

# Badania przemieszczeń powierzchni spowodowanych wstrząsami górniczymi z zastosowaniem satelitarnej interferometrii radarowej na przykładzie LGOM

Analysis of surface displacements caused by mining tremors based on satellite radar interferometry, case study of the Legnica-Glogow Copper District



Mgr inż. Karolina Owczarz\*)



Dr hab. inż. Jan Blachowski\*)

**Treść:** W artykule przedstawiono wyniki obliczeń metodą satelitarnej interferometrii różnicowej (DInSAR) wykonanych dla trzech wstrząsów indukowanych, które wystąpiły na terenach górniczych LGOM. Wybrane do analiz zdarzenia miały magnitudy: 4.8, 4.5 oraz 3.9 i wystąpiły odpowiednio: 26.12.2017 r., 20.07.2018 r. oraz 12.08.2018 r. Do określania potencjalnych zmian na powierzchni w wyniku tych wstrząsów wykorzystano zobrażenia SAR zarejestrowane przez satelity Sentinel-1A i Sentinel-1B bezpośrednio przed i po wystąpieniu wstrząsów. Wyznaczono koherencję, opracowano interferogramy, a następnie wyznaczono przemieszczenia powierzchni w linii widoczności satelity (LOS). Dla wstrząsu o magnitudzie 4.8 obniżenia pionowe (LOS) wyniosły ponad 8 cm, a dla wstrząsu o magnitudzie 4.5 około 7 cm. Dla wstrząsu o najmniejszej magnitudzie nie zidentyfikowano wyraźnego obrazu deformacji na powierzchni. Wyniki posłużyły do analizy wielkości i zasięgu zmian na powierzchni powstałych w wyniku tych zdarzeń, a także do dyskusji na temat przydatności satelitarnej interferometrii radarowej do pozyskiwania wiarygodnych danych o deformacjach powierzchni powodowanych sejsmiką indukowaną działalnością górniczą.

**Abstract:** This paper presents the results of calculations using the differential satellite radar interferometry (DInSAR) method made for three induced shocks that occurred in the LGOM mining areas. The events selected for the analysis had the magnitudes of 4.8, 4.5 and 3.9 and occurred on the 26.12.2017, 20.07.2018 and 12.08.2018 respectively. To identify potential changes on the surface as a result of these shocks, SAR imagery recorded by Sentinel-1A and Sentinel-1B satellites immediately before and after these events was used. In the calculation process: coherence was determined, interferograms were developed, and then surface displacements in the line of the sight (LOS) were determined. For the magnitude 4.8 the vertical movements (LOS) reached - 8 cm, and for a magnitude 4.5 event approx. - 7 cm. For the seismic event with the smallest magnitude deformation, the image could not be identified on the surface. The results were used to analyze the size and extent of changes on the surface resulting from these events, as well as to discuss the usefulness of the satellite radar interferometry method to obtain reliable data on deformations caused by mining induced seismicity.

## Słowa kluczowe:

sejsmika indukowana, satelitarna interferometria radarowa, przemieszczenia powierzchni, górnictwo, Legnicko-Głogowski Okręg Miedziany (LGOM), Polska

## Keywords:

induced seismicity, satellite radar interferometry, surface displacements, mining, Legnica-Glogow Copper District, Poland

## 1. Wprowadzenie

Satelitarna interferometria radarowa jest już ugruntowaną techniką monitorowania ruchów powierzchni Ziemi, która jest zdolna do pomiaru dużych obszarów po konkurencyjnych kosztach i dokładności porównywalnej z innymi technikami pomiarów geodezyjnych (Malenovsky i in. 2012, Gee i in.

2017). Satelity okołoziemskie wyposażone w radar z syntetyczną aperturą (ang. SAR; *Synthetic Aperture Radar*) transmitują fale elektromagnetyczne o odpowiedniej długości w kierunku Ziemi oraz odbierają odbity od powierzchni Ziemi sygnał zawierający informacje, niezbędne do określenia powstałych przemieszczeń (Geudtner i in. 2014). Misja satelitów Sentinel 1 programu Copernicus Europejskiej Agencji Kosmicznej rozpoczęta w 2014 roku spowodowała, że czas rewizyty danego obszaru skrócił się do 6 dni, a dostęp do

\* Politechnika Wroclawska, Wroclaw

obrazów radarowych stał się powszechny. Istotnym obszarem jej zastosowań są badania zmian powierzchni wywołanych eksploatacją górniczą (Cao i in. 2008, Yang i in. 2010, Grzybek 2017, Vervoort i in. 2017, Gee i in. 2017, Milczarek i in. 2017). Ważną cechą satelitarnej interferometrii radarowej jest to, że zobrazowania gromadzone są w sposób ciągły i umożliwiają analizowanie historycznych ruchów powierzchni, w związku z tym znajduje ona zastosowanie w badaniach przemieszczeń powierzchni spowodowanymi sejsmiką indukowaną działalnością górniczą, gdyż umożliwia wykrycie zmian powierzchni na podstawie analizy zobrazowań zarejestrowanych przed i po wystąpieniu wstrząsu (Barba i in. 2016, Thorpe 2017, Keranen i in. 2018).

Sejsmika indukowana zwana również mikrosejsmicznością objawia się jako wstrząs powierzchni powstały w wyniku działalności antropogenicznej, do której zalicza się, m.in.: podziemną i odkrywkową eksploatację złóż surowców, produkcję energii geotermalnej, magazynowanie substancji pod powierzchnią ziemi, pobór wód podziemnych oraz budowę i użytkowanie zbiorników wodnych. Taka działalność może prowadzić do zaburzenia stanu równowagi w otaczającym górotworze, przez co występujące w nim pierwotne naprężenia ulegają zmianie (www.is-epos.eu 2018). Zakumulowana energia ulega wyładowaniu, które wywołuje drganie górotworu, a na powierzchni może spowodować deformacje terenu. Stały monitoring wstrząsów sejsmicznych prowadzony jest m.in. w ramach Światowej Sieci Sejsmograficznej (ang. *Global Seismographic Network*), którą tworzy ponad 150 obserwatoriów geofizycznych i sejsmologicznych rozmieszczonych na całym świecie i połączonych ze sobą siecią telekomunikacyjną (Butler i in. 2011). W obszarach narażonych na występowanie sejsmiki indukowanej zakładane są także lokalne stacje i sieci. W oparciu o zarejestrowane pomiary tworzone są bazy danych zawierające informacje o wstrząsach i charakteryzujących je parametrach, takich jak lokalizacja i magnituda, które stanowią dane dla badań naukowych. Zaletą stacji lokalnych i regionalnych jest większa precyzja wyznaczenia współrzędnych epicentrum wstrząsu, co pozwala na jego korelację z warunkami geologicznymi i górniczymi. Na obszarze Polski wyróżnia się trzy główne obszary, na których występują wstrząsy związane z działalnością antropogeniczną tj.: Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy (eksploatacja złóż rud miedzi), Górnośląskie Zagłębie Węglowe (eksploatacja złóż węgla kamiennego) oraz rejon odkrywkowej eksploatacji złóż węgla brunatnego (Bełchatów - Szczerców). Według danych rejestrowanych w bazie European-Mediterranean Seismological Centre (EMSC) (www.emsc-csem.org 2018) w roku 2017 na terenie Polski miało miejsce 72 wstrząsów, które można zakwalifikować do zdarzeń związanych z sejsmiką indukowaną. Najsilniejszy wstrząs miał magnitudę 4,8. W 2018 roku, do października, miało miejsce 30 wstrząsów, z których najsilniejszy osiągnął magnitudę 4,5.

