



## Analiza interferometryczna zmian powierzchni terenu, wywołanych silnym wstrząsem górotworu Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w dniu 13.01.2020 o magnitudzie $M_L=4.0$

### Interferometric analysis of surface displacement caused by mining tremor of 13.01.2020 with magnitude $M = 4.0$ in Upper Silesia Coal Basin

Mgr Karol Kura<sup>\*)</sup>

**Treść:** Przedstawiono zastosowanie techniki satelitarnej interferometrii różnicowej (DInSAR) do monitorowania zmian powierzchni terenu, jakie wystąpiły w wyniku wstrząsu górniczego o energii sejsmicznej  $E = 3 \cdot 10^9 \text{J}$  (magnituda  $M_L=4.0$ ), który miał miejsce 13.01.2020 r. w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym, w południowej części kopalni Budryk. Dla określenia wielkości zmian powierzchni terenu, które miały miejsce przed i po wystąpieniu wstrząsu, zastosowano zobrazenia SAR wykonane przez satelity Sentinel-1. Został przeprowadzony cały proces analizy interferometrycznej, to jest sprawdzono koherencję poszczególnych zobrażeń, wygenerowano 7 interferogramów oraz wyznaczono przemieszczenia powierzchni terenu. Na interferogramie obejmującym czas bezpośrednio po wystąpieniu wstrząsu uwidacznia się bardzo wyraźna niecka obniżeniowa. Maksymalne obniżenie powierzchni wyniosło w tym czasie 35 mm. Kilkanaście dni przed powyższym wstrząsem górotworu obserwowane były również wyniesienia powierzchni terenu na obszarze większym niż sama niecka obniżeniowa. Opracowane wyniki pozwoliły na potwierdzenie możliwości wykorzystania metody satelitarnej interferometrii radarowej, jako narzędzia do szybkiego i precyzyjnego wyznaczania wielkości i zasięgu zmian na powierzchni terenu, powstałych wskutek wystąpienia silnego wstrząsu górniczego.

**Abstract:** The application of the satellite differential interferometry (DInSAR) technique to monitor changes in the terrain surface as a result of mining tremor, with seismic energy  $E = 3 \cdot 10^9 \text{J}$  (local magnitude  $M_L=4.0$ ) has been presented. Above mentioned tremor took place on January 13, 2020 in the Upper Silesian Coal Basin in southern part of Budryk mine. To estimate the magnitude of the terrain surface changes that occurred before and after this tremor, SAR images from Sentinel-1 satellites were used. The whole process of interferometric analysis was carried out - the coherence of individual images was checked, 7 interferograms were generated and the surface displacements were determined. A very clear subsidence trough is visible on the interferogram immediately after the occurrence of analyzed mining tremor. The maximum subsidence of the surface, at that time reached 35 mm. A dozen or so days before the mining tremors, elevations of the land surface were also observed in an area larger than the subsidence basin itself. The developed results allowed to confirm the method of satellite radar interferometry as a tool for quick and precise determination of the size and extent of changes on the surface of the terrain where strong mining tremor occurred.

#### Słowa kluczowe:

wstrząs górniczy, deformacje powierzchni terenu, satelitarna interferometria radarowa, misja Sentinel-1, Górnośląskie Zagłębie Węglowe (GZW)

#### Key words:

mining tremors, terrain surface deformations, satellite radar interferometry, Sentinel-1 mission, Upper Silesian Coal Basin (USCB)

## 1. Wprowadzenie

Obszar Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (GZW) jest aktualnie największym w Europie zagłębiem węgla kamiennego, w którym nadal prowadzona jest działalność górnicza. Powierzchnia GZW poddawana jest ciągłym wpływom i zagrożeniom związanym z podziemną eksploatacją. Są to przede wszystkim deformacje powierzchni terenu, jak i występująca sejsmiczność indukowana. Działalność górnicza prowadzi bowiem do naruszenia równowagi w górotworze, czego konsekwencją są procesy deformacyjne prowadzące do zmiany pierwotnych naprężeń i ich akumulacji. W wyniku gwałtownego uwolnienia zakumulowanej w górotworze energii sprężystej dochodzi do powstawania zjawisk sejsmicznych (Marczak,

Zuberek 1994). Skala energetyczna jest szeroka – od słabych o energii sejsmicznej  $10^2 \text{J}$  do bardzo silnych, gdzie energia przekracza  $10^9 \text{J}$ . W przypadku silnych wstrząsów może dochodzić do istotnych zmian deformacyjnych w obrębie górotworu, a także powstawania deformacji powierzchni terenu, w postaci jego obniżen. Należy podkreślić, że obszar GZW jest jednym z najbardziej sejsmicznie aktywnych rejonów górniczych na świecie. Epicentra najsilniejszych zaistniałych i zarejestrowanych wstrząsów są związane z kilkoma rejonami, związanymi z różnymi jednostkami strukturalnymi. Charakteryzują się one głębokim zaleganiem pokładów węgla, występowaniem w ich otoczeniu mocnych i grubych kompleksów piaskowców oraz silnie rozwiniętą tektoniką (Stec 2007).

Wstrząsy górnicze indukowane działalnością kopalń, w porównaniu do naturalnych zjawisk sejsmicznych w postaci trzęsień ziemi, charakteryzują się niższą magnitudą,

<sup>\*)</sup> Główny Instytut Górnictwa, Katowice

wyraźnie mniejszą głębokością ognisk wstrząsów (w większości przypadków skorelowaną z głębokością eksploatacji), krótszym czasem trwania wstrząsu, mniejszym zasięgiem wpływów na powierzchnię (Zembaty 2004, Dubiński, Mutke 2011, Mutke 2019). Jednak, mimo że najsilniejsze wstrząsy górotworu w GZW osiągają energię sejsmiczną czasem przekraczającą poziom  $10^9$ J (magnituda  $M_L$  około 4), mogą one wywoływać uszkodzenia w obiektach budowlanych, np. zniszczenie kominów, spadanie dachówek, pęknięcia ścian itp. (Mutke 2019). Doświadczenia światowe wskazują, że w przypadku wystąpienia bardzo silnego wstrząsu górniczego, poza samymi drganiami dynamicznie oddziaływującymi na ludzi i obiekty budowlane, pojawiają się deformacje ciągłe powierzchni terenu (Chen i in. 2007). Porównując jednak deformacje powierzchni powodowane przez trzęsienia ziemi z deformacjami wywołwanymi przez silne wstrząsy górnicze, zasięg zjawiska jest zupełnie inny. W przypadku trzęsień ziemi przemieszczenia powierzchni terenu mogą dochodzić do kilku metrów (Lanari i in. 2004, Lindsey i in. 2015). Natomiast deformacje ciągłe powstałe w wyniku wstrząsu górniczego nie przekraczają kilkudziesięciu milimetrów (Malinowska i in. 2017, Milczarek 2019).

