

# Kompleksowe wykorzystanie przetworzeń DInSAR i PSInSAR w badaniu pionowych przemieszczeń terenu w wybranych rejonach GOP

Comprehensive use of InSAR and PSInSAR in the study of vertical ground movements in selected regions of the GOP



Mgr inż. Maria Przyłucka\*)



Prof. dr hab. Marek Graniczny\*)

**Treść:** W artykule przedstawiono analizę danych pozyskanych z różnych przetworzeń technikami satelitarnej interferometrii radarowej w celu uzyskania mapy pionowych przemieszczeń terenu zaistniałych w ciągu jednego roku na dwóch obszarach badawczych, Bytomia i Katowic. Przedstawiona metodyka łączenia różnych typów danych (DInSAR i PSInSAR), pochodzących z obrazów pozyskanych w różnych pasmach radarowych (C, L oraz X), pozwoliła na zbadanie zarówno małych, milimetrycznych ruchów powierzchni terenu jak i bardzo szybkich obniżeń, dochodzących do 58 centymetrów na rok. Wyniki przedstawiono w formie mapy wartości pionowych przemieszczeń na obszarze Katowic dla okresu od 22 lutego 2007 r. do 27 maja 2008 r. oraz na obszarze Bytomia dla okresu od 5 lipca 2011 r. do 21 czerwca 2012 r. Mapy te uzyskano poprzez interpolację złożonego zestawu punktów metodą Simple Kriging oraz warunkowych Symulacji Gaussa. Dodatkowo otrzymano mapy prawdopodobieństwa przekroczenia zadanej wartości progowej, pozwalające określić granice obszaru znajdującego się pod wpływem ciągłych obniżeń powierzchni terenu. Wyniki analiz pozwalają stwierdzić, iż satelitarna interferometria radarowa może w znaczący sposób wspomagać klasyczne metody monitoringu deformacji powierzchni terenów aktywnych górniczo, gdyż umożliwia detekcję powolnych, pozornie nieszkodliwych przemieszczeń, jak i bardzo szybkich obniżeń towarzyszących procesowi powstawania poszczególnych niecek obniżeniowych.

**Abstract:** This paper presents an analysis of the dataset obtained from various satellite radar interferometry processing techniques in order to create maps of one-year vertical ground displacements which occurred in two areas of the research - Bytom and Katowice. The presented methodology of combining different types of data (DInSAR and PSInSAR), derived from images acquired at different radar bands (C, L, and X), enabled the identification of small, millimeter-ground surface movements and very fast subsidence, of up to 58 centimeters per year. The results are presented in the form of vertical displacements maps of Katowice area (for the period of 22 February 2007 - 27 May 2008) and of Bytom area (for the period of 5 July 2011 - 21 June 2012). These maps were obtained by Simple Kriging and Conditional Gaussian Simulation interpolation of a complex set of points. In addition, the probability maps were used for determining the boundaries of the area under the influence of continuous ground surface subsidence. The results of analyses allow us to conclude that satellite radar interferometry can significantly support the classic methods of surface deformation monitoring over active mining areas, as it enables the detection of slow, seemingly negligible movements, as well as very fast subsidence associated with the process of formation of individual subsidence troughs.

## Słowa kluczowe:

satelitarna interferometria radarowa, GZW, pionowe deformacje terenu, geostatystyka

## Key words:

satellite radar interferometry, USCB, vertical ground movements, geostatistics

\*) Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy

## 1. Wprowadzenie

Obniżenia terenu są jednym z ważniejszych wpływów podziemnej działalności górniczej na środowisko. Zasięg pionowej wartości składowej przemieszczeń zależy od wielu czynników, takich jak metoda wydobywania surowca, grubość, głębokość i nachylenie złoże, warunki geologiczne i tektoniczne, jak i czas prowadzenia eksploatacji. Z uwagi na złożoność procesu powstawania niecki obniżeniowej, najważniejsze parametry ruchu terenu oraz kryteria i wartości graniczne są trudne do wyznaczenia analitycznie i w większości są oparte na obserwacjach empirycznych już zaistniałych deformacji i zniszczeń budynków [1]. Obniżenia powodowane przez eksploatację z zawałem stropu, występują nad miejscem prowadzonych prac na obszarze większym od zakresu eksploatowanego pokładu rozciągającym się ku górze i na zewnątrz od powierzchni roboczej, ograniczonym przez kąt wpływu od 8 do 45° w zależności od zagłębia węglowego [8]. W Polsce zjawisko obniżen na terenach górniczych było przedmiotem badań między innymi [5, 23, 25, 27].

Górnośląskie Zagłębie Węglowe (GZW) jest jednym z największych zagłębi węglowych w Europie, gdzie aktywność górnicza rozpoczęła się już w XIX wieku i trwa do chwili obecnej. W okresie 1945÷1979 średnie wydobycie węgla było na poziomie 200 milionów ton na rok [23]. Począwszy od lat 80. rozpoczął się powolny spadek wydobycia, które w 2012 roku wynosiło 79 milionów ton [24]. Wraz z rozwojem przemysłu, nastąpił gwałtowny rozwój miast i obecnie Górny Śląsk jest zamieszkały przez 3 miliony ludzi w 37 miastach. Najczęściej stosowanym systemem eksploatacji jest system ścianowy z zawałem stropu lub z podsadzką hydrauliczną. Obniżenie nad typową ścianą eksploatacyjną znajdującą się na głębokości 680 metrów, o wysokości 2,5 metra i długości od 250 do 400 metrów, sięga do 70% wysokości warstwy, co odpowiada największemu pionowemu przemieszczeniu 0,75 ÷ 2,0 m w centralnej części niecki obniżeniowej [13]. Z uwagi na eksploatację wielu pokładów, pionowe przemieszczenia na terenie GZW, dochodzą w niektórych miejscach do dzie-

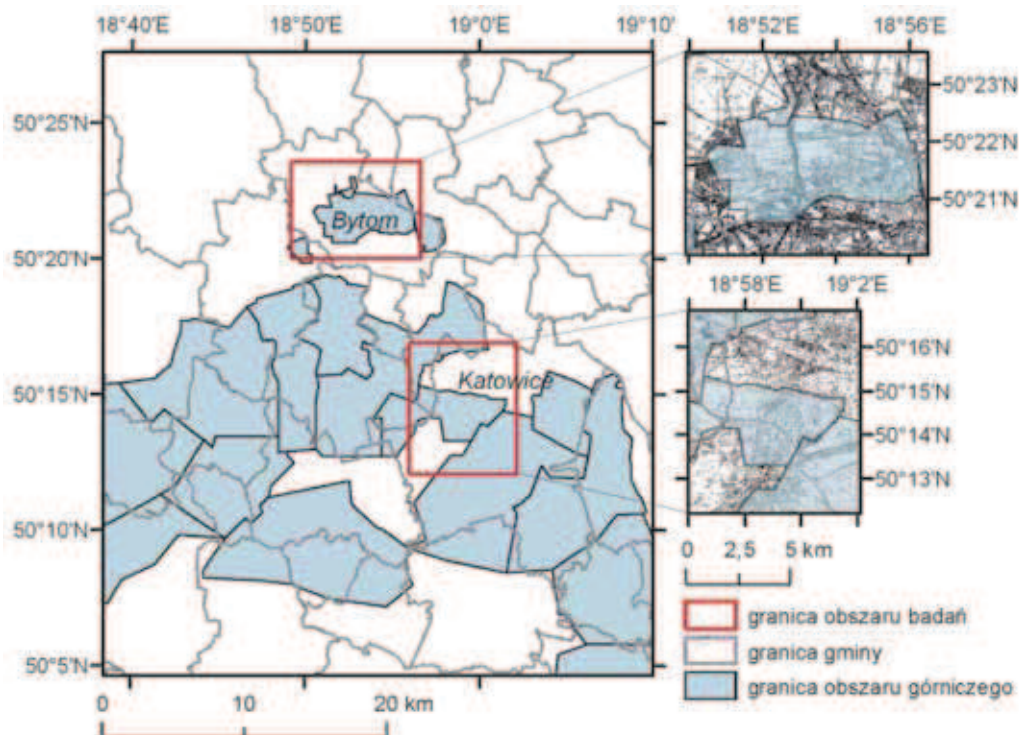
siątków metrów. Szacuje się, że ponad 300 km<sup>2</sup> dotkniętych jest pionowymi przemieszczeniami terenu [3]. Nawet jeśli w większości są to tereny rolnicze i leśne, deformacje terenu okresowo dotyczą również tereny miejskie i przyczyniają się do zniszczeń budynków i obiektów infrastruktury.

