątków metrów. Mogą być one wypełnione wodą, co ma niewątpliwie wpływ na lokalne warunki hydrogeologiczne. Obszary takie są szczególnie narażone w trakcie powodzi, tworząc wewnętrzne niecki osiadań i bezodpływowe baseny. Osiadania powodują również zniszczenia infrastruktury wodnej, gazowej, elektrycznej oraz ściekowej powodując uszkodzenia sieci kanalizacyjnej. Naturalnym obrazem na obszarze GZW jest widok domów wzmocnionych żelaznymi sztabami bądź kotwami. Pomimo tych zabezpieczeń na elewacjach wielu domów zauważalne są liczne pęknięcia i szczeliny. Dlatego też zbieranie systematycznych obserwacji na temat niestabilności powierzchni terenu na tych obszarach jest niezwykle istotne, ponieważ powinno być ono uwzględnione w opracowywanych planach zagospodarowania przestrzennego.

W ostatnich latach pojawiła się niezwykle atrakcyjna metoda monitoringu deformacji powierzchni terenu, bazująca na zdjęciach satelitarnych wykonywanych w zakresie mikrofal. Jest to dyferencyjna interferometria radarowa (DInSAR). Metodę tę z powodzeniem zastosowano na terenach aktywnych sejsmicznie, tektonicznie oraz wulkanicznych [10, 12]. Jak każda metoda nie była ona idealna z powodu niestarczącej rozdzielczości przestrzennej, niskiej koherencji, charakterystycznej dla obszarów pokrytych zwartą roślinnością, oraz zakłóceń wynikających z warunków atmosferycznych [3, 13]. Dlatego też została wkrótce udoskonalona i rozwinięta na Politechnice w Mediolanie. Nową metodę nazwano *Permanent Scatterers Interferometry* (PSInSAR), co można upraszczająco przetłumaczyć jako „Interferometrię Stabilnych Rozpraszaczy” [4, 7, 8]. Metoda DInSAR została również udoskonalona do tak zwanej wersji wieloczasowej [1, 2 15]. W odróżnieniu od pierwotnej wersji pozwala ona na analizę geologiczną niestabilności stoków i osiadań w skali subregionalnej i lokalnej.

Z kolei metoda PSInSAR umożliwia identyfikację licznych punktów PS (stabilnych rozpraszaczy), z których można odczytać niezwykle precyzyjne informacje na temat przemieszczeń powierzchni terenu. Biorąc pod uwagę powtarzalny charakter informacji satelitarnych oraz pokrycie dużego obszaru, z reguły jest możliwe uzyskanie dziesiątków tysięcy punktów pomiarowych PS, które zazwyczaj odzwierciedlają różne zabudowania i inne elementy infrastruktury miejskiej i przemysłowej.

Zakładając powtarzalność rejestracji danych i pokrycie dużego obszaru przez detektory satelitarne oraz fakt, że PS są zazwyczaj rejestrowane na dachach budynków lub innych obiektach infrastruktury budowlano-przemysłowej, metoda ta znajduje przede wszystkim zastosowanie w aglomeracjach miejskich, a więc tam, gdzie prowadzenie pomiarów za pomocą tradycyjnych metod geodezyjnych czy GPS jest utrudnione [9].

Efektywność metody PSInSAR dla monitoringu deformacji terenu została potwierdzona na licznych przykładach w różnych częściach świata (www.terrafirma.com).

Dane PS mogą być pomocne do:

- identyfikacji i wyznaczenia obszarów, na których zachodzą powolne deformacje terenu,
- określenia szybkości przemieszczeń (z milimetrową precyzją),
- identyfikacji źródeł niestabilności terenu przy pomocy wizji terenowej *in situ* oraz danych satelitarnych wykonanych w różnych przedziałach czasowych.

Różne przykłady monitoringu deformacji terenu metodami interferometrii satelitarnej zostały przedstawione w atlasie TerraFirma, opublikowanym w 2009 r. [14]. Zawarto w nim przykłady 54 terenów testowych z całej Europy, w tym z Górnego Śląska. Poza przykładami z Polski znalazły się tam również dwa inne dotyczące obszarów górnictwa węglowego – Stoke on Trent (Wielka Brytania) oraz Liege (Belgia). W rejonie Stoke on Trent prowadzono eksploatację węgla kamiennego zarówno metodą podziemną, jak i odkrywkową. Zmiany powierzchni terenu w tym obszarze zachodziły w trakcie działalności górnictwa, jak również po jej zaprzestaniu, co było głównie związane ze zmianą warunków hydrogeologicznych. Wyeksploatowane wyrobiska i korytarze zostały wypełnione podsadzką, co nie powstrzymało procesu osiadania, ale wyraźnie zmniejszyło jego wielkość. Ponadto górotwór był poddany tektonicznym ruchom tensji i kompresji. Na interferometrycznym obrazie tego terenu widoczne są zarówno ruchy obniżające, jak i podnoszące. Podnoszenie zaznacza się głównie na terenie dawniej zlikwidowanych kopalń i jest najprawdopodobniej odzwierciedleniem elastycznego odprężenia związanego ze zwiększonym zasilaniem wód podziemnych. Osiadania są związane z obszarami, gdzie kopalnie zostały zamknięte niedawno, a zwłaszcza tam, gdzie występują aluwialne grunty ściśliwe (charakteryzujące się zmniejszeniem objętości pod wpływem przyłożonego obciążenia) oraz gdzie w podłożu występują osady solne [5].

