

# Obserwacja przemieszczeń pionowych powierzchni terenu wywołanych eksploatacją węgla kamiennego za pomocą zobrażeń interferometrii satelitarnej (pasma C i L) na przykładzie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego

Marek Graniczny<sup>1</sup>, Zbigniew Kowalski<sup>1</sup>, Maria Przyłucka<sup>1</sup>,  
Albin Zdanowski<sup>1</sup>, Anna Klimkowska<sup>1</sup>



M. Graniczny



Z. Kowalski



M. Przyłucka



A. Zdanowski



A. Klimkowska

**Observation of the surface subsidence due to coal mining exploitation using satellite interferometric data (bands C and L) in the Upper Silesia Coal Basin.** Prz. Geol., 62: 573–578.

*Abstract.* The mining exploitation of hard coal in Upper Silesia has been conducted since XIX century and continues to the present days. Different methods of monitoring subsidence of the earth surface were applied in this area, starting from analysis of topographic maps compiled in different period of time, precise levelling and GPS measurements. Nowadays satellite interferometry seems to be useful and effective tool for these purposes. PS data from ERS and ENVISAT satellites very well illustrate subsidence occurring in the active mining areas where subsidence does not exceed – 40 mm/yr. These data correspond very well with subsidence predictive models prepared by mining companies. However, the Upper Silesian Coal Basin (USCB) mining area subsides even up to 600 mm/yr (locally even more). Therefore, it is necessary to apply a different methodology. One of the solutions to this problem could be differential interferograms obtained from L-band SAR images. Combination of C-Band (ERS, Envisat) and L-band (ALOS) shows excellent results. C-band SAR satellites are useful for detecting smaller displacements; in contrary L-band satellites are able to monitor surface deformations in range of several decimetres, being possible to detect progress of mining front

**Keywords:** satellite interferometry, surface deformations, hard coal mining, subsidence, hydrogeology

Górnośląskie Zagłębie Węglowe (GZW) jest położone w południowej Polsce oraz w regionie Ostrawa-Karwina w Republice Czeskiej. Zajmujący powierzchnię około 7250 km<sup>2</sup> obszar jest głównym zagłębiem węglowym w Polsce, a także jednym z największych w Europie. Górny Śląsk jest to również duży obszar metropolitalny, składający się z 37 miast zamieszkałych przez 3 mln ludzi.

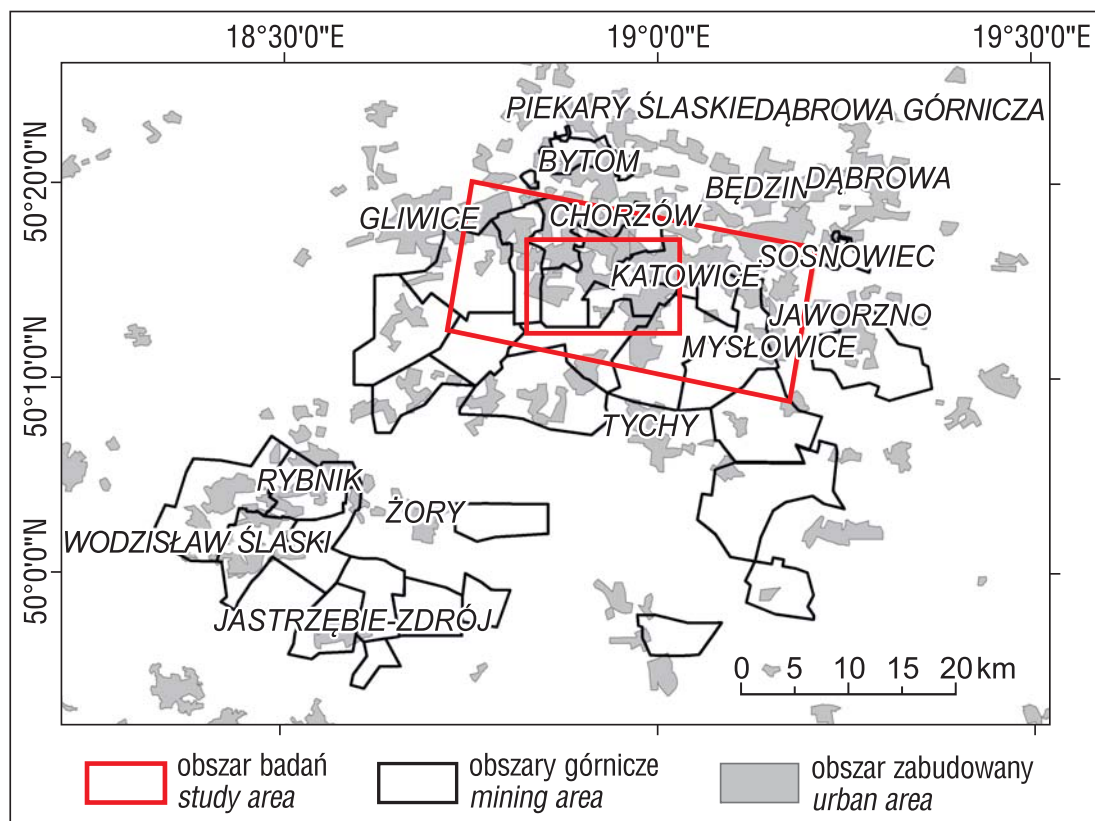
Prowadzone na szeroką skalę podziemne prace górnicze mają ogromny wpływ na środowisko naturalne, reakcję górotworu oraz zmiany na powierzchni terenu. Wydobywanie węgla kamiennego prowadzone jest tu od ponad 200 lat i przyczynia się do zmian chemicznych, hydrogeologicznych i mechanicznych. Główne zagrożenie związane jest z osiadaniem powierzchni terenu. Szacuje się, że około 600 km<sup>2</sup> GZW jest pod wpływem procesu osiadania. Obszar charakteryzuje się licznymi zapadliskami i nieckami o głębokości powyżej kilkunastu metrów. Zagłębienia te mogą pozostać suche lub wypełnić się wodą, tworząc zalewiska w zależności od lokalnych warunków hydrogeologicznych. Nie-równomierne osiadania powodują poważne uszkodzenia obiektów liniowych, takich jak drogi, koleje, rurociągi gazowe i wodne, linie energetyczne i kanalizacja miejska. Zagrożeniu podlegają również domy, budynki użyteczności publicznej i inne obiekty infrastruktury technicznej.