Liczba prac dotyczących badań wpływu sejsmiki indukowanej podziemną działalnością górniczą na powierzchnię z zastosowaniem satelitarnej interferometrii radarowej jest wciąż niewielka i obejmuje okres ostatnich kilku lat. Analizy w tym zakresie prowadzili do tej pory, wspomniani wyżej: Barba i in. (2016); Thorpe (2017); a także Albano i in. (2017), Krawczyk i Grzybek (2018) oraz Malinowska i in. (2018). W przypadku dwóch pierwszych zespołów badaniami poddano obszary Colorado, Oklahoma, Texas w Stanach Zjednoczonych, gdzie dochodziło do wstrząsów o magnitudzie powyżej 4,0. Wzmoczona aktywność sejsmiczna spowodowana była prowadzeniem na tych terenach szczelinowania hydraulicznego. Do określenia deformacji powierzchni autorzy wykorzystali serie czasowe obrazów radarowych, opracowali modele deformacji oraz na tej podstawie zaproponowali środki

łagodzące sejsmiczność indukowaną. Natomiast zespół trzeci analizował wstrząs o magnitudzie  $M_w = 6.5$ , który miał miejsce w Botswanie 3 kwietnia 2017 roku. Na podstawie analizy interferogramów ze zobrazowań Sentinel-1, geometrii i mechanizmu uskoku należącego do systemu Wielkiego Rowu Wschodnioafrykańskiego (EARS) oraz prowadzonej działalności górniczej – szczelinowania hydraulicznego – stwierdzili, że zarejestrowany wstrząs miał podłoże naturalne. Krawczyk i Grzybek prowadzili badania dotyczące korelacji pomiędzy zasięgiem obniżenia terenu górniczego a lokalizacją epicentrum wstrząsów sejsmicznych indukowanych działalnością górniczą na przykładzie Górnośląskiego Zagłębia Węglowego w Polsce. W badaniach wykorzystali zobrazowania pozyskane z misji Sentinel-1. Z kolei ostatni wymieniony zespół poddał analizie wstrząs indukowany działalnością górniczą, który wystąpił 29 listopada 2016 roku i miał magnitudę  $M_w = 4.5$ . Wstrząs miał miejsce w sąsiedztwie obiektu unieszkodliwiania odpadów wydobywczych „Żelazny Most” w granicach terenów górniczych dolnośląskich kopalń miedzi. W wyniku opracowania sekwencji interferogramów autorzy opracowali model zmian powierzchni w czasie.

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki wstępnych badań nad wykorzystaniem satelitarnej interferometrii radarowej i danych satelitarnych z misji Sentinel-1 do określenia wielkości i zasięgu zmian na powierzchni spowodowanych ingerencją człowieka w górotwór w trakcie prowadzenia działalności górniczej. Podczas badań określono przemieszczenia powierzchni w linii widoczności satelity (ang. *Line of Sight*, LOS) powstałe w wyniku wystąpienia trzech wstrząsów, do których doszło pomiędzy grudniem 2017 roku a sierpniem 2018 roku: 26.12.2017 r., 0.07.2018 r. oraz 12.08.2018 r. na terenie podziemnej eksploatacji miedzi w Polsce. Wstrząsy miały magnitudę od 3.9 do 4.8. Do obliczeń wykorzystano metodę różnicowej satelitarnej interferometrii radarowej (ang. *Differential SAR Interferometry*, DInSAR) oraz zobrazowania satelitarne Sentinel-1.

Artykuł jest zorganizowany w następujący sposób: w sekcji drugiej scharakteryzowano obszar badań oraz dane wejściowe, w sekcji trzeciej omówiono poszczególne etapy związane z przetwarzaniem obrazów radarowych metodą DInSAR, w sekcji czwartej przedstawiono analizę wyników wraz z dyskusją.

## 2. Obszar badań

Na obszar badań wybrano tereny górnicze eksploatacji rud miedzi w województwie dolnośląskim, w południowo-zachodniej Polsce. Jest to jeden z najbardziej intensywnie eksploatowanych obszarów podziemnej działalności górniczej w kraju, a najbardziej, jeśli chodzi o eksploatację złóż surowców metalicznych. Legnicko-Głogowski Okręg Miedziowy (LGOM) stanowi jeden z największych na świecie ośrodków górnictwa i wzbogacania rud miedzi i srebra oraz hutnictwa, rafinacji elektrolitycznej i przetwórstwa miedzi (Pindór 2016). Eksploatowane złoża rud miedzi zalegają monoklinalnie na głębokości od kilkuset metrów do około 1500 m. Minerale miedzi charakteryzują się tym, że mogą występować w trzech głównych odmianach litologicznych skał, tj.: piaszczakach, łupkowcach i węglanach. Rudy miedzi eksploatowane są w trzech podziemnych zakładach górniczych: „Lubin”, „Polkowice-Sierszowice” oraz „Rudna” przez KGHM Polska Miedź S.A, dla których ustanowiono tereny górnicze: Gaworzyce, Głogów Głęboki - Przemysłowy, Sierszowice, Rudna, Polkowice oraz Lubin-Małomice. Łączna powierzchnia terenów górniczych tych kopalń wynosi 2 735,87 km<sup>2</sup> i obejmuje swoim zasięgiem ośrodki miejskie takie jak: Legnica, Lubin, Głogów i Polkowice. W kopalniach,

