



Agnieszka MALINOWSKA\*, Wojciech WITKOWSKI\*\*, Artur GUZY\*\*\*, Ryszard HEJMANOWSKI\*\*\*\*

## **Badania dynamicznych zjawisk przemieszczeniowych z wykorzystaniem radarowych obrazowań satelitarnych – Sentinel**

Streszczenie: Zjawiska dynamiczne – zarówno pochodzenia antropogenicznego, jak i naturalnego – występują zazwyczaj nieoczekiwanie i ujawniają się z dużą prędkością. Zmiany morfologii powierzchni terenu cechują się w takich przypadkach dużą gwałtownością, a rejony ich występowania nie podlegają najczęściej stałemu monitoringowi naziemnemu. Z tego względu kompleksowe opisanie skutków zaistnienia zjawisk tego typu – zwłaszcza po upływie pewnego czasu od ich wystąpienia – jest trudne, a często niemożliwe. Jednocześnie, dla badań nad charakterystykami jakościowymi i ilościowymi zjawisk dynamicznych, wartości i kierunki przemieszczeń powierzchni terenu będące ich wynikiem mają duże znaczenie. Zastosowanie satelitarnej interferometrii radarowej w badaniach zmian rzeźby powierzchni terenu wywołanych przez zjawiska takie jak trzęsienia ziemi jest już od pewnego czasu rutyną. Niemniej misja Sentinel, która prowadzona jest przez Europejską Agencję Kosmiczną, stwarza nowe możliwości prowadzenia monitoringu na obszarach, na których wystąpiły zjawiska o charakterze dynamicznym. Autorzy postanowili sprawdzić, czy wstrząs pochodzenia górniczego generuje ruchy powierzchni terenu oraz zbadać, w jakiej odległości od epicentrum mają one miejsce oraz określić rząd wielkości ruchów tego typu. Analizy interferometryczne, które oparto na metodzie satelitarnej interferometrii różnicowej DInSAR na podstawie obrazowań radarowych pochodzących z misji Sentinel pozwoliły na uzyskanie odpowiedzi na te pytania.

Słowa kluczowe: wstrząs pochodzenia górniczego, przemieszczenie pionowe, DInSAR, misja Sentinel, eksploatacja podziemna

### **Study of dynamic displacement phenomena with the use of imaging radars from the Sentinel mission**

Abstract: Dynamic phenomena, both anthropogenic and natural, usually occur unexpectedly, at high speed. During such an event, changes in ground surface morphology become rapid. What is more, permanent ground monitoring

\* Dr hab. inż., \*\* Mgr inż., \*\*\* Inż., \*\*\*\* Prof. dr hab. inż., AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków;  
e-mail: amalin@agh.edu.pl

in the areas of that transformations is usually not carried out. Therefore, the comprehensive description of the effects of such phenomena – especially after some time since the event took place – is difficult and often impossible. Nevertheless, the research on qualitative and quantitative characteristics of dynamic phenomena, the values and directions of surface movements induced by their occurrence play an important role. At present, the application of satellite radar interferometry in order to assess displacements caused by earthquakes became a pattern. However, the Sentinel mission, which is being run by the European Space Agency, has opened up a new opportunities of ground deformation monitoring, particularly in the areas affected by dynamic phenomena. The authors decided to investigate whether a mining induced tremor generates surface movements and what the range as well as the dynamism of those movements are. The use of differential radar satellite interferometry DInSAR based on the Sentinel imagery radars allowed us to deepen the investigation on the ground movements caused by mining related earthquakes.

Keywords: mining induced tremors, vertical displacement, DInSAR, Sentinel mission, underground mining

## Wprowadzenie

W dniu 29.11.2016 r. o godzinie 21.09 w głębinowej kopalni rud miedzi O/ZG Rudna należącej do KGHM PM SA wystąpił silny wstrząs sejsmiczny. W wyniku tąpnięcia zniszczeniu uległa część wyrobisk górniczych. Epicentrum wstrząsu znajdowało się na głębokości około 1100 m, a jego zarejestrowana przez sejsmografy magnituda wyniosła 4,5 stopni w skali Richtera. Wstrząs nastąpił samoistnie w polu G23 i w momencie jego wystąpienia, w bezpośrednim zasięgu oddziaływania tego zjawiska, pod ziemią znajdowało się 16 osób, z których 8 zginęło. W wyniku tąpnięcia zniszczeniu uległa strefa o powierzchni ponad 1 km<sup>2</sup>. Tąpnięcie w kopalni Rudna było największą tragedią w KGHM w ciągu ostatnich 55 lat.

Wstrząsy pochodzenia górniczego – w porównaniu do naturalnych zjawisk sejsmicznych – charakteryzują się niższą energią, głębokość ich wystąpienia jest zdecydowanie mniejsza niż w przypadku trzęsień ziemi, a czas trwania z reguły znacznie krótszy. Natomiast, pomimo niskiej energii, ich wpływ na uszkodzenia architektoniczne obiektów znajdujących się na powierzchni terenu jest relatywnie duży (McGarr i in. 1989; Orlecka-Sikora i in. 2012; Zembaty i in. 2015). Wiąże się to z dużą amplifikacją drgań podłoża gruntowego, wynikającą z niedużej głębokości epicentrum wstrząsów. Wieloletnie obserwacje potwierdziły zależność pomiędzy stopniem uszkodzenia budynków i obiektów inżynierskich a energią wstrząsów (Wodyński i Lasocki 2004; Wodyński i in. 2008; Tataro 2012). Wyniki badań dowodzą, że w przypadku wystąpienia wstrząsu o dużej energii na powierzchni terenu, poza drganiami, obserwowane mogą być również deformacje o charakterze ciągłym (Matsuda i in. 2000; Chen i in. 2007). Dowodzą tego liczne obserwacje powstrząsowe wykonane zarówno po wystąpieniu trzęsień ziemi jak i wstrząsów pochodzenia górniczego (Yadav i in. 2008; Pezzo i in. 2014; Fattahi i in. 2016; Leeman i in. 2016). Skala zjawiska jest jednak inna. W przypadku naturalnych zjawisk sejsmicznych przemieszczenia powierzchni terenu mogą sięgać nawet kilku metrów (Massonnet i in. 1993; Lanari i in. 2004; Elliott 2015; Lindsey i in. 2015). Wstrząsy pochodzenia górniczego powodują deformacje ciągłe, nieprzekraczające kilkudziesięciu centymetrów (Popiołek i in. 2001).

Określenie wartości przemieszczeń powierzchni terenu, które wystąpiły nagle, możliwe jest głównie dzięki zobrazowaniom interferometrycznym. Badania prowadzone nad wykorzystaniem interferometrii do oceny ruchów powierzchni terenu wywołanych działalnością

ludzką przyniosły obiecujące rezultaty. Zobrazowanie satelitarne wykorzystywane jest do monitorowania ruchów powierzchni terenu wywołanych m.in. ekstrakcją surowców fluidalnych (Amelung i in. 1999; Galloway i in. 2007; Loupasakis i in. 2007; Sowter i in. 2016). Znaczne deformacje powierzchni terenu wywołane przez eksploatację podziemną również mogą być poddane analizie opartej na wynikach zobrazowań SAR (Daniel i in. 2003; Mirek 2012; Lazecký i in. 2017). Zwiększona częstotliwość nalołów satelitów Sentinel 1-A i 1-B, wykorzystanie metody PSI oraz metody różnicowej pozwalają na obserwację zjawisk dynamicznych, takich jak deformacje nieciągłe (Closson i in. 2003; Castañeda i in. 2009; Chang 2014; Jones i in. 2014), czy deformacje wywołane zjawiskami sejsmicznymi (Massonet i in. 2003; Lindsey i in. 2015; Ji et al. 2017).