Istnieją różne metody oceny i pomiaru pionowych przemieszczeń terenu spowodowanych eksploatacją węgla. Jako uzupełnienie pomiarów geodezyjnych, metody te powinny obejmować techniki teledetekcji, takie jak: zdjęcia lotnicze i satelitarne o bardzo wysokiej rozdzielczości, skanowanie laserowe (LIDAR) czy interferometria radarowa. W pracy przedstawiono wykorzystanie zobrażeń radarowych w zakresie widma C i L do obserwacji pionowych przemieszczeń terenu na obszarze testowym GZW (ryc. 1).

## CHARAKTERYSTYKA DANYCH INTERFEROMETRYCZNYCH

W niniejszym artykule przedstawiono dwie metody przetwarzania satelitarnych danych interferometrycznych – metodę dyferencyjną (DInSAR) oraz metodę permanentnych rozpraszaczy (PSInSAR). Każda z nich ma swoje zalety i ograniczenia. Obie metody zezwalają na analizę dużego obszaru, co czyni je konkurencyjnymi w stosunku do tradycyjnych metod geodezyjnych. Nie znaczy to, że metody satelitarne zastąpią metody klasyczne, ale mogą je ograniczyć i pozwolić na lepsze ich zaprojektowanie. Metoda dyferencyjna umożliwi rejestrację przemieszczeń

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; marek.graniczny@pgi.gov.pl, zbigniew.kowalski@pgi.gov.pl, maria.przylucka@pgi.gov.pl, albin.zdanowski@pgi.gov.pl, anna.klimkowska@pgi.gov.pl.



**Ryc. 1.** Lokalizacja obszaru badań. Czerwoną ramką zaznaczono obszar badań: większy, obejmujący zakres danych PSInSAR z satelitów ERS i Envisat oraz mniejszy z obszarów górniczych kopalni KWK Wujek i KWK Halemba-Wirek, dla którego przedstawiono szczegółową analizę

**Fig. 1.** 1 Localization of study area. Red frame indicates study areas: bigger covering PSInSAR data from ERS and Envisat satellites and smaller covering Wujek and Halemba-Wirek coal mining areas where detailed analysis was made

w skali decymetrowej wynikającej z porównania dwóch scen satelitarnych pozyskanych w różnym czasie. Zmiany na powierzchni są widoczne w postaci prążków interferometrycznych. Z kolei w metodzie PSInSAR mamy do czynienia z „chmurą” punktów, tzn. *permanent scatterers*, wspomnianych już wcześniej permanentnych rozpraszaczy. Każdy z punktów zawiera informacje o wielkości przemieszczeń (mm/rok) zazwyczaj w przedziale kilku lub kilkunastu lat. Bardziej szczegółowy opis wspomnianych metod można odnaleźć w literaturze (Carnece i in., 1994; Ferreti i in., 2001; Crosetto i in., 2009). Obie metody można z powodzeniem wykorzystać do obserwacji przemieszczeń pionowych na terenach górniczych (Herrera i in., 2007; Huanyin i in., 2011), ale również są one przydatne do monitoringu wulkanów, trzęsień ziemi czy osuwisk.