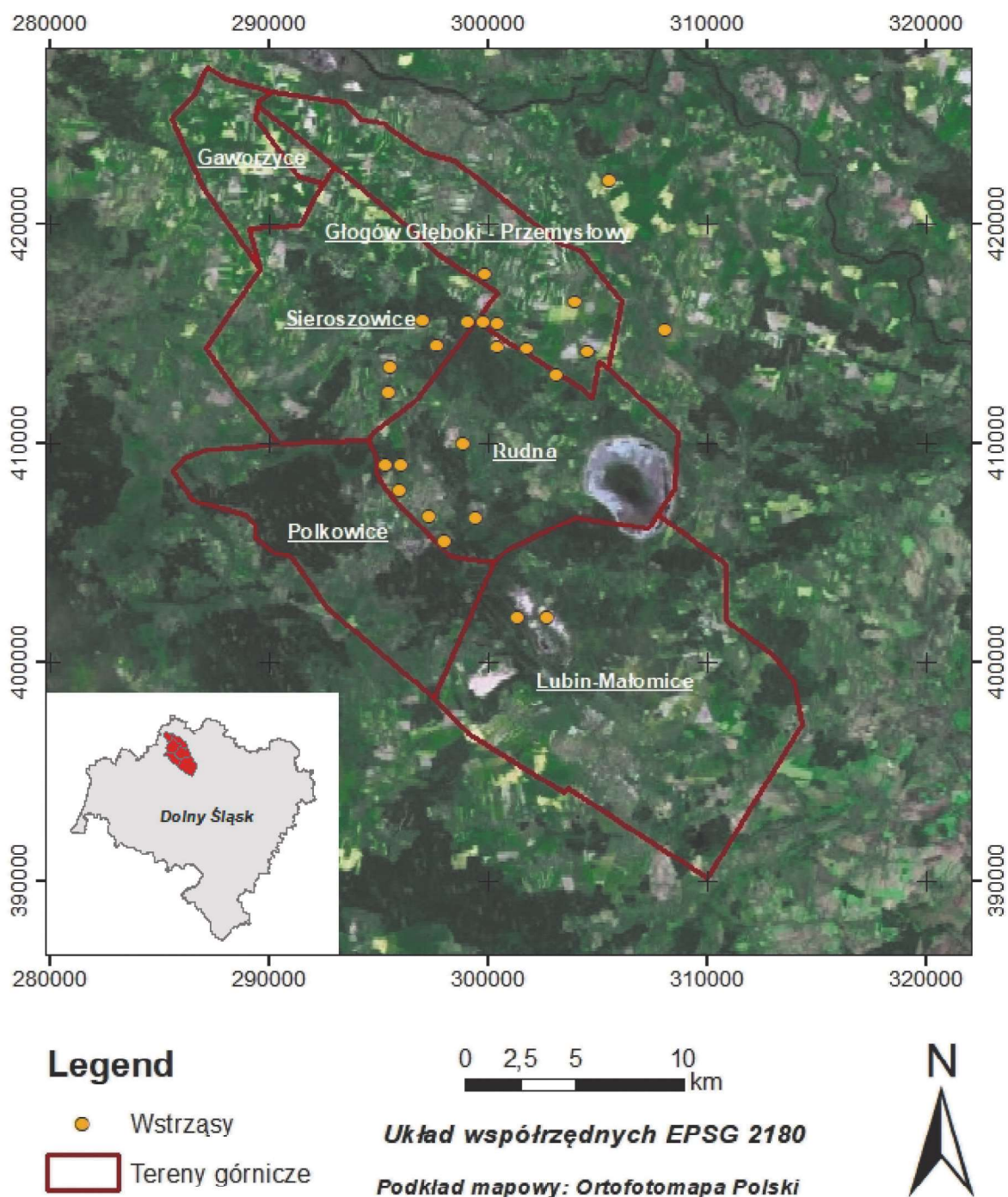
do urabiania złoże rud miedzi, stosuje się systemy komorowo-filarowe eksploatacji z użyciem techniki strzałowej (Konopacka, Zagożdżon 2014). Procesy eksploatacyjne obejmują roboty udostępniające oraz przygotowawcze, podczas których dochodzi do wyznaczenia konturu przewidzianej do eksploatacji parceli złoże siecią wyrobisk korytarzowych, rozcinania calizn komorami i pasami w celu wydzielenia szeregu filarów eksploatacyjnych, urabiania złoże, odstawienia urobku do wysypów oddziałowych, gdzie następuje kruszenie dużych brył, a stamtąd urobek zostaje transportowany do zbiorników przyszybowych i na końcu wyciągami szybowymi trafia na powierzchnię (Zespół wew. KGHM Polska Miedz S.A. 2012).

Eksploatacja rud miedzi wiąże się z zagrożeniami, wśród których znajdują się także wstrząsy sejsmiczne spowodowane

naruszeniem stanu naprężeń w otaczającym górotworze. Mogą one powodować straty materialne i stanowić zagrożenie dla życia ludzkiego (wstrząs z 21 listopada 2016 roku spowodował śmierć 8 górników (Malinowska i in. 2018).

Na podstawie analizy danych gromadzonych w bazach danych EMSC stwierdzono, że w okresie od 01.01.2015 r. do 01.10.2018 r. na terenie LGOM wystąpiło 166 wstrząsów sejsmicznych o magnitudzie od 2,2 do 4,8 (www.emsc-csem.org 2018), których przyczyn można szukać w prowadzonej tam działalności górniczej.

Na rysunku 1 przedstawiono granice terenów górniczych wraz z lokalizacjami wstrząsów górniczych o magnitudzie powyżej 3,9, które wystąpiły w okresie od 12.12.2014 r. do 12.08.2018 r.



Rys. 1. Obszar badań – LGOM

Fig. 1. Location of the study area – LGCD

### 3. Dane i metodyka

W obliczeniach wykorzystano dane o lokalizacji wstrząsów sejsmicznych zarejestrowanych w bazie danych platformy European-Mediterranean Seismological Centre. Zawiera ona informację o współrzędnych geograficznych, czasie wystąpienia oraz magnitudzie każdego wstrząsu. Informacje o analizowanych w pracy wstrząsach górotworu zestawiono w tabeli 1. Do wyznaczenia przemieszczeń powierzchni wykorzystano zobrazenia radarowe Sentinel-1 produkt SLC (ang. *Single Look Complex*), który posiada informację zarówno o amplitudzie, jak i fazie fali elektromagnetycznej. Dodatkowo radary wyposażone są w pasmo C, które umożliwia penetrację sygnału przez chmury. Na każde zobrazenie radarowe składają się trzy podobszary: IW1, IW2 i IW3 (ang. *sub-swath*), a wynika to z techniki pomiarowej TOPSAR (ang. *The Terrain Observation with Progressive Scans SAR*) wykorzystywanej przez satelity Sentinel-1 ([www.sentinel.esa.int](http://www.sentinel.esa.int)). Poza tym satelity mogą transmitować sygnał w polaryzacji pionowej (V) oraz poziomej (H), a następnie odbierać go w polaryzacji V i H, zarówno pojedynczej (VV, HH), jak i podwójnej (VV+VH, HH+HV). Ze względu na obszar zainteresowań, zakres przetwarzania ograniczono do jednego podobszaru sceny radarowej – IW1 oraz polaryzacji VV. Wybrane zobrazenia zostały pozyskane podczas ruchu wznoszącego się satelity, czyli od południa do północy kuli ziemskiej. Natomiast odległość bazowa odnosi się do dystansu pomiędzy pozycjami satelitów w kolejnych przejściach nad tym samym obszarem i wykorzystywana jest w obliczeniu przemieszczeń. Dane składały się z trzech zestawów po dwa zobrazenia satelitarne (master i slave) dla każdego ze wstrząsów górniczych. Przy użyciu platformy Copernicus Open Access Hub pobrano sześć scen radarowych, które zostały pozyskane przez satelity Sentinel-1 na ścieżce 73 przed i zaraz po wystąpieniu danego wstrząsu. Każda para składająca się z obrazów: master i slave została osobno przetworzona metodą DInSAR. Informacje o wykorzystanych scenach zawarto w tabeli 2.