Miasto Liege jest położone na terenie dawnych kopalń węgla kamiennego. W rejonie tym występują również zjawiska krasowe (leje i zapadliska). Po zamknięciu kopalń zaobserwowano zjawisko podnoszenia się wód podziemnych, co było przyczyną podtopień i różnych szkód górniczych, spowodowanych zarówno osiadaniami, jak i podnoszeniem się terenu. Powtarzające się katastrofy budowlane doprowadziły do zmian legislacyjnych. Główne deformacje i ruchy powierzchni terenu zostały zidentyfikowane na płaszczyźnie aluwialnej wokół Mozy (osiadanie) oraz w centrum miasta i na okalających go wzgórzach (podnoszenie). Ruchy osiadające związane są z nieczynnymi kopalniami oraz gruntami aluwialnymi poddanymi kompresji, natomiast podnoszenie wiąże się

ze zwiększeniem ciśnienia hydrostatycznego. Odnotowano również związek pomiędzy podwyższonymi wartościami PS a miejscami współczesnych procesów krasowych i zasilaniem wód na terenie zamkniętych kopalń [6].

Dwa omówione przykłady, jak również obszar Górnośląskiego Zagłębia Węglowego, są idealnym poligonami do zastosowania technologii satelitarnej interferometrii radarowej.

W artykule zaprezentowano kilka wybranych przykładów dotyczących m.in. możliwości monitoringu podziemnych frontów eksploatacyjnych na przykładzie KWK „Halemba-Wirek” oraz podnoszenia gruntu wskutek zmiany warunków hydrogeologicznych na terenach zamkniętych KWK „Sosnowiec” i „Saturn”.

2. Charakterystyka danych interferometrycznych

Analizowany obszar badawczy obejmuje 460 km² i jest zawarty pomiędzy aglomeracjami miejskimi Zabrze, Sosnowca, Mysłowic i Katowic. Przeprowadzono tutaj interpretację szeregu zbiorów danych InSAR. Większość z nich została przetworzona przez firmę włoską Tele-Rilvamento Europa - T.R.E. s.r.l. w ramach projektu DORIS. Zestawy danych obejmowały trzy zakresy widmowe SAR (X – 2,4 – 3,8 cm, C – 3,8 – 7,5 cm oraz L – 15,0 – 30,0 cm) i zostały przetworzone zarówno w module DInSAR, gdzie deformacje są przedstawione w postaci obrazów rastrowych prążków interferometrycznych, jak również PSInSAR, gdzie przemieszczenia są przedstawione w postaci zestawów PS.

Dane z zakresu C objęły przetwarzanie 70 „zstępujących” scen satelitarnych ERS z okresu 17.05.1992 - 20.12.2000 oraz 31 „zstępujących” scen satelitarnych ENVISAT z okresu 05.03.2003÷29.09.2010.

W wyniku przetwarzania zarejestrowano 71709 punktów PS w przypadku satelitów ERS oraz 32341 punktów PS dla satelitów ENVISAT. Wielkość przemieszczeń wahała się od -40 do +7 mm w ciągu roku. Większe przemieszczenia nie mogą być zarejestrowane w tym paśmie z uwagi na długość fali oraz nieliniowy charakter zmian powierzchni terenu. Dlatego też w centralnej części obszaru charakteryzującej się większymi przemieszczeniami nie zanotowano punktów PS. Aby uzupełnić informacje na temat osiadania wykonano dwa interferogramy metodą dyferencyjną na podstawie danych z satelitów ERS i ENVISAT. Interferogramy te przedstawiają w obu przypadkach przemieszczenia większe, nie ujawnione za pomocą metody PSInSAR.

W przypadku pasma X przetworzono 30 scen satelity TerraSAR-X z okresu 05/07/2011-21/06/2012. Zarejestrowano 824220 punktów PS, które wskazały na przemieszczenia powierzchni terenu w zakresie od -337 do +57 mm na rok. Krótszy zakres mikrofal pasma X oraz częstsza powtarzalność satelity (11 dni), wynikająca z innej orbity, w porównaniu do satelitów ERS czy Envisat spowodowały uzyskanie dużego zbioru danych punktów PS, który wskazał większy zakres przemieszczeń. Niemniej jednak również zestaw danych TerraSAR-X zawiera obszary bez punktów PS, co sugeruje prawdopodobnie obecność większych przemieszczeń lub brak koherencji na obszarach pokrytych roślinnością. Na podstawie danych TerraSAR-X wykonano również 28 interferogramów otrzymując dodatkowe informacje na temat przemieszczeń powierzchni terenu.

Dane pasma X zostały również przetworzone według nowego algorytmu SqueeSAR [9], opracowanego przez Tele-Rilevamento Europa (TRE.s.r.l.). Oprogramowanie to zasadniczo różni się od stosowanego uprzednio PSInSAR. W poprzedniej metodzie wykorzystywano analizę Permanent Scatterers (PS), czyli stabilnych rozpraszaczy W praktyce są

to zarejestrowane punkty odbicia fal radarowych z budynków, mostów, zapór, wiaduktów, obiektów metalowych (anten, rurociągów), jak również obiektów naturalnych, takich jak wychodnie, wyrobiska itp. W nowej metodzie (oprogramowaniu) uwzględnia się również tak zwane *Distributed Scatterers* (DS), co można przetłumaczyć jako rozprzestrzenione rozpraszacze, zbierające również informację z otoczenia PS. Nowa metoda skutkuje zebraniem znacznie większej informacji w porównaniu z metodą PSInSAR. W związku z powyższym metody interferometrii satelitarnej mogą być z powodzeniem zastosowane nie tylko dla terenów zurbanizowanych i przemysłowych, ale również poza nimi. Ważną zaletą nowego algorytmu jest uzyskanie dużej gęstości punktów PS i DS, około 10 000 punktów na km² oraz wysoka precyzja pomiarów.