W prezentowanym studium wykorzystano trzy zbiory danych (tab. 1). Dwa przetworzone metodą PSInSAR oraz pięć interferogramów przetworzonych metodą DInSAR. Dwa zbiory PSInSAR pozyskano w ramach projektu DORIS (EC – F-7/2007 – 2013, nr 242212). Zostały one przetworzone przez włoską firmę Tele-Rilevamento Europa (TRE). Dane obejmują 70 scen satelitarnych ERS-1/2 i zarejestrowanych pomiędzy 17.05.1992 r. a 20.12.2000 r. (71 709 punktów PS) oraz 31 scen satelitarnych ENVISAT zarejestrowanych pomiędzy 05.03.2003 r. a 29.09.2010 r. (32 341 punktów PS). Analizowane dane PSInSAR cha-

rakteryzują się średnim rocznym tempem ruchu (VEL) wzdłuż linii wybierania satelity (LOS) od  $-40,5$  do  $+7,41$  mm/rok. Na obu zestawach danych można zaobserwować przemieszczenia powierzchni terenu związane z działalnością górniczą. Najwyższe wartości ujemne wskazujące na osiadanie są zlokalizowane wokół głównej niecki osiadań. W obrębie samej niecki punkty PS nie występują z uwagi na występujące tam większe wartości osiadań, przekraczające możliwości ich rejestracji w paśmie C.

W studium wykorzystano także interferogramy dyferencyjne otrzymane w ramach projektu Terrafirma ESRIN/Contract nr 17059/03/I-IW. Zostały one przetworzone przez szwajcarską firmę Gamma Remote Sensing (Czarnogórska i in., 2008; Graniczny i in., 2009). W analizie wykorzystano pięć interferogramów z satelity ALOS-PALSAR obejmujące następujące przedziały czasowe: 22.02.2007–10.07.2007; 10.07.2007–25.08.2007; 25.08.2007–25.11.2007; 25.11.2007–25.02.2008 oraz 25.02.2008–27.05.2008.

## INTERPRETACJA DANYCH SAR

### Interpretacja danych PSInSAR dla pasma C w rejonie GZW

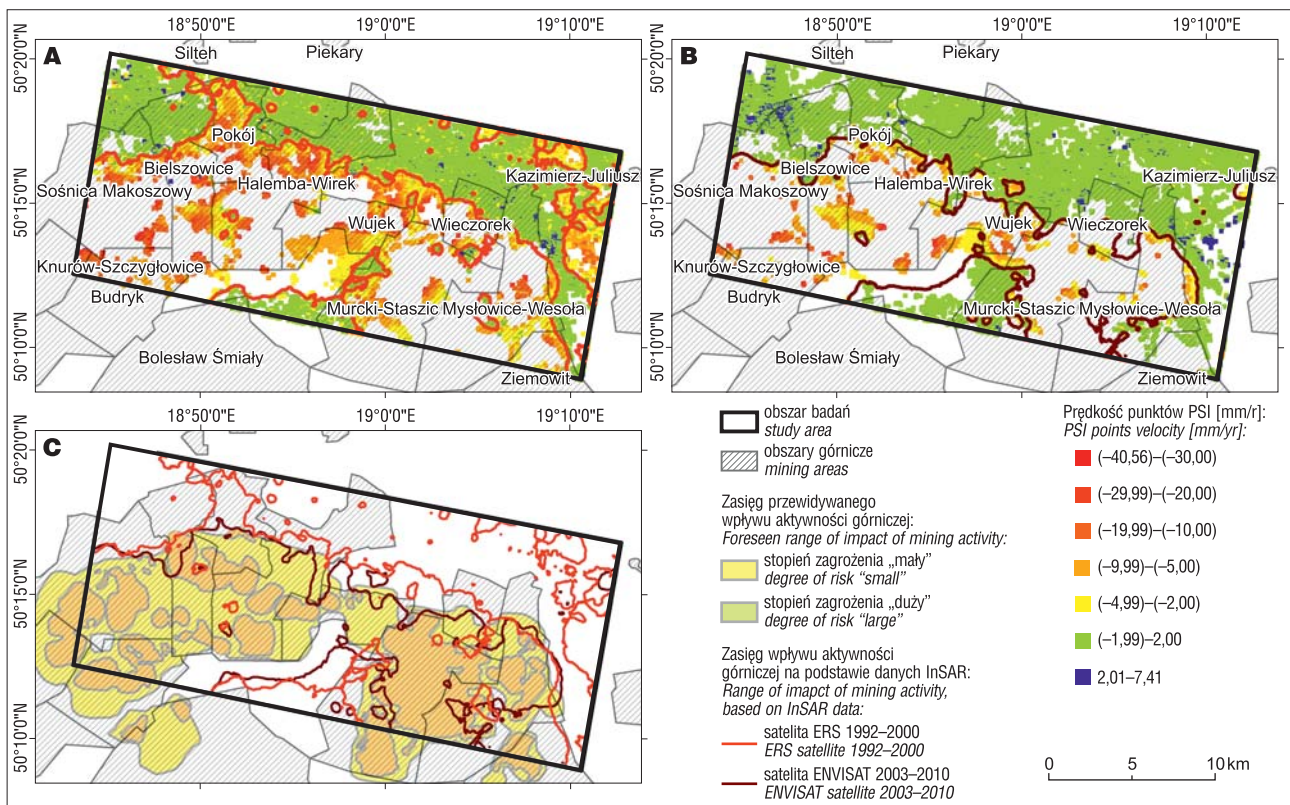
Przetworzone dane SAR poddano analizie porównawczej wykorzystując moduł geostatystyczny (*geostatistical analyst*) w oprogramowaniu ArcGIS. W pierwszym etapie