**Tabela 1. Informacja o wstrząsach sejsmicznych wybranych do analizy**

**Table 1. Information on seismic events selected for analysis**

Oznaczenie	Data wstrząsu	Długość geograficzna	Szerokość geograficzna	Magnituda
Wstrząs 1	26.12.2017 r.	16,08	51,56	4,8
Wstrząs 2	20.07.2018 r.	16,11	51,59	4,5
Wstrząs 3	12.08.2018 r.	16,12	51,57	3,9

**Tabela 2. Charakterystyka zobrażeń satelitarnych wykorzystanych w obliczeniach przemieszczeń**

**Table 2. Characteristics of satellite images used for calculation of displacements**

Nr wstrząsu	Daty zobrażeń	Odległość bazowa	Kierunek lotu satelity	Nr ścieżki
1	2017-12-23 2017-12-29	-111 m	Wznosząca	73
2	2018-07-15 2018-07-21	131 m	Wznosząca	73
3	2018-08-08 2018-08-14	96 m	Wznosząca	73

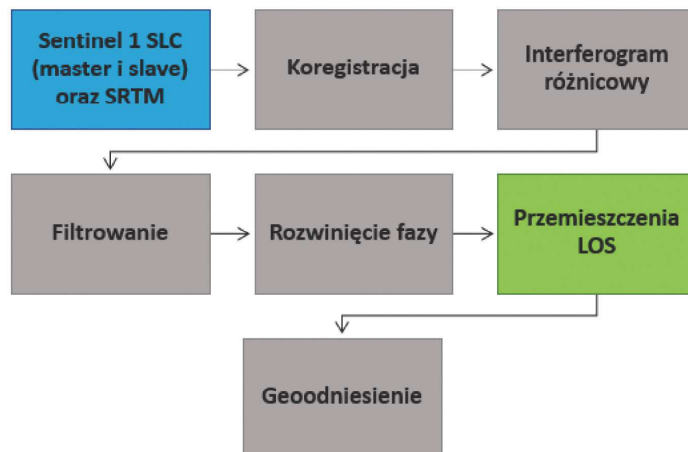
Oprócz zobrażeń satelitarnych pozyskano również numeryczny model terenu SRTM o rozdzielczości 30 m w formacie .grd ze strony internetowej oprogramowania GMT5SAR ([www.topex.ucsd.edu](http://www.topex.ucsd.edu)). Granice terenów górniczych

pobrano z Centralnej Bazy Danych Geologicznych Państwowego Instytutu Geologicznego ([www.dm.pgi.gov.pl](http://www.dm.pgi.gov.pl)). Opracowania graficzne wykonano w programie ESRI ArcGIS licencjonowanego dla Politechniki Wrocławskiej. Wszystkie pozyskane dane wejściowe zorganizowano w odpowiednią strukturę plików wsadowych.

### 4. Satelitarna radarowa interferometria różnicowa

Do opracowania danych SAR wykorzystano metodę satelitarnej radarowej interferometrii różnicowej (ang. *Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry*, DInSAR), która dedykowana jest do wyznaczenia przemieszczeń powierzchni terenu w kierunku linii widoczności satelity – LOS (Przyłucka, Graniczny 2015). DInSAR oznacza, że wyznaczenie następuje pomiędzy dwoma kolejnymi pozyskaniem obrazów radarowych tego samego obszaru. Sygnały zarejestrowane przez antenę odbiorczą posiadają informację o amplitudzie i fazie, które w satelitarnej interferometrii radarowej wykorzystywane są do obliczenia geometrii pomiędzy położeniem satelity a obiektem na Ziemi. W oparciu o przestrzenne zależności geometryczne oraz odpowiednie algorytmy obliczeniowe możliwe jest określenie wartości przemieszczeń powierzchni. Przetwarzanie danych zostało wykonane w programie GMT5SAR (Sandwell i in. 2011), który może być kompilowany na dowolnym komputerze z zainstalowanymi aplikacjami GMT (program do graficznej prezentacji danych) i NETCDF (zestaw bibliotek oprogramowania z dostępem do tworzenia, udostępniania danych naukowych). Zastosowano procedurę obliczeniową przedstawioną schematycznie na rysunku 2. Przetwarzanie danych rozpoczęto od wykonania procesu koregistracji polegającego na dopasowaniu geometrii obrazu slave do geometrii obrazu master zarówno na poziomie pikseli (zgrubna koregistracja), jak i na poziomie subpiksela (precyzyjna koregistracja) (Zou i in. 2009). Różnice faz między dwoma zobrazeniami uzyskanymi w kolejnych akwizycjach satelity i różnych czasach umożliwiły wygenerowanie interferogramu, który stanowi podstawę do wyznaczenia przemieszczeń w linii widoczności satelity. W obliczeniach wykorzystano również Numeryczny Model Terenu do utworzenia tzw. interferogramu syntetyzowanego, który posłużył do wyeliminowania topografii terenu ze składowych fazy (Sheng in. 2009, Milczarek i in. 2017). Wynikiem różnicy między dwoma interferogramami był interferogram różnicowy, który następnie poddano procesowi filtrowania, aby usunąć szum fazowy z powodu błędów rejestracji, czynników atmosferycznych, czasowej dekorelacji, zakłóceń elektromagnetycznych. Kluczowym etapem we wszystkich metodach satelitarnej interferometrii radarowej jest rozwinięcie fazy, czyli określenie rzeczywistej wielkości fazy, która potrzebna jest do wyliczenia wartości deformacji. Proces rozwijania fazy polegał na jej przeliczeniu z cykli 2 $\pi$  na wielkości proporcjonalne do rzeczywistych wysokości przez dodanie właściwej, całkowitej liczby cykli fazowych do wartości fazy każdego piksela (Chen i in. 2002). Następnie dokonano wyliczenia względnych wartości wysokości, czyli przemieszczeń w linii widoczności satelity jakie nastąpiły na badanym obszarze. Ostatnim krokiem było wykonanie georeferencji wyników.