Misja satelitarna Sentinel programu Copernicus prowadzona przez Komisję Europejską oraz Europejską Agencję Kosmiczną pozwala na uzyskanie darmowych zobrazowań radarowych. W ramach tej misji zaprojektowane zostały dwa satelity: Sentinel 1-A, który dostarcza zobrazowań powierzchni Ziemi od października 2014 r. oraz Sentinel 1-B, operujący od września 2016 r. Na terenie Polski każdy satelita zapewnia pokrycie tego samego fragmentu powierzchni terenu w interwale 6 dni. Różnica w czasie pozyskania zobrazowań pomiędzy tymi satelitami to okres 3 dni (De Zan i Guarnieri 2006). Zamontowane na satelitach radary z syntetyczną aperturą pracują w paśmie C, o częstotliwości 5,405 GHz. Zdjęcia wykonywane są w trybie tzw. Interferometric Wide Swath Mode, z zastosowaniem metody progresywnego skanowania TOPSAR (ang. *Terrain Observation with Progressive Scans SAR*) (Ferretti i in. 2001). Metoda ta polega na wykonywaniu zobrazowania interferometrycznego danej powierzchni w trzech tzw. pasach o długości 250 km i rozdzielczości sytuacyjnej 5 m na 20 m każdy, przy wykorzystaniu ruchomej anteny, która kieruje wiązkę fali radarowej cyklicznie w kierunku od i do azymutu przelotu satelity. Zastosowane rozwiązanie pozwala na zobrazowanie większej powierzchni w czasie jednej rejestracji zobrazowania, ale jednocześnie wymaga aplikacji nowych algorytmów do obróbki danych. Tryb skanowania TOPS był wcześniej implementowany eksperymentalnie w satelitach TerraSAR-X oraz RADARSAT-2 (Yague-Martinez 2016). Dotychczas zobrazowania Sentinel-1 zostały wykorzystane między innymi do zobrazowania ruchów powierzchni terenu wywołanych eksploatacją górnictw, trzęsieniami ziemi oraz ekstrakcją wody (Sowter i in. 2016; Yague-Martinez 2016; Lazecký i in. 2017).

Wykonywanie obserwacji ruchów powierzchni po wystąpieniu zjawisk dynamicznych było dotychczas możliwe głównie dzięki klasycznym pomiarom geodezyjnym (Bock i in. 1993; Blewitt i in. 2006; Hejmanowski i in. 2008; Moreno i in. 2009; Szczerbowski i Jura 2015) lub zobrazowania satelitów o dużej częstotliwości rejestracji (np. TerraSAR-X) (Massonet i in. 2003; Lindsey i in. 2015; Ji i in. 2017). Były to jednak metody i technologie wymagające gotowości ekip pomiarowych, kosztowne ze względu na niezbędną precyzję pomiaru, obciążone ponadto dużą niepewnością, nie tylko w zakresie dokładności, ale także np. w odniesieniu do jakości zobrazowań. Tworzyło to lukę badawczą. Misja Sentinel daje szansę na pokonanie tych trudności i wdrożenie skutecznego i stosunkowo powszechnego monitorowania ewentualnych przekształceń powierzchni występujących wskutek wstrząsów pochodzenia górnictwa i trzęsień ziemi.

Dlatego dla wstrząsu z dnia 29.11.2016 r., ze względu na jego stosunkowo dużą energię, podjęto próbę określenia przestrzennego rozkładu pola przemieszczeń, które ujawniło

się na powierzchni terenu po jego wystąpieniu. W badaniach wykorzystano zobrazowanie radarowe z misji Sentinel-1, koncentrując się na czasoprzestrzennej analizie przemieszczeń powierzchni terenu w rejonie wstrząsu. Prowadzone badania pozwoliły na określenie m.in. czasu trwania powstrząsowych ruchów powierzchni terenu w podziale na fazy ruchów dynamicznych i zanikających. Określono zasięg i skalę oddziaływania wstrząsu na ruchy powierzchni terenu. Dzięki wykorzystaniu zobrazowania satelitarnego uzyskano ciągle obraz przekształceń powierzchni w strefie objętej wpływami wstrząsu. Prezentowane wyniki przyczyniły się do lepszego poznania czasoprzestrzennego ruchu powierzchni terenu wywołanego wstrząsem pochodzenia górniczego o stosunkowo dużej magnitudzie (4,5 stopni w skali Richtera).

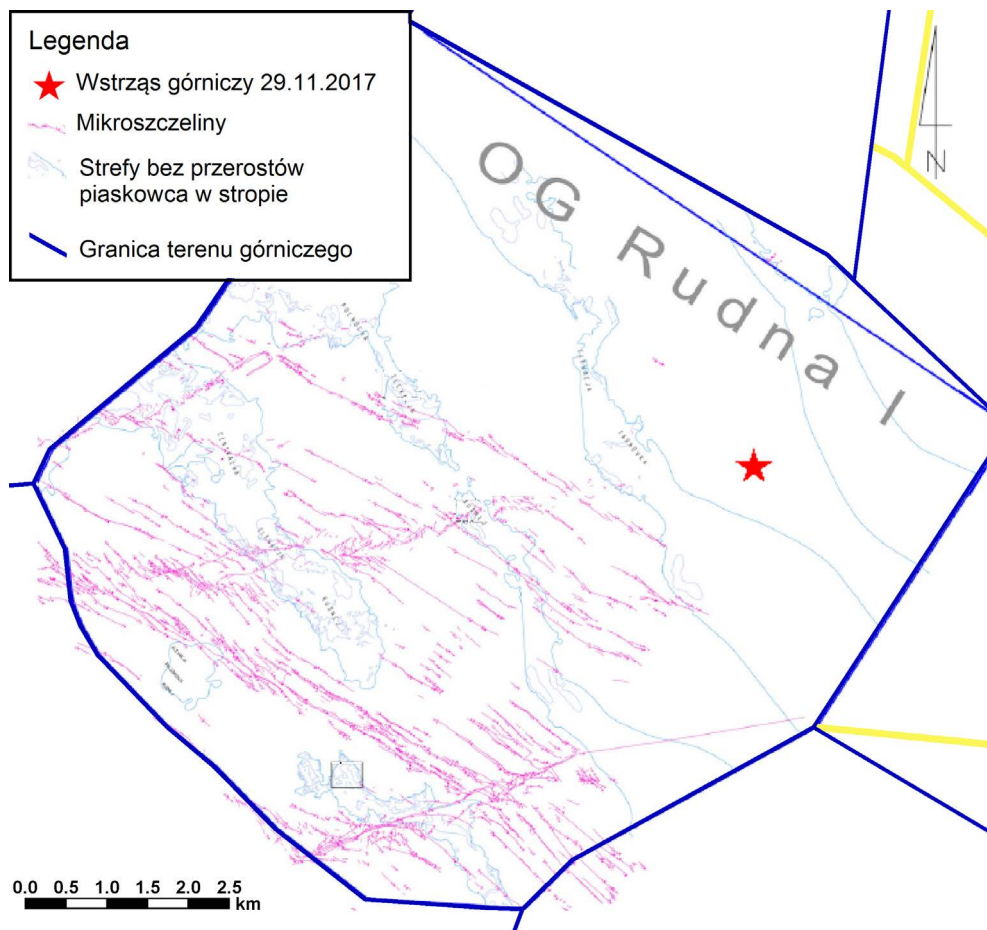
## 1. Charakterystyka rejonu badań

Badania prowadzone były na terenie górniczym należącym do O/ZG Rudna znajdującego się na przedpolu monokliny sudeckiej. Monoklina składa się głównie ze skał metamorficznych i osadowych.