W ostatnich latach opublikowano szereg prac dotyczących relacji pomiędzy sejsmicznością indukowaną przez górnictwo podziemne i jej wpływem na deformacje powierzchni terenu określane z zastosowaniem satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR) (Lindsey i in. 2016, Albano i in. 2017). W rejonie GZW zastosowaniem techniki InSAR do badania i analizy wpływu sejsmiczności indukowanej na powierzchnię terenu, w ostatnich latach zajmowali się między innymi (Kura 2016, Krawczyk, Grzybek 2018, Rudziński i in. 2019). Kura przedstawił analizę interferometryczną zmian powierzchni terenu w rejonie ogniska silnego wstrząsu ( $M_L=3,7$ ), mającego miejsce w dniu 21.11.2014 r. w rejonie ściany 003, w pokładzie 504, w KWK Bielszowice. Analiza ta miała na celu wskazania miejsc szczególnie predysponowanych do wystąpienia ognisk silnych wstrząsów indukowanych robotami górniczymi. Natomiast, Krawczyk i Grzybek zajmowali się korelacją pomiędzy zasięgiem i kształtem niecki obniżeniowej, obliczonej na podstawie zobrażeń SAR z lokalizacją miejsca wystąpienia wstrząsu indukowanego podziemną eksploatacją górniczą. W publikacji Rudziński i in. podjęta została analiza lokalizacji oraz mechanizmu ogniska silnego wstrząsu o magnitudzie  $M_L=4,1$ , jaki wystąpił w KWK Wujek w korelacji z obrazami deformacji terenu wyznaczonymi z zobrażeń satelitarnych misji Sentinel-1.

Celem niniejszego artykułu jest zobrazowanie zmian deformacji powierzchni terenu w strefie epicentralnej bardzo silnego wstrząsu górniczego z dnia 13.01.2020 r. o magnitudzie  $M_L=4$  (energia sejsmiczna  $E=3 \cdot 10^9$ J). Z punktu widzenia predykcji wystąpienia silnego wstrząsu szczególnie interesujące jest śledzenie zmian występujących w okresie poprzedzającym ten wstrząs. Natomiast po jego zaistnieniu zachowanie się górotworu i jego relaksacja objawia się, między innymi, zmianami deformacji powierzchni terenu. Nowe narzędzie, jakim jest obrazowanie powierzchni terenu techniką satelitarną SAR, daje tutaj nowe możliwości obserwacji z dużą częstotliwością zachowania się dużych powierzchni terenu (rzędu kilku kilometrów i większych), które mogą być deformowane wskutek wystąpienia silnych wstrząsów pochodzenia górniczego.

## 2. Charakterystyka wstrząsu z dnia 13.01.2020 r. o magnitudzie $M_L=4.0$

W dniu 13.01.2020 r. o godz. 14:34, w pobliżu miejscowości Orontowice wystąpił bardzo silny wstrząs górotworu o magnitudzie  $M_L=4.0$  (energia sejsmiczna  $E=3 \cdot 10^9$ J - dane

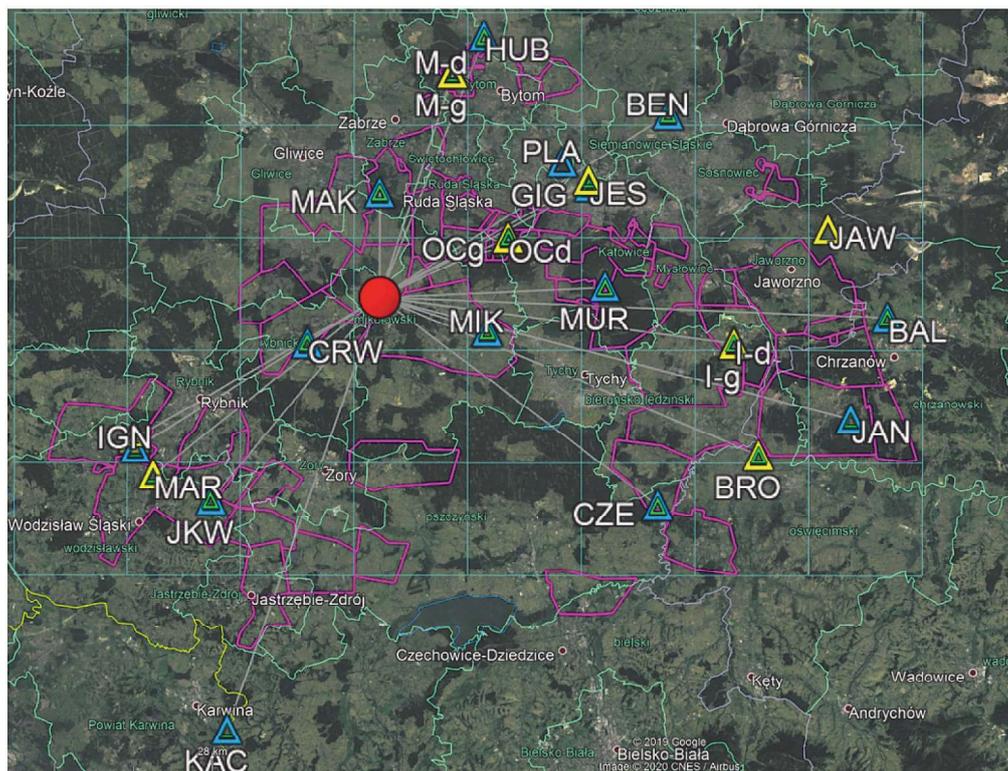
z Górnośląskiej Regionalnej Sieci Sejsmologicznej (GRSS) (<http://www.grss.gig.eu/>). Sieć ta została zmodernizowana w ramach projektu EPOS, co pozwala na wiarygodną lokalizację wszystkich silnych wstrząsów sejsmicznych w GZW o magnitudzie  $M \geq 2$  (Mutke i in. 2019). Wstrząs ten miał miejsce podczas eksploatacji ściany D-2, w pokładzie 358/1, w południowej części kopalni Budryk. Zjawisko to było odczuwalne w całej aglomeracji śląskiej. Epicentrum wstrząsu miało miejsce ok. 500 m na południe od dużej strefy uskokowej Barbara i było zlokalizowane nad przedmiotową ścianą D-2. Lokalizacja wstrząsu na tle mapy powierzchni terenu GZW oraz rozmieszczenie stanowisk sejsmicznych sieci GRSS przedstawiono na rys 1. Stanowiska sieci GRSS otaczają epicentrum wstrząsu, co jest jednym z warunków poprawnej lokalizacji ogniska wstrząsu.

### 2.1. Techniki satelitarnego obrazowania radarowego

Misja Sentinel-1 to projekt europejskich satelitów radarowych, w ramach inicjatywy Copernicus realizowanej przez Komisję Europejską i Europejską Agencję Kosmiczną (ESA). Program Copernicus, poprzednio znany jako GMES (Global Monitoring for Environment and Security), ma na celu świadczenie usług informacyjnych związanych ze środowiskiem naturalnym i bezpieczeństwem. Wykorzystuje w tym celu dane pochodzące z satelitów do obserwacji Ziemi i z czujników naziemnych. Satelity misji Sentinel-1 są kontynuacją wcześniejszych europejskich misji radarowych, takich jak ERS-1 i ERS-2 czy Envisat. Jednakże w odróżnieniu od wcześniejszych misji ESA, misja Sentinel, nie ma charakteru naukowego, lecz operacyjny, to jest systematycznego i rutynowego dostarczania danych teledetekcyjnych.