**Tab. 1.** Zestawienie wykorzystanych zbiorów danych  
**Table 1.** A register of used radar databases

Satelita <i>Satellite</i>	Zakres i długość fali <i>Range and wavelength</i>	Rodzaj przetworzenia <i>Processing type</i>	Dane GIS <i>GIS data</i>	Przedział czasowy <i>Time span</i>
ERS 1 i 2	zakres C – 5,6 cm <i>C Band, 5.6 cm</i>	PSInSAR	71709 punktów PS <i>71709 PS points</i>	17.05.1992–20.12.2000
Envisat	zakres C – 5,6 cm <i>C Band, 5.6 cm</i>	PSInSAR	32341 punktów PS <i>32341 PS points</i>	05.03.2003–29.09.2010
ALOS-PALSAR	zakres L – 23,6 cm <i>L Band, 23.6 cm</i>	DInSAR	5 interferogramów różnicowych <i>5 differential interferograms</i>	22.02.2007–10.07.2007; 10.07.2007–25.08.2007; 25.08.2007–25.11.2007; 25.11.2007–25.02.2008 oraz (and) 25.02.2008–27.05.2008

zbiory punktów PS zostały nałożone na granice obszarów górniczych (ryc. 2 A i B). Wartości punktów przedstawione w skali barwnej od czerwonego do niebieskiego odpowiadają zarejestrowanym prędkościom ruchu terenu. Najsilniejsze, zarejestrowane ruchy wynoszą  $-4$  cm/rok i są przedstawione kolorem czerwonym. Mniejsze wartości osiadania uwidocznione są kolorem pomarańczowym i żółtym. Punkty uznane za stabilne mieszczą się w przedziale od  $-2$  do  $+2$  mm/rok i są przedstawione kolorem zielonym. Niewielkie wypiętrzenia na obszarach kopalni

zamkniętych przedstawiono kolorem niebieskim. Ogólny obraz przemieszczeń powierzchni terenu ilustruje osiadanie będące wpływem aktywności górniczej w centralnej części obszaru badawczego. Wpływy z poszczególnych obszarów górniczych zachodzą na siebie. Duże pokrycie danymi punktowymi pozwoliło na wyznaczenie zasięgu wpływu aktywności górniczej. Każdy z zestawów danych PS został interpolowany metodą Ordinary Kriging. Z powstałej powierzchni prędkości ruchów terenu została zdjęta warstwa o wartości  $-2$  mm/rok. Wartość  $-2$  mm/rok jest



**Ryc. 2.** A – dane PS z satelity ERS obejmujące okres 1992–2000 wraz z wyznaczonym na ich podstawie zasięgiem wpływu aktywności górniczej (czerwona linia). B – dane PS z satelity Envisat obejmujące okres 2003–2010 wraz z wyznaczonym na ich podstawie zasięgiem wpływu aktywności górniczej (ciemnobrązowa linia). C – zasięgi wpływu aktywności górniczej wyznaczone na podstawie danych PSInSAR na tle zasięgu przewidywanego wpływu aktywności górniczej wyznaczony przez Kowalskiego (2011)

**Fig. 2.** A – PS data from ERS satellite covering period 1992–2000 presented together with range of mining activity (red line). B – PS data from Envisat satellite covering period 2003–2010 presented together with range of mining activity (dark brown line). C – ranges of mining activity identified on the basis of interferometric data on the background of predicted mining activity ranges determined by Kowalski (2011)

ogólnie przyjętą wartością graniczną pomiędzy stabilnymi a niestabilnymi punktami PS pochodzącymi z zakresu C (Colesanti & Wasowski, 2006). Na tej podstawie warstwicą o wartości  $-2$  mm/rok wyznacza granice wpływu działalności górniczej na deformacje powierzchni terenu. Dla każdego z zestawu danych ERS i Envisat granica ta została wyznaczona osobno i przedstawiona w postaci linii odpowiednio czerwonej i ciemno-brązowej (ryc. 2 A-C).

W drugim etapie otrzymane zasięgi wpływów aktywności górniczej zostały porównane z modelem przewidywanych osiadań (Kowalski A., 2011). Model ten (zakres czasowy 2000–2020) wykonano specjalnie dla obszaru pokrywającego się z danymi ERS i Envisat na podstawie aktualnych informacji uzyskanych z kopalń i przedstawiono w formie dwóch stopni zagrożenia (ryc. 2C). Pierwszy stopień określony jako „mały”, oznaczony żółtym kolorem, obejmuje deformacje I kategorii terenu górniczego, gdzie mogą wystąpić tylko niewielkie uszkodzenia obiektów infrastruktury budowlano-przemysłowej oraz II kategorii, gdzie występujące uszkodzenia można stosunkowo łatwo naprawić. Dla małego stopnia zagrożenia określono obniżenia terenu dochodzące do 3 m w perspektywie 20 lat. Drugi stopień zagrożenia, „duży”, zaznaczony na pomarańczowo, obejmuje deformacje III kategorii terenu górniczego – uszkodzenia obiektów wymagające prac zabezpieczających oraz IV kategorii oznaczającej poważne uszkodzenia, a nawet zniszczenia obiektów. Przewidywana wielkość obniżeń wynosi od 3 do 12 m w ciągu 20 lat.