Złoże miedzi znajduje się w pokładach cechsztynu. Grubość pokładu miedzionośnego waha się od 0,1 do 15 m. Z dotychczasowego stanu rozpoznania tektonicznego dotyczącego uskoków o dużych zrzutach w obszarze kopalni LGOM wynika, że zdecydowana ich większość ma przebieg NW–SE z odchyleniami na NWW–SEE i NNW–SSE (Salski 1996; Butra i Kudęłko 2011). Do dominujących systemów uskoków w obszarze prowadzonych robót górniczych należy zaliczyć strefę uskoku Rudnej Głównej i Głównego Lubina. Analiza warunków geologiczno-tektonicznych w obrębie obszaru górniczego kopalni Rudna kieruje uwagę na cechujące się dużymi zrzutami i znacznym zasięgiem strefy uskoków w rejonach południowych i centralnych. Pośród kilku systemów uskoków, wpływających na występowanie zagrożenia sejsmicznego, za reprezentatywny uznany jest system uskoku Rudnej Głównej. W jego rejonie w większości wydobyto już złoże, a prowadzonej eksploatacji towarzyszył wysoki poziom zagrożenia wstrząsami i tąpnięciami (Markiewicz i in. 2007). Szczegółowe rozpoznanie lokalizacji mikrouskoków w poziomie złożowym i warstwach stropu bezpośredniego w rejonie, w którym wystąpiło to zjawisko sejsmiczne dowiodło, że w tym obszarze nie występowały jednak zaburzenia tektoniczne (rys. 1).

## 2. Dane satelitarne i metodyka przyjęta w badaniach

W niniejszym opracowaniu, w celu przetworzenia obrazów SAR, wykorzystano metodę tzw. satelitarnej interferometrii różnicowej DInSAR (ang. *Differential Interferometry SAR*). Jest to metoda, która pozwala na uzyskanie informacji o ruchu powierzchni terenu poprzez porównanie różnicy faz dwóch zdjęć radarowych wykonanych nad tym samym obszarem w różnych okresach. Zastosowanie tej metody jest zasadne ze względu na charakter ruchów powierzchni terenu wywołanych wstrząsem. Są to deformacje, których rozkład w czasie nie ma charakteru liniowego. Dynamika przekształceń powierzchni terenu jest wówczas nagła



Rys. 1. Lokalizacja mikrouskoków w poziomie złożowym i warstwach stropu bezpośredniego złoża (Markiewicz 2017)

Fig. 1. Distribution of micro-faults at the reservoir level and in the layers located directly above the seam

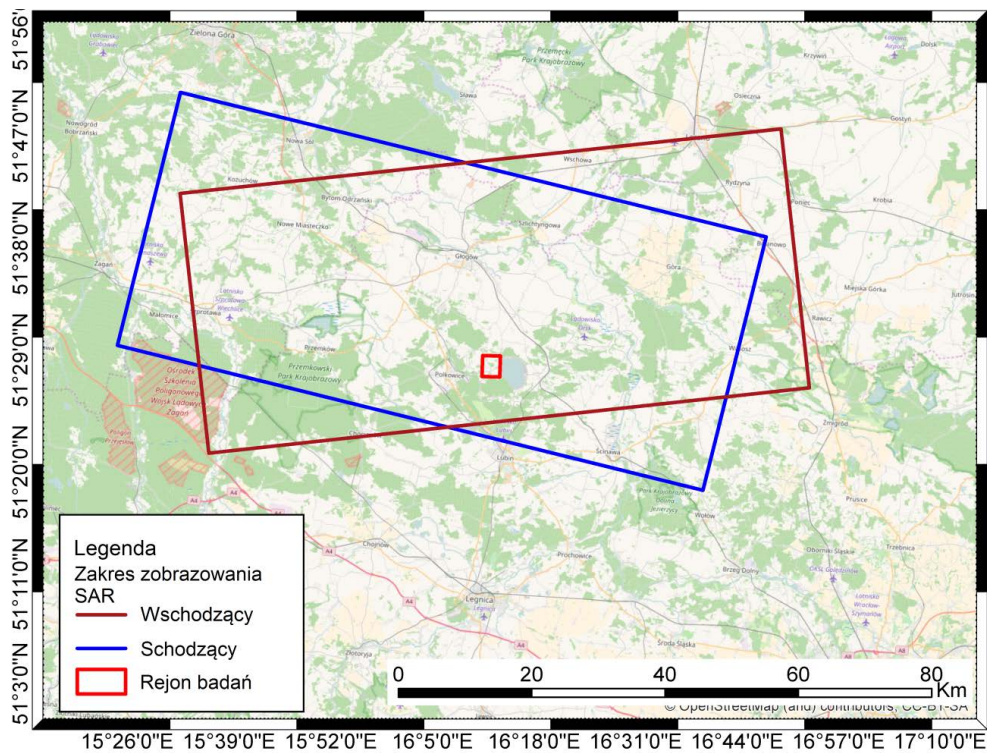
i niespodziewana. Dlatego wykorzystanie metod bazujących na szeregach czasowych, przy których zakładana jest liniowość zjawiska deformacji powierzchni terenu, jest niemożliwa. Natomiast wykorzystanie zobrazowania satelitarne, które pozwala na uzyskanie przyrostów przemieszczeń w dużej częstotliwości wydaje się być optymalną techniką pomiarową. Tak duża częstotliwość pomiarów pozwala na uzyskanie pełnego obrazu ruchów powierzchni w rejonie kształtującego się pola przemieszczeń.

### 2.1. Dane satelitarne

Zjawisko sejsmiczne pochodzenia górniczego wystąpiło 29.11.2016 r. w rejonie miejscowości Tarnówek (rys. 2). Dane z satelity Sentinel-1 pozwoliły na uzyskanie pełnego pokry-

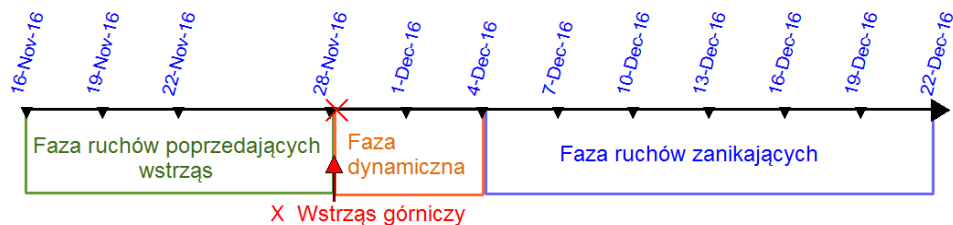
cia terenów powstrząsowych zobrazeniami z orbity satelity wschodzącego i schodzącego. Badania prowadzono w okresie poprzedzającym wystąpienie wstrząsu oraz jeden miesiąc po nim. Zasadnicze analizy obejmowały okres od 16.11.2016 do 19.12.2016 r.

Badania podzielono na trzy interwały czasowe (rys. 3).



Rys. 2. Zakres zobrazowań SAR z satelitów Sentinel 1-A i 1-B o orbitach wschodzących i schodzących w rejonie badań

Fig. 2. Scope of imaging radars from ascending and descending orbits of the Sentinel 1-A and 1-B satellites in the study area



Rys. 3. Fazy przemieszczeń powierzchni terenu w okresie objętym badaniami

Fig. 3. Phases of ground surface displacement during the study period

Pierwszy interwał czasowy obejmował dwa tygodnie poprzedzające pojawienie się wstrząsu. W tym czasie analizowano, czy w rejonie wpływów dynamicznych wystąpiły ruchy powierzchni terenu poprzedzające wstrząs. Kolejnym okresem był kilkudniowy interwał czasowy zaraz po ujawnieniu się wstrząsu. Dla tego i kolejnego okresu badano dynamikę rozwoju pola przemieszczeń. Ostatni, trzeci interwał czasowy obejmował analizę zanikających ruchów powierzchni terenu. W celu utworzenia 10 interferogramów różnicowych wykorzystano 11 zdjęć radarowych, które pozyskane zostały od 16.11.2016 do 19.12.2016 r. (tab. 1, rys. 2).