Misja Sentinel-1 obejmuje konstelację dwóch satelitów okołobiegunowych: Sentinel-1A wyniesiony na orbitę 3 kwietnia 2014 r. oraz bliźniaczy satelita Sentinel-1B wyniesiony na orbitę 25 kwietnia 2016 r. Satelity przeznaczone są do obrazowania radarowego SAR (Synthetic Aperture Radar). Dzięki temu, że wystrzelono dwa bliźniacze satelity „A” i „B”, które są zlokalizowane na tej samej orbicie po przeciwnych stronach, zagwarantowano krótki czas rewizyty. Dla obszaru Polski, czas rewizyty dla tego samego fragmentu terenu wynosi 6 dni (De Zan, Guarneri 2006). Na pokładzie każdego satelity znajduje się radar z syntetyczną aperturą, pracujący w paśmie C, o częstotliwości 5,405 GHz. Rejestracja zobrażeń odbywa się dzięki elektronicznemu sterowaniu wiązką sygnału, wysyłanego przez radar znajdujący się na pokładzie satelity. Wiązka emitowana przez antenę radaru jest spójna. Promieniowanie, docierając do obiektów terenu, wchodzi z nimi w różnego rodzaju interakcje – może ono ulec odbiciu, absorpcji lub transmisji. Podczas rejestracji fal odbitych od powierzchni Ziemi zapisywane są informacje (w obrazie radarowym), o intensywności odbicia fali oraz jej fazie w chwili rejestracji przez odbiornik. Wartości amplitudy i fazy sygnału powrotnego znane są dla każdego piksela obrazu radarowego. W przypadku serii satelitów Sentinel-1 rejestracja może odbywać się w czterech trybach;

- *Stripmap* (SM) – dla pasa o szerokości 80 km pozyskiwane są dane w rozdzielczości 5 m. Ten tryb wykorzystywany jest tylko na potrzeby zarządzania kryzysowego,
- *Interferometric Wide swath* (IW) – dane w rozdzielczości 5 x 20 metrów pozyskiwane są dla pasa o szerokości 250 km. To tryb wystarczający dla większości użytkowników potrzebujących danych dla obszarów lądowych,
- *Extra-Wide swath* (EW) – kosztem słabszej rozdzielczości (20 x 40 metrów) dane pozyskiwane są dla pasa o szerokości aż 400 km. Taki tryb jest stosowany głównie w pomiarach oceanów oraz obszarów polarnych,



● - epicentrum wstrząsu    △ △ △ - stanowiska sejsmiczne sieci GRSS    [pink outline] - obszary górnicze kopalń węgla kamiennego

**Rys 1.** Lokalizacja epicentrum wstrząsu z dnia 13.01.2020 r. o energii  $E=3 \cdot 10^9$  J na tle mapy powierzchni terenu, granic obszarów górniczych i stacji sejsmicznych sieci sejsmologicznej GRSS

**Fig 1.** Location of the mine tremor epicenter of 13.01.2020 with energy  $E=3 \cdot 10^9$  J against the background of the map of the surface, borders of mining areas and seismic stations

- *Wave* (WV) – to tryb podobny do tych stosowanych w aparatach Envisat i ERS, choć wyróżnia go wyższa rozdzielczość. Dane pozyskiwane są dla obszarów o wymiarach  $20 \times 20$  km w rozdzielczości  $5 \times 5$  m. Tryb stosowany jest na ogół na otwartych oceanach.

Podstawowym trybem rejestracji dla obszarów lądowych satelity Sentinel-1 jest *Interferometric Wide swath* (IW), przy zastosowaniu metody progresywnego skanowania TOPS (Terrain Observation by Progressive Scans) (De Zan, Guarnieri 2006). Metoda ta umożliwia rejestrację szerokiego pasa obrazowania o długości 250 km i rozdzielczości sytuacyjnej  $5 \text{ m} \times 20 \text{ m}$  każdy (Yagüe-Martínez i in. 2016). Rejestracja odbywa się impulsowo dla 3 pasów IW1, IW2, IW3 (ang. *sub-swath*), przy wykorzystaniu ruchomej anteny, która kieruje wiązkę fali radarowej w kierunku azymutu, a ruch wiązki następuje od tyłu do przodu, w kierunku przelotu satelity. Dzięki takiemu sposobowi rejestracji obrazowana jest znacznie, większa powierzchnia terenu przy zachowaniu dobrej rozdzielczości terenowej (25 m), w porównaniu z innymi trybami rejestracji zobrazowań. Progresywne skanowanie TOPS po raz pierwszy było testowane eksperymentalnie w satelitach TerraSAR-X (Scheiber i in. 2010, Mittermayer i in. 2010, Meta i in. 2010) i RADARSAT-2 (Davidson i in. 2013, Geudtner 2014).

Najistotniejszą zaletą zobrazowań z satelitów radarowych jest możliwość obrazowania w dowolnych warunkach pogodowych czy oświetleniowych, a więc również w nocy oraz przy pełnym zachmurzeniu. Użyteczność tej cechy ujawnia się w zarządzaniu kryzysowym, np. przy wyznaczeniu zasięgu fali powodziowej, gdzie niezmiernie ważny jest czas

pozyskania zobrazowań. Stosowanie klasycznych zobrazowań optycznych często nie zdaje egzaminu, gdyż podtopiony teren często spowity jest gęstą warstwą chmur, co znacznie utrudnia pozyskanie odpowiedniego zobrazowania. Zobrazowania misji Sentinel-1 przydają się także w monitorowaniu środowisk lądowych. Pozwalają np. śledzić deforestację czy procesy urbanizacyjne. Dane radarowe doskonale sprawdzają się w monitorowaniu oceanów. Dobrze widoczne są na nich statki, góry lodowe czy zasięg pokrywy lodowej, a dzięki informacji o szorstkości powierzchni mórz i oceanów możliwe jest pozyskiwanie informacji o plamach oleju.

Radar Sentinela-1 dostarcza jednak nie tylko zobrazowań. Dzięki wykorzystaniu satelitarnej technologii interferometrii radarowej (InSAR) możliwy staje się precyzyjny pomiar nawet niewielkich deformacji terenu. Wykorzystywane jest to np. w monitoringu geodezyjnym rozległych obszarów czy w badaniu skutków trzęsień ziemi.

Interferometria radarowa (InSAR – Interferometry Synthetic Aperture Radar), która została opracowana w latach 90. XX wieku, jest najczęściej stosowaną metodą do przetwarzania satelitarnych zobrazowań radarowych. Rozwój radarowej interferometrii satelitarnej spowodował, że znalazła ona zastosowanie w wielu dziedzinach: tworzenie modeli numerycznych terenu (DEM), obliczanie obniżek terenu, monitoring osuwisk, ocena zasięgu fali powodziowej, zmian w pokrywie lodowcowej czy roślinności (Gabriel i in. 1989, Massonnet, Adragna 1993, Perski 1999, Ilieva i in. 2019). Satelitarna interferometria radarowa pozwala na obserwację zmian na powierzchni terenu w ściśle określonym przedziale czasowym (jednoczasowo), na bardzo dużym