Schemat przetwarzania znajdujący się na rysunku 2 zaimplementowano osobno dla każdej pary obrazów radarowych odpowiadających danemu wstrząsowi górniczemu. Wartości parametrów w poszczególnych etapach były uzależnione od warunków środowiskowych badanego obszaru.

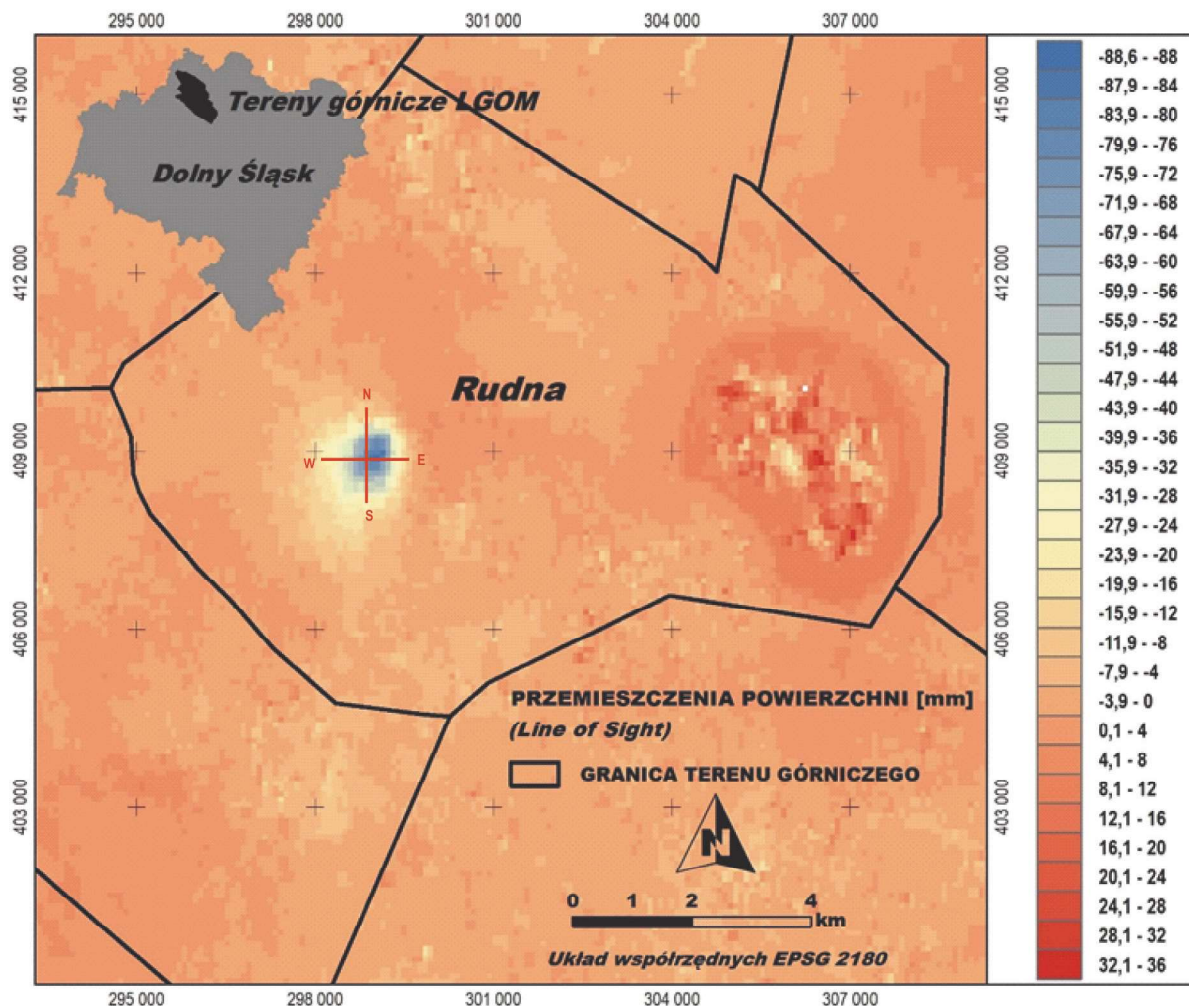


Rys. 2. Schemat przetwarzania danych w metodzie DInSAR  
 Fig. 2. Scheme of data processing in DInSAR method