Deformacje są monitorowane przy wykorzystaniu tradycyjnych metod geodezyjnych (niwelacja precyzyjna i techniczna oraz pomiary GNSS) oraz sporadycznie za pomocą różnicowych analiz wysokorozdzielczych numerycznych modeli terenu pozyskanych za pomocą LIDAR. Szybki rozwój teledetekcyjnych metod obrazowania Ziemi pozwala na badanie możliwości ich wykorzystania do detekcji i monitoringu dynamicznych zmian powierzchni terenu. Wśród tych metod, najbardziej użyteczną okazała się różnicowa interferometria radarowa. Przykłady jej wykorzystania na terenach górniczych na świecie można znaleźć w [2, 6, 20, 35]. Podobne badania w Polsce przeprowadzili między innymi na obszarze GZW [19, 26, 28], a także na obszarze LGOM [29, 32]. Wynikiem przetworzeń technikami interferometrii radarowej są duże zbiory danych zapisywane w formatach rastrowych i wektorowych. W celu wydobycia i pełniejszego zrozumienia informacji o pionowych przemieszczeniach terenu na obszarach górniczych uzyskanych z tych danych, kilku autorów zastosowało, wykorzystane również w tej pracy, geostatystyczne narzędzia GIS [12, 30, 33].

Celem pracy jest zaprezentowanie możliwości łączenia danych InSAR pozyskanych dwiema różnymi metodami przetwarzania, tj. konwencjonalną interferometrią różnicową oraz techniką permanentnych rozpraszaczy (ang. Permanent Scatterers). Jako obszary badawcze wybrano dwie lokalizacje w okolicach Bytomia i Katowic (rys. 1), gdzie podziemna eksploatacja węgla prowadzona jest od początku XX wieku systemem z zawałem stropu lub z podsadzką hydrauliczną [21, 22]. Wynikiem zastosowania geostatystycznych narzędzi oprogramowania GIS są mapy przemieszczeń pionowych, które uwzględniają zarówno niewielkie milimetrowe deformacje, jak i znaczące obniżenia dochodzące do 58 cm.

Rys. 1. Geograficzna lokalizacja obszarów badawczych Bytom i Katowice na tle granic obszarów górniczych (na podstawie [18])

Fig. 1. Geographical setting of the study areas with the boundaries of coal mining areas in Upper Silesia Coal Basin (based on the [18])



## 2. Satelitarna interferometria radarowa

Tradycyjna radarowa interferometria różnicowa (ang. *Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry*, DInSAR) wykorzystuje zobrazenia mikrofalowe z radaru bocznego wybierania z anteną syntetyzowaną SAR (ang. *Synthetic Aperture Radar*). Różnica faz powracającego sygnału zarejestrowanego dla obrazów tego samego obszaru pozyskanych w różnym czasie, służy do detekcji deformacji powierzchni terenu [9]. Deformacje przedstawione zostają w postaci interferogramu, gdzie prążki interferometryczne odpowiadają wielkości i zakresowi deformacji powierzchni zaszłej w czasie pomiędzy dwoma zobrazeniami. Przetworzenia te ściśle zależą od koherencji, czyli zgodności, obrazów. W konsekwencji, zmiany pokrycia terenu (roślinność, pokrywa śnieżna, itp.) oraz zakłócenia atmosferyczne ograniczają precyzję pomiaru do centymetrów [16]. Jednakże przetworzenia te są z sukcesem wykorzystywane do badań skutków trzęsień ziemi, deformacji związanych z sejsmicznością i wulkanizmem, czy dużych obniżen terenu.

Na początku XXI wieku, zostało zaimplementowane nowe podejście do przetworzeń danych SAR, oparte na jednoczesnej analizie kilkunastu-kilkudziesięciu scen tego samego obszaru, znane jako Permanent Scatterer Interferometry (PSInSAR, PSI) [14, 15], w Polsce tłumaczone jako interferometria permanentnych rozpraszaczy. Podstawą techniki PSInSAR jest wyodrębnienie różnych składowych różnicy faz: przemieszczenie terenu, topografia, błędy atmosfery oraz niepewność informacji o orbicie satelity. Poprzez przetworzenie złożonego zbioru danych (zwykle więcej niż 20 obrazów), zostają wybrane piksele, dzięki którym obliczane są poprawki atmosferyczne. Pozwala to na detekcję przemieszczeń z dokładnością milimetrową [34]. Wynikiem przetworzenia jest zbiór od kilkudziesięciu tysięcy do kilkuset tysięcy punktów PS (*Permanent Scatterers*, permanentnych rozpraszaczy), zawierających informację o średniej prędkości ruchu w kierunku obrazowania satelity oraz tabelę względnych przemieszczeń zaobserwowanych dla każdej sceny (względnych względem jednej wybranej sceny „master”). Technika PSInSAR uzupełnia tradycyjną interferometrię różnicową DInSAR o dane na temat bardzo małych przemieszczeń w skali milimetrów na rok. Technika jest szeroko wykorzystywana ze względu na możliwość wykrycia subtelnych, pozornie nieszkodliwych, ciągłych deformacji. Jednakże należy podkreślić, iż w przypadku gwałtownego lub nieliniowego charakteru zmian powierzchni terenu nie są one rejestrowane. Ma to szczególne znaczenie przy badaniu deformacji terenu spowodowanych podziemną działalnością górnictwem.

Najnowszym postępowaniem w dziedzinie przetworzeń PSInSAR jest algorytm SqueeSAR, który umożliwia detekcję znacznie większej ilości punktów PS. Dzięki niemu zostają wykryte deformacje nie tylko na obiektach silnie odbijających falę radarową, takich jak infrastruktura miejska, czy wychodne skały, ale również na obszarach pokrytych niewielką roślinnością [17].