obszarze. Metoda ta pozwala na detekcję przemieszczeń terenu z dokładnością rzędu od kilku milimetrów do kilku centymetrów, w zależności od zastosowanych algorytmów. Idea metody Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) polega na przetworzeniu dwóch mikrofalowych obrazów radarowych dla tego samego obszaru, zarejestrowanych przez system SAR w różnym czasie lub/i z różnych pozycji, jednak z wykorzystaniem tych samych długości fal radarowych. Na podstawie różnicy faz powracającego sygnału dla obrazów tego samego obszaru, pozyskanych w różnym czasie, możemy obliczyć deformację terenu (Curlander, McDonough 1991). Dwa obrazy radarowe, po wykonanej kalibracji radiometrycznej i geometrycznej, nakładają się na siebie i dla każdego piksela obliczana jest różnica faz. Rezultatem tych zabiegów jest interferogram składający się z tzw. prążków interferencyjnych, które niosą informację o wielkości i zakresie deformacji powierzchni, jaka zaszła w przedziale czasu pomiędzy wykonaniem użytych obrazów typu SAR. Zmiany w pokryciu terenu np. wegetacja roślin czy pokrywa śnieżna oraz zakłócenia powodowane przez atmosferę ograniczają dokładność pomiaru do centymetrów (Ferretti i in. 2004). Pomimo tych ograniczeń, metoda DInSAR z sukcesem stosowana jest do analizy i oceny skutków wstrząsów, zarówno pochodzenia naturalnego (trzęsienia Ziemi), jak i antropogenicznego, czy też dużych obniżenia terenu. Z początkiem XXI wieku, zastosowanie znalazło nowe podejście do obrazowań SAR, bazujące na jednoczesnej analizie co najmniej kilkudziesięciu scen dla tego samego rejonu. Technika permanentnych rozpraszaczy (PSInSAR, PSI, SqueeSAR) (Ferretti i in. 2000, 2001, 2011) polega na wyodrębnieniu składowych różnicy faz związanych z topografią, przemieszczeniem terenu, zakłóceniami atmosferycznymi, niepewnością danych o orbicie satelity. Po analizie tak skomplikowanego zbioru danych wytypowane zostają piksele obrazu, które cechują się stabilnością w czasie, dzięki czemu możliwe jest obliczenie poprawek atmosferycznych. Detekcja zmian powierzchni terenu może być obliczona z dokładnością milimetrową. Rezultatem tak przeprowadzonej analizy jest zbiór tysięcy punktów PS (ang. *Permanent Scatterers*) zawierających informację o względnych przemieszczeniach dla każdej sceny oraz informację o średniej prędkości ruchu w kierunku obrazowania satelity. Technika ta jest powszechnie stosowana do rejestracji ciągłych deformacji powierzchni. Jednakże w przypadku szybkiego lub nieliniowego charakteru zmian powierzchni terenu, np. wywołanej przez wstrząsy górnicze lub przez niecki osiadań spowodowane przez eksploatację górniczą, technika ta nie rejestruje zmian.

## 2.2. Dane satelitarne użyte do analizy

Do obliczenia deformacji w obszarze epicentralnym wstrząsu użyto obrazowania radarowe Sentinel-1 w formacie SLC (ang. *Single Look Complex*). Produkt ten zawiera informacje o amplitudzie oraz o fazie fali elektromagnetycznej. Ze względu na wielkość rejonu wystąpienia wstrząsu oraz dla przyspieszenia czasu obliczeń, zakres przetwarzania obrazowań ograniczono do jednego pasa z zarejestrowanej sceny radarowej – IW2. Z platformy Copernicus Open Access Hub pobrano 14 scen radarowych, które zostały pozyskane przez satelitę Sentinel-1 na ścieżce 175 przed i zaraz po wystąpieniu analizowanego wstrząsu. Obrazowania radarowe zostały pozyskane podczas ruchu wznoszącego się satelity (ang. *ascending*), czyli od południa do północy kuli ziemskiej. Informacje o wykorzystanych scenach radarowych zawarto w tabeli 1.

**Tabela 1. Zestawienie obrazowań Sentinel -1, które zostały użyte w analizie**

**Table 1. List of Sentinel -1 images that were used in the analysis**

Lp.	Data rejestracji sceny	Kierunek lotu satelity	Nr ścieżki	Orbita
1	26-11-2019 08-12-2019	wschodząca	175	19101 19276
2	08-12-2019 20-12-2019	wschodząca	175	19276 19451
3	20-12-2019 01-01-2020	wschodząca	175	19451 19626
4	01-01-2020 13-01-2020	wschodząca	175	19626 19801
5	13-01-2020 25-01-2020	wschodząca	175	19801 19976
6	25-01-2020 06-02-2020	wschodząca	175	199976 20152
7	06-02-2020 18-02-2020	wschodząca	175	20152 20326

## 3. Metodyka analizy DInSAR

Do analizy zmian powierzchni terenu w rejonie wystąpienia wstrząsu z dnia 13.01.2020. o magnitudzie  $M_s=4$ , zastosowano metodę klasycznej interferometrii różnicowej DInSAR. Użycie tej metody zostało podyktowane nieliniowym charakterem ruchów powierzchni terenu oraz nagłą i nieprzewidywalną dynamiką zmian powierzchni terenu, które zostały wywołane przez wstrząs. Metoda bazująca na permanentnych rozpraszaczach (PSI), gdzie spełniony musi być warunek liniowości zjawiska, nie znajduje w tym przypadku zastosowania.

Poniżej przedstawiono etapy obliczania wielkości obniżenia powierzchni terenu w technice DInSAR:

1. Współrejestracja (ang. *coregistration*) obrazowań radarowych, która polega na przestrzennym dopasowaniu do siebie pikseli zdjęcia głównego (ang. *master*) i ze zdjęciem podrzędnym (ang. *slave*). Proces współrejestracji bazuje na danych o precyzyjnych orbitach satelitów, wykonujących obrazowania oraz o Numeryczny Model Terenu (NMT) o rozdzielczości 3" (90 m x 90 m), który został pozyskany z Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), (Jarvis i in. 2008).
2. W następnym etapie opracowano interferogram z różnicą faz sygnału, pomiędzy dwoma obrazowaniami SAR, w poszczególnych seriach czasowych (tabl. 1). W etapie tym obliczono również wartość koherencji (spójności) dla fazy sygnału. Wysoka koherencja występuje, gdy obiekty nie zmieniają swojej charakterystyki powierzchniowej, pomiędzy następującymi po sobie rejestracjami obrazowań. Rejonami o wysokim współczynniku koherencji są obszary silnie zurbanizowane, natomiast tereny gdzie występuje silna wegetacja roślin np. uprawy rolne, jak również zbiorniki wodne, to rejonami o bardzo niskiej koherencji. Parametr ten determinuje jakość obliczanego interferogramu. Podczas obliczania interferogramu dla poszczególnych par obrazowań SAR usunięto część fazy sygnału, która wynika z krzywizny Ziemi, a która mogłaby wpłynąć na ostateczne wartości interferogramów.
3. Kolejny krok to wyeliminowanie szumu. W tym celu otrzymany interferogram przefiltrowano metodą Goldsteina (Goldstein 1995, Shanker i Zebker 2007). Efektem przeprowadzonych obliczeń jest usunięcie składowej fazy, która odpowiedzialna jest za topografię terenu.

Otrzymany interferogram różnicowy zawiera informacje o ruchu powierzchni terenu, w kierunku padania wiązki fali radarowej. Informacje te zapisane są w wartości różnicy fazy w zakresie  $\langle 0, 2\pi \rangle$ .

