

## WYKORZYSTANIE SATELITARNEJ INTERFEROMETRII RADAROWEJ W BADANIACH DEFORMACJI POWIERZCHNI W GÓRNICTWIE ODKRYWKOWYM WĘGLA BRUNATNEGO

### APPLICATION OF SATELLITE RADAR INTERFEROMETRY IN STUDIES OF GROUND SURFACE DEFORMATION IN BROWN COAL OPEN PIT MINING

Wojciech Milczarek, Jan Blachowski, Piotr Grzempowski - Zakład Geodezji i Geoinformatyki, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wroclawska

*W artykule, na przykładzie Kopalni Węgla Brunatnego „Turów”, zademonstrowano możliwości wykorzystania satelitarnej interferometrii radarowej w badaniach deformacji powierzchni w odkrywkowym górnictwie węgla brunatnego. Przedstawiono metodykę opracowania danych SAR (ang. Synthetic Aperture Radar) pochodzących z satelity Sentinel-1 Europejskiej Agencji Kosmicznej technikami małych baz (SBAS) oraz interferometrii różnicowej (DInSAR). Na podstawie ich wyników określono stan geometryczny powierzchni terenu górniczego w dłuższym – rok (22.11.2015 – 11.04.2016) oraz w krótszym okresie – dwa tygodnie (22.11.2015 – 4.12.2015). Wyznaczone przemieszczenia w linii obserwacji satelity (ang. Line of Sight, LOS) przedstawiono w sposób graficzny na mapach i wykresach. Przedyskutowano przydatność interferometrii satelitarnej w badaniach deformacji powierzchni otoczenia odkrywkowych kopalni węgla brunatnego jako obserwacji komplementarnych dla pomiarów geodezyjnych realizowanych przez służby miernicze zakładu górniczego.*

**Słowa kluczowe:** odkrywkowa kopalnia węgla brunatnego, deformacje powierzchni, interferometria satelitarna, Sentinel-1

*In the article, application of satellite radar interferometry in studies of ground surface deformation in open pit brown coal mining have been demonstrated on the case study of KWB “Turów” mine. Methodology of Synthetic Aperture Radar (SAR) Sentinel-1 ESA satellite mission data processing with small base (SBAS) and differential (DInSAR) interferometric techniques from has been presented. Based on these results geometrical condition of mining ground surface has been determined for a longer, one year (22.11.2015 – 11.04.2016) and shorter, two week (22.11.2015 – 4.12.2015) periods. The displacements calculated in the satellite’s Line of Sight (LOS) have been presented graphically on maps and graphs. Application of satellite interferometry in studies of ground surface deformations in areas of open pit brown coal mining as a data source complementary and augmenting geodetic measurements conducted by mine surveyors has been discussed.*

**Keywords:** open-pit brown coal mine, surface deformation, satellite interferometry, Sentinel-1

#### Wprowadzenie

Satelitarna interferometria radarowa (ang. *Satellite Radar Interferometry*) jest jedną z technik zdalnych obserwacji powierzchni Ziemi, która znalazła już trwałe zastosowanie w badaniach deformacji powierzchni ziemi wynikających z procesów naturalnych, np. wulkanizm, trzęsienia ziemi oraz tych spowodowanych działalnością człowieka, np. osiadania powierzchni terenu związane z podziemną eksploatacją kopalni i eksploatacją wód podziemnych, itp. Szereg komercyjnych misji satelitarnych takich jak: TerraSAR-X, RADARSAT-2, ALOS-PALSAR oraz dostępne nieodpłatnie zobrazowania radarowe pochodzące z misji Europejskiej Agencji Kosmicznej dostarczają danych, które w wyniku odpowiedniego ich przetworzenia umożliwiają precyzyjne wyznaczanie przemieszczeń powierzchni terenu w linii obserwacji satelity (ang. *Line of*

*Sight, LOS*) dla dużych obszarów (setki kilometrów kwadratowych) oraz z wysoką i stałą częstotliwością wynoszącą np. dla misji Sentinel 6-7 dni.

Przedmiotem opisywanych badań jest analiza wykorzystania danych satelitarnych pochodzących z misji Sentinel-1A Europejskiej Agencji Kosmicznej do wyznaczania przemieszczeń powierzchni w granicach terenu górniczego odkrywkowej kopalni węgla brunatnego na przykładzie KWB „Turów” w Polsce. W artykule przedstawiono kolejno: wyniki przeglądu literatury w zakresie badań nad zastosowaniem satelitarnej interferometrii radarowej w odkrywkowym górnictwie węgla brunatnego, lokalizację KWB „Turów” oraz charakterystykę jej działalności, metodykę opracowania danych satelitarnych, wyniki obliczeń przemieszczeń powierzchni terenu metodami SBAS i DInSAR wraz z ich omówieniem oraz podsumowanie.