Analiza danych satelitów ERS i Envisat przeprowadzona metodą PSInSAR wykazała istnienie osiadań, które w dużym stopniu pokrywają się z zasięgami niecek wyznaczonych na modelu przewidywanych osiadań. Zwraca również uwagę fakt, że zasięgi osiadań wyznaczone na starszych danych satelitarnych ERS (1992–2000) są większe niż na nowszych, z satelity Envisat (2003–2010). Można to wytłumaczyć ogólnym spadkiem wydobywania węgla kamiennego na obszarze GZW. W 1994 r. wydobywano 134 miliony ton węgla, podczas gdy w 2010 r. już tylko 77 milionów ton, co oznacza blisko 50% spadek wydobywania (Karbownik & Turek, 2011).

Ponadto na obszarach zamkniętych kopalń zarejestrowano nieznaczne, kilkumilimetrowe wypiętrzanie powierzchni terenu. Na podstawie analizy danych hydrogeologicznych stwierdzono, że podnoszenie terenu jest związane z „zatapianiem” wyrobisk nieczynnych kopalni wodami naturalnymi, zmniejszeniem lub zaniechaniem odwadniania kopalni oraz generalnie zmianami poziomu wód podziemnych.

Przetwarzanie danych ERS oraz ENVISAT metodą PSInSAR na obszarach aktywnych kopalń umożliwia obserwację osiadań do wartości  $-40$  mm/rok. Wiadomo jednak, że wartości osiadań w obrębie czynnych kopalń są dużo większe. Dlatego też na obszarze testowym brak jest punktów PS w części centralnej, gdzie prowadzona jest eksploatacja. W takiej sytuacji wskazane jest wykorzystanie pasma L (długość fali 25 cm), zezwalającego na wyznaczanie większych osiadań. Optymalnym rozwiązaniem jest nałożenie danych z obu pasm C i L, umożliwiające łączną interpretację punktów PS i prążków interferometrycznych.

### Interpretacja danych dla pasm C i L na terenie Kopalni Węgla Kamiennego Wujek oraz Halemba-Wirek

Projekt Kopalni Wujek, wówczas pod nazwą Oheim, powstał 4 marca 1899 r. W tym samym roku zatwierdzono lokalizację i plan budowy kopalni. W 1922 r. nastąpiła zmiana nazwy Kopalni Oheim na dzisiejszą Wujek. Kopalnia prowadzi eksploatację pokładów węgla na poziomach 613 i 680 m. Obecnie eksploatowane są pokłady: 401, 405, 504 i 510. W większości eksploatację prowadzi się systemem ścianowym z podsadzką hydrauliczną. W styczniu 2005 r. do KWK Wujek została przyłączona kopalnia KWK Śląsk. Po połączeniu obu kopalni mamy do czynienia z Ruchem Wujek oraz Ruchem Śląsk. Ruch Śląsk posiada zasoby przemysłowe w pokładach serii rudzkiej (głównie seria 417) oraz w pokładach warstwy siodłowej (pokłady 502, 504, 507 i 510). Wydobywanie węgla w obszarze górniczym Śląska prowadzone jest systemem ścianowym z zawałem stropu.

Kopalnia Halemba została oddana do eksploatacji w lipcu 1957 r. KWK Halemba należy do spółki Kompania Węglowa S.A. Kopalnia prowadzi eksploatację pokładów węgla na poziomach 525, 830 i 1030 m. W dniu 1 sierpnia 2007 r. w wyniku połączenia obszarów eksploatacyjnych kopalń Halemba i Polska Wirek powstała KWK Halemba-Wirek. Połączenie kopalń zostało przeprowadzone ze względu na wyczerpanie się złóż z poziomów 636 i 711 m w kopalni Polska-Wirek. W Ruchu Halemba wydobywa się głównie węgiel z warstw rudzkiej, orzeskiej i siodłowej. W kopalni stosuje się ścianowy system eksploatacji z zawałem lub z podsadzką hydrauliczną.