### 2.1. Charakterystyka wykorzystanych danych i wstępna interpretacja

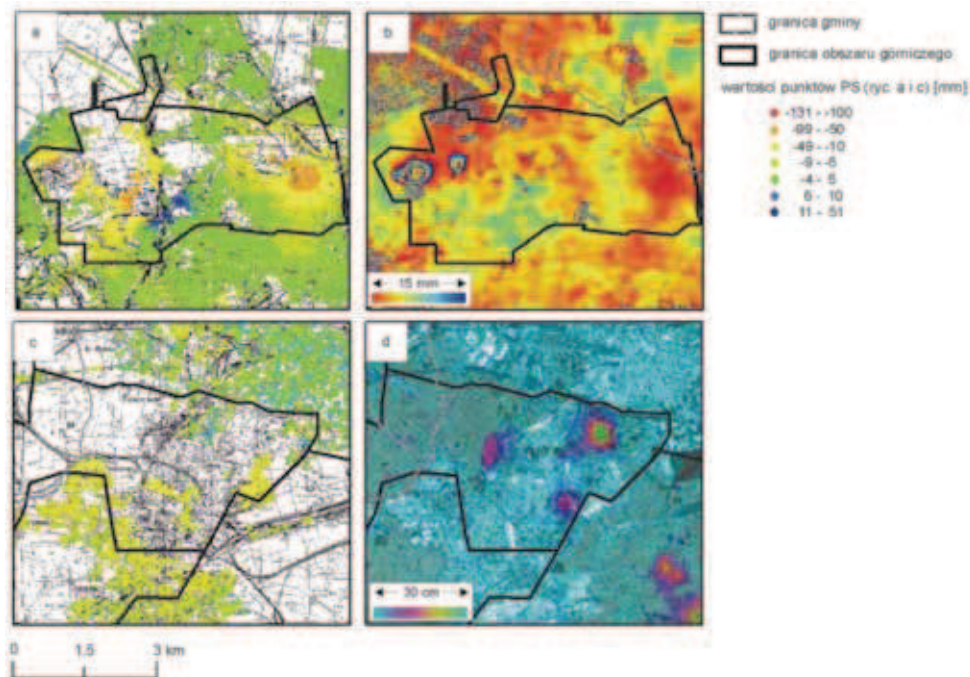
W pracy wykorzystano złożony zbiór przetworzeń InSAR, pochodzących ze scen satelitów Envisat, ALOS-PALSAR oraz TerraSAR-X. W tabelicy 1 została przedstawiona charakterystyka danych.

Zestaw danych pochodzących z satelity TerraSAR-X zawierał zarówno punkty PS pochodzące z przetworzenia SqueeSAR, jak i 28 interferogramów pokrywających przedział czasowy od 5 lipca 2011 r. do 21 czerwca 2012 r. Dane te zostały wykorzystane do badania pionowych przemieszczeń terenu zaszłych na obszarze Bytomia (rys. 1). Dla tego obszaru zarejestrowano 121 694 punkty PS charakteryzujące się wartościami całkowitego pionowego przemieszczenia od -131 do +50 mm, ze średnią wartością -5 mm (rys. 2a). Pomimo iż zakres wartości przemieszczeń jest dość duży i sięga 13 cm w jednym roku obrazowania, obniżenia spowodowane działalnością górnictwem na tym obszarze były znacznie szybsze. Ilustruje to brak punktów w środkowych częściach niecek obniżeniowych. Szybkie przemieszczenia zostały natomiast zarejestrowane na 11-dniowych interferogramach różnicowych, których przykład został przedstawiony na rys. 2b. Na obrazie widoczne są miejsca powstawania niecek w postaci prążków interferometrycznych. Wartość pionowej składowej przemieszczeń jest przedstawiona w skali barwnej, gdzie każdy kolejny prążek (pełen cykl fazy) rozpoczyna się na granicy koloru czerwonego i niebieskiego i odpowiada przemieszczeniu 15 mm (połowa długości fali).

Do badań przemieszczeń pionowych na obszarze Katowic (rys. 1) wykorzystano zestaw danych PS pochodzących z przetworzeń obrazów satelity Envisat oraz 5 interferogramów różnicowych satelity ALOS-PALSAR. W celu kompleksowego zbadania przemieszczeń pionowych, ograniczono zestaw danych PS do przedziału czasowego od 3 stycznia 2007 do 27 lutego 2008 r., tak aby był jak najbardziej zbliżony do przedziału danych ALOS-PALSAR (od 22 lutego 2007 r. do 27 maja 2008 r.). Dane PS zawierały 7 069 punkty, o wartościach całkowitego przemieszczenia pionowego w okresie styczeń 2007 ÷ luty 2008 mieszczącymi się pomiędzy -35 mm a +15

**Tabela 1. Charakterystyka wykorzystanych zbiorów danych**  
**Table 1. Characteristics of the used datasets**

Zestaw danych	Envisat	ALOS-PALSAR	TerraSAR-X
Obszar badań	Katowice	Katowice	Bytom
Metoda przetworzenia	PSInSAR	DInSAR	DInSAR oraz SqueeSAR
Długość fali $\lambda$ , cm	5.6	23.6	3.1
Kąt padania wiązki $\theta$ [°]	23	~ 38	37
Minimalna różnica czasowa pomiędzy dwoma scenami dzień	35	46	11
Piksel obrazu, m	20x20	20x20	3x3
Przedział czasowy danych	05/03/2003-29/09/2010	22/02/2007-27/05/2008	05/07/2011-21/06/2012
Liczba scen	31	6	30
Gęstość punktów PS, liczb/km <sup>2</sup>	107	nd.	2092
Liczba interferogramów	nd.	5	28



Rys. 2. Wykorzystane dane InSAR. a. Dane PSInSAR na podstawie scen TerraSAR-X dla obszaru Bytomia. Skala barwna ilustruje całkowite przemieszczenie pionowe zarejestrowane dla okresu 05.07.2011-21.06.2012. b. Przykładowy interferogram różnicowy scen TerraSAR-X dla obszaru Bytomia (okres 17.12.2011-28.12.2011). c. Dane PSInSAR na podstawie scen Envisat dla obszaru Katowic. Skala barwna ilustruje całkowite przemieszczenie pionowe zarejestrowane dla okresu 03.01.2007-27.02.2008. d. Przykładowy interferogram różnicowy scen ALOS-PALSAR dla obszaru Katowic (okres 10.07.2007-25.08.2007).

Fig. 2. InSAR datasets used. a. Bytom area, PSInSAR dataset based on TerraSAR-X scenes. Colour scale shows the total vertical displacement recorded for the period of 5 July 2011-21 June 2012. b. Bytom area, an example of a differential interferogram from TerraSAR-X scenes (the period of 17 December 2011 – 28 December 2011). c. Katowice area, PSInSAR dataset based on Envisat scenes. Colour scale shows the total vertical displacement recorded for the period of 3 January 2007-27 February 2008. d. Katowice area, an example of a differential interferogram from ALOS-PALSAR scenes (the period of 10 July 2007-25 August 2007)

mm ze średnią wartością  $-2$  mm (rys. 2c). Jak widać na rysunku 2 zakres wartości PS satelity Envisat jest znacznie mniejszy niż satelity TerraSAR-X. Wynika to z faktu dłuższej długości fali zakresu obrazowania C. Dodatkowo satelita TerraSAR-X charakteryzuje się znacznie większą rozdzielczością terenową, co skutkuje gęstszym zbiorem punktów w porównaniu z satelitą Envisat. Z tego względu zbiór punktów PS dla obszaru Katowic nie zawiera żadnych punktów w centralnej części obszaru górnictwa, gdzie przewidywane są największe obniżenia. Te największe przemieszczenia pionowe zostały natomiast zarejestrowane na pięciu interferogramach różnicowych satelity ALOS-PALSAR (rys. 2d). Na obrazach tych przemieszczenia zostały zilustrowane za pomocą skali barwnej, gdzie kolor niebieski oznacza brak przemieszczeń, a turkusowy przemieszczenia o wartości  $-30$  cm.