## Przykłady wykorzystania satelitarnej interferometrii radarowej w odkrywkowym górnictwie węgla brunatnego

Prowadzone na świecie badania nad wykorzystaniem satelitarnej interferometrii radarowej do monitorowania ruchów powierzchni terenu w obszarach oddziaływania odkrywkowego wydobycia węgla brunatnego, których wyniki publikowane są w literaturze, wskazują na jej skuteczność, jako metody uzupełniającej pomiary geodezyjne i rozszerzającej zakres pozyskiwanych w ten sposób danych o stanie powierzchni. Badania takie dla otoczenia odkrywkowej kopalni węgla brunatnego Mavropigi w Grecji prowadzili m.in. Papadaki i in. [6]. Na podstawie opracowania 19 zobrażeń PALSAR z japońskiego satelity ALOS (ang. *Advanced Land Observing Satellite*) metodą satelitarnej interferometrii różnicowej (ang. *Differential InSAR*) określili rozwój deformacji powierzchni terenu w okresie od marca 2008 do listopada 2010 roku w otoczeniu kopalni. Otrzymane w wyniku przetworzenia zobrażeń SAR przemieszczenia rejestrowane w linii widoczności satelity (*LOS*) zweryfikowali rezultatami obserwacji techniką GPS. Dokładność wyznaczenia przemieszczeń określili na lepszą niż 1 cm. W tej samej kopalni prowadzono badania nad wykorzystaniem metody DInSAR do monitorowania deformacji powierzchni terenu związanych z zagrożeniami geotechnicznymi. Tripolitsiotis i in. [10] wykazali skuteczność tej metody do identyfikacji obszarów występowania ryzyka osuwiskami i optymalizacji wykorzystania sprzętu geodezyjnego przez służby miernicze. Ponadto zwrócili uwagę na problemy w monitorowaniu przemieszczeń w wyrobisku kopalni, ze względu na postęp eksploatacji, który skutkowało utratą koherencji pomiędzy kolejnymi akwizycjami danych satelitarnych (35 dni dla misji ALOS). Metodę DInSAR wykorzystali także [9] do monitorowania zmian powierzchni terenu w obszarze otoczenia czynnych i zlikwidowanych kopalń węgla brunatnego na południe od Lipska w Niemczech. Wykorzystali zobrażenia satelitów ENVISAT i ERS-2 oraz dwanaście tzw. reflektorów (*corner reflectors*) rozmieszczonych w wybranych miejscach obszaru. Punkty te użyto do georeferencji danych SAR oraz do porównania otrzymanych przemieszczeń z wynikami deformacji określonymi na podstawie pomiarów niwelacyjnych. Autorzy wyznaczyli przemieszczenia powierzchni terenu i wskazali na potencjalne ograniczenia dokładności zastosowanej metody, występowanie zjawiska dekorelacji czasowej w związku z rolniczym użytkowaniem terenu oraz opóźnienia sygnału radarowego w trakcie przejścia przez atmosferę ziemską. Z kolei Poenaru i in. [7] wykorzystali dane z satelity TerraSAR-X oraz metodę stałych rozpraszaczy (PSInSAR) do określenia przestrzenno-czasowych deformacji powierzchni terenu otoczenia odkrywkowej kopalni węgla Rosia Jiu w Rumunii. Wykazali przydatność użytego podejścia do monitorowania deformacji w otoczeniu kopalni oraz wyznaczania terenów podatnych na zagrożenia geotechniczne.

Autorzy wymienionych publikacji zwracają uwagę na następujące zalety interferometrii satelitarnej w badaniach wpływów odkrywkowego górnictwa węgla:

- wykrywanie ruchów powierzchniowych przed wystąpieniem widocznych deformacji nieciągłych w postaci szczelin, pęknięć itp.,

- zastosowanie w obszarach, które są trudno dostępne dla służb mierniczych realizujących pomiary z zastosowaniem klasycznych technik geodezyjnych (niwelacja, pomiary GNSS),

- pomiary dużych obszarów, które wiązałyby się z wysokimi kosztami w przypadku zastosowania pomiarów naziemnych.

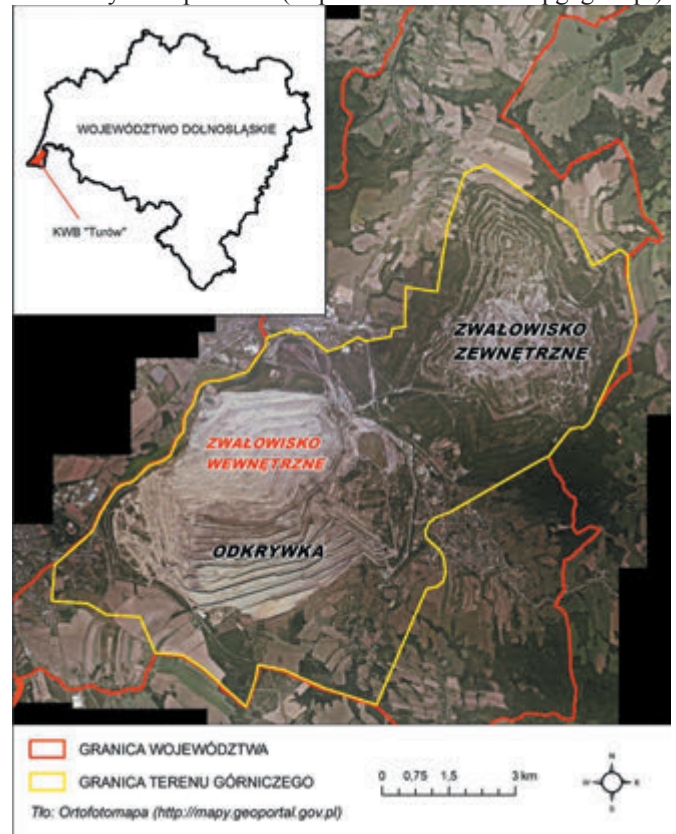
Wśród ograniczeń autorzy zwracają uwagę na:

- zjawisko dekorelacji czasowej, która w przypadku satelitów Sentinel 1A/1B nie ma tak dużego wpływu z racji tego, że ten sam obszar jest obserwowany co kilkanaście dni,

- konieczność weryfikacji wyników rezultatami klasycznych pomiarów geodezyjnych w celu identyfikacji przemieszczeń większych niż długość fali, na której pracuje aparatura SAR.

## Charakterystyka działalności górniczej KWB „Turów” i jej wpływu na stan powierzchni

Kopalnia Węgla Brunatnego „Turów” znajduje się w południowo-zachodniej Polsce w północno-wschodniej części Niecki Żytawskiej przy granicy z Czechami i Niemcami (pow. zgorzelecki) (rys. 1). Zakład górniczy prowadzi eksploatację dwóch głównych pokładów węgla brunatnego udokumentowanych w trzeciorzędowej formacji węglowej. Dolny występuje głównie w centralnej części niecki, gdzie osiąga miąższość 20-25 m oraz górny o mniejszym stopniu uwęglenia i większym zasięgu przestrzennym. Miąższość pokładu górnego zmienia się od 3 m (na obrzeżach) do 40 m (w części centralnej) (KWB Turów S.A.). Eksploatacja złoża polega na usuwaniu nadkładu i zwałowaniu go na zwałowiskach zewnętrznym (do 2006 roku) i wewnętrznym. Proces technologiczny wydobycia kopaliny oparty jest na 13 koparkach wieloczerpakowych i 4 zwałowarkach połączonych ze sobą ponad 100-kilometrowym układem przenośników taśmowych tworzących modyfikowane układy transportowe (<https://www.kwbturow.pgegiel.pl>).



Rys. 1. Granice i lokalizacja obszaru analizy – teren górniczy KWB „Turów”

Fig. 1. Boundaries and location of study area – KWB „Turów” mining ground



Rys. 2. Widok na odkrywkę (po lewej) i zwałowisko wewnętrzne (po prawej) w KWB „Turów” (fot. Kaźmierczak U., 2013)  
Fig. 2. Open pit (left) and waste dump inside the open pit (right) (photo Kaźmierczak U., 2013)

Powierzchnia odkrywki docelowo osiągnie 33 km<sup>2</sup> (obecnie ma ponad 24 km<sup>2</sup>), powierzchnia zwałowiska zewnętrznego wynosi 21,75 km<sup>2</sup>. Powierzchnia całego obszaru górniczego to 66,1 km<sup>2</sup> (<http://igs.pgi.gov.pl>). Zdjęcia stanu odkrywki i zwałowiska wewnętrznego w 2013 roku pokazano na rysunku 2.

Odkrywkowa eksploatacja węgla brunatnego powoduje przeobrażenia powierzchni terenu i zmiany krajobrazu, przede wszystkim w postaci odkrywkowego wyrobiska górniczego oraz nadpoziomowego zwałowiska nadkładu. Eksploatacja kopaliny powoduje także zmiany lokalnej sieci hydrograficznej i warunków hydrogeologicznych w wyniku odwadniania górniczego wyrobiska i jego przedpola. Zdejmowanie nadkładu, a następnie urabianie węgla skutkuje zmianą naprężeń otaczającego górotworu, co przekłada się na występowanie deformacji ciągłych i nieciągłych. W przypadku kopalń odkrywkowych istotnym problemem jest także powstawanie osuwisk. Takie przemieszczanie się mas skalnych, zwłaszcza o gwałtownym charakterze, może stanowić zagrożenie dla życia pracowników kopalni oraz infrastruktury zakładu górniczego powodując nawet przerwy w wydobyciu surowca. Przyczyny występowania osuwisk w KWB „Turów” to: obecność uskoku tektonicznych w pokładach węgla i nadkładzie, spękania i szczeliny odprężeniowe w pokładach węgla i gruntach nadkładu, duże nachylenie warstw litologicznych, zwłaszcza w brzeżnych partiach złoża, w których zlokalizowane są skarpy i zbocza stałe odkrywki oraz wycieki wody z soczew i przerostów piaszczystych oraz z pokładów węgla, powodujące zmiany konsystencji gruntów spoistych [5]. Procesy osuwiskowe w KWB „Turów” miały już miejsce wielokrotnie, były to m.in.: zagrożenie osuwiskowe zbocza północnego odkrywki (w 1993 roku), proces osuwiskowy w drugim pokładzie węgla w wyniku nacięcia uskołu przez koparkę (w 1999 roku), osuwisko powstałe w wyniku nacięcia rowem przyskarpowym spągu węgla pierwszego pokładu nachylonego pod kątem 7° w kierunku odkrywki (w 2006 roku) oraz (w 2007 roku) eksploatacji węgla w likwidowanej III pochylni. Przyczyną powstania tego osuwiska były wzmożone opady atmosferyczne, które spowodowały nawodnienie szczeliny [5]. We wrześniu 2016 roku miało miejsce gwałtowne osunięcie mas skalnych na zwałowisku wewnętrznym kopalni. W celu przeciwdziałania tego typu zagrożeniom Kopalnia posiada zorganizowany system monitorowania i rozpoznawania zagrożeń naturalnych, którego elementem są pomiary zaistniałych zjawisk geotechnicznych z wykorzystaniem technologii satelitarnej GPS (<https://www.kwbturow.pgegiel.pl>). W dalszej części opracowania przedstawiono metodykę opracowania