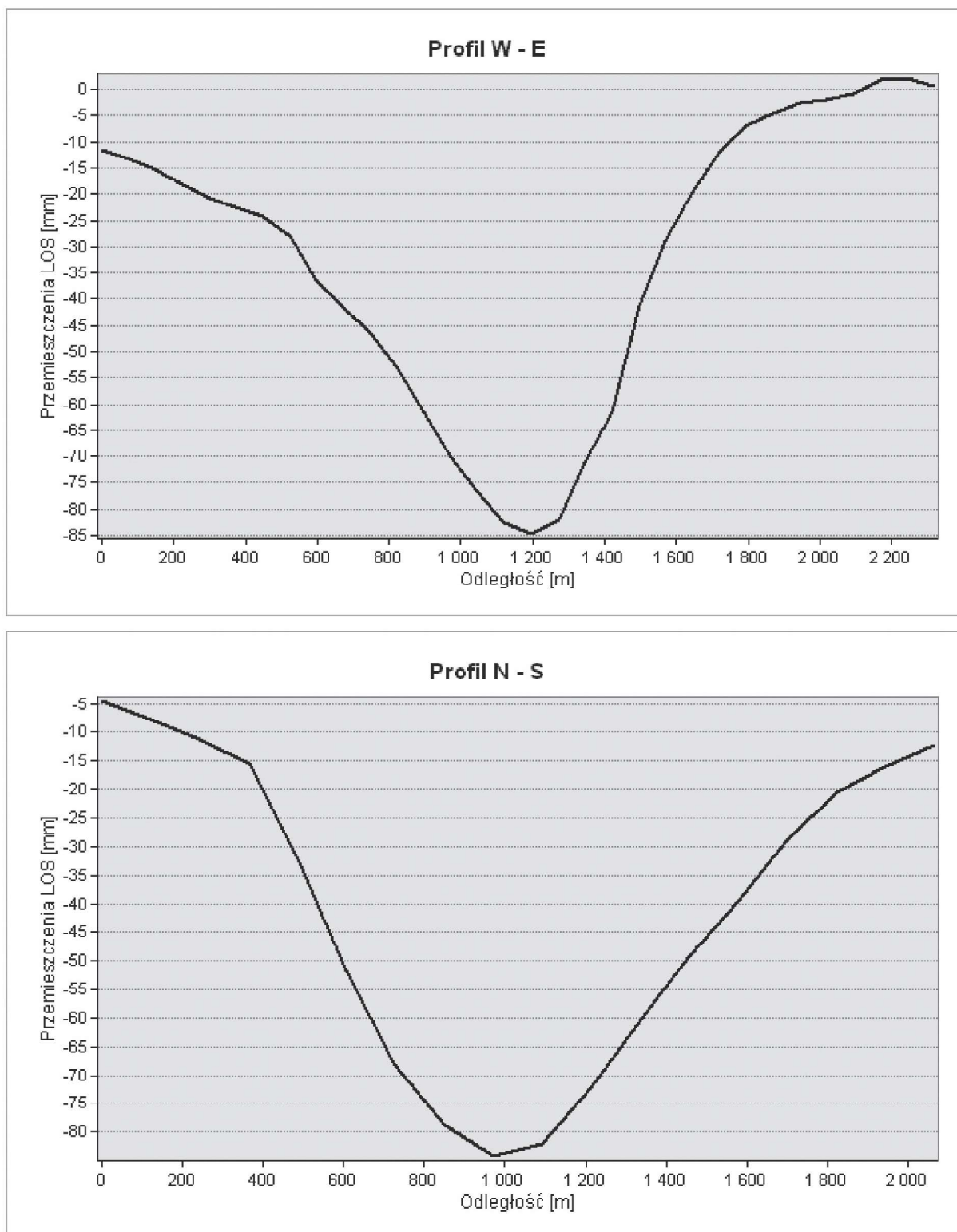
5. Rezultaty i dyskusja

Badaniom, metodą DInSAR, poddano powierzchnię terenu po wystąpieniu trzech wybranych wstrząsów o magnitudach od  $M_w = 3.9$  do  $M_w = 4.8$ , które wystąpiły odpowiednio w dniach 26.12.2017 r., 20.07.2018 r. i 12.08.2018 r. (tab. 1). Rezultaty obliczeń przemieszczeń powierzchni w linii widoczności satelity przedstawiono w postaci graficznej i omówiono poniżej.

Dla wstrząsu o  $M_w = 4.8$ , który wystąpił w dniu 26 grudnia 2017 roku otrzymano wyraźny obraz deformacji powierzchni (rys. 3). Maksymalna wartość obniżenia (w linii widoczności satelity) wyniosła ponad 80 mm. Zasięg przestrzenny deformacji powierzchni to ok.  $2.3 \times 2.5$  km o nieco większej rozpiętości w kierunku N-S (przy rozmiarze piksela równym 90 m). Profil wysokościowy niecki w kierunkach N-S i W-E przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 3. Lokalizacja i zasięg deformacji powierzchni związanych ze wstrząsem z dnia 26 grudnia 2017 roku, magnituda  $M_w 4.8$   
 Fig. 3. Location and extent of surface deformations linked with the seismic event of 26 December 2017, magnitude  $M_w 4.8$

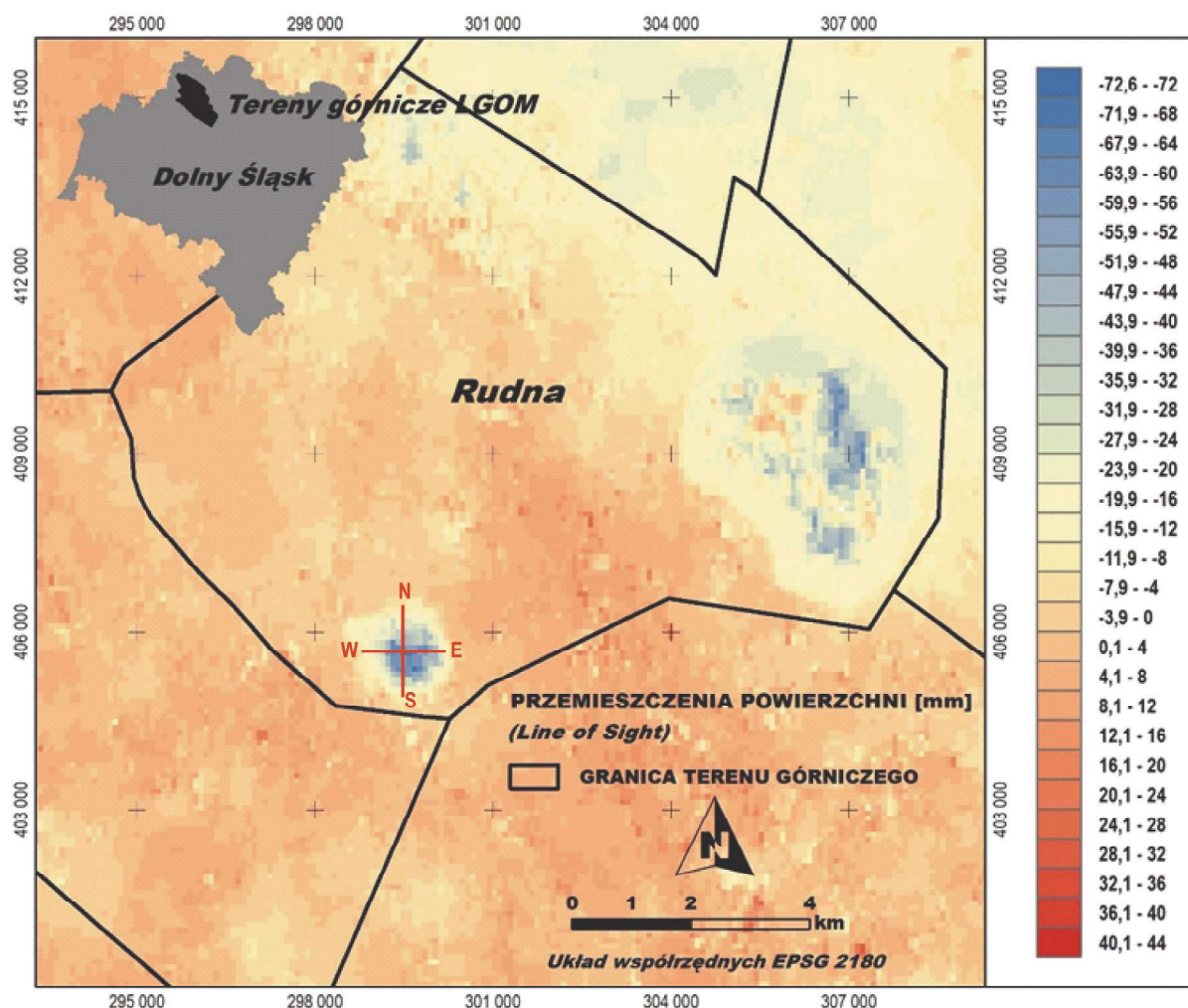


Rys. 4. Profile obniżenia powierzchni dla wstrząsu z dnia 26 grudnia 2017 roku ( $M_w = 4.8$ ). Kierunek W-E (góra) oraz kierunek N-S (dół)