### 3. Zastosowana metodyka badań

Przedstawione zestawy danych można podzielić na dwa zasadnicze typy. Wynikiem tradycyjnej interferometrii różnicowej są obrazy rastrowe, gdzie przemieszczenia pionowe są przedstawione za pomocą skali barwnej. Na interferogramach pozyskanych z satelity ALOS-PALSAR (rys. 2d) kolor jednoznacznie odpowiada danemu przemieszczeniu o wartości

mieszczącej się w przedziale 0-30 cm. Z kolei na otrzymanych interferogramach satelity TerraSAR-X (rys. 2b) wartość maksymalnego przemieszczenia zależy od liczby widocznych prążków interferometrycznych (kolejnych różnic pomiędzy kolorami czerwonym i niebieskim), co będzie szczegółowo wytłumaczone w dalszej części artykułu. Różnica ta wynika z zaistniałych trudności w „odpakowaniu” (ang. unwrapping) fazy na interferogramach TerraSAR-X, spowodowanych barakiem koherencji w środkowej części niecek obniżeniowych. Niemniej jednak oba zestawy interferogramów pozwalają na zidentyfikowanie zarówno zasięgu jak i wartości niecek, które powstały w okresie pomiędzy 22 lutego 2007 r. a 27 maja 2008 r. i 5 lipca 2011 r. a 21 czerwca 2012 r. odpowiednio na obszarze Katowic i Bytomia. Na pojedynczych interferogramach widać obniżenie do 30 cm w okresie 46 dni (zestaw danych ALOS-PALSAR) i do 7,5 cm w okresie 11 dni (zestaw danych TerraSAR-X). Jednocześnie małe ruchy powierzchni terenu nie są widoczne.

Drugim typem danych są wektorowe pliki tysięcy punktów PS, pochodzące z przetworzeń PSInSAR scen satelitów Envisat i TerraSAR-X. Rozmieszczone nierównomiernie punkty zawierają informacje o całkowitym przemieszczeniu względnym, jakie zaszło w okresie od 3 stycznia 2007 r. do 27 lutego 2008 r. (zestaw danych Envisat wykorzystany dla obszaru Katowic) oraz od 5 lipca 2011 r. do 21 czerwca 2012

r. (zestaw danych TerraSAR-X, wykorzystany dla obszaru Bytomia). Dane z satelity Envisat na terenie Katowic pozwoliły zidentyfikować małe przemieszczenia pionowe o wartości do -35 mm. W porównaniu z informacją z interferogramów różnicowych, punkty PS nie pozwalają na szczegółową identyfikację procesu tworzenia się niecki obniżeniowej. Niemniej jednak mogą służyć do określenia granic stabilności terenu znajdującego się pod wpływem kopalni. Na terenie Bytomia, punkty PS z satelity TerraSAR-X, dzięki krótszej długości fali, umożliwiły detekcję przemieszczeń do -131 mm. Większy zakres zaobserwowanych wartości nie umożliwił jednak wyznaczenia maksymalnych obniżzeń, mających miejsce w centralnych częściach niecek.

Zastosowana metodyka badań miała na celu połączenie informacji o bardzo szybkich przemieszczeniach pionowych, pozyskanej z obrazów rastrowych, z wartościami niewielkich pionowych przemieszczeń terenu, zarejestrowanych na punktach PS. W wyniku analiz opracowano mapy pionowych przemieszczeń terenu dla obszaru Katowic (okres 22.02.2007 – 27.05.2008) i Bytomia (okres 5.07.2011-21.06.2012). Wykonanie map składało się z dwóch etapów:

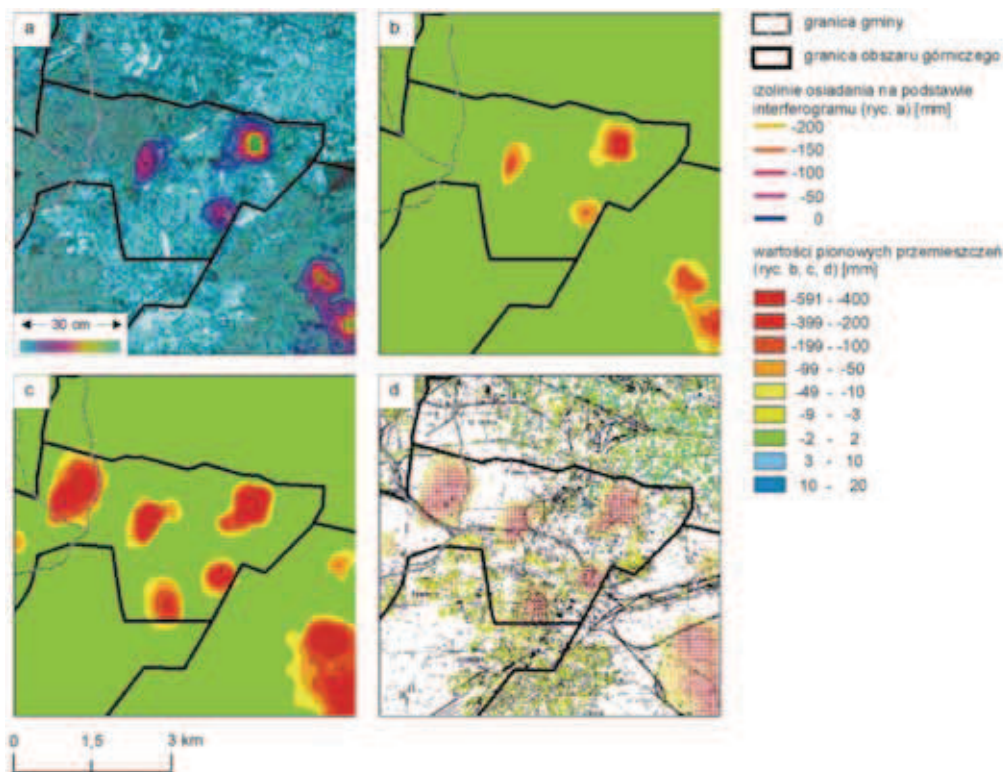
Etap 1 – opracowanie sumarycznych pionowych deformacji terenu zidentyfikowane na wszystkich interferogramach

z danego okresu a następnie przedstawienie tych danych w formie punktowej i złączenie ze zbiorem danych PS,

Etap 2 – interpolacja łącznego zbioru danych punktowych metodą Simple Kriging, a następnie metodą warunkowych Symulacji Gaussa.