W celu rekonstrukcji fali do pełnej długości, należało przeprowadzić procedurę tzw. rozwinięcia fazy (ang. *phase unwrapping*), którą przeprowadzono w oprogramowaniu SNAPHU (Statistical-Cost, Network-Flow Algorithm for Phase Unwrapping) (Chen, Zebker 2000, 2002) przy zastosowaniu algorytmu Minimum Cost Flow (MCF) (Rodriguez i in. 2005). Stosując znany wzór (1), rozwiniętą długość fali przeliczono na wartości wyrażone w metrach;

$$d_{LOS} = \frac{\lambda \cdot \Delta\phi}{4\pi \cdot \cos\theta} \quad (1)$$

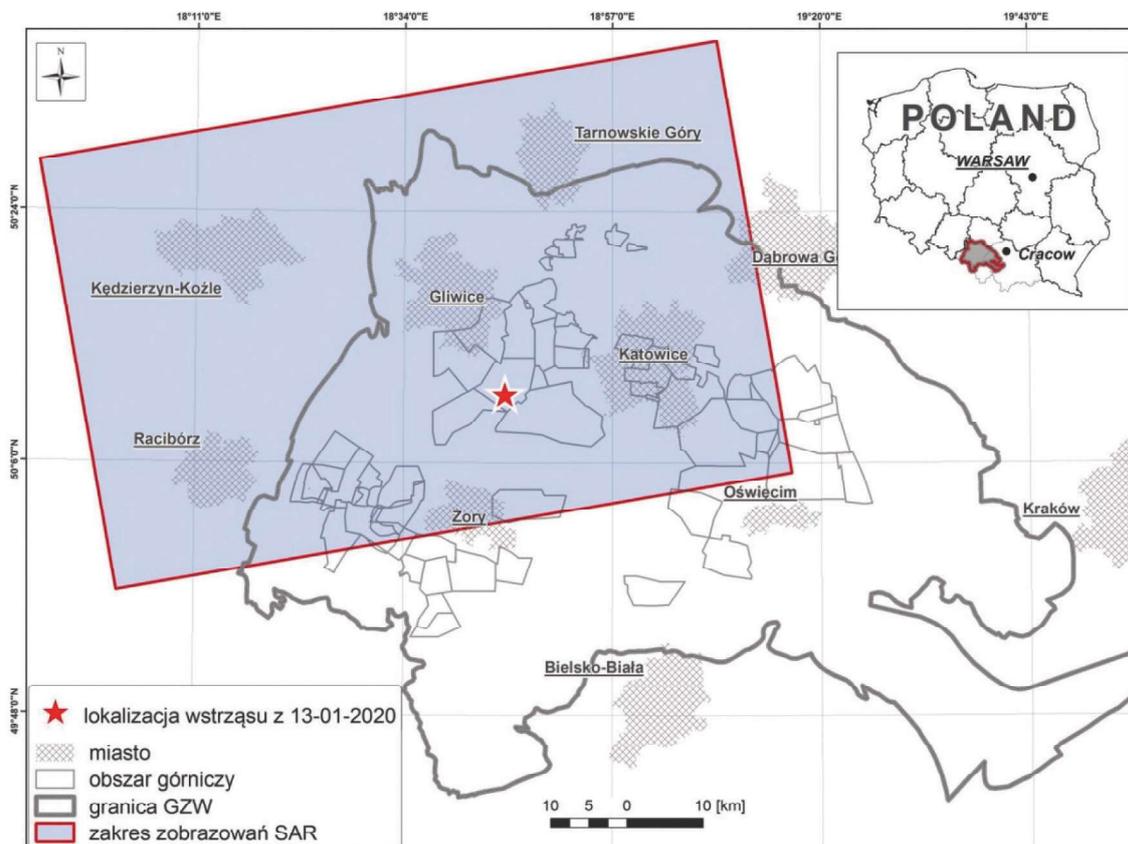
#### 4. Wyniki badań i ich analiza

Dla analizowanego wstrząsu górniczego, który wystąpił dnia 13.01.2020, maksymalna wartość obniżenia, w kierunku lotu satelity, wyniosła **33,3** mm, natomiast maksymalne wyniesienie **27** mm. Obszar niecki osiadania powierzchni w rejonie wystąpienia wstrząsu ma wymiary 1000 m x 750 m i kierunek rozciągłości W-E. Cały analizowany teren to południowa część obszaru górniczego kopalni Budryk. Zakres czasowy analizy obejmuje **36** dni przed i **36** dni po wystąpieniu wstrząsu. Obliczenia dotyczą jednej ścieżki numer 175, przedział czasowy pomiędzy wykonaniem kolejnych zobrażeń wynosi 12 dni. Podstawowe parametry zobrażeń użytych do analizy przedstawiono już w tabeli 1. Rys. 2. pokazuje pokrycie zobrażeń jakie zostały wykorzystane do analizy.

Do analizy wykorzystano 7 interferogramów, które dotyczą różnych okresów czasu. Są one przedstawione na

kolejnych rys. 3A ÷ 3F. Pierwszy interferogram wykonany dla różnicy obrazów z okresu 26.11.-08.12.2019. (rys. 3A), w obszarze kopalni Budryk, czyli ponad miesiąc przed wstrząsem o magnitudzie  $M_L=4$ , wykazuje bardzo niewielkie ruchy obniżające powierzchni terenu rzędu milimetrów zlokalizowane w rejonie eksploatowanej ściany D-2. Zapis tych zmian wynika z faktu prowadzonej eksploatacji i tworzenia się klasycznej niecki osiadania. Dla zobrażeń, wykonanych w okresie od 20.12.2019-01.01.2020 (rys. 3B), zarejestrowano osiadania w centralnej części eksploatowanej ściany D-2, gdzie zmiany te wynosiły ok. 17 mm, natomiast na zewnątrz od konturu ściany D-2, dość duży obszar powierzchni podlegał wynoszeniu, którego maksymalne wartości były do 26 mm. Wynoszenie terenu związane jest zapewne z mechanizmem dyatacji (zwiększanie się objętości masywu skalnego), związanego z odkształceniami niesprężystymi i w efekcie przyrostem defektów i mikropęknięć przed wystąpieniem głównego wstrząsu górotworu (Marczak, Zuberek 1994).