Fig. 4. Profiles of surface deformations for the seismic event of 26 December 2017 ( $M_w = 4.8$ ). Direction W-E (upper) and direction N-S (lower)

Podobnie, wyraźny obraz deformacji powierzchni otrzymano dla wstrząsu o magnitudzie  $M_w = 4.5$  z dnia 20 lipca 2018 roku (rys. 5). Maksymalna wartość obniżenia (w linii widoczności satelity) przekroczyła 70 mm. Zasięg przestrzen-

ny deformacji powierzchni to ok. 1.8 x 1.8 km, a kształt jest regularny (przy rozmiarze piksela równym 90 m). Profil wysokościowy niecki w kierunkach N-S i W-E przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5. Lokalizacja i zasięg deformacji powierzchni związanych ze wstrząsem z dnia 20 lipca 2018 roku, magnituda  $M_w = 4.5$

Fig. 5. Location and extent of surface deformations linked with the seismic event of 20 July 2018, magnitude  $M_w = 4.5$

Dla wstrząsu z dnia 12 sierpnia 2018 roku o magnitudzie  $M_w = 3.9$  nie zidentyfikowano wyraźnego obrazu deformacji na powierzchni terenu.

Interpretując powyższe wyniki, trzeba zwrócić uwagę na następujące uwarunkowania. Przedstawione obliczenia dotyczą jednej ścieżki (nr 73) zobrazowań pozyskiwanych przez satelity Sentinel-1. Opracowanie wyników dla kolejnych ścieżek obejmujących analizowany obszar, jak również dla kolejnych kombinacji akwizycji danych, w odstępach dłuższych niż 6-dniowe, pozwala na dodatkowe potwierdzenie otrzymanych rezultatów. Z kolei opracowanie sekwencji interferogramów w odstępach 6-dniowych umożliwia zbadanie dynamiki zjawiska w czasie.

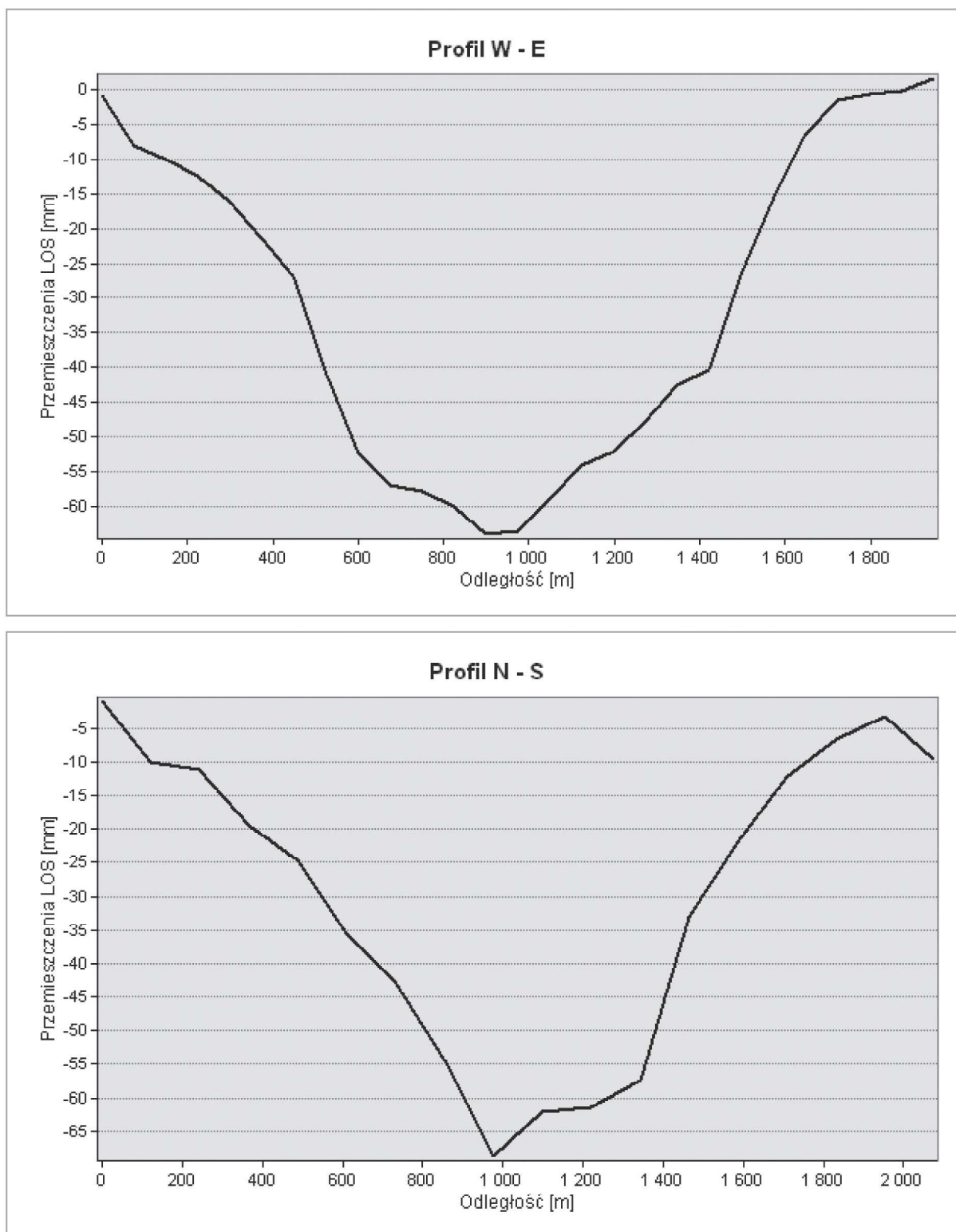
Wpływ na dokładność otrzymanych wartości przemieszczeń mają czynniki takie jak: pokrycie terenu i charakter wegetacji (związany z porą roku) oraz opóźnienie jonosferyczne, które z kolei wpływają na wartość koherencji. W analizach przyjmowano minimalną wartość koherencji na poziomie 0.1-0.4. Uwzględnienie w algorytmach obliczeniowych modeli jonosfery pozwoliłoby na podniesienie dokładności wyznaczenia przemieszczeń. Wiąże się to jednak z zastosowaniem bardziej złożonych i czasochłonnych algorytmów obliczeniowych.

Otrzymane wyniki nie były porównywane z wynikami naziemnych pomiarów geodezyjnych ze względu na brak takich

danych. Dokładność wyznaczenia przemieszczeń powierzchni dla zastosowanej techniki (DInSAR) w literaturze określana jest na poziomie  $\pm 1$  cm (Manzo i in. 2011, Mleczko, Mróz 2012, Murdzek i in. 2018). Jest to wartość wystarczająca do identyfikacji i analizy zmian powierzchni spowodowanych wstrząsami na terenach górniczych.