### 3.1. Analiza przemieszczeń pionowych na obszarze Katowic

Dla obszaru Katowic duże przemieszczenia centymetrowe i decymetrowe zostały odzwierciedlone na pięciu interferogramach o następujących datach początkowych i końcowych scen: 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. Różnica pomiędzy sceną początkową a końcową wynosiła 46, 92 lub 138 dni. Pionowe deformacje terenu zasze w tych okresach są widoczne na wynikowych obrazach jako piksele o określonej barwie. W celu opracowania sumarycznego przemieszczenia pionowego dla okresu 22.02.2007÷27.05.2008 konieczna była zamiana obrazu rastrowego na wektorowy. Na rysunku 3a przedstawiono jeden z wykorzystanych interferogramów. Dla każdej zarejestrowanej niecki obniżeniowej manualnie zostały zdigitalizowane war-



**Rys. 3.** Opracowanie zbioru punktów zawierającego informacje o pionowych przemieszczeniach terenu na obszarze Katowic. a. Interferogram 10.07.2007-25.08.2007 z manualnie wyznaczonymi warstwicami obniżzeń. b. Wektorowa mapa obniżzeń zidentyfikowanych na interferogramie 10.07.2007-25.08.2007. c. Suma map obniżzeń zidentyfikowanych na pięciu kolejnych interferogramach przedstawiająca duże przemieszczenia pionowe z okresu 22.02.2007-27.05.2008. d. Kompleksowy zbiór punktów przedstawiający zarówno dane PS o niewielkich przemieszczeniach (rys. 2c), jak i punkty o dużych przemieszczeniach zidentyfikowanych na podstawie interferogramów (rys. 3c).

**Fig. 3.** Process of developing a set of points containing information about vertical ground displacement in the Katowice area. a. Manual digitalization of subsidence contours visible at the interferogram, period of 10 July 2007-25 August 2007. b. Vector map of subsidence identified at the interferogram, period of 10 July 2007-25 August 2007. c. Map of total vertical displacement identified in five consecutive interferograms from the period of 22 February 2007-27 May 2008. d. A comprehensive set of points representing both the PS data with small displacements (Fig. 2c) and points with larger movements identified on the basis of the interferograms (Fig. 3c)

stwice odpowiadające określonej wartości obniżeń. Następnie warstwie posłużyły do wygenerowania powierzchni przemieszczeń pionowych zaszłych w okresie jednego interferogramu, tak jak jest to przedstawione na rysunku 3b. Powierzchnie wygenerowane dla każdego z pięciu interferogramów następnie zsumowano. Wynikową powierzchnię zasięgu i zakresu dużych obniżeń dla obszaru Katowic przedstawiono na rysunku 3c. Otrzymane wartości dużych przemieszczeń zostały zapisane w formie siatki punktów o oczku 80 m, zbliżonym do średniej odległości pomiędzy punktami PS z satelity Envisat. Następnie połączono oba zbiory punktowe (siatki punktów przedstawiającej sumaryczne przemieszczenia z interferogramów oraz zbioru punktów PS z satelity Envisat) (rys. 3d).

### 3.2. Analiza przemieszczeń pionowych na obszarze Bytomia

Na obszarze Bytomia duże przemieszczenia terenu z okresu 5.07.2011÷21.06.2012 zostały opracowane na podstawie 28 11-dniowych interferogramów. Sumaryczna mapa niecek obniżeniowych dla podanego okresu powstała przy wykorzystaniu tej samej metodyki, jak w przypadku Katowic, z tą różnicą że manualna digitalizacja warstw obniżeń na poszczególnych interferogramach wymagała identyfikacji kolejnych prążków interferometrycznych, a nie kolejnych zmian barwnych (jak miało to miejsce w przypadku satelity ALOS-PALSAR). Interferogramy satelity TerraSAR-X przedstawiają pionowe deformacje powierzchni terenu za pomocą zmian różnicy faz pomiędzy dwoma obrazami. Pełen cykl zmiany różnicy faz (2II) odpowiada pionowemu przemieszczeniu o wartości połowy długości fali, w tym wypadku 15 mm i na obrazie interferometrycznym jest widoczny jako jeden prążek, w tym wypadku jest to granica pomiędzy kolorem czerwonym a niebieskim. W celu opracowania mapy niecek

obniżeń konieczna jest identyfikacja kolejnych prążków i nadanie im wartości przemieszczenia pionowego (pierwsza granica 0 mm, druga -15 mm, trzecia -30 mm, itd.). Przykład manualnej interpretacji wartości obniżenia dla jednej z niecek widocznej na jednym z interferogramów przedstawiono na rysunku 4a.

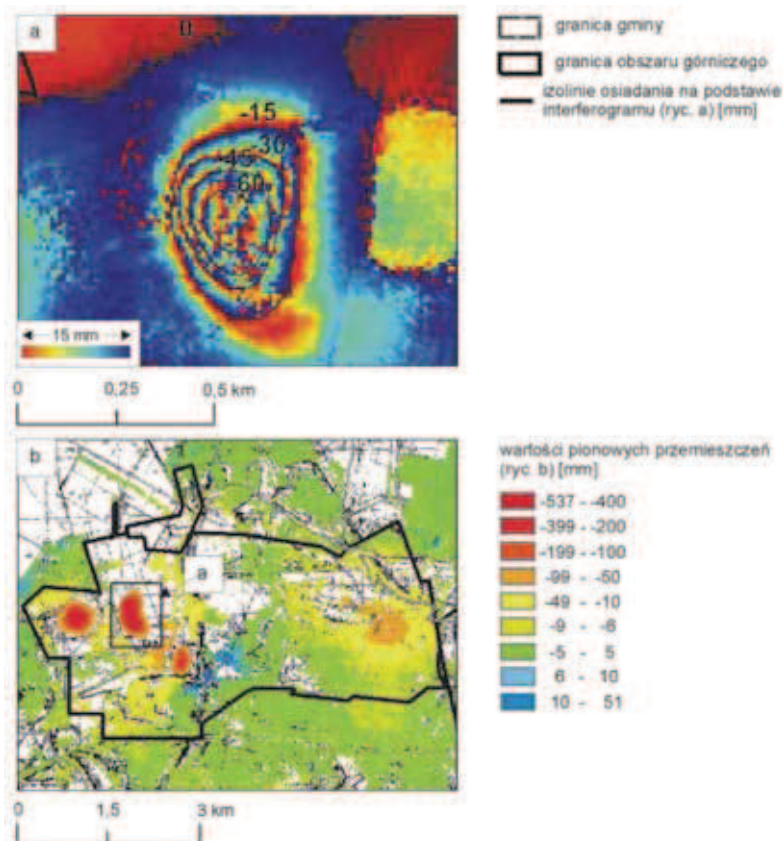
Tak otrzymane warstwie dla każdego z interferogramów posłużyły do stworzenia wektorowych map obniżeń dla 11-dniowych okresów każdego z interferogramów. Następnie mapy te zostały zsumowane i zamienione na regularną siatkę punktów o oczku 40 m, przedstawiających duże obniżenia zaistniałe w badanym okresie. Punkty te dołączono do zbioru punktów PS z satelity TerraSAR-X (rys. 4b).