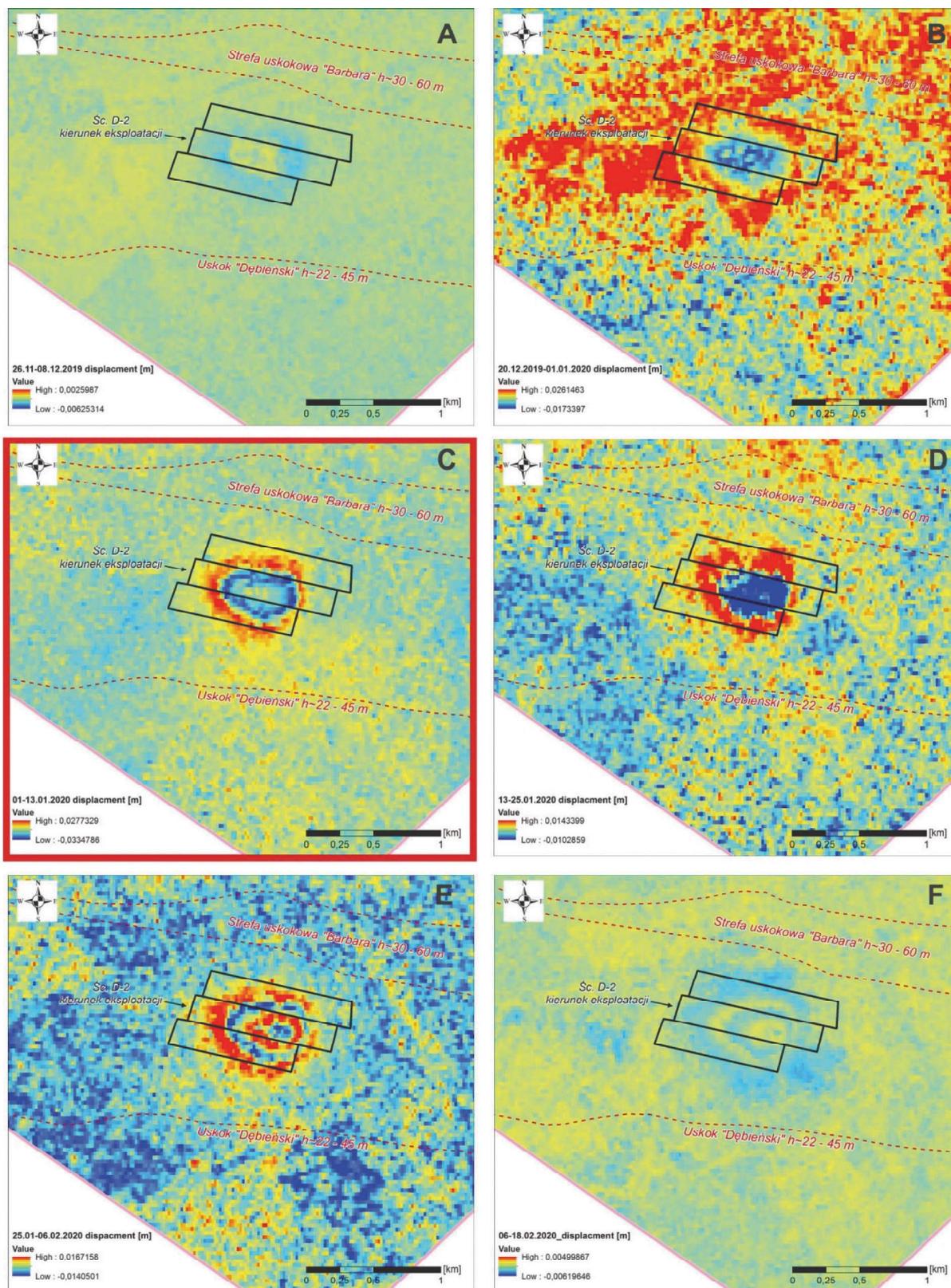
W przedziale czasowym interferogramu wykonanego z zobrażeń między 01.01.–13.01.2020 (rys. 3C), miał miejsce analizowany wstrząs o magnitudzie  $M_L=4$ . Zobrażenie z dnia 13.01.2020 zostało wykonane ok. 2 godzin po zaistnieniu wstrząsu. Taki czas wykonania zdjęć satelitarnych pozwala na interpretację różnicy deformacji powierzchni między okresem 12 dni przed silnym wstrząsem i bezpośrednio po jego zaistnieniu. W przypadku tego zobrażenia, w epicentrum wstrząsu położonym nad ścianą D-2, uwidaczniają się bardzo wyraźnie prążki interferometryczne wskazujące na rejon, gdzie następowało bardzo szybkie obniżanie się powierzchni terenu, które zostało wywołane wystąpieniem analizowanego wstrząsu. Najwyższe wartości obniżenia lokują się w środkowej części aktywnego skłonu niecki osiadań i to właśnie w tym miejscu znajduje się epicentrum zaistniałego



Rys 2. Pokrycie zobrażeń SAR zastosowanych do analizy  
Fig 2. Coverage of SAR images used for the analysis

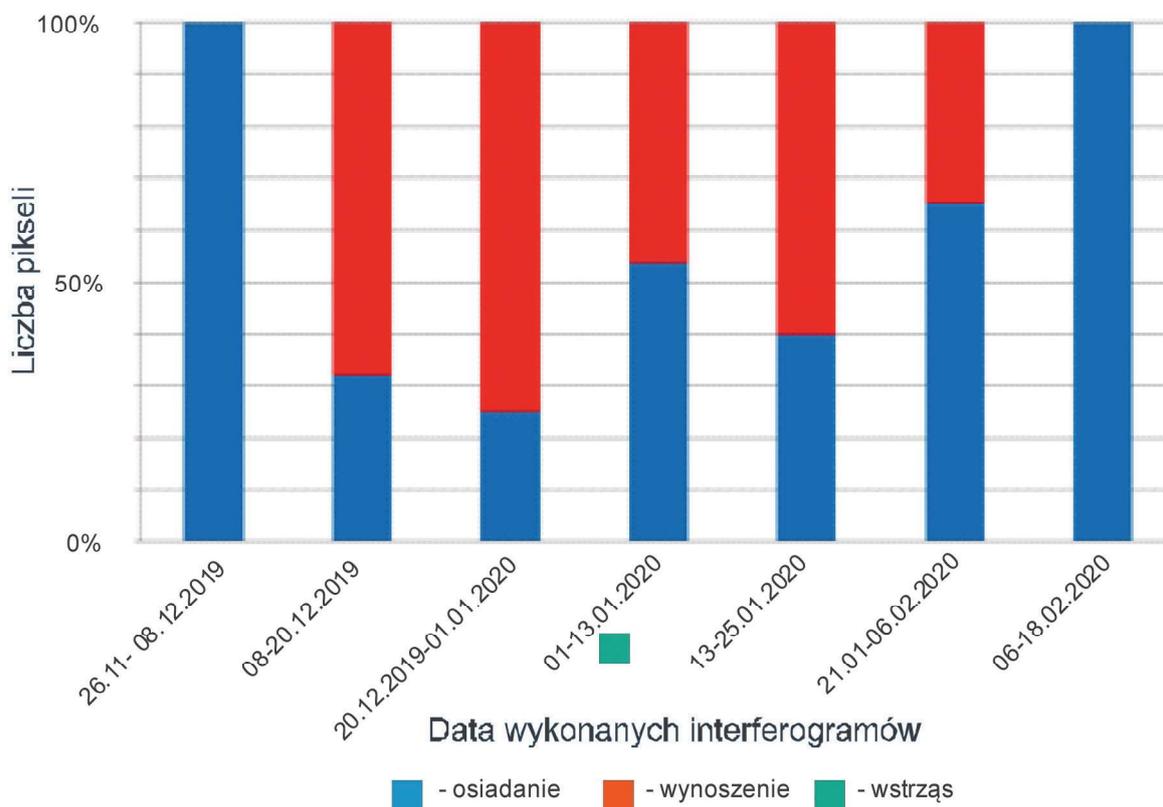
wstrząsu. Maksymalne obniżenia spowodowane wstrząsem jakie wystąpiły w tym czasie wynoszą 35 mm. Obraz zmian w pozostałych częściach interferogramu jest stabilny z niewielkim zakresem deformacji rzędu milimetrów.