Do analizy wykorzystano również 5 interferogramów wygenerowanych ze scen satelitarnych ALOS-PALSAR operującego w paśmie L. Dane te pozyskano w trakcie realizacji projektu TerraFirma (ESRIN/Contract no. 17059/03/I-IW). Zostały one przetworzone przez szwajcarską firmę GAMMA Remote Sensing and Consulting AG. Obejmują one okres od 22.02.2007 do 27.05.2008 w interwałach 45-, 92- i 138-dniowych.

Zebrany bogaty zestaw danych obejmujący różne przedziały czasowe oraz różne pasma mikrofal okazał się niezwykle przydatny dla obserwacji wielu różnych zjawisk odzwierciedlających dynamikę powierzchni terenu na Górnym Śląsku.

3. Interpretacja danych interferometrycznych

3.1. Pasma - C

Archiwalne dane satelitów ERS i Envisat operujące w paśmie C pozyskano z Europejskiej Agencji Kosmicznej. Obejmują one, jak już wspomniano, dwa zestawy danych z lat 1992÷2001 oraz 2003÷2010. Pierwszy z nich stwarza możliwość uzyskania informacji na temat ruchów powierzchni terenu sprzed ponad 20 lat. Takie informacje są niezwykle cenne, ponieważ zdecydowana większość kopalni węgla kamiennego była wówczas czynna. Z kolei drugi zestaw pozwala na analizę dynamiki powierzchni terenu w okresie po zamknięciu kopalni. Praktycznie taka analiza, regionalna lub szczegółowa nie mogłaby zostać przeprowadzona za pomocą innych technik teledetekcyjnych lub naziemnych. Jako teren testowy do analizy porównawczej wybrano dwie były KWK „Sosnowiec” i „Saturn”. Wartości przemieszczeń na terenach górniczych tych kopalń wahają się w latach 1992÷2010 od +7 mm/rok do 40 mm/rok. Założono również, że obszary na których wartości PS kształtują się na poziomie od -2 to +2 mm/rok należy uznać za stabilne.

KWK „Sosnowiec” pod tą nazwą funkcjonuje od 1945 r. Jej poprzednia nazwa to Hrabia Renard, gdzie eksploatację prowadzono już od 1876 r. Początkowo eksploatowano pięć pokładów węgla. Do roku 1905 eksploatację prowadzono systemem filarowym z zawałem stropu. Po tym roku wprowadzono podsadzkę hydrauliczną. System z zawałem stropu zastosowano ponownie po 1970 r. przy eksploatacji pokładu 409, gdzie po raz pierwszy zastosowano budowy zmechanizowane. Eksploatację w KWK „Sosnowiec” zakończono 31 grudnia 1997 r. [11]. Obecnie wyrobiska kopalni są niedostępne, pozostał jedynie szyb Szczepan pełniący funkcję studni głębinowej do bieżącego szczywania wody. Poziom wody w szybie utrzymywany jest na rzędnej 140 m n.p.m., dopuszczalny poziom zwierciadła wody to 90 m n.p.m.

KWK Saturn powstała z połączenia trzech kopalń. W 1973 r. połączono KWK „Milowice” i „Czeladź”, a dwa lata później dołączono do nich KWK „Czerwona Gwardia”. Nowo

utworzona kopalnia nosiła początkowo nazwę „Czerwona Gwardia”, która została następnie zmieniona na „Saturn”. Na obszarze tej kopalni eksploatację węgla prowadzono już od 1822 r. W zależności od warunków zalegania poszczególnych pokładów eksploatację prowadzono systemem z zawalęm stropu lub stosowano podsadzkę hydrauliczną. W latach 1965÷1992 równoległe z wydobywaniem węgla prowadzono eksploatację złoża ilów montmorylonitowych (bentonitów) jako kopaliny towarzyszącej. W ostatnich latach eksploatacja była prowadzona na poziomach 180 i 320 m. Wydobywanie węgla zakończono 31 grudnia 1995 r. Obecnie KWK „Saturn” ma jeszcze dostępnych około 6000 m wyrobisk i dwa szyby. Poziom wody utrzymywany jest na rzędnej 38 m n.p.m. Dopuszczalny poziom zwierciadła wody to 69 m. n.p.m. [11].

Za monitoring i prowadzenie odwodnienia na terenach zlikwidowanych kopalń odpowiada od roku 2001 Centralny Zakład Odwadniania Kopalń. Istnieją trzy systemy odwadniania kopalń: odwadnianie głębinowe, odwadnianie stacjonarne oraz system mieszany będący połączeniem obu systemów. W KWK „Sosnowiec”, zlikwidowanej w 1997 roku prowadzi