TABELA 1. Zobrazowania z satelitów Sentinel 1-A i Sentinel 1-B wykorzystane w badaniach

TABLE 1. Imaging radars from the Sentinel 1-A and 1-B satellites used in the research

Lp.	Zdjęcie odniesienia	Zdjęcie dostosowania	Kierunek przejścia satelity	Numer orbity	Długość bazy poprzecznej [m]
1.	16.11.2016	22.11.2016	wschodzący	73	58
2.	19.11.2016	01.12.2016	schodzący	22	131
3.	22.11.2016	28.11.2016	wschodzący	73	102
4.	28.11.2016	04.12.2016	wschodzący	73	110
5.	01.12.2016	07.12.2016	schodzący	22	93
6.	04.12.2016	10.12.2016	wschodzący	73	57
7.	07.12.2016	13.12.2016	schodzący	22	108
8.	10.12.2016	16.12.2016	wschodzący	73	15
9.	13.12.2016	19.12.2016	schodzący	22	87

## 2.2. Metodyka przyjęta w badaniach

Pierwszym etapem badań była wzajemna rejestracja radarogramów (ang. *coregistration*), polegająca na przestrzennym dopasowaniu do siebie pikseli zdjęcia nadrzędnego do zdjęcia podrzędnego. Proces ten wykonano opierając się na informacjach o precyzyjnych orbitach danych satelitów oraz Numeryczny Model Terenu (NMT). Model terenu pozyskany został z Shuttle Radar Topography Mission. Jego rozdzielczość terenowa to  $\pm 3''$  (ok. 90 m na 90 m), a dokładność wysokościowa około  $\pm 16,7$  m (Ferretti i in. 2001). Następnym krokiem było opracowanie interferogramu z różnicą faz między dwoma obrazami SAR w kolejnych interwałach czasowych (tab. 1) oraz obliczoną wartością koherencji dla każdego piksela. Różnica faz obrazu interferometrycznego powinna zależeć wyłącznie od różnicy odległości między satelitami, wykonującymi zobrazowanie radarowe, a danym punktem znajdującym się na powierzchni terenu. Wartość ta utożsamiana jest wówczas wyłącznie z przemieszczeniem punktu pomiarowego w kierunku padania wiązki fali radarowej LOS (ang. *Line of Sight*).

Podczas formowania interferogramu, opierając się na precyzyjnie obliczonych współrzędnych satelitów oraz wykorzystany NMT, usunięto część fazy wynikającą z krzywizny Ziemi. W dalszej kolejności, w celu zredukowania szumu, wygenerowany interferogram poddano fil-

tracji metodą Goldsteina (Goldstein 1995; Shanker i Zebker 2007). Ostatecznie, przy wykorzystaniu zaimplementowanego uprzednio do obliczeń NMT, usunięto składową odpowiedzialną za topografię terenu, otrzymując w ten sposób interferogram różnicowy, którego wartość różnicy faz utożsamiono z ruchem powierzchni terenu w kierunku padania wiązki fali radarowej. Powyższe kroki badawcze zostały przeprowadzone w programie SNAP. Z uwagi na fakt, że różnica faz znana była w zakresie  $\langle 0, 2\pi \rangle$ , w celu rekonstrukcji tej wartości do pełnej długości fali konieczne było przeprowadzenie procesu tzw. rozwinięcia fazy (ang. *phase unwrapping*), który wykonano przy zastosowaniu oprogramowania SNAPHU. Ostatecznie, przy wykorzystaniu wzoru (1), rozwiniętą długość fali przeliczono na wartości metryczne:

$$dLOS = \frac{\Delta\varphi_{disp}^{unw} \cdot \lambda}{4\pi \cos(\theta)} \quad (1)$$

gdzie:

- $dLOS$  – ruch powierzchni terenu w kierunku padania wiązki fali radiowej,
- $\Delta\varphi_{disp}^{unw}$  – rozwinięta wartość długości wiązki fali radiowej odpowiadająca części różnicy faz wynikającej z przemieszczenia obserwowanej powierzchni,
- $\theta$  – kąt padania wiązki fali radiowej.

Powyżej przedstawiona procedura pozwoliła na uzyskanie obrazu pola przemieszczeń pionowych w rejonie, w którym wystąpiło zjawisko sejsmiczne.

### 3. Uzyskane wyniki

Poniżej, w podrozdziałach 3.1–3.3, omówione zostaną wyniki obserwacji w podziale na wymienione w podrozdziale 2.1 fazy ruchów powierzchni terenu.

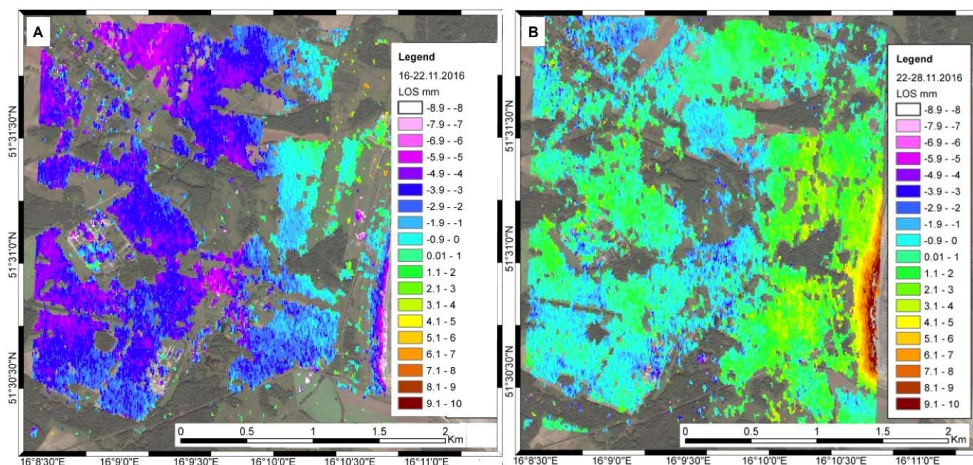
#### 3.1. Obserwowane ruchy powierzchni terenu poprzedzające wystąpienie wstrząsu

W rejonie badań dostępne zobrazenia satelitarne pozwoliły na utworzenie interferogramów różnicowych tydzień i dwa tygodnie przed wstrząsem (tab. 1). Otrzymany obraz ruchów powierzchni terenu w kierunku LOS rozpatrywany był w okresach 16.11–22.11.2016 r. oraz 22.11–28.11.2016 r.

W okresie 16–22.11.2016 r. oraz 22.11–28.11.2016 r. w rejonie badań zaobserwowano ruchy powierzchni terenu dochodzące do  $-6$ , nawet  $-7$  mm w kierunku LOS (rys. 4). Deformacje w centralnej strefie analizowanego obszaru związane są przypuszczalnie z lokalizacją bieżących eksploatacji prowadzonych przez KGHM. W północno-zachodnim narożu pionowe ruchy powierzchni terenu w kierunku LOS, wynikające prawdopodobnie z wpływu eksploatacji górniczej, dochodzą do  $-8$  mm. Na przedpolu zbiornika Żelazny Most, który znajduje się we wschodniej części analizowanego obszaru, nie wystąpiły żadne deformacje powierzchni terenu. Na koronie zbiornika odpadów poflotacyjnych ruchy powierzchni terenu osiągnęły



maksymalnie  $-9$  mm. Obserwacje prowadzone na tydzień przed pojawieniem się wstrząsu również nie wykazywały żadnych anomalii w rozkładzie deformacji powierzchni terenu.



Rys. 4. Przesunięcia powierzchni terenu w kierunku LOS w okresie: a) od 16.11. do 22.11.2016 r. oraz b) od 22.11. do 28.11.2016 r.