Dla interferogramu wykonanego w okresie 13.01 - 25.01.2020, a więc 2 godziny po wystąpieniu wstrząsu i do 12 dni po wstrząsie (rys. 3D), układ i obszar obniżień i wyniesień powierzchni jest podobny jak poprzedni, przy



OBJAŚNIENIA; - krawędzie eksploatacyjne - Śc. D-2, - obszar górniczy, - uskoki

Rys. 3A-3F. Mapy wartości osiadania powierzchni terenu przed i po wystąpieniu wstrząsu 13.01.2020 o magnitudzie  $M_L=4$   
 Fig. 3A-3F. Maps of the value of subsidence of the surface area before and after the occurrence of the magnitude 4.0 mine tremor of January 13, 2020



Rys 4. Liczba pikseli „wynoszonych” i „obniżanych” dla interferogramów w poszczególnych przedziałach czasu  
 Fig 4. The number of „elevated” and „lowered” pixels for interferograms in individual time intervals

czym są one już prawie trzykrotnie mniejsze. Obniżenia, które wystąpiły w tym czasie w centrum obszaru nad ścianą D-2 wynoszą maksymalnie 10 mm. Dla kolejnego interferogramu za okres 25.01 - 06.02.2020 (rys. 3E) widoczne są bardzo niewielkie ruchy obniżające (ok. 10 mm), które występują jeszcze na sklonie niecki oraz w rejonie wystąpienia wstrząsu. W przypadku ostatniego interferogramu z okresu 06.02-18.02.2020 (rys. 3F) po wstrząsie, w obszarze epicentralnym występują już tylko kilkumilimetrowe osiadania terenu. Obraz interferometryczny po 36 dniach od wystąpienia wstrząsu stabilizuje się i jest typowy dla klasycznej niecki osiadania. Dynamika zmian powierzchni powraca do sytuacji, jaka była miesiąc przed wstrząsem.

W badaniach przeprowadzono również analizę rastrową otrzymanych interferogramów. Analiza ta przebiegała pod kątem, klasyfikacji pikseli, to jest na piksele o wartościach dodatnich i ujemnych. Dzięki temu podejściu, wykazano stosunek pikseli „wynoszonych” do pikseli „obniżanych” dla poszczególnych zobrażeń czasowych (rys. 4).

Należy zauważyć, że na 36 dni przed wystąpieniem wstrząsu wszystkie piksele mają wartości obniżające oraz, że na tę sytuację wpływ miały jedynie procesy tworzenia klasycznej niecki osiadania. Na 24 dni przed wstrząsem stosunek pikseli obniżanych do wynoszonych wynosi 30÷70 %, a na 12 dni 25÷75% i jest to okres, w którym najwięcej pikseli wykazuje ruch wynoszenia. Wyraźna zmiana w zobrazeniach widoczna jest w okresie 01-13.01.2020, w którym w dniu 13.01.2020 miał miejsce analizowany silny wstrząs o  $M_L=4$ . W okresie tym stosunek pikseli wynosi 55÷45% i przeważają piksele obniżające terenu. W tym obrazie deformacji powierzchni dominują procesy związane z szybkim osiadaniem powierzchni w strefie epicentralnej wstrząsu, wywołane zaistnieniem nagłej deformacji

nieciągłej w masywie skalnym skutkującej wystąpieniem silnego wstrząsu górotworu. Na kolejnych zobrazeniach, a więc po 12 dniach od wystąpienia wstrząsu stosunek ten zmienia się 40÷60%, by po 24 dniach osiągnąć 65÷35. Potwierdza to, że ma miejsce stabilizacja procesu deformacji górotworu po zaistnieniu silnego wstrząsu sejsmicznego. Zaobserwowane zmiany deformacji powierzchni terenu wskazują, że przed wstrząsem piksele mają trend wynoszenia, a bezpośrednio po wstrząsie trend ten się odwraca, na korzyść pikseli wskazujących na osiadanie o największych amplitudach, aby ostatecznie powrócić do sytuacji na 36 dni przed wstrząsem, gdzie większość pikseli miała charakter osiadający, o niewielkich amplitudach przemieszczenia, charakterystyczny dla tworzenia się eksploatacyjnej niecki osiadania powierzchni.

#### 4. Wnioski

1. Wykazano możliwość wykorzystania pomiarów satelitarnych wykonanych przez satelity Sentinel-1 do obrazowania zmian zachodzących w procesie deformacji powierzchni terenu, jakie zostały wywołane przez wystąpienie bardzo silnego wstrząsu górnictwa o magnitudzie  $M_L=4.0$ .
2. Dokonana analiza wyników uzyskanych z zastosowaniem metody różnicowej interferometrii satelitarnej (DInSAR) potwierdza, że daje ona najlepsze rezultaty w przypadku zjawisk o nieliniowym charakterze ruchów powierzchni oraz pojawiających się w sposób nagły.
3. Szczegółowa analiza 7 interferogramów wybranych spośród 14 zobrażeń radarowych z misji Sentinel-1 wskazuje, że wybrany przedział czasu od 36 dni przed wystąpieniem wstrząsu i do 36 dni po jego wystąpieniu

- jest odpowiedni dla interpretacji zmian zachodzących w procesie deformacji powierzchni terenu.
4. Analiza interferometryczna dynamiki zmian powierzchni w rejonie epicentrum wstrząsu zlokalizowanego nad ścianą węglową D-2 w pokładzie 358/1 kopalni Budryk wykazała, że największe przyrosty obniżeń terenu wystąpiły bezpośrednio po wstrząsie i wyniosły do 34 mm. Ponadto wskazała, że epicentrum wstrząsu było zlokalizowane w aktywnej części niecki osiadań powierzchni.
  5. Na miesiąc przed wystąpieniem analizowanego wstrząsu, obniżenia terenu spowodowane tworzeniem się klasycznej niecki osiadania osiągały co najwyżej kilka milimetrów (w granicach błędu metody).
  6. Po okresie około 1 miesiąca od wystąpienia wstrząsu, dynamika zmian deformacji na powierzchni terenu uległa spowolnieniu i stała się podobna do obserwowanej 1 miesiąc przed wystąpieniem wstrząsu.
  7. Przeprowadzona analiza stosunku pikseli, mających wartości dodatnie i ujemne, dla otrzymanych interferogramów wskazuje, że 12 i 24 dni przed wstrząsem, większość pikseli ma wartości dodatnie, czyli powierzchnia terenu ulega wynoszeniu, natomiast dla interferogramów wykonanych bezpośrednio po wstrząsie zmienia się to na korzyść pikseli ujemnych, co oznacza, że powierzchnia terenu osiada, zdecydowanie najsilniej bezpośrednio po zaistnieniu przedmiotowego wstrząsu o magnitudzie  $M=4.0$ .
  8. Przeprowadzone badania i interpretacja uzyskanych wyników pozwalają stwierdzić, że metoda satelitarnej interferometrii radarowej DinSAR może być stosowana jako efektywne narzędzie do szybkiego i precyzyjnego wyznaczania wielkości i zasięgu zmian zachodzących na powierzchni terenu w strefie wystąpienia silnego wstrząsu górniczego.