ogólnodostępnych danych SAR z satelity Sentinel 1 jako systemu uzupełniającego i rozszerzającego ten zbiór danych.

### Metodyka opracowania danych SAR

Satelitarna interferometria radarowa umożliwia wyznaczanie przemieszczeń powierzchni terenu w oparciu o zobrażenia SAR. Zobrażenia pozyskiwane są poprzez detekcję wysłanego w kierunku powierzchni Ziemi impulsu elektromagnetycznego, który jest rejestrowany przez antenę zamontowaną na satelicie. Aparatura SAR satelity Sentinel 1 pracuje w paśmie C o długości fali ok. 5,6 cm. Pojedyncza scena obejmuje obszar o powierzchni ok. 40 tys. km<sup>2</sup>. Wyznaczenie przemieszczeń następuje w wyniku opracowania minimum dwóch zobrażeń SAR pozyskanych w różnym czasie z uwzględnieniem informacji o morfologii terenu (NMT).

W ogólnym przypadku wyznaczenie przemieszczeń powierzchni terenu bazujące na satelitarnych danych radarowych można opisać równaniem o postaci (1):

$$\Phi_{i,j} = \Phi_{\text{def } o,i,j} + \Phi_{\alpha,i,j} + \Phi_{\epsilon,i,j} + \eta_{i,j} \quad (1)$$

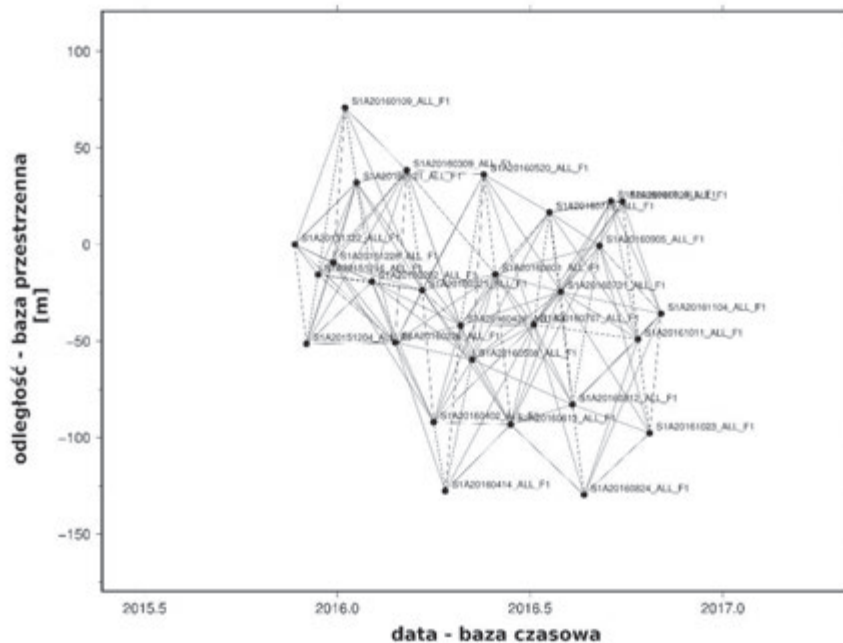
gdzie:  $\Phi_{i,j}$  – różnica faz sygnałów pomiędzy dwoma zobrażeniami SAR,  $\Phi_{\text{def } o,i,j}$  – część fazy sygnału, która reprezentuje przemieszczenie powierzchni,  $\Phi_{\alpha,i,j}$  – składnik reprezentujący opóźnienie atmosferyczne,  $\Phi_{\epsilon,i,j}$  – resztkowa część fazy wynikająca z błędów numerycznego modelu terenu,  $\eta_{i,j}$  – pozostałe błędy tj. błąd wynikający z wzajemnego wpasowania zdjęć SAR.