Fig. 4. Ground surface displacements in LOS direction in the period: a) from 16.11. to 22.11.2016 and b) from 22.11. to 28.11.2016

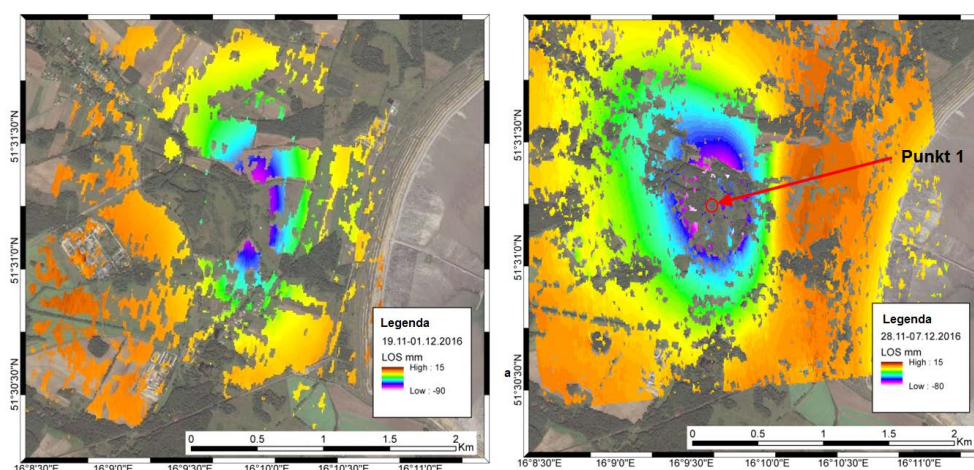
Reasumując powyższe rozważania należy stwierdzić, że w rejonie badań na tydzień i dwa tygodnie przed wystąpieniem wstrząsu nie zaobserwowano żadnych znaczących ruchów powierzchni terenu, mogących wskazywać na istotne zmiany (wzrost) naprężeń w górotworze, które wskazywałyby na zaistnienie zjawiska sejsmicznego pochodzenia górniczego. Ciągłe ruchy powierzchni terenu wynikające bezpośrednio z eksploatacji zaobserwowano w centralnej i północno-wschodniej części badanego obszaru. Na przedpolu zbiornika osadów poftlotacyjnych ruchy powierzchni terenu praktycznie nie występują. Natomiast na koronie zbiornika odpadów poftlotacyjnych Żelazny Most widoczne są ruchy powierzchni terenu w kierunku LOS, które maksymalnie wyniosły  $-8$  mm/tydzień. Mogły one być efektem kompaktacji ziemnej grobli zbiornika.

Prezentowane wyniki nie potwierdzają tezy o możliwości zaobserwowania ruchów powierzchni terenu związanych z naprężeniami, które stanowiłyby przesłankę do wczesnego ostrzegania o prawdopodobieństwie pojawienia się wstrząsu. Zaobserwowane ruchy powierzchni terenu w kierunku LOS wynikają jedynie z bieżącej eksploatacji prowadzonej w rejonie badań.

### 3.2. Obserwowane ruchy powierzchni terenu wywołane wystąpieniem wstrząsu – faza ruchów dynamicznych

Dotychczasowe rozważania dowiodły, że ruchy powierzchni terenu w rejonie badań przed wystąpieniem wstrząsu wynikają jedynie z eksploatacji górniczej i nie przekracza-

ją  $-8$  mm/tydzień. Kolejnym celem badań była analiza ruchów powierzchni terenu, które mogły zostać wywołane bezpośrednio przez wstrząs, który wystąpił 29.11.2016 r. Dostępne zobrazowania pozwoliły na analizę rozkładu ruchów powierzchni terenu w okresach 19.11–01.12.2016 r. oraz 28.11–07.12.2016 r. Różnicowy obraz uzyskany z satelity schodzącego w okresie obejmującym 10 dni przed i 2 dni po pojawieniu się wstrząsu potwierdził tezę o wpływie wstrząsu na powierzchnię terenu. Zakładając, że ruchy powierzchni terenu wynikające z eksploatacji wyniosły około  $-10$  mm, bezpośrednio w rejonie epicentrum wstrząsu, w okresie 19–29.11.2016 r., wykształciła się niecka obniżeniowa o przemieszczeniach do około  $-90$  mm. Pozwoliło to na stwierdzenie, że w przeciągu 2 dni ruchy powierzchni terenu wywołane zjawiskiem sejsmicznym pochodzenia górniczego osiągnęły maksymalnie  $-80$  mm (rys. 5a). Na obrazie z satelity schodzącego widoczna jest eliptyczna niecka obniżeniowa. Obraz ruchów powierzchni terenu jest bardzo słaby w centralnej części niecki ze względu na występowanie w tym rejonie szaty roślinnej (teren leśny). Obraz z satelity wstępującego zapewnił pełniejsze pokrycie. Zobrazowanie z satelity wstępującego w okresie 28.11–07.12.2016 r. potwierdziło tezę o ruchach powierzchni terenu wywołanych zjawiskiem sejsmicznym pochodzenia górniczego (rys. 5b). Wyraźnie wykształcona niecka obniżeniowa osiągnęła wartości w kierunku LOS wynoszące około  $-80$  mm.



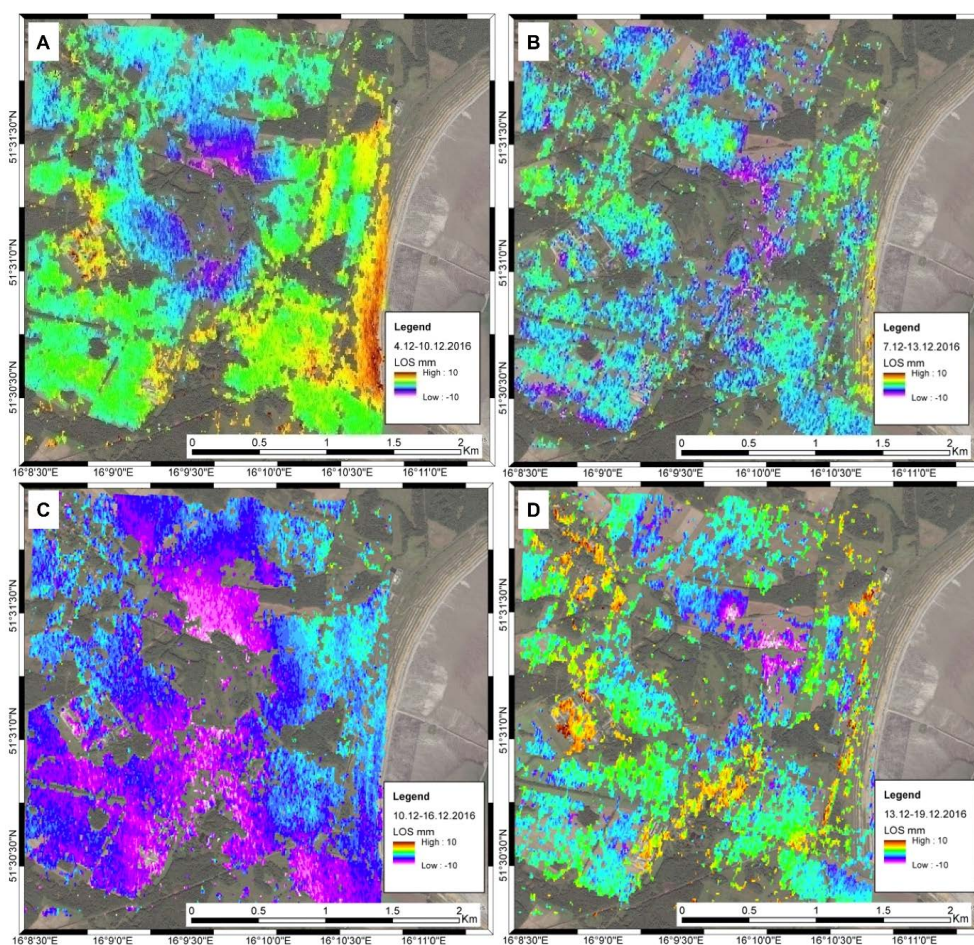
Rys. 5. Przesunięcia powierzchni terenu w kierunku LOS ze zobrazowania z satelity schodzącego a) w okresie 19.11–01.12.2016 r. oraz wstępującego b) w okresie 28.11–07.12.2016 r.