## Literatura

- ALBANO M., POLCARI M., BIGNAMI C., MORO M., SAROLI M., STRAMONDO S. 2017 - Did anthropogenic activities trigger the 3 April 2017 Mw 6.5 Botswana earthquake?. *Remote Sensing*, Tom 9(10), p. 1028.  
<http://www.grss.gig.eu/pl/>. [Online].
- BURGMANN R., FERRETTI A., HILLEY G., NOVALI F., PRATI C. L. A. 2004 - InSAR permanent scatterer analysis reveals ups and downs in San FRANCISCO BAY AREA. *TOM* 85(34), PP. 317-324.
- CHEN C. W., ZEBKER H. A. 2000 - Network approaches to two-dimensional phase unwrapping: intractability and two new algorithms. *Journal of the Optical Society of America A*, Tom 17, pp. 401-414.
- CHEN C.W., ZEBKER H.A. 2002 - Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models. *EEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Tom 40, pp. 1709-1719.
- CHEN J.L., WILSON C.R., TAPLEY B.D., GRAND S. 2007 - RACE detects coseismic and postseismic deformation from the Sumatra-Andaman earthquake. *Geophysical Research Letters*, Tom 34(13).
- CURLANDER J.C., MCDONOUGH R.N. 1991 - Synthetic aperture radar. New York: John Wiley and Sons.
- DAVIDSON G., MANTLE V., RABUS B., WILLIAMS D., GEUDTNER D. 2013 - Implementation of TOPS mode on RADARSAT-2 in support of the Sentinel-1 mission. Edinburgh.
- DE ZAN F., GUARNIERI A.M. 2006 - TOPSAR: Terrain observation by progressive scans. brak miejsca, brak nazwiska, pp. 2352-2360.
- DUBIŃSKI J., MUTKE G. 2011 - Selected relations between earthquakes and mining seismic events recorded in Polish coal mines. *Proceedings of 22nd World Mining Congress Istanbul-2011*. Editor Dr Sinasi Eskikaya. Volume-1. pp. 350-357.
- FERRETTI A., FUMAGALLI A., NOVALI F., PRATI C., ROCCA F., RUCCI A. 2011 - A new algorithm for processing. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Tom 49, p. 3460-3470.
- FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. 2000 - Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Tom 38, p. 2202-2212.
- FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. 2001 - Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, Tom 39, pp. 8-20.
- GABRIEL A.K., GOLDSTEIN R.M., ZEBKER, H.A. 1989 - Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Tom 94(B7), pp. 9183-9191.
- GEUDTNER D. 2014 - Implementation of the TOPS mode on RADARSAT-2 in support of the Copernicus Sentinel-1 mission: RADARSAT-2 TOPS SAR Interferometry (InSAR) scene pair data acquisitions, Paris: European Space Agency.
- GOLDSTEIN R. 1995 - Atmospheric limitations to repeat-track radar interferometry. *Geophysical research letters*, Tom 22(18), pp. 2517-2520.
- ILIEVA M., POLANIN P., BORKOWSKI A., GRUHLIK P., SMOLAK K., KOWALSKI A., ROHM W. 2019 - Mining Deformation Life Cycle in the Light of InSAR and Deformation Models. *Remote Sensing*, 11(7) (745).
- JARVIS A., REUTER H. I., NELSON A., GUEVARA E. 2008 - <http://srnm.csi.cgiar.org>. [Online]  
Available at: <http://srnm.csi.cgiar.org>
- KRAWCZYK A., GRZYBEK R. 2018 - An evaluation of processing InSAR Sentinel-1A/B data for correlation of mining subsidence with mining induced tremors in the Upper Silesian Coal Basin (Poland). In *E3S Web of Conferences*, Tom 26, p. 00003.
- KURA K. 2016 - Analysis of the usage satellite interferometry technique (InSAR) in terms of mining-induced changes in land surface. Sofia, SEG, pp. 815-822.
- LANARI R., MORA O., MANUNTA M., MALLORQUÍ J. J., BERARDINO P., SANSOSTI E. 2004 - A small-baseline approach for investigating deformations on full-resolution differential SAR interferograms. *EEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Tom 42(7), pp. 1377-1386.
- LINDSEY E.O., NATSUAKI R., XU X., SHIMADAM., HASHIMOTO M., MELGAR D., SANDWELL D.T. 2016 - Line-of-sight displacement from ALOS-2 interferometry: Mw 7.8 Gorkha Earthquake and Mw 7.3 aftershock. *Geophysical Research Letters*, Tom 42(16), pp. 6655-6661.
- MALINOWSKA A., WITKOWSKI W., GUZY A., HEJMANOWSKI R. 2017 - Badania dynamicznych zjawisk przemieszczeniowych z wykorzystaniem radarowych obrazowań satelitarnych-Sentinel. *Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN*, Issue 101, pp. 229-246.
- MARCAK H., ZUBEREK W.M. 1994 - *Geofizyka górnicza. brak miejsca: Śląskie Wydaw. Techniczne*.
- MASSONNET D., ADRAGNA F. 1993 - A full-scale validation of Radar Interferometry with ERS-1: the Landers earthquake. *Earth Observation Quarterly*, Tom 41, pp. 1-5.
- METAA., MITTERMAYER J., PRATS P., SCHEIBER R., STEINBRECHER U. 2010 - TOPS imaging with TerraSAR-X: Mode design and performance analysis. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 48(2), pp. 759-769.
- MILCZAREK W. 2019 - Investigation of post induced seismic deformation of the 2016 MW 4.2 Tarnovek Poland mining tremor based on DInSAR and SBAS method. *Acta Geodyn. Geomater*, Tom 2, pp. 183-193.
- MITTERMAYER J. i inni 2010 - TOPS Sentinel-1 and TerraSAR-X processor comparison based on simulated data. *Proc. 8th EUSAR*, pp. 1-4.
- MUTKE G. 2019 - Oddziaływania górnich wstrząsów sejsmicznych na powierzchnię. *Wydawnictwo GIG. Monografia*, str. 189.
- MUTKE G., KOTYRBA A., LURKA A., OLSZEWSKA D., DYKOWSKI P., BORKOWSKI A., BARAŃSKA A. 2019 - Upper Silesian Geophysical Observation System A unit of the EPOS project. *Journal of Sustainable Mining*, Tom 18(4), pp. 198-207.
- MUTKE G., DUBIŃSKI J. 2016 - Seismic intensity induced by mining in relations to weak earthquakes. *Proc. of the 24th World Mining Congress. Part. Underground Mining. Rio de Janeiro*, pp. 399 - 407.
- PERSKI Z. 1999 - Osiadania terenu GZW pod wpływem eksploatacji pod-

- ziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR)... „Przeгляд Górnicy”, Tom 47, pp. 171-174.
- RODRIGUEZ E., MORRIS C.S., BELZ J.E., CHAPIN E.C., MARTIN J.M., DAFFER W., HENSLEY S. 2005 - An Assessment of the SRTM Topographic Products, Pasadena: Jet Propulsion Laboratory.
- RUDZIŃSKI Ł., MIREK K., MIREK J. 2019 - Rapid ground deformation corresponding to a mining-induced seismic event followed by a massive collapse. *Natural Hazards*, Tom 96(1), pp. 461-471.
- SCHEIBER R., WOLLSTADT S., SAUER S., MALZ E., MITTERMAYER J., PRATS P., ATTEMA E. 2010 - Sentinel-1 imaging performance verification with TerraSAR-X. *Proc. 8th EUSAR*, pp. 1-4.
- SHANKER P. I ZEBKER H. 2007 - Persistent scatterer selection using maximum likelihood estimation. *Geophysical Research Letters*, Tom 34(22).
- STEC K. 2007 - Characteristics of seismic activity of the Upper Silesian Coal Basin in Poland. *Geophysical Journal International*, Tom 168(2), pp. 757-768.
- TATAR A. 2012 - Odporność dynamiczna obiektów budowlanych w warunkach wstrząsów górniczych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- YAGÜE-MARTÍNEZ N., PRATS-IRAOLA P., GONZALEZ F.R., BRCIC R., SHAU R., GEUDTNER D., BAMLER R. 2016 - Interferometric processing of Sentinel-1 TOPS data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Tom 54(4), pp. 2220-2234.
- ZEBKER H.A. 1986 - Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, Tom 91(B5), pp. 4993-4999.
- ZEMBATY Z. 2004 - Rockburst induced ground motion - a comparative study. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Tom 24(1), pp. 11-23.

Artykuł wpłynął do redakcji – marzec 2020

Artykuł akceptowano do druku – 30.04.2020