W artykule zaprezentowano wyniki obliczeń danych SAR (ang. *Synthetic Aperture Radar*) wykorzystując dwie metody. Pierwsza z nich, to wspomniana metoda DInSAR (ang. *Differential SAR Interferometry*), która pozwala na wyznaczenie przemieszczeń powierzchni terenu w linii obserwacji satelity (LOS) w okresie pomiędzy dwoma analizowanymi zobrażeniami SAR. W metodzie zarejestrowana w obrazie faza wykorzystywana jest do określenia odległości pomiędzy satelitą a powierzchnią terenu. Różnica fazy pomiędzy porównywanymi zobrażeniami pozwala na wyznaczenie przemieszczeń powierzchni dla dużych obszarów. Numeryczny Model Terenu (NMT) służy do wyeliminowania wpływu topografii ze składowych fazy. Dokładność metody zależy od długości fali SAR (ok. 5,6 cm dla satelity Sentinel) i jest rzędu milimetrów.

Druga z zastosowanych metod to metoda SBAS (ang. *Small Baseline Subset*), która pozwala na wyznaczenie przemieszczeń LOS w długim okresie czasu w oparciu o określony zbiór zobra-

Tab. 1. Wykaz wykorzystanych w obliczeniach (SBAS) obrazowań SAR z rejonu kopalni  
 Tab. 1. List of SAR images used in SBAS calculations for the mine area

nr	satelita	data	nr	satelita	data	nr	satelita	data
1	Sentinel 1A	2015-11-22	10	Sentinel 1A	2016-04-02	19	Sentinel 1A	2016-07-31
2	Sentinel 1A	2015-12-04	11	Sentinel 1A	2016-04-16	20	Sentinel 1A	2016-08-12
3	Sentinel 1A	2015-12-16	12	Sentinel 1A	2016-04-26	21	Sentinel 1A	2016-08-24
4	Sentinel 1A	2015-12-28	13	Sentinel 1A	2016-05-08	22	Sentinel 1A	2016-09-05
5	Sentinel 1A	2016-01-21	14	Sentinel 1A	2016-05-20	23	Sentinel 1A	2016-09-17
6	Sentinel 1A	2016-02-02	15	Sentinel 1A	2016-06-01	24	Sentinel 1A	2016-09-29
7	Sentinel 1A	2016-02-26	16	Sentinel 1A	2016-06-13	25	Sentinel 1A	2016-10-11
8	Sentinel 1A	2016-03-09	17	Sentinel 1A	2016-07-07	26	Sentinel 1A	2016-10-23
9	Sentinel 1A	2016-03-21	18	Sentinel 1A	2016-07-19	27	Sentinel 1A	2016-11-04



Rys. 3. Graficzna prezentacja baz czasowej i przestrzennej par obrazowań, dla których obliczono interferogramy  
 Fig. 3. Graphical presentation of temporal and spatial bases of image pairs, for which interferograms have been calculated

zowań SAR. Obliczenie tą metodą polega na wyznaczeniu interferogramów z par obrazowań SAR spełniających warunki baz, czasowej i przestrzennej. Na podstawie obliczonych interferogramów wyznaczane są przemieszczenia pomiędzy kolejnymi parami obrazowań. Podstawy teoretyczne zastosowanych metod można znaleźć m.in. w pozycjach [4] - DinSAR oraz [1] – SBAS.

Wszystkie obliczenia przeprowadzono w oparciu o oprogramowanie GMTSAR ver. 5.0.0 [8], a opracowanie graficzne wykonano w środowisku GMT ver. 5.4.0 [11]. Rozwinięcie fazy fali przeprowadzono z wykorzystaniem programu Snaphu ver. 1.4.2 [2]. Do korekcji fazy fali względem powierzchni terenu wykorzystano dane Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) wersja 1 [3]. Zestawienie 27 obrazowań SAR, wykorzystanych w obliczeniach przedstawiono w tabeli 1.

Do obliczeń metodą DInSAR wybrano parę obrazowań 22-11-2015 i 04-12-2015. W przypadku obliczeń metodą SBAS wyznaczono pary obrazowań spełniających założenia bazy czasowej i przestrzennej odpowiednio na poziomie 80 dni i 100m. Dało to łączną liczbę 142 interferogramów (rys. 3).

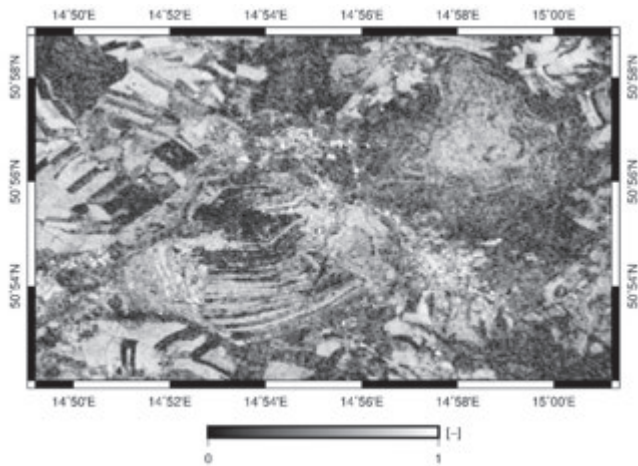
### Analiza wyników

Interferogram otrzymany metodą DInSAR dla pary obrazowań SAR przedstawiono na rysunku 4. Mapę koherencji