Fig. 5. Ground surface displacements in LOS direction derived from satellite's descending orbit a) in the period 19.11.–01.12.2016 and from satellite's ascending orbit b) in the period 28.11.–07.12.2016

### 3.3. Obserwowane ruchy powierzchni terenu wywołane wystąpieniem wstrząsu – faza ruchów zanikających

Kolejne rozważania dotyczą estymacji czasu ujawniania się resztowych wpływów powstrząsowych. Dostępne zobrazowania umożliwiły ocenę ruchów powierzchni terenu w okresach 04–10.12.2016, 07–13.12.2016, 10–16.12.2016 oraz 13–19.12.2016. W pierw-

szym tygodniu po wystąpieniu wstrząsu wyniki zobrazowania potwierdzają tezę, że teren nadal się obniża. Maksymalne ruchy powierzchni terenu w kierunku LOS wynoszą około  $-10$  mm w okresie 6 dni (rys. 6a). Widoczne jest nadal kształtowanie się wyraźnej formy niecki obniżeniowej. Wyniki opracowane dla kolejnych okresów wskazują zanikające ruchy powierzchni terenu (rys. 6b–d). Zobrazowanie uzyskane w okresie 7–13.12.2016 r. nie pozwala na określenie ruchów powstrząsowych (rys. 6b). Wyniki uzyskane dla kolejnego okresu, 10–16.12.2016 r., pozwalają na stwierdzenie, że przemieszczenia powierzchni terenu związane są już częściowo z wpływem eksploatacji. W południowej części analizowanego terenu widoczne są osiadania wynikające przypuszczalnie z zaciskania się pustek poeksplo-

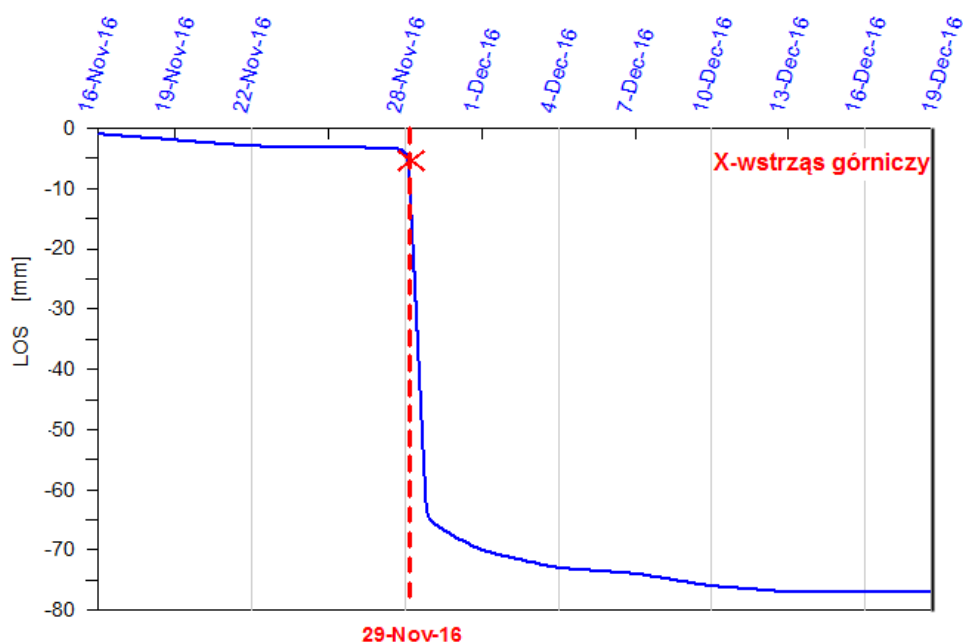


Rys. 6. Przemieszczenia powierzchni terenu w kierunku LOS ze zobrazowania z satelity wschodzącego a) od 04.12. do 10.12.2016 r., c) od 10.12. do 16.12.2016 r. oraz schodzącego, b) od 07.12. do 13.12.2016 r., d) od 13.12. do 19.12.2016 r.

Fig. 6. Ground surface displacements in LOS direction derived from satellite's ascending orbit a) from 04.12. to 10.12.2016, c) from 10.12. to 16.12.2016 and satellite's descending orbit, b) from 07.12. to 13.12.2016, d) from 13.12. to 19.12.2016

atacyjnych (rys. 6c). Wyniki zobrazowań dla dwóch ostatnich okresów, 13–19.12.2016 r., dowodzą, że wpływy powstrząsowe, jeżeli istnieją, mieszczą się w granicach błędu i są już praktycznie niewykrywalne (rys. 6d).

Ocena kinematyki ujawniania się wpływów powstrząsowych została poparta dodatkową analizą rozkładu prędkości osiadań powierzchni terenu dla wybranego punktu zlokalizowanego w centrum niecki obniżeniowej (rys. 7).



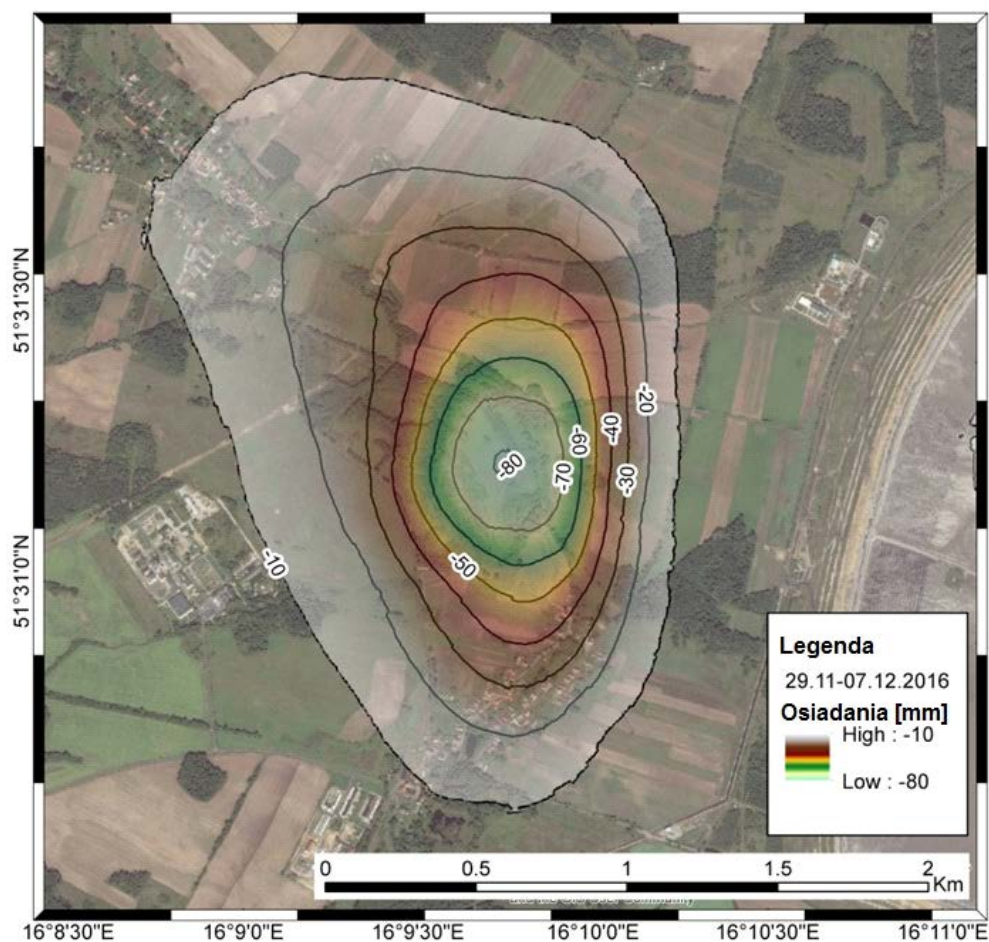
Rys. 7. Rozkład przemieszczeń wybranego punktu 1 w czasie

Fig. 7. Ground surface displacement distribution for chosen point in time

Z analizy wykresu widać, że przed wystąpieniem wstrząsu teren osiadł o około  $-5$  mm. Przepuszczalnie były to wpływy eksploatacji górniczej prowadzonej peryferyjnie.

Jeżeli przyjąć, że osiadania bezpośrednio spowodowane wstrząsem zostały zarejestrowane po 28.11.2016 r., to wyniosły one dla analizowanego punktu około  $-80$  mm. W okresie dwóch dni po wystąpieniu wstrząsu zarejestrowano około 92% maksymalnych przemieszczeń (ok. 75 mm). Prędkość przemieszczeń wynosiła w tej fazie około  $-32$  mm/dobę. W okresie kolejnych 5 dni ujawniło się jeszcze 7% wpływów maksymalnych. Pozostałe 1% stwierdzić można po tym okresie (po 07.12.2016 r.). Reasumując można stwierdzić, że z najbardziej dynamicznym procesem przemieszczeń powierzchni terenu mamy do czynienia w okresie pierwszych 48 godzin po wystąpieniu wstrząsu (85% przemieszczeń). Zanikające, znaczące w sensie statystycznym wpływy resztowe występują na powierzchni terenu od drugiej do siódmej doby po wstrząsie. W tym okresie ujawnia się kolejne 7% przemieszczeń. Pozostałe ruchy powierzchni można z dużym prawdopodobieństwem zaliczyć do ciągłych przemieszczeń pogórnich, nie związanych bezpośrednio ze zjawiskiem sejsmicznym.