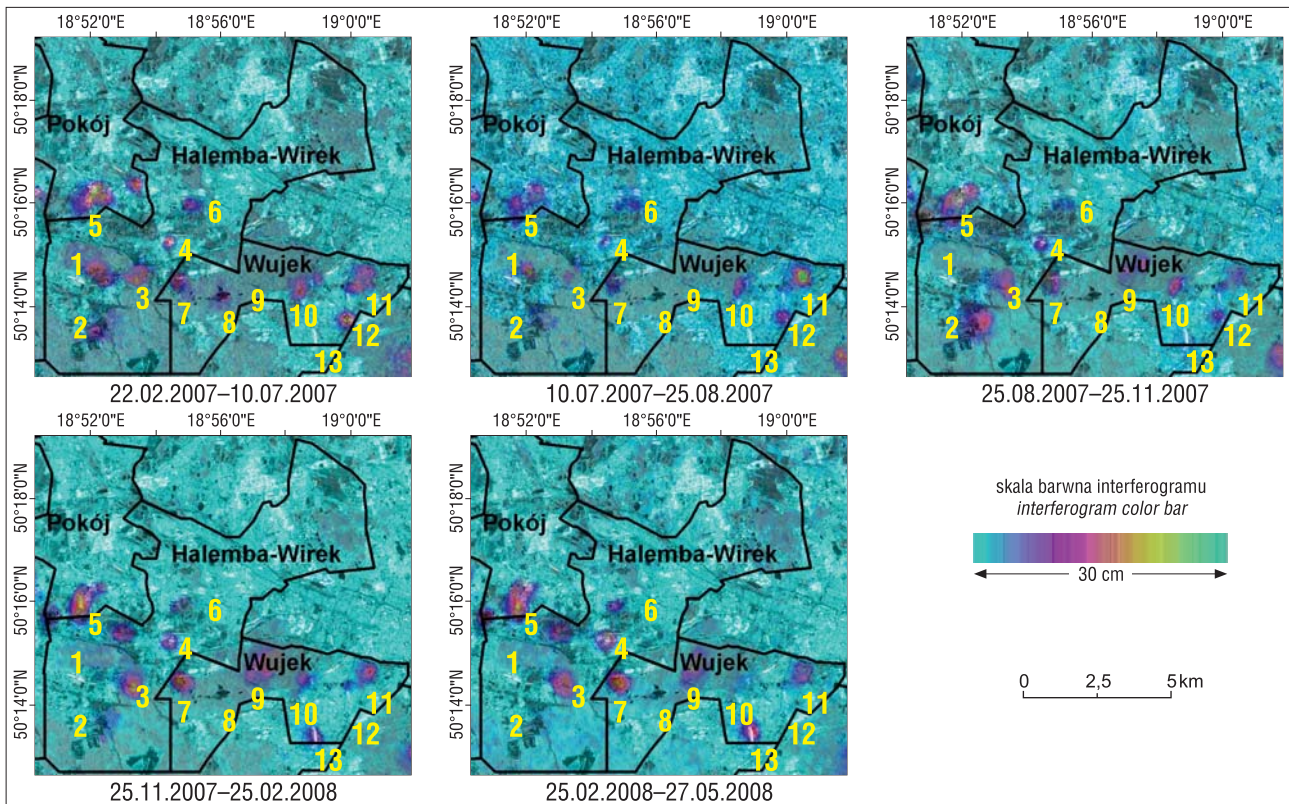
Obszar kopalń pokrywa 5 interferogramów pochodzących z przetworzenia danych satelitarnych ALOS – PALSAR. Na interferogramach przeprowadzono analizę osiadań w okresie pomiędzy 22.02.2007 a 27.05.2008.

Na ich podstawie wyróżniono 13 niecek osiadań. Niecki zostały oznaczone numerami w kolorze żółtym (ryc. 3) i nazwane: 1 – Kłodnica (Zachód), 2 – Stara Kuźnia, 3 – Kłodnica (Wschód), 4 – Kochłowice (Wschód), 5 – Kochłowice (Zachód), 6 – Nowy Wirek, 7 – Kochłowice (Południe), 8 – Czarny Staw, 9 – Kokociniec (Północ), 10 – Katowicka Hałda, 11 – Park Kościuszki, Brynów, 12 – Brynów, 13 – Ligota. Widoczne na kolejnych obrazach deformacje przedstawione są za pomocą skali barwnej, gdzie kolor niebieski oznacza brak deformacji, a kolor seledynowy deformację 30 cm, która zaszła w czasie pomiędzy rejestracją sceny początkowej i sceny końcowej. Na podstawie interferogramów można zauważyć tworzenie się poszczególnych niecek osiadań i zmiany w intensywności oraz zasięgu przemieszczeń pionowych.