dla interferogramu przedstawia rysunek 5. Obraz koherencji prezentuje wysokie wartości współczynnika dla analizowanego obszaru kopalni. Wysoka (pow. 0,45) koherencja świadczy o dobrym odbiciu sygnału SAR od podłoża w rozpatrywanym okresie (22-11 do 4-12). Ma to bezpośredni wpływ na jakość otrzymanych przemieszczeń LOS i wysoką gęstość pikseli z wartościami tych przemieszczeń.

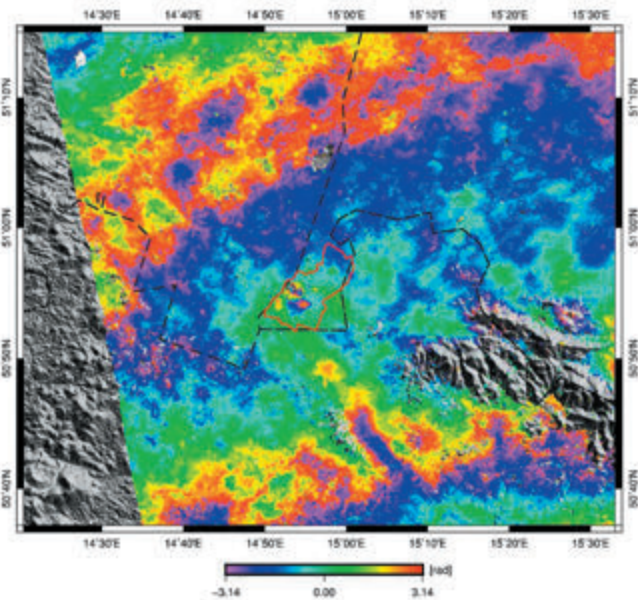
Maksymalne wartości przemieszczeń wyznaczone metodą DInSAR (rys. 6) wynoszą -53 mm (osiadania) i +44 mm (podnoszenie) dla okresu 2 tygodni. Obszary osiadań (kolor niebieski) zidentyfikowano w rejonie zwałowiska wewnętrznego oraz na skarpie we wschodniej części odkrywki do -18mm. Niewielkie osiadania (do -8 mm) zaobserwowano w obszarze zwałowiska zewnętrznego. Obszary podnoszenia (kolor czerwony) to rejon eksploatacji węgla w południowej części obszaru górniczego.

W drugim etapie analizy otrzymano, metodą SBAS, obraz przemieszczeń dla dłuższego okresu tj. od 22-11-2015 do 4-11.2016 (1 rok). Przemieszczenia te wyznaczono na podstawie wyników obliczonych 142 par interferogramów z 27 obrazowań SAR (rys. 3). Wyznaczone tą metodą przemieszczenia LOS są przestrzennie zbieżne i potwierdzają charakter deformacji w obszarach zidentyfikowanych metodą DInSAR. Maksymalne osiadania zarejestrowane na zwałowisku zewnętrznym osiągają 43,4 cm/rok a dla skarpy we wschodniej części wyrobiska 16,0 cm/rok.



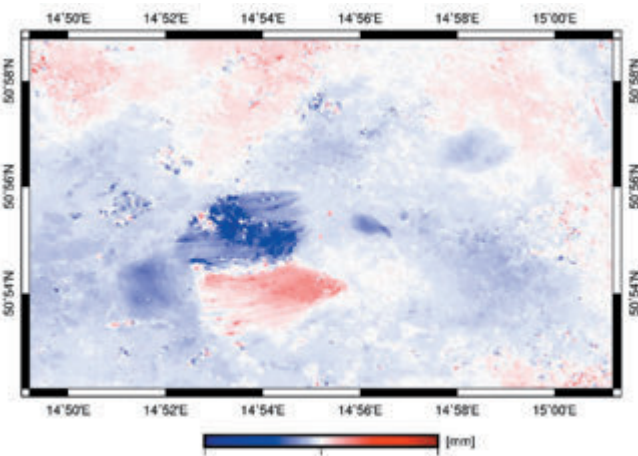
Rys. 4. Koherencja w obszarze kopalni dla pary zobrażeń SAR w okresie 22.11.2015 – 4.12.2015, ciemne obszary charakteryzują się niską koherencją, a jasne odpowiednio wyższą

Fig. 4. Coherence in the study area for a pair of SAR images in the 22.11.2015 – 4.12.2015 period, dark areas indicate low coherence, light ones high coherence



Rys. 5. Interferogram dla pary zobrażeń SAR w okresie 22.11.2015 – 4.12.2015, linią czerwoną zaznaczono granice terenu górniczego KWB „Turów”