Celem podsumowania przeprowadzonych badań dokonano redukcji przemieszczeń zarejestrowanych w kierunku LOS do przemieszczeń pionowych. Wygenerowana ostatecznie niecka obniżeniowa została przedstawiona na rysunku (rys. 8). Niecka została wygenerowana na podstawie interpolacji rozkładu powierzchniowego, bazując na wartościach przemieszczeń pionowych.



Rys. 8. Ostateczna niecka osiadań wywołana przez zaciskanie się wyrobisk górniczych w wyniku wystąpienia wysokoenergetycznego wstrząsu pochodzenia górniczego z 29.11.2016 r.

Fig. 8. Final state of ground surface subsidence related to mining caverns convergence induced by high energy mining induced tremor that occurred on 29.11.2016

Na uwagę zasługuje niewątpliwie asymetria niecki powstrząsowej. Jej rozciągłość w kierunku północ-południe wynosi około 2800 m, natomiast w kierunku wschód-zachód 1700 m. Izolinie osiadań są wyraźnie rozciągnięte w kierunku północnego-zachodu. Widoczna asymetria w rozkładzie ruchów pionowych wymagałaby pogłębionych badań właściwości geo-

technicznych gruntów oraz analiz wpływu eksploatacji dokonanych w tym rejonie. Można ponadto stwierdzić, że nie odnotowano żadnych przemieszczeń powstrząsowych w rejonie przedpola i korony grobli zbiornika odpadów poflotacyjnych.

### **Podsumowanie i wnioski**

Prezentowane wyniki badań pozwoliły na pogłębienie wiedzy o procesie deformacji powierzchni terenu wywołanym przez wstrząs indukowany w górotworze wskutek prowadzonej eksploatacji górniczej rud miedzi w kopalni Rudna, należącej do koncernu KGHM. W badaniach wykorzystano zobrazenia z satelitów Sentinel 1-A i 1-B wykonane przed, w trakcie i po wystąpieniu 29.11.2016 r. wstrząsu o magnitudzie 4,5 w skali Richtera, którego hipocentrum było zlokalizowane przypuszczalnie około 1100 m pod powierzchnią terenu.

Szczegółowa analiza interferogramów różnicowych z okresu 16.11.2016 r. –19.12.2016 r. pozwoliła na wydzielenie obniżen powierzchni terenu, będących jednoznacznie efektem wstrząsu. Podział analizowanych zobrazeń na okresy, a także pogłębiona analiza prędkości narastania przemieszczeń pozwoliły na następujące stwierdzenia:

a) przed wystąpieniem zjawiska sejsmicznego nie można na powierzchni terenu stwierdzić żadnych dodatkowych przemieszczeń w rejonie badań; teren osiadał wskutek prowadzonej peryferyjnie eksploatacji górniczej;

b) w okresie około 48 godzin po wystąpieniu wstrząsu powierzchnia terenu osiadała gwałtownie, przy czym można było wówczas zarejestrować około 92% całkowitych osiadań spowodowanych wstrząsem. Prędkość osiadania wynosiła wówczas w rejonie centrum niecki powstrząsowej około  $-32$  mm/dobę. Nie można jednak wykluczyć większych, chwilowych prędkości osiadań, których ze względu na rozdzielczość czasową zobrażeń satelitarnych nie można obecnie badać;

c) do około 7 doby po wstrząsie ruchy powierzchni stopniowo zanikały, a w tym okresie ujawniło się jeszcze około 7% przemieszczeń; prędkość przemieszczeń spadła do zanedbywalnie małych wartości;

d) w kolejnych dobach zjawisko ruchów powstrząsowych praktycznie zanikło.

Maksymalne osiadania powstrząsowe zarejestrowane w polu przemieszczeń wyniosły około  $-80$  mm. Niecka obniżeniowa, która ukształtowała się wskutek wstrząsu ma formę asymetryczną, o wydłużonym kształcie w kierunku północ-południe i rozciągłości około 2800 m na około 1700 m. Obserwowane zjawiska przemieszczeniowe są bezwzględnie niewielkie, jednak z uwagi na dynamikę przebiegu osiadań oraz odległość centrum zidentyfikowanej niecki powstrząsowej od zachodniej grobli zbiornika osadów poflotacyjnych Żelazny Most proces deformacji ma znaczenie dla oceny zagrożenia środowiska. Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że powstrząsowe ruchy powierzchni zanikły w odległości około 250–300 m od podstawy grobli zachodniej. Wstrząs nie wywołał zatem zagrożenia dla jej stabilności (w sensie przemieszczeniowym).

W aspekcie badań nad przydatnością zobrażeń misji Sentinel-1 do analizy wpływu zjawisk dynamicznych na powierzchnię terenu można stwierdzić, że otwiera ona nowe moż-

liwości obserwacji tego typu zjawisk. Badania prezentowane dowiodły, że przemieszczenia powierzchni terenu większe niż 2 mm/db mogą być obserwowane dzięki zobrazowaniu Sentinel-1, w interwałach sześciodniowych. Ograniczeniem tej metody może być ewentualnie zbyt niska koherencja, niepozwalająca na zobrazowanie przemieszczeń powierzchni terenu. W artykule nie było miejsca na szczegółową analizę dokładności uzyskanych rezultatów, jednak wydaje się, że submilimetrowe wartości wyznaczonych przemieszczeń zapewniają wystarczającą wiarygodność badań i wnioskowania na temat zagrożeń związanych ze skutkami wstrząsów. Te aspekty będą jednak przedmiotem innych rozważań i nie były tutaj kluczowe. Celem badań było przede wszystkim określenie maksymalnych wartości przemieszczeń, ich lokalizacji, rozproszenia pola przemieszczeń oraz wyznaczenie prędkości ruchów terenu w fazie dynamicznej.

Interesujące byłoby również zbadanie przyczyn asymetrii niecki powstrząsowej, zwłaszcza w kontekście spostrzeżeń innych badaczy, które wskazywały na tworzenie się raczej symetrycznych niecek obniżeniowych (Popiołek i in. 2001). Wymaga to jednak bardziej szczegółowej analizy geologii, tektoniki i wiedzy o rozwoju eksploatacji górniczej i będzie przedmiotem odrębnych badań.