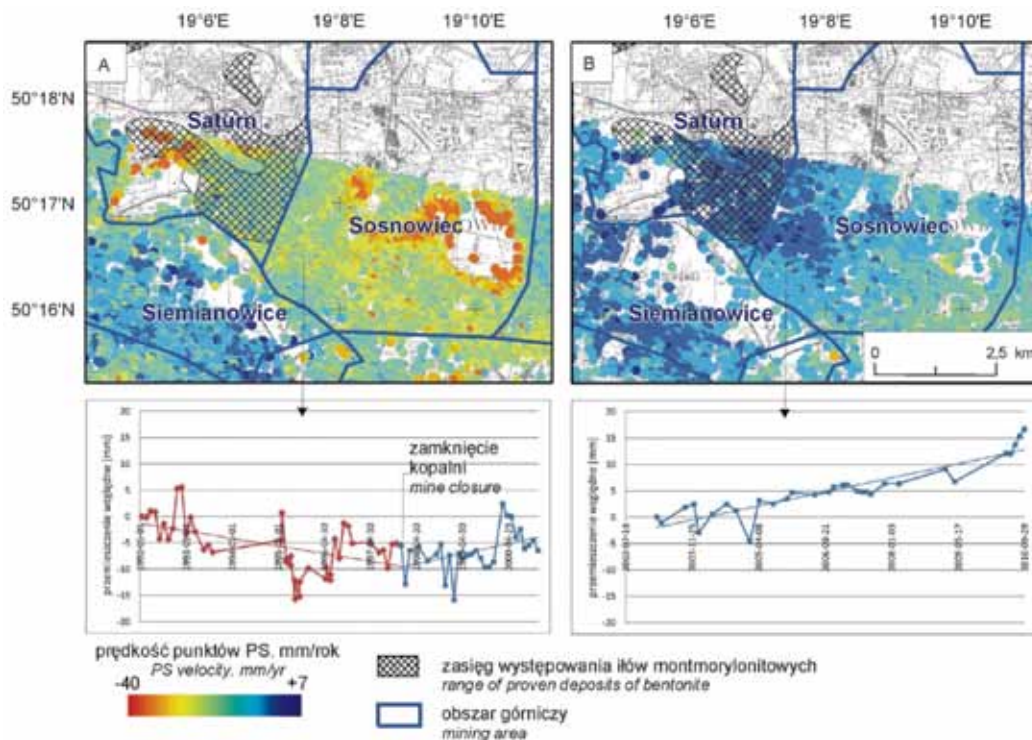
się system odwadniania głębinowego. Natomiast w KWK „Saturn”, od roku 2004 w stanie likwidacji prowadzi się system odwadniania mieszany. W tablicy 1 pokazano dopływ wód do zlikwidowanych kopalń m.in. Sosnowiec i Saturn w latach 2001 - 2008. Podano też przedziały zatopionych wyrobisk i dopuszczalny poziom wód.

Na terenie zlikwidowanych kopalń poziom wód podziemnych podnosi się powracając do naturalnego stanu, w efekcie czego, pomimo ich ciągłego pompowania, obserwuje się nieznaczne podniesienie się terenu. Dane te doskonale zgadzają się z podnoszeniem się terenu uwidocznionym w danych interferometrii radarowej (rys. 2). Starszy zestaw danych PSInSAR z lat 1992÷2001 wskazuje na wartości od -4,0 mm do 0,0 mm, natomiast nowszy 2003÷2010 rejestruje wartości od -2,0 do +7,0 mm. Jest to wynik zmian powierzchni terenu początkowo osiadania, a następnie podnoszenia. Jeszcze lepiej jest to widoczne na wykresach czasowych wybranych punktów PS na terenie obu omawianych kopalni. Od dat ich zamknięcia zmiana tendencji osiadania terenu na podnoszenie jest bardzo wyraźna (rys. 2).

Tablica 1. Dopływy wód do zlikwidowanych kopalni „Sosnowiec” i „Saturn” w okresie 2001÷2008 wraz z charakterystycznymi rzędnymi odwadniania i pojemnościami zbiorników wodnych (wg Czapiń, 2009, informacja ustna)

Table 1. Mine water inflow to the abandoned coal mines „Sosnowiec” and „Saturn” in 2001÷2008 with characteristic levels and water volumes in the flooded mines (according to Czapiń, 2009, oral information)

KWK	System odwadniania	Dopływ wód w latach, m ³ /min								Charakterystyczne rzędne (m.n.p.m.)		Objętość wody w zatopionych wyrobiskach, mln m ³
		2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Poziom dopuszczalny	Przedziały zatopionych wyrobisk	
Sosnowiec	Głębinowy	8	8	7	7	6	7	6	6	90	(-200) - (-20)	4.50
Saturn	mieszany	22	29	23	22	19	20	23	24	69	(-130) - (-55)	7.40



Ryc. 2 Zestaw danych PSInSAR z rejonu KWK „Sosnowiec” i „Saturn” zamkniętych w latach 1997 i 1995, kolorowe punkty PS przedstawiają wartości przemieszczeń, od czerwonych – osiadanie do granatowych – podnoszenie, w mm/rok. Zestaw A przedstawia dane z satelitów ERS obejmujące okres 1991÷2000, natomiast zestaw B przedstawia dane z satelity ENVISAT z okresu 2003÷2010 (po zamknięciu obu kopalń). W dolnej części zamieszczono wykresy zmian czasowych wybranego punktu PS.

Fig. 2. Example of C-band PSInSAR dataset over the parts of the areas of „Sosnowiec” and „Saturn” coal mines, abandoned in 1997 and 1995, respectively. ERS dataset (A) covers the period of 1991÷2000, whereas ENVISAT dataset (B) covers the period of 2003÷2010 (after the closure of the two mines). On the bottom, time series of the randomly selected PS point is presented.

Innym czynnikiem wpływającym zapewne na podnoszenie terenu w omawianym rejonie jest obecność ilów montorylonitowych (bentonitów). Występują one w utworach seri paralicznej, a ich miąższość wynosi około 3 metry. Jak wiadomo, bentonity należą do grupy pęczniących utworów ilastych. Pod wpływem nawodnienia ich objętość może wzrosnąć nawet ośmiokrotnie. Porównanie obszaru eksploatowanych złóż bentonitu w kopalni „Saturn” z obszarami najwyższego podnoszenia się punktów PS wskazuje na znaczną korelację. Przepuszczalnie utwory bentonitu występują również na przyległej kopalni „Sosnowiec”, gdzie zaznacza się również podnoszenie terenu.