W szczególności można wyróżnić trzy typy zmian zachodzących na powierzchni terenu:

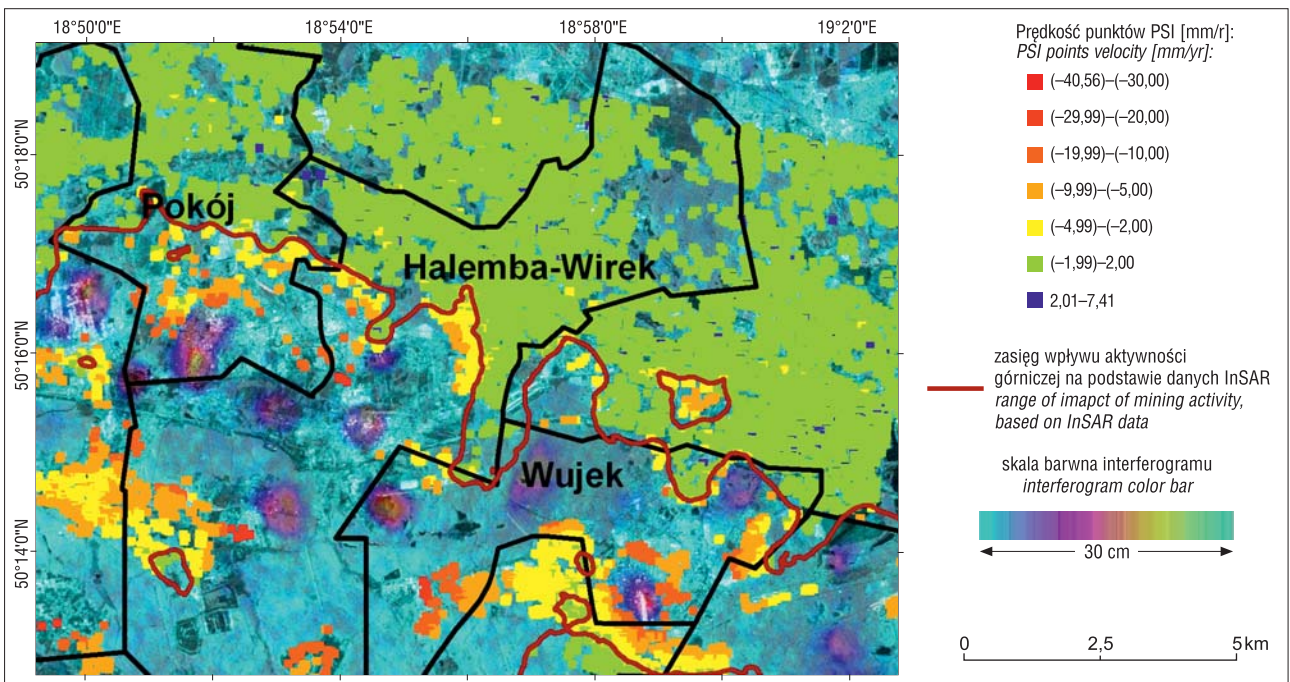
1. Początkowa stabilność terenu i stopniowy wzrost osiadania. Jest to widoczne na obszarach o numerach 5, 9 i 13, gdzie osiadanie zaczyna występować dopiero w listopadzie 2007 r., po czym utrzymuje się do maja 2008 r. Zmiany takie są charakterystyczne dla początkowego okresu tworzenia się niecki osiadania towarzyszącej podziemnej eksploatacji węgla.

2. Niewielkie przemieszczenia pionowe widoczne na początku obrazowanego okresu od lutego 2007 r. i stopniowe



**Ryc. 3.** Interferogramy różnicowe z danych satelity ALOS-PALSAR zakresu L na obszarach górniczych kopalni KWK Halemba-Wirek oraz KWK Wujek (GIG, 2012). Zarejestrowane przemieszczenia pionowe są przedstawione za pomocą skali barwnej, gdzie kolor niebieski oznacza brak osiadania, kolor różowy osiadanie 15 cm, a kolor seledynowy osiadanie 30 cm. Żółtymi numerami oznaczono zaobserwowane niecki osiadań

**Fig. 3.** Differential interferograms interpreted from ALOS-PALSAR satellite (L band) at the Halemba-Wirek and Wujek Coal Mining Areas (Central Mining Institute, 2012). Vertical displacement are presented in color scale, where blue color shows stable areas, pink color subsidence up to 15 cm and aquamarine 30 cm. Yellow numbers indicate observed depression basins



**Ryc. 4.** Obszary górnicze kopalni KWK Halemba-Wirek oraz KWK Wujek (GIG, 2012) wraz z punktami PS z danych satelity Envisat z zakresu C z okresu 2003–2010 na tle interferogramu różnicowego z danych satelity ALOS-PALSAR z zakresu L z okresu 25.02.2008–27.05.2008. Ciemnobrązową linią oznaczono zasięg wpływu aktywności górniczej wyznaczony na podstawie danych PS

**Fig. 4.** Halemba-Wirek and Wujek coal mining areas presented together with PS points interpreted from Envisat (C Band) showing time span 2003–2010 on the background of differential interferograms from ALOS-PALSAR satellite (L band) from the period 25.02.2008–27.05.2008. Range of mining activity determined on the basis of PS points was depicted by dark brown line

zmniejszanie się osiadania aż do całkowitego jego zaniku. Takie zmiany są widoczne na obszarach 1, 8, 10, 12. Zmiany te są charakterystyczne dla stopniowego zmniejszania się wpływu robót górniczych na powierzchnie terenu po zakończeniu eksploatacji pojedynczych ścian.