Fig. 5. Interferogram for a pair of SAR images in the 22.11.2015 – 4.12.2015 period, red line indicates boundaries of KWB “Turów” mining ground



Rys. 6. Przemieszczenia LOS dla pary zobrażeń SAR w okresie 22.11.2015 – 4.12.2015 określone metodą DInSAR

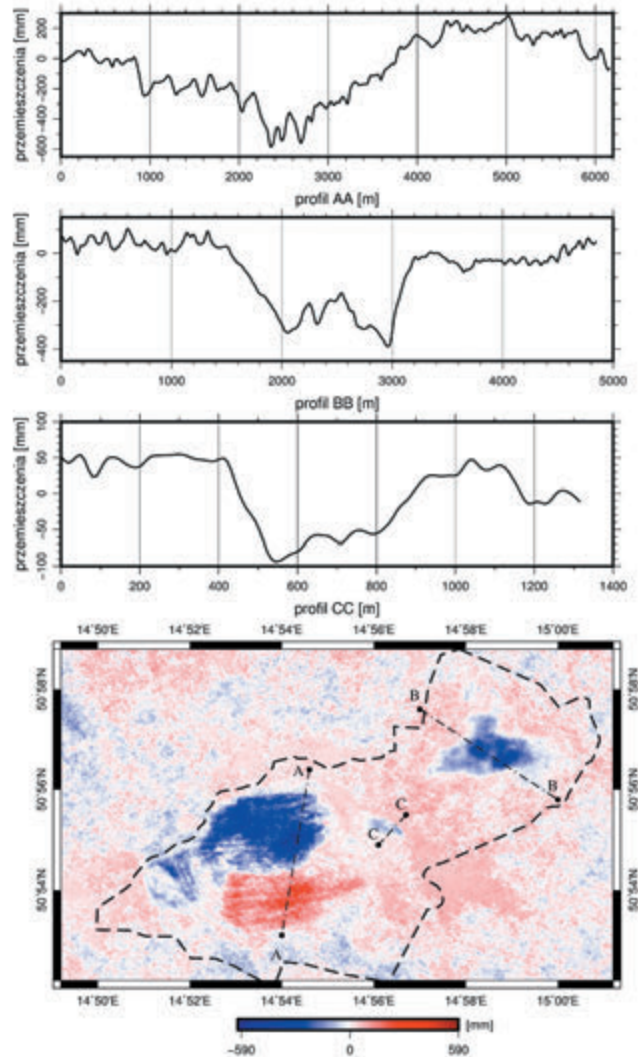
Fig. 6. Ground displacements (LOS) for a pair of SAR images in the 22.11.2015 – 4.12.2015 period determined with DInSAR method

Wartości przemieszczeń w trzech reprezentatywnych profilach pokazano na rysunku 7. Poprowadzono je przez obszary zwałowania i eksploatacji w odkrywce (profil A-A) oraz wspomniane rejony osiadań skarpy wyrobiska (profil C-C) i zwałowiska zewnętrznego (profil B-B).

Najbardziej interesującym obszarem ze względu na zaobserwowane przemieszczenia jest zwałowisko zewnętrzne oraz obszar skarpy we wschodniej części wyrobiska kopalni. Na terenach tych nie są prowadzone prace obejmujące zdejmowanie nadkładu, eksploatację kopaliny lub zwałowanie a obserwowane przemieszczenia wskazują na ich powolne obniżanie.

W bezpośrednim sąsiedztwie kopalni, na podstawie otrzymanych dla rozpatrywanego okresu rezultatów, nie stwierdzono istotnych przemieszczeń powierzchni, które świadczyłyby o wpływie eksploatacji (np. odwadnianie wyrobiska) na deformacje powierzchni.

Przedstawione rezultaty należy traktować pogładowo. Do pełnej interpretacji wyników potrzebna jest weryfikacja otrzymanych przemieszczeń LOS z rezultatami pomiarów klasycznymi metodami geodezyjnymi (np. niwelacja). Jest to szczególnie istotne dla obszarów, gdzie prowadzone są prace górnicze. Zdejmowanie nadkładu, eksploatacja kopaliny



Rys. 7. Przemieszczenia LOS w okresie 22.11.2015 – 11.04.2016 określone metodą SBAS wraz z przykładowymi profilami przemieszczeń dla wybranych fragmentów terenu górniczego

Fig. 7. Ground displacements (LOS) for a pair of SAR images in the 22.11.2015 – 11.04.2016 period determined with SBAS method, with profiles along selected parts of mining ground

lub zwałowanie wiąże się bowiem z przemieszczaniem mas skalnych, których wartości mogą być większe niż długość fali aparatury SAR. W sytuacji, kiedy rzeczywiste przemieszczenie jest większe niż długość fali lub jej wielokrotność otrzymane wyniki są niewiarygodne. Jeśli znamy wartości rzeczywistych przemieszczeń rejestrowanych punktowo pomiarami niwelacji precyzyjnej lub obserwacjami satelitarnymi GPS mogą one być uwzględniane w obliczeniach i służyć do kalibracji obliczeń metodami interferometrii satelitarnej.