3.2. Pasma – X

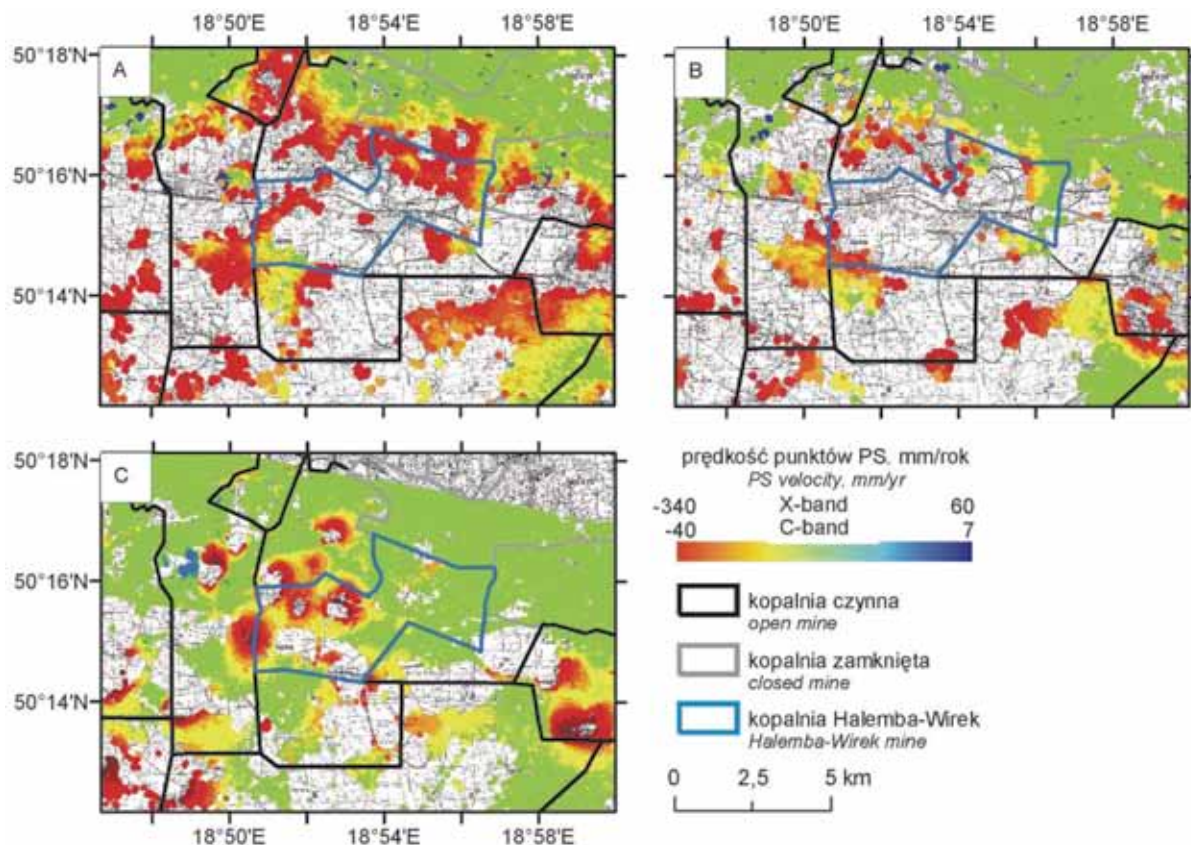
Jak uprzednio wspomniano dane pasma X obejmują 30 scen zarejestrowanych pomiędzy lipcem 2011 a czerwcem 2012 r. Uzyskano ponad 10 razy więcej punktów PS niż na podstawie danych pasma C – ERS i 25 razy więcej niż z danych pasma C – ENVISAT.

Porównanie danych pozyskanych z trzech wymienionych satelitów na obszarze KWK „Halemba-Wirek” przedstawiono na Ryc. 3. Co więcej, dane z pasma X umożliwiły śledzenie znacznie większych przemieszczeń w porównaniu z danymi pasma C. Na ich podstawie zarejestrowane osiadania w ciągu roku sięgały – 340 mm w porównaniu do – 40 mm w przypadku satelitów ERS i ENVISAT. Na tej podstawie można wysnuć wniosek, że dane pasma C są przydatne do określenia obszaru, pod wpływem działalności górniczej, na zewnątrz

głównej niecki osiadań, natomiast na podstawie danych pasma X można precyzyjnie wyznaczyć samą nieckę osiadań.

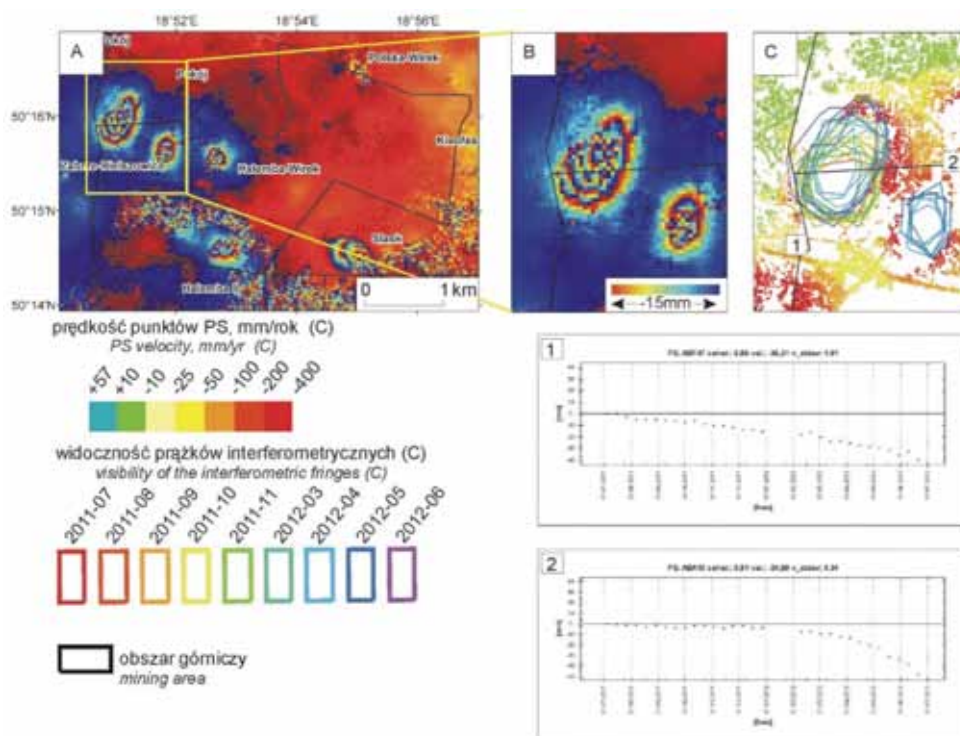
Interpretację niecek osiadań ułatwia analiza interferogramów dyferencyjnych. Na rysunku 4 można jednak zauważyć, że w centralnej części niecek nie ma punktów PS, co wskazuje bądź na bardzo duże wartości przemieszczeń, bądź ich nieliniowy charakter. Dlatego też przydatnym w takim przypadku jest analiza interferogramów dyferencyjnych. Stosunkowo krótki, 11-dniowy cykl powtarzalności danych z satelity TerraSAR – X pozwolił na pozyskanie 28 kolejnych interferogramów. Widoczne są na nich prążki interferometryczne („fringes”) przedstawione w skali barwnej, która umożliwia określenie wielkości przemieszczeń. Jeden pełny cykl barw (od czerwieni do czerwieni) wynosi 15 mm, co stanowi połowę długości fali pasma X. Pełny cykl oznacza więc przemieszczenie wielkości 15 mm w ciągu 11 dni. Kolejne pełne cykle oznaczają odpowiednio wartości 30, 45, 60 mm itd.