## Literatura

- Amelung i in. 1999 – Amelung, F., Galloway D.L., Bell, J.W., Zebker, H.A. i Laczniak R.J. 1999. Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology* 27, s. 483–486.
- Blewitt i in. 2006 – Blewitt, G., Kreemer, C. i Hammond, W.C. 2006. Rapid determination of earthquake magnitude using GPS for tsunami warning systems. *Geophysics* Vol. 33, Iss. 11.
- Bock i in. 1993 – Bock, Y., Agnew, D.C. i Fang, P. 1993. Detection of crustal deformation from the landers earthquake sequence using continuous geodetic measurements. *Nature* 361, s. 337–340.
- Butra, J. i Kudełko, J. 2011. Rockburst hazard evaluation and prevention methods in Polish copper mines. *Cuprum* 61, s. 5–20.
- Castañeda i in. 2009 – Castañeda, C., Gutiérrez, F., Manunta, M. i Galve, J.P. 2009. DInSAR measurements of ground deformation by sinkholes, mining subsidence and landslides, Ebro River, Spain. *Earth Surface Processes and Landforms* 34, s. 562–1574.
- Chen i in. 2007 – Chen, J.L., Wilson, C.R., Tapley, B.D. i Grand, S. 2007. GRACE detects coseismic and postseismic deformation from the Sumatra-Andaman earthquake. *Geophysical Research Letters* 34.
- Cosso i in. 2003 – Cosso, D., Karaki, N.A., Hansen, H., Derauw, D., Barbier, C. i Ozer, A. 2003. Space-borne radar interferometric mapping of precursory deformations of a dyke collapse, Dead Sea area, Jordan. *International Journal of Remote Sensing* 24, s. 843–849.
- Daniel i in. 2003 – Daniel, R., Maisons, C., Carnec, S., Le Mouelic, C. i Hosford, S. 2003. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France). Comparison with ground-based measurement. *Remote Sensing of Environment* 88, s. 468–478.
- De Zan, F. i Guarnieri, A.M. 2006. TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans. *Geoscience and Remote Sensing* 44(9), s. 2352–2360.
- Elliott i in. 2015 – Elliott, J.R., Searle, M., Jolivet, R. i in. 2015. Himalayan megathrust geometry and relation to topography revealed by the Gorkha earthquake. *Nature Geoscience* 9, s. 174–180.
- Fattahi, H. i Amelung, F. 2016. InSAR observations of strain accumulation and fault creep along the Chaman Fault system, Pakistan and Afghanistan. *Geophysical Research Letters*.
- Ferretti i in. 2001 – Ferretti, A., Prati, C. i Rocca, F. 2001. Permanent Scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing* 39(1), s. 8–21.
- Galloway, D.L. i Hoffmann, J. 2007. The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. *Hydrogeology Journal* 15, s. 133–154.

- Goldstein, R. 1995. Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry. *Geophysical Research Letters* 22(18), s. 2517–2520.
- Hejmanowski i in. 2008 – Hejmanowski, R., Malinowska, A., Stoch, T., Pluciński, P., Warchała, M. i Kosior, R. 2008. New interpretation of GPS measurements results. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 24, z. 3/1, Kraków: Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, s. 197–204.
- Jones i in. 2014 – Jones, C.E., Blom, R.G. i Bayou, C. 2014. Louisiana, sinkhole: Precursory deformation measured by radar interferometry. *Geology* 42, s. 111–114.
- Lanari i in. 2004 – Lanari, R., Mora, O., Manunta, M., Mallorqui, J.J., Berardino, P. i Sansosti, E. 2004. A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing* 42, s. 1377–1386.
- Lazecký i in. 2017 – Lazecký, M., Jiráňková, E. i Kadlečík, P. 2017. Multitemporal monitoring of Karvina subsidence trough using Sentinel-1 and TerraSar-X interferometry. *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 14, s. 53–59.
- Leeman i in. 2016 – Leeman, J., Saffer, D., Scuderi, M. i Marone, C. 2016. Laboratory observations of slow earthquakes and the spectrum of tectonic fault slip modes. *Nature Communications* 7.
- Lindsey E. i in. 2015. Line of sight displacement from ALOS-2 interferometry: Mw 7.8 Gorkha earthquake and Mw 7.3 aftershock. *Geophysical Research Letters* 42, s. 6655–6661.
- Lingyun i in. 2017 – Lingyun, J., Qingliang, W., Jing, X. i Cunwei, J. 2017. The July 11, 1995 Myanmar–China earthquake: A representative event in the bookshelf faulting system of southeastern Asia observed from JERS-1 SAR images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 55, s. 43–51.
- Loupasakis, C. i Rozos, D. 2009. Land Subsidence Induced by Water Pumping in Kalochoi Village (North Greece) – Simulation of the Phenomenon by Means of the Finite Element Method. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology. Geological Society of London* 42, s. 369–382.
- Markiewicz i in. 2007 – Markiewicz, A., Suchan, J. i Tomanik, R. 2007. Eksploatacja górnicza a zuskokowanie spagowej partii utworów cechsztyńskich w kopalni Rudna KGHM Polska Mied SA. *Górnictwo i Geoinżynieria* R. 31, z. 3/1.
- Massonnet, D. i in. 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry. *Nature* 364, s. 138–142.
- Matsuda, Hiroshi, Keiji S. i Naoya E. 2000. Effects of earthquake-induced settlement of clay layer on the ground subsidence. Proc. of 12th World Conference on Earthquake.
- McGarr i in. 1989 – McGarr, A., Bicknell, J., Sembera, R. i Green, R. 1989. Analysis of exceptionally large tremors in two gold mining districts of South Africa. *Pure and Applied Geophysics* 129, s. 295–307.
- Mirek, K. 2012. Satellite radar interferometry (InSAR) used for estimation of ground subsidence in mining areas – Upper Silesian Coal Basin Case Study. *Polish Journal of Environmental Studies* 21, s. 312–316.
- Moreno i in. 2009 – Moreno, M.S., Bolte, J., Klotz, J. i Melnick, D. 2009. Impact of megathrust geometry on inversion of coseismic slip from geodetic data: Application to the 1960 Chile earthquake. *Geophysical Research Letters* 36.
- Orlecka-Sikora i in. 2012 – Orlecka-Sikora, B., Lasocki, S., Lizurek, G. i Rudziński, L. 2012. Response of seismic activity in mines to the stress changes due to mining induced strong seismic events. *International Journal of Rock Mechanics and Mine Science* 53, s. 151–158.
- Pezzo i in. 2014 – Pezzo, G., Boncori, J.P.M., Atzori, S., Antonioli, A. i Salvi, S. 2014. Deformation of the western Indian Plate. *Geophysical Journal International* Vol. 198, Iss. 1, s. 25–30.
- Popiołek i in. 2001 – Popiołek, E., Ostrowski, J., Czaja, J. i Mazur, J. 2001. The Impact of a Strong Mining Tremor on the Subsidence of the Area Surface in the Legnica-Glogow Copper Area. 10th FIG Int. Symposium on Deformation measurements. Orange. California.
- Salski, W. 1996. *The tectonics of the deposit*. Piestrzyński A. red., Kraków: KGHM SA.
- Shanker, P. i Zebker, H. 2007. Persistent scatterer selection using maximum likelihood estimation. *Geophysical Research Letters* 34, s. 301–312.
- Sowter i in. 2016 – Sowter, A., Bin, M., Amat, C., Cigna, F., Marsh, S. i Athab, A. 2016. Mexico City land subsidence in 2014 – 2015 with Sentinel-1 IW TOPS: Results using the Intermittent SBAS (ISBAS) technique. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* 52, s. 230–242.
- Szczerbowski, Z. i Jura, J. 2015. Induced seismic events and surface deformations monitored by GPS permanent stations. *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 12, s. 237–248.



- Tatara, T. 2012. Odporność dynamiczna obiektów budowlanych w warunkach wstrząsów górniczych. Kraków: Politechnika Krakowska.
- Wodyński, A. i Lasocki, S. 2004. Assessment of Mining Tremor Influence on the Technical Wear of Building. *Acta Geodynamica Et Geomaterialia* 1.
- Wodyński i in. 2008 – Wodyński, A., Firek, K. i Rusek, J. 2008. Assessment of time and mining exploitation effects on the technical wear of prefabricated panel buildings. 21st World Mining Congress & Expo 2008: New challenges and visions for mining; Risk management & subsidence engineering: Sustainable development in mining industry. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* t. 24, z. 3/1, Kraków: Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, s. 173–181.
- Yadav i in. 2012 – Yadav, R., Gahalaut, V., Chopra, S. i Shan, B. 2012. Tectonic implications and seismicity triggering during the 2008 Baluchistan, Pakistan earthquake sequence. *Asian Earth Science* 45, s. 167–178.
- Yague-Martinez i in. 2016 – Yague-Martinez, N., Prats-Iraola, P., Member, S., Gonzalez, F.R., Brcic, R., Shau, R. i Member, S. 2016. Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 54, s. 2220–2234.
- Zembaty i in. 2015 – Zembaty, Z., Kokot, S., Bozzoni, F., Scandella, L., Lai, C.G., Kuś, J. i Bobra, P. 2015. A system to mitigate deep mine tremor effects in the design of civil infrastructure. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 74, s. 81–90.