### 3.3. Kompleksowe mapy przemieszczeń pionowych

Kompleksowe zbiory punktów interpolowano metodą Simple Kriging, której parametry [4] zostały przedstawione w Tabeli 2. Wyniki interpolacji Simple Kriging posłużyły jako dane wejściowe do docelowej interpolacji metodą Symulacji Gaussa. Zbiorem warunkowym był odpowiedni łączny zbiór punktów zawierających dane o całkowitych pionowych przemieszczeniach dla danego obszaru. Zastosowano 100 równo prawdopodobnych symulacji. Na ich podstawie wyznaczono trzy mapy końcowe: mapę średnich wartości całkowitego przemieszczenia pionowego, mapę prawdopodobieństwa przekroczenia zadanej wartości progowej oraz mapę odchylenia standardowego interpolacji. Mapy opracowano z rozdzielczością 80 m dla Katowic i 10 m dla Bytomia. Rozdzielczość wynikowa była podyktowana rozdzielczością wykorzystanych danych pierwotnych, która dla satelity TerraSAR-X jest znacznie większa niż dla satelity Envisat (tabl. 1). Więcej o metodach interpolacji Simple Kriging i Symulacji Gaussa można znaleźć w literaturze [7, 10, 11, 31].

Rys. 4. Opracowanie zbioru punktów zawierającego informacje o pionowych przemieszczeniach terenu na obszarze Bytomia. a. Manualna digitalizacja prążków interferometrycznych na interferogramie z okresu 06.12.2011÷17.12.2011. b. Kompleksowy zbiór punktów przedstawiający zarówno dane PS o niewielkich przemieszczeniach (rys. 2a), jak i punkty o dużych przemieszczeniach zidentyfikowanych na podstawie interferogramów.

Fig. 4. Process of developing a set of points containing information about vertical ground displacement in the Bytom area. a. Manual digitalization of subsidence contours visible at the interferogram, period of 6 December 2011÷17 December 2011. b. A comprehensive set of points representing both the PS data with small displacements (Fig. 2a) and points with larger movements identified on the basis of the interferograms



Tablica 2. Parametry interpolacji Simple Kriging danych punktowych dla obszaru Katowic i Bytomia.

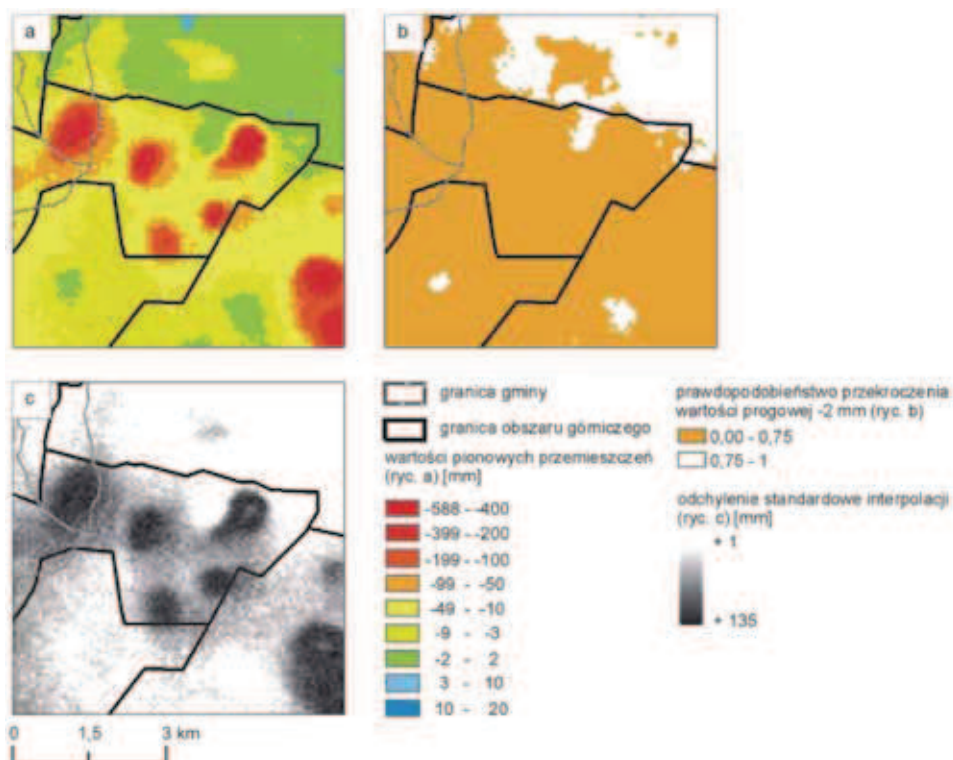
Table 2. Simple Kriging interpolation parameters for Katowice and Bytom area.

parametr	Katowice	Bytom
samorodek (nugget)	0,20	0,15
wartość progowa (sill)	0,99	0,81
zasięg (major range)	5200	2500
odstęp (lag size)	1000	100
liczba odstępów (no. of lags)	11	35

#### 4. Wyniki i dyskusja

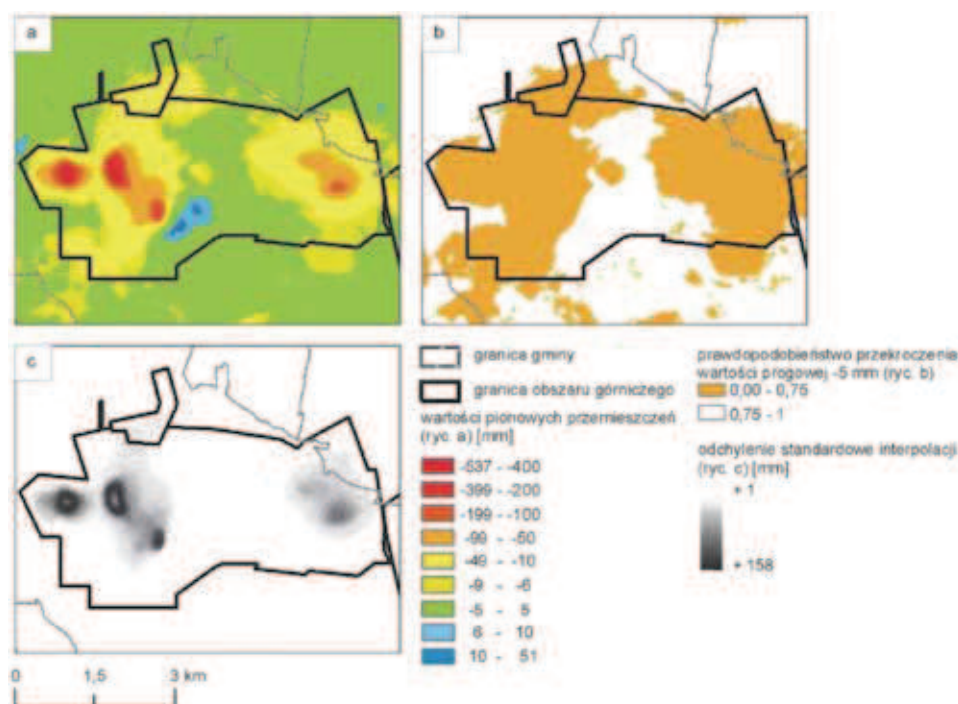
Wynikowe mapy zostały przedstawione na rysunku 5 (Katowice) i rysunku 6 (Bytom).