W przypadku GZW prążki interferometryczne podlegają ciągłym zmianom w zależności od podziemnej aktywności górniczej i lokalizacji frontu robót. Jedne z nich wskazują na wysokie wartości przemieszczeń, a następnie po kilku miesiącach zanikają. Na ich podstawie można również określić czas i kierunek postępujących przemieszczeń. Inne są widoczne cały czas, a jeszcze inne pojawiają na nowo w określonym miesiącu, w kwietniu i październiku 2012 r. Najlepsze wyniki daje jednak łączna analiza punktów PS i prążków interferometrycznych. Ilustruje to dobrze przykład zaprezentowany na rysunku 4. Wykresy czasowe wybranych



Ryc. 3 Porównanie zestawów danych PSInSAR pozyskanych z różnych satelitów, w rejonie KWK „Halemba-Wirek”: A – ERS, pasmo C, B – ENVISAT, pasmo C, C – TerraSAR – X, pasmo X. Kolorami zaznaczono punkty PS przedstawiające wartości przemieszczeń

Fig. 3. Comparison of PSInSAR datasets from different satellites in the “Halemba-Wirek” mining area: on the top C-band: A. ERS and B. ENVISAT; on the bottom X-band: C. TerraSAR-X



Ryc. 4. Przykład zestawu danych pasma X z obszaru KWK „Halemba-Wirek”. Interferogram dyferencyjny z przedziału czasu 19/05/2012-30/05/2012 (A, B) został uzupełniony punktami PS (C). Prążki interferencyjne zidentyfikowane w różnych przedziałach czasowych oznaczono kolorowymi poligonami (C). Z prawej strony u dołu zamieszczono wykresy zmian czasowych wybranych punktów PS odnoszących się do obszarów zaznaczonych cyframi 1 i 2 na obrazowaniu C

Fig. 4. Example of X-band datasets in the coal mining area of "Halemba-Wirek" mine. Differential interferogram from 19 May 2012-30 May 2012 (A, B) is complemented by PSInSAR points (C). Appearance of fringes on the interferograms from various months is presented by coloured polygons (C). Time series on the bottom-right refers to random PS points selected near the areas 1 and 2 (C)

PS w pobliżu niecki nr 1 wskazują przez cały analizowany okres stałą tendencję do osiadania, natomiast wykresy czasowe punktów PS w pobliżu niecki nr 2 do pewnego czasu wskazują na sytuację stabilną, a następnie na gwałtowne obniżenie terenu. Zazwyczaj, dane z PS pokazują określone trendy przemieszczeń wcześniej niż wynika to z obserwacji interferometrycznych. Jest to związane z faktem, że prążki interferometryczne pokazują tylko przemieszczenia większe niż 15 mm w ciągu 11 dni.

3.3. Pasma – L

Podobne informacje na temat obserwacji zmian powierzchni terenu można uzyskać na podstawie danych z satelity ALOS – PALSAR operującego w paśmie L. Z rejonu górniczego Halemba – Wirek pozyskano pięć interferogramów dyferencyjnych z następujących okresów: 22.02.2007÷10.07.2007; 10.07.2007÷25.08.2007; 25.08.2007÷25.11.2007; 25.11.2007÷25.02.2008; 25.02.2008÷27.05.2008. Dla każdego interferogramu przedział czasowy wyniósł 46, 92 i 138 dni. Prążki interferometryczne wyznaczone z danych ALOS-a wskazujące na osiadanie powierzchni są nierozwinięte, w odróżnieniu od danych pasma – X. Innymi słowy, skala barw pozwala na bezpośrednie określenie wielkości przemieszczeń bez potrzeby identyfikacji kolejnych prążków interferometrycznych. Przykład analizy interferogramów przedstawiono na rysunku 5. Przedstawiono tam część interferogramów obszaru górniczego „Halemba-Wirek”. Poszczególne prążki interferometryczne wyróżniające się barwą można zliczyć i scyfrować. Interpolacja poszczególnych prążków daje wyobrażenie na temat przemieszczeń, które