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono wstępne wyniki obliczeń przemieszczeń powierzchni terenu w rejonie KWB „Turów” wykonanych dwiema metodami satelitarnej interferometrii radarowej, DInSAR oraz SBAS na podstawie obrazowań Satelity Sentinel 1A. Zarówno obliczenia wykonane dla krótkiego okresu obejmującego 2 tygodnie jak również dłuższych obserwacji (ok. 1 rok) wykazały ten sam charakter deformacji powierzchni terenu. Ze względu na brak danych geodezyjnych, które mogłyby być wykorzystane do kalibracji obliczeń InSAR w analizie skupiono się na obszarach, w których nie są prowadzone prace górnicze. Stwierdzono występowanie procesu osiadania powierzchni terenu na zwałowisku zewnętrznym oraz w rejonie skarpy wschodniej wyrobiska. Maksymalne

osiadania wynoszą odpowiednio dla zwałowiska 43,4 cm/rok a dla skarpy 16,0 cm/rok.

Ze względu na wysoką powtarzalność obrazowań SAR wynoszącą 7 dni dla pary satelitów Sentinel 1A/1B uważamy, że metoda ta może stanowić uzupełnienie pomiarów prowadzonych metodami geodezyjnymi przez służby miernicze kopalni. Zastosowanie kombinacji metod satelitarnej i klasycznych daje dostęp do wiarygodnych danych o przemieszczeniach powierzchni dla całego obszaru kopalni z wysoką rozdzielczością przestrzenną i czasową. Może być także źródłem informacji o zjawiskach, które skutkują wystąpieniem deformacji nieciągłych i osuwisk takich jak np. osuwisko w kopalni „Turów” z września 2016 roku na zwałowisku wewnętrznym, zanim zostaną one stwierdzone w wyniku inspekcji wizualnej lub pomiarów geodezyjnych.

## Podziękowania

Badania realizowano częściowo w ramach zadania badawczego statutowego nr 0401/0211/16

Autorzy wyrażają serdeczne podziękowania dla Wrocławskiego Centrum Sieciowo-Komputerowego za umożliwienie wykonania obliczeń numerycznych w ramach grantu obliczeniowego nr 336

## Literatura

- [1] Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, E. Sansosti (2002), *A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms*, IEEE Trans. Geosci. Remote Sens., 40, 2375 – 2383, doi:10.1109/TGRS.2002.803792
- [2] Chen C. W., Zebker H. A. (2000), *Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: Intractability and two new algorithms*, J. Opt. Soc. Am. A, 17, 401–414, doi:10.1364/JOSAA.17.000401
- [3] Farr T. G., Rosen P. A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D., (2007), *The Shuttle Radar Topography Mission*, Rev. Geophys., 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183
- [4] Massonnet, D., K. L. Feigl (1998), *Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface*, Rev. Geophys., 36(4), 441–500, doi:10.1029/97RG03139
- [5] Miłkowski D., Górecka A., Wójcicka-Milewska M., (2008) *Zabezpieczenie i monitoring osuwisk powstałych na zbroczu północnym wyrobiska odkrywkowego BOT KWB Turów SA*. Górnictwo i Geologia, r. 32, z. 2, s. 247-255
- [6] Papadaki E., Tripolitsiotis A., Steiakakis Ch., Agioutantis Z., Stelios M., Partsinevelos P., Schilizzi P., (2013) *Land movement monitoring at the Mavropigi lignite mine using spaceborne D-InSAR*. Proc. First International Conference on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment, Vol. 8795, 87951A
- [7] Poenaru V. D., Dana Negula I. F., Badea A., Cuculici R., (2016) *Environmental impact assessment of Rosia Jiu opencast area using an integrated SAR analysis*. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLI-B8, XXIII ISPRS Congress, 12–19 July 2016, Prague, Czech Republic
- [8] Sandwell D. T., Mellors R., Tong X., Wei M., Wessel P., (2011), *Open radar interferometry software for mapping surface deformation*, Eos Trans. AGU, 92(28), 234, doi:10.1029/2011EO280002
- [9] Schäfer M., Walter D., Busch W., (2017) *DInSAR ground movement monitoring in the rural environment of an open pit mining area*. Proc. Envisat Symposium 2007, Montreux, Switzerland, 23–27 April 2007
- [10] Tripolitsiotis A., Steiakakis Ch., Papadaki E., Agioutantis Z., Mertikas S., Partsinevelos P., (2014) *Complementing geotechnical slope stability and land movement analysis using satellite DInSAR*. Cent. Eur. J. Geosci., 6 (1), s. 56-66, DOI: 10.2478/s13533-012-0159-y
- [11] Wessel P., Smith W. H. F., Scharroo R., Luis J. F., Wobbe F., (2013), *Generic Mapping Tools: Improved version released*, Eos Trans. AGU, 94, 409–410, doi:10.1002/2013EO450001

## Netografia

- [12] <https://www.kwbturow.pgegiek.pl>
- [13] <http://igs.pgi.gov.pl>