3. Zmienne natężenie wielkości przemieszczeń pionowych widoczne dla całego okresu monitoringu od lutego 2007 r. do maja 2008 r. widoczne jest na obszarach o numerach 2, 3, 4, 6, 7 oraz 11, co jest charakterystyczne dla obszarów, gdzie prowadzona jest eksploatacja.

Na rycinie 4 dla tego samego obszaru przedstawiono interferogram różnicowy i punkty PS pochodzące z satelity Envisat z okresu 2003–2010. Widać wyraźnie jak wspomniane dane uzupełniają się nawzajem. Dane PS z zakresu C ilustrują zasięg wpływu aktywności górniczej i powolne osiadania na jego granicy, podczas gdy na interferogramach różnicowych z zakresu L można zaobserwować pojedyncze niecki osiadań, gdzie przemieszczenia pionowe sięgają kilkudziesięciu centymetrów w okresie 15 miesięcy.

### WNIOSKI

1. Na obszarach czynnych kopalń interferogramy dyferencyjne pasma L okazały się bardzo przydatne do obserwacji dynamiki rozwoju i zanikania niecek osiadań i określenia ich wielkości.

2. Dane z interferogramów pozwalają na określenie osiadania w skali decymetrowej w ciągu roku, w cyklach 46-, 92- i 138-dniowych.

3. Dane pasma C w postaci punktów PS rejestrują powolne ruchy, gdzie wartości przemieszczeń pionowych nie przekraczają 4 cm/rok. Dlatego też, zastosowanie danych tego pasma powinno przede wszystkim ograniczać się do otoczenia czynnych kopalń, bądź obszarów kopalń zamkniętych.

4. Optymalnym rozwiązaniem zalecanym do kompleksowego monitoringu obszarów górniczych na terenie GZW jest łączne zastosowanie danych z dwóch pasm radarowych: C i L.

5. Wyniki przemieszczeń zarejestrowane metodami interferometrii satelitarnej powinny być weryfikowane przez naziemne pomiary geodezyjne (niwelacja precyzyjna)

oraz dane z permanentnych stacji GPS. Wskazane jest również wykorzystanie kopalnianych map wydobywania węgla oraz danych hydrogeologicznych z Centralnego Zakładu Odwadniania Kopalń (CZOK) w odniesieniu do zlikwidowanych kopalń.

### LITERATURA

- CARNEC C., MASSONNET D., VILLAN J.P. & KING C. 1994 – Potential Applications of Differential SAR Interferometry for Monitoring the Impact of Underground Mining. Proceedings of the 1st SAR Interferometry Workshop: 41–45, Tokyo.
- COLESANTI C. & WASOWSKI J. 2006 – Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) Interferometry. Eng. Geol., 88: 173–199.
- CROSETTO M., MONSERRAT O., JUNGNER A. & CRIPPA B. 2009 – Persistent Scatterer Interferometry: potential and limits, ISPRS Archives – Volume XXXVIII-1-4-7/W5, ISPRS Workshop 2009 – High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information, Hannover, Germany.
- CZARNOGORSKA M., GRANICZNY M., KOWALSKI Z. & WEGMULLER U. 2008 – Dynamika zmian powierzchni terenu na Górnym Śląsku w okresie 10.07–25.08.2007 r. na podstawie danych interferometrycznych z satelity ALOS. Prz. Geol., 56 (7): 524–527.
- FERRETI A., PRATI C. & ROCCA F. 2001 – Permanent Scatterers in SAR Interferometry, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 39: 8–20.
- GŁÓWNY INSTYTUT GÓRNICICTWA 2012 – Obszary górnicze kopalń podziemnych oraz płytkie eksploatacje rud I węgla kamiennego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. Wydawnictwo kartograficzne Mapy Ścienne, Beata Piętka.
- GRANICZNY M., CZARNOGORSKA M., KOWALSKI Z. & WEGMULLER U. 2009 – Using ALOS PALSAR, Envisat ASAR and ERS data for monitoring of subsidence and related ground failures in Upper Silesian Coal Basin, Southern Poland. EGU (European Geosciences Union) General Assembly 2009, Geophysical Research Abstracts, 11, Vienna, Austria.
- HUANYIN Y., GUANG L., PERSKI Z. & HUADONG G. 2011 – Satellite radar reveals land subsidence over coal mines. SPIE Newsroom, doi.10.1117/2.1201110.003898 :3.
- HERRERA G.; TOMAS, R., LOPEZ-SANCHEZ J.M., DELGADO J., MALLORQUI J.J., DUQUE S. & MULAS J. 2007 – Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain): Eng. Geol., 90: 148–159.
- KARBOWNIK A. & TUREK M. 2011 – Zmiany w górnictwie węgla kamiennego – geneza, przebieg, efekty. Prz. Górn., 66 (7–8): 11–18.
- KOWALSKI A. 2011 – Wstępna informacja o działalności górniczej i aktywności deformacyjnej terenów górniczych i pogórnicznych w obrębie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (materiał niepublikowany).