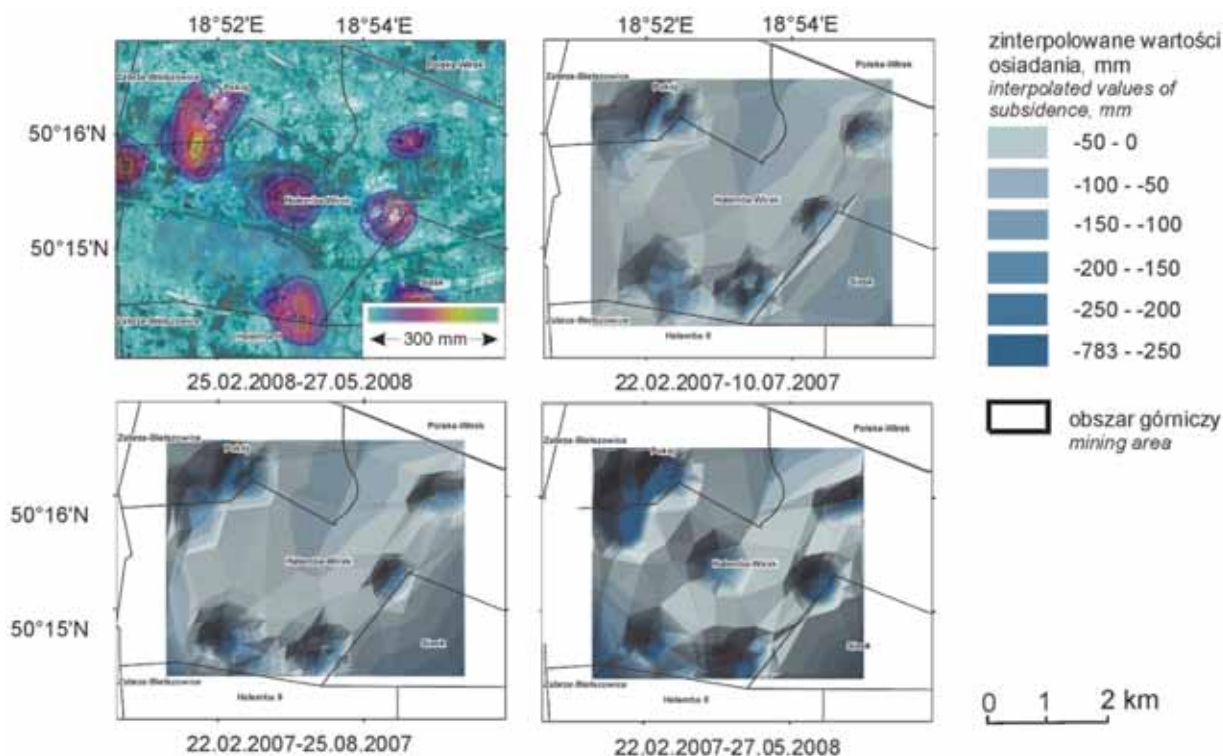
zaszły w określonym przedziale czasowym interferogramu. Poszczególne wartości dla każdego interferogramu można zsumować. W ten sposób uzyskano dane dla całego okresu pomiarowego czyli od 22.02.2007 do 27.05.2008.

Łączna wartość przemieszczeń w okresie 15 miesięcy wyniosła 78 cm. Analiza zaprezentowana powyżej jest niezwykle przydatna dla odtworzenia genezy powstawania niecek osiadań oraz obserwacji skali rozwoju lub zaniku ruchów powierzchni terenu w dowolnie wybranym przedziale czasowym.

4. Wnioski

Najbardziej istotne wnioski można sformułować w sposób następujący:

- Analiza danych interferometrycznych wybranych obszarów GZW umożliwiła identyfikację oraz regularną obserwację przemieszczeń powierzchni terenu związanych z podziemną działalnością górniczą w okresie kilkunastu miesięcy. Zostało to przedstawione na przykładzie obszaru górniczego „Halemba-Wirek”. Przetworzenie i analiza danych TerraSAR – X, a następnie ALOS – PALSAR (pasmo L) wydaje się optymalnym rozwiązaniem dla monitoringu dużych obszarów podziemnej eksploatacji węgla. Rozwiązanie te uwzględnia możliwość szybkiego uzyskania informacji, precyzyjność porównywalną do innych metod geodezyjnych oraz uzyskanie informacji w skali regionalnej stosunkowo niewielkim kosztem.
- Analiza umożliwiła również potwierdzenia ruchów wznoszących wokół zamkniętych w latach 1995 i 1997 KWK



Ryc. 5 Formowanie się niecek osiadań w rejonie KWK „Halemba-Wirek” w okresie 22.02.2007÷27.05.2008. Pierwsze zobrazowanie (górne z lewej strony) przedstawia „rozpakowany” interferogram różnicowy uzyskany z satelity ALOS – PALSAR, pasmo – L, ze scyfrowanymi poligonami przedstawiającymi kolejne wartości przemieszczeń. Trzy następne zobrazowania przedstawiają rozwój niecek osiadań wyznaczonych na podstawie interpolacji prążków interferometrycznych. Ostatnie zobrazowanie (dolne z prawej strony) przedstawia całkowitą wartość przemieszczeń w okresie pomiędzy 22.02.2007 a 27.05.2008 r.