Na obu rycinach obrazy (a) przedstawiają wartości pionowych przemieszczeń dla okresu 22.02.2007÷27.05.2008 na obszarze Katowic oraz okresu 05.07.2011÷21.06.2012 na obszarze Bytomia. Na obszarze Katowic widoczne jest siedem niecek obniżeniowych, gdzie przemieszczenia dochodzą do 58 cm. Ponadto wszędzie niecki znajdują się w obszarze, gdzie obniżenie przekroczyło wartość 1 cm (kolor żółty). Na obszarze Bytomia można wyróżnić cztery niecki,



Rys. 5. Wynikowe mapy dla obszaru Katowic na podstawie interpolacji Symulacjami Gaussa. a. Mapa wartości pionowych przemieszczeń dla okresu 22.02.2007÷27.05.2008. b. Mapa prawdopodobieństwa przekroczenia wartości -2 mm. c. Mapa odchylenia standardowego interpolacji.

Fig. 5. Resulting maps for Katowice area on the basis of Gaussian Simulations interpolation. a. Vertical displacements for the period of 22 February 2007÷27 May 2008. b. Probability of exceeding a value of -2 mm. c. Standard deviation of the interpolation



Rys. 6. Wynikowe mapy dla obszaru Bytomia na podstawie interpolacji Symulacjami Gaussa. a. Mapa wartości pionowych przemieszczeń dla okresu 05.07.2011÷21.06.2012. b. Mapa prawdopodobieństwa przekroczenia wartości -5 mm. c. Mapa odchylenia standardowego interpolacji.

Fig. 6. Resulting maps for the Bytom area on the basis of Gaussian Simulations interpolation. a. Vertical displacements for the period of 5 July 2011÷21 June 2012. b. Probability of exceeding a value of -5 mm. c. Standard deviation of the interpolation

o maksymalnej wartości obniżenia 53 cm zlokalizowane w dwóch obszarach o przemieszczeniach pionowych szybszych niż 1 cm na rok. Ponadto widoczne są dwa niewielkie tereny, gdzie zarejestrowano centymetrowe podnoszenie.

Obrazy (b) przedstawiają mapy prawdopodobieństwa przekroczenia zadanej wartości progowej. Wybór wartości uzależniono od satelity z którego pozyskano dane PS. Dla obszaru Katowic, gdzie dane pochodziły z satelity pasma C, jest to wartość -2 mm. Dla obszaru Bytomia, a więc dla danych z satelity pasma X, jest to wartość -5 mm. Mapy należy interpretować w następujący sposób: kolorem pomarańczowym oznaczono obszar, dla którego prawdopodobieństwo wystąpienia obniżenia w danym okresie badań większego niż wartość progowa jest większe niż 0,75. Innymi słowy kolor biały oznacza obszar, który z prawdopodobieństwem większym niż 0,75 nie obniżył się więcej niż 2 mm (dla Katowic) lub 5 mm (dla Bytomia). Na podstawie rysunku 5b widać wyraźnie, iż większość badanego obszaru znajduje się pod wpływem pionowych przemieszczeń terenu. Rysunek 6b natomiast przedstawia dwa takie obszary oddalone od siebie o około 1 km na terenie Bytomia.

Na obrazach (c) przedstawiono odchylenie standardowe interpolacji metodą Symulacji Gaussa. W obu przypadkach odchylenie jest niewielkie, w granicach 1 mm, na obszarze występowania punktów PS, ale osiąga znaczące wartości w rejonach głównych niecek obniżeniowych, wyznaczonych na podstawie interferogramów. Wynika to z faktu, iż obecność znaczących wartości skupionych w pojedynczych rejonach obszarów badawczych zaburza znacząco rozkład wszystkich punktów w zbiorach kompleksowych, przez co odbiega on od rozkładu normalnego. W miejscach tych Symulacje Gaussa są mniej wiarygodne.

## 5. Podsumowanie

W artykule przeprowadzono próbę połączenia dwóch typów danych pochodzących z dwóch różnych przetworzeń interferometrycznych i trzech pasm obrazowania radarowego. Wstępna analiza danych punktowych PS pozwala stwierdzić, iż niosą one informację tylko o niewielkich przemieszczeniach, dochodzących do pojedynczych centymetrów w przypadku satelity zakresu C oraz 13 cm w przypadku satelity zakresu X dla jednego roku prowadzenia monitoringu. Z drugiej strony znaczące obniżenia, dochodzące do decymetrów na miesiąc, zostają zarejestrowane na obrazach interferometrycznych i przedstawione w postaci prążków w skali barwnej. Połączenie tych dwóch typów informacji zostało opracowane poprzez stworzenie kompleksowego zbioru danych punktowych, a następnie jego interpolację metodą warunkowych Symulacji Gaussa.

Wynikami analiz są mapy przemieszczeń pionowych zaszłych w okresie od 22 lutego 2007 r. do 27 maja 2008 r. dla obszaru Katowic oraz od 5 lipca 2011 r. do 21 czerwca 2012 r. dla obszaru Bytomia. Dodatkowo wygenerowano mapy prawdopodobieństwa przekroczenia zadanej wartości progowej, ilustrujące obszary które w badanym okresie znajdowały się pod wpływem ciągłych obniżenia. Ponadto wygenerowano mapy odchylenia standardowego interpolacji, które służą określeniu wiarygodności otrzymanych wartości w danym punkcie.

Uzyskane wyniki pokazują, iż metody interferometrii radarowej dostarczają kompleksowych danych na temat przemieszczeń pionowych na terenach aktywnych górniczo. Tam gdzie jest prowadzona eksploatacja mogą one pomóc w określeniu zasięgu i zakresu tworzących się niecek obniżeniowych. Jednocześnie dostarczają one informacji o niewielkich,

często niezauważalnych przemieszczeniach, które jednak przy dłuższym okresie występowania mogą okazać się niebezpieczne. Zaprezentowane kompleksowe mapy obniżenia pokrywają znaczny obszar, dzięki czemu mogą stanowić uzupełnienie pomiarów geodezyjnych jak również ułatwienie ich planowania.

Ograniczeniem przedstawionej metodyki jest brak korekcji zarejestrowanych przemieszczeń danych InSAR z kierunku obrazowania satelity (zblizonego do pionowego) do kierunku ściśle pionowego. Aby korekcja taka była możliwa, należy dysponować podwójnym zbiorem danych, zarówno z kierunku obrazowania satelity „descending”, jak i „ascending”. Ponadto należy podkreślić brak detekcji najbardziej gwałtownych obniżenia, jakie mają miejsce w środkowych obszarach niecek. Również pewną niedogodnością jest etap manualnej digitalizacji warstw obniżenia na interferogramach różnicowych, który jest obciążony błędem interpretacji obrazu przez operatora.

W dalszych badaniach autorzy pragną skupić się na opracowaniu bardziej optymalnych metod interpolacji danych punktowych.

## Podziękowania

Dane wykorzystane w przedstawionych badaniach zostały pozyskane w ramach Projektów DORIS i Terrafirma, współfinansowanych przez Komisję Europejską (umowa o dofinansowanie FP7-EC n. 242212. oraz ESRIN/Contract no. 17059/03/I-IW) i przetworzone przez firmy Tele-Rilevamento Europa - T.R.E. s.r.l i Gamma Remote Sensing. Prace badawcze były prowadzone w ramach projektu finansowanego w ramach działalności statutowej Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego o numerze 61-2506-1401-00-0.

## Literatura

1. Bell, F. G., Stacey, T. R., Genske, D. D.: Mining subsidence and its effect on the environment: some differing examples. *Environmental Geology* 2000, 40(1-2), 135÷152.
2. Benecke N., Bateson L., Browitt C., Declercq P., Graniczny M., Marsh S., Zimmermann K.: Perspectives concerning Satellite EO and geohazard risk management: the way forward - Community paper concerning inactive mines hazards. W: Ph. Bally (red.): The International Forum on Satellite EO and Geohazards. Forum on Satellite EO and Geohazards, 21-23 May 2012, Santorini Greece., doi:10.5270/esa-geo-hzrd-2012, 81÷90.
3. Bialecka B.: Tereny zdegradowane działalnością górnictw – Geneva. W: Bialecka B., Biały W., (red.): Tereny pogórnice – szanse, zagrożenia. Analiza przypadku. Panova SA. Gliwice 2014, pp. 14 (191).
4. Bohling, G.: Introduction to geostatistics and variogram analysis. *Kansas geological survey* 2005, 20p.
5. Borecki M. (red.): Ochrona powierzchni przed szkodami górnictwymi., Śląsk, Katowice, 1980, 1-967.
6. Carnec C., Delacourt C.: Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, near Gardanne, France. *Journal of Applied Geophysics* 43 (2000), 43÷54.
7. Cocteau J.: Conditional Simulations. W: Chiles, J. P., Delfiner, P.: *Geostatistics: modeling spatial uncertainty*. John Wiley & Sons., 1999, 449÷470.
8. Crowell D. L.: The hazards of mine subsidence, *Ohio Geology. A Quarterly Publication of the Division of Geological Survey*, Fall 1995, pp.1÷5.
9. Curlander, J. C., McDonough R.N.: *Synthetic Aperture Radar: Systems and Signal Processing*. John Wiley and Sons 1991, 647 pp.
10. De Smith, M. J., Goodchild, M. F., Longley, P.: *Geospatial analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tools*. Troubador Publishing Ltd. 2007, 382÷390.



11. *Deutsch, C. V., Journel, A. G.*: Geostatistical software library and user's guide. New York, 1992, 119÷147.
12. *Devleeschouwer, X., Declercq, P. Y., Flamion, B., Brixko, J., Timmermans, A., Vanneste, J.*: Uplift revealed by radar interferometry around Liège (Belgium): a relation with rising mining groundwater. Proceedings of the Post-Mining Symposium, 6-8 February 2008, Nancy, France, 1÷13.
13. *Dobak P., Dragowski A., Frankowski Z., Frolik A., Kaczynski R., Kotyrba A., Pininska J., Rybicki S., Wozniak H.*: Zasady dokumentowania warunków geologiczno-inżynierskich dla celów likwidacji kopalń. Polish Ministry of Environment, Warsaw, 2009, 12÷14 (84).
14. *Ferretti A., Prati C., Rocca F.*: Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 2000, 38, 2202÷2212.
15. *Ferretti A., Prati C., Rocca F.*: Permanent Scatterers in SAR Interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2001, vol. 39: 8÷20.
16. *Ferretti A., Novali F., Bürgmann R., Hilley G., Prati C.*: InSAR Permanent Scatterer Analysis Reveals Ups and Downs in San Francisco Bay Area, Eos 2004, Vol. 85, No. 34, 317÷324.
17. *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 2011, Volume: 49, Issue: 9, 3460÷3470.
18. Główny Instytut Górnictwa (Central Mining Institute): Obszary górnicze kopalń podziemnych oraz płytkie eksploatacje rud i węgla kamiennego w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. Wydawnictwo kartograficzne Mapy Ścienne, Beata Piętka, 2012.
19. Graniczny M.: Sosnowiec, Poland. W: Capes R., Marsh S. (red.): The TerraFirma Atlas – The terrain-motion information service for Europe, GMES – ESA. June 2009. TerraFirma project, ESA publication, 34.
20. *Herrera G., Tomas R., Lopez-Sanchez J. M., Delgado J., Mallorqui J.J., Duque S., Mulas J.*: Advanced DInSAR analysis on mining area: La Union case study (Murcia, SE Spain). Engineering Geology 90 (2007), 148÷159.
21. <http://www.kwsa.pl/>, strona internetowa KWK „Bobrek-Centrum”, data 14.03.2014.
22. <http://www.wujek.pl/historiaw.html>, strona internetowa KWK „Wujek”, data 12.08.2014
23. *Konopko W.*: Wydobycie węgla i destrukcja górotworu w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym, Przegląd Górniczy. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Górnictwa 2010, T. 66 no 11, 1÷10.
24. *Kowalski A.*: Surface deformations in the Upper Silesian Coal Basin, FP 7 EU GA no 242212 Doris project Workshop, Polish Geological Institute – National Research Institute, Bedzin, Poland. 17.04.2013.
25. *Kwiatk J.* (red.): Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych (eng. Protection of buildings in mining areas). GIG, Katowice, 1997, 1÷726.
26. *Leśniak A., Porzycka S.*: Impact of tectonics on ground deformations caused by mining activity in the north-eastern part of the Upper Silesian Coal Basin. Gosp. Sur. Min. 2009, 25: 227÷238.
27. *Paleczek W.*: Metoda obliczania wartości promienia zasięgu wpływów głównych z wykorzystaniem danych geomechanicznych skał. Zeszyty Naukowe Politechniki Częstokowskich. Budownictwo 2009, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Z.15 (165), 19÷36.
28. *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 1998, 32, 555÷558.
29. *Perski, Z., Krawczyk, A., & Marinković, P.*: Satelitarna interferometria radarowa (InSAR) wysokiej rozdzielczości z wykorzystaniem danych TerraSAR-X. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji 2008, 18, p. 499÷507.
30. *Sanabria, M. P., Guardiola-Albert, C., Tomás, R., Herrera, G., Prieto, A., Sánchez, H., Tessitore, S.*: Subsidence activity maps derived from DInSAR data: Orihuela case study. Natural Hazards and Earth System Science 2014, 14(5), 1341÷1360.
31. *Savelieva E., Demayanov V., Maignan M.*: *Geostatistics: Spatial Predictions and Simulations*. W: Kanevski, M. (red.): Advanced mapping of environmental data (Vol. 62). John Wiley & Sons, 2010, 47-94.
32. *Sopata, P.*: Wykorzystanie satelitarnej interferometrii radarowej INSAR w badaniach i prognozowaniu pogórnich zmian powierzchni terenu: rozprawa doktorska; promotor: Edward Popiołek. Kraków : Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, 2007, p. 84.
33. *Strzelczyk, J., Porzycka, S., Lesniak, A.*: Analysis of ground deformations based on parallel geostatistical computations of PSInSAR data. Geoinformatics International Conference 2009, IEEE, 1-6.
34. *Vasco D. W., Rucci A., Ferretti A., Novali F., Bissell R.C., Ringrose P.S., Mathieson A.S, Wright I.W.*: Satellite-based measurements of surface deformation reveal fluid flow associated with the geological storage of carbon dioxide. Geophysical Research Letters 2010, VOL. 37, L03303, doi:10.1029/2009GL041544, 2010, 1÷5.
35. *Wegmuller U., Werner C., Strozzi T., Wiesmann A.*: Monitoring mining induced surface deformation. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004. IGARSS '04. Proceedings. 2004 IEEE International (Volume:3 ), 1933÷1935.