Fig. 5. Formation of subsidence troughs in “Halemba-Wirek” mining area in 22 February 2007÷27 May 2008. First picture is a part of an unwrapped interferogram from ALOS-PALSAR satellite (L-band) with digitalized lines referring to certain values of displacement. Three other pictures show the formation of deformation surface indicated by the surfaces from each of the interferograms made by lines interpolation. The last picture illustrates the total value of displacements which occurred between 22 February 2007 and 27 May 2008

„Sosnowiec” i „Saturn”. Jest to najprawdopodobniej związane z podnoszeniem się poziomu wód podziemnych powracającego do naturalnego stanu i w efekcie pomimo ich pompowania obserwuje się nieznaczne podniesienie się terenu. Dane te doskonale zgadzają się z podnoszeniem się terenu uwidocznionym w danych interferometrii radarowej. Starszy zestaw danych PSInSAR z lat 1992 – 2001 wskazuje na wartości od – 4,0 mm do 0,0 mm natomiast nowszy 2003÷2010 rejestruje wartości od – 2,0 do + 7,0 mm. Wskazuje więc na mniejsze osiadanie a następnie podnoszenie. Jeszcze lepiej jest to widoczne na wykresach czasowych wybranych punktów PS na terenie obu omawianych kopalni. Dodatkowym czynnikiem wpływającym zapewne na podnoszenie terenu w rejonie jest obecność ilów pęczniejących – montmorylonitowych (bentonitów), występujących w utworach serii paralicznej karbonu górnośląskiego (serpuchow).

- Warto też zwrócić uwagę, że w nawiązaniu do obecnych regulacji prawnych, tereny zamkniętych kopalń po 5 latach od ich zamknięcia są uważane za w pełni bezpieczne i zezwala się na prowadzenie na ich obszarze działalności budowlanej. Uzyskane wyniki analizy danych interferometrycznych przedstawione w niniejszym artykule kwestionują ten stan rzeczy. Pomijanie kwestii kontynuacji ruchów powierzchni terenu na obszarach zamkniętych kopalń może stać się przyczyną powstawania kolejnych szkód, a nawet katastrof budowlanych.

Praca została przygotowana w ramach zadania nr. 57.3509.1001.00.0 - projekt współfinansowany przez UE - 7 Program Ramowy.

Literatura

1. Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E.: A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40 (11), 2002. 2375÷2383.
2. Bovenga, F., Nutricato, R., Refice, A. & Wasowski, J.: Application of multi-temporal differential interferometry to slope instability detection in urban/peri-urban areas. *Engineering Geology*, 88 (3-4), 2006 218÷239.
3. Colesanti, C. & Wasowski, J.: Investigating landslides with satellite Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geology*, 88 (3-4), 2006 173÷199.
4. Colesanti, C., Ferretti, A., Prati, C. & Rocca F.: Monitoring landslides and tectonic motions with the Permanent Scatterers Technique. *Engineering Geology. Special Issue on Remote Sensing and Monitoring of Landslides*, 68(1), 2003 3÷14.
5. Culshaw M.: Stoke-on-Trent, United Kingdom. [In]: The TerraFirma Atlas – The terrain-motion information service for Europe (ed. Capes R., Marsh S.), GMES – ESA, June 2009. Terra Firma project, ESA publication, 2009 p. 43.
6. Devleeschouwer X., Declercq P.: Liège, Belgium. [In]: The TerraFirma Atlas – The terrain-motion information service for Europe (ed. Capes

- R., Marsh S.), GMES – ESA, June 2009. TerraFirma project, ESA publication, 2009 p. 46÷47.
7. *Ferretti, A., Prati, C. & Rocca F.*: Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Trans. Geoscience And Remote Sensing*, 39(1), 2001, 8÷20.
 8. *Ferretti, A., Prati, C., Rocca, F., & Wasowski, J.*: Satellite interferometry for monitoring ground deformations in the urban environment. *Proc. 10th IAEG Congress*, Nottingham, UK (CD-ROM) 2006.
 9. *Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A.*: A New Algorithm for Processing Interferometric Data-stacks: SqueeSAR, *IEEE Trans. On Geoscience and Remote Sensing*, Volume: 49, Issue: 9, 2011 p. 3460÷3470.
 10. *Gabriel, A.K., Goldstein, R. M. & Zebker H. A.*: Mapping Small Elevation Changes over Large Areas: Differential Radar Interferometry. *Journal of Geophys. Res.* 94, N°B7, 1989 pp. 9183÷9191.
 11. *Graniczny M., Kowalski Z., Jureczka J., Wilk S.*: Analiza radarowych materiałów interferometrycznych na przykładzie rejonu Sosnowca, Grant KBN 6.95.0002.00.0, NAG – PIF - PIB
 12. *Massonnet, D. & Feigl K.*: Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Rev. Geophys.* 1998, 36, 441÷500.
 13. *Wasowski, J., Refice, A., Bovenga, F., Nutricato, R. & Gostelow P.*: On the Applicability of SAR Interferometry Techniques to the Detection of Slope Deformations, *Proc. 9th IAEG Congress*, Durban, South Africa, 16-20 Sept. 2002, CD ROM.
 14. The TerraFirma Atlas – Terrain – Motion Across Europe, 2009, Fugro NPA Ltd.
 15. *Werner, C., Wegmuler, U., Strozzi, T., Wiesmann, A.*: Interferometric Point Target Analysis for Deformation Mapping. *Proc. IEEE International Geoscience Remote Sensing Symposium (IGARSS 2003)*, vol. 7, 2003 pp. 4362÷4364.
-
-

NACZELNY REDAKTOR

w zeszycie 1-2/2010 Przeglądu Górniczego, zwrócił się do kadr górniczych z zachętą do publikowania artykułów ukierunkowanych na wywołanie

POLEMIKI – DYSKUSJI.

Trudnych problemów, które czekają na rzetelną, merytoryczną wymianę poglądów – jest wiele! Od niej – w znaczącej mierze – zależy skuteczność praktyki i nauki górniczej w działaniach na rzecz bezpieczeństwa górniczego oraz postępu technicznego i ekonomicznej efektywności eksploatacji złóż.

**Od naszego wysiłku w poszukiwaniu najlepszych rozwiązań
– zależy przyszłość polskiego górnictwa!!!**