Lokalizacja epicentrow rozpatrywanych wstrząsów i ich magnituda zostały określone na podstawie baz danych, które oparte są na sejsmografach znajdujących się w dużej odległości od analizowanego obszaru (nawet kilkaset kilometrów). Wykorzystanie danych z obserwacji sejsmicznych prowadzonych lokalnie przez zakład górniczy umożliwia bardziej precyzyjne wyznaczenie miejsca wystąpienia wstrząsu i mogłoby być podstawą do określenia zbieżności przestrzennej przemieszczeń powierzchni oraz epicentrum wstrząsu.

Podobnie, analiza sytuacji geologiczno-górnictwa prowadzonej eksploatacji podziemnej w powiązaniu z uzyskanymi rezultatami daje podstawę do interpretacji charakteru wstrząsu i jego wpływu na powierzchnię. Wstrząsy związane z działalnością górniczą można podzielić na te bezpośrednio związane z operacją górniczą oraz na te związane z budową geologiczną i tektoniką otoczenia kopalni, w tym wpływu górnictwa na rozkład naprężeń występujących w górotworze. W tym drugim przypadku epicentrum wstrząsu może wystąpić w pewnej odległości od frontu eksploatacji, najczęściej w sąsiedztwie



Rys. 6. Profile obniżen powierzchni dla wstrząsu z dnia 20 lipca 2018 roku ( $M_w = 4.5$ ). Kierunek W-E (górze) oraz kierunek N-S (dół)

Fig. 6. Profiles of surface deformations for the seismic event of 20 July 2018 ( $M_w = 4.5$ ). Direction W-E (upper) and direction N-S (lower)

stref nieciągłości (Gibowicz, Kijko 1994). Przedmiotem badań opisanych w artykule była jednak analiza dotycząca tylko wyznaczenia przemieszczeń z obserwacji satelitarnych.

Uwzględniając powyższe czynniki należy stwierdzić, że otrzymane wyniki badań wstępnie potwierdzają, że technika DInSAR umożliwia określenie przemieszczeń powierzchni spowodowanych wstrząsami wynikającymi z prowadzonej

działalności górniczej. Co ważne, gromadzona systematycznie baza danych zobrazowań satelitarnych po ich przetworzeniu dostarcza informacji o miejscu i zasięgu deformacji w sytuacji, kiedy nie ma innej możliwości pozyskania takich danych, np. w wyniku prac geodezyjnych prowadzonych przez służby miernicze zakładu górniczego, ze względu na nagły i niespodziewany charakter zdarzenia.



## 6. Podsumowanie

W badaniach przeanalizowano przydatność metody różnicowej satelitarnej interferometrii radarowej (DInSAR) do wyznaczania przemieszczeń powierzchni terenu wywołanych wstrząsami górniczymi na przykładzie podziemnej eksploatacji rud miedzi prowadzonej w LGOM. Obliczenia przeprowadzono, w programie GMT5SAR, z wykorzystaniem zobrażeń z satelitów Sentinel 1 zarejestrowanych bezpośrednio przed oraz bezpośrednio po wystąpieniu danego wstrząsu.

Analizie poddano trzy wstrząsy górnicze charakteryzujące się różną magnitudą o wartościach od 3.9 do 4.8, dla których wygenerowano mapy względnych przemieszczeń powierzchni (LOS). W przypadku wstrząsów o magnitudzie  $M_w=4.8$  (26.12.2017 r.) i  $M=4,5$  (20.07.2018 r.) uzyskano jednoznaczne wyniki w postaci obrazów deformacji powierzchni. Otrzymane rezultaty wskazują na powstanie obniżenia terenu w kształcie niecek o maksymalnych wartościach, odpowiednio ponad 80 mm i ponad 70 mm. Natomiast dla wstrząsu o magnitudzie  $M_w=3.9$  (12.08.2017 r.) nie udało się zidentyfikować na powierzchni obszaru, który mógłby świadczyć o powstaniu deformacji w jego wyniku.

Uzyskane wyniki badań wstępnie potwierdzają, iż metodę DInSAR można stosować do określenia przemieszczeń powierzchni spowodowanych wstrząsami górniczymi. Metoda ta jest stosunkowo prosta i umożliwia szybkie obliczenie zmian zachodzących na powierzchni z dokładnością ok. 1 cm. Ograniczeniem metody jest, niemożliwość do całkowitego wyeliminowania, wpływ atmosfery na wyniki pomiarów. W kolejnym etapie badań planuje się przeanalizować zależności przestrzenne pomiędzy lokalizacją deformacji a prowadzoną działalnością górniczą i budową geologiczną oraz wykorzystać metody satelitarnej interferometrii radarowej oparte na przetwarzaniu serii zobrażeń radarowych, takich jak SBAS (*Small Baseline Subset*) i PSInSAR (*Persistent Scatterer Interferometry SAR*). Niewątpliwie satelitarna interferometria radarowa może być traktowana jako technika uzupełniająca i rozszerzająca zakres danych dostarczanych przez służby geodezyjne zakładów górniczych wykorzystujących klasyczne techniki geodezyjne pomiarów powierzchni.

## Literatura

- ALBANO M., POLCARI M., BIGNAMI CH., MORO M., SAROLI M., STRAMONDO S. 2017 - Did Anthropogenic Activities Trigger the 3 April 2017  $M_w$  6.5 Botswana Earthquake. *Remote Sensing*, Vol. 9.
- BARBA M., TIAMPO K.F., SAMSONOV S.V. 2016 - InSAR MSBAS Time-Series Analysis of Induced Seismicity in Colorado and Oklahoma. *American Geophysical Union*.
- BUTLER R., LAY T., CREAGER K., EARL P., FISCHER K., GAHERTY J., LASKE G., LEITH B., PARK J., RITZWOLLE M., TROMP J., WEN L. 2011 - The global seismographic network surpasses its design goal. *Eos, Transactions, American Geophysical Union*, Vol. 85.
- CAO L., ZHANG Y., He J., LIU G., YUE H., WANG R., GE L. 2008 - Coal mine land subsidence monitoring by using spaceborne InSAR Data - A case study in Fengfeng, Hebei Province, China. *Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. 37.
- CHEN C.W., ZEBKER H.A. 2002 - Phase unwrapping for large SAR interferograms: statistical segmentation and generalized network models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 8, 1709-1719.
- GEE D., BATESON L., SOWTER A., GREBBY S., NOVELLINO A., CIGNA F., MARSH S., BATON C., WYATT L. 2017 - Ground Motion in Areas of Abandoned Mining: Application of the Intermittent SBAS (ISBAS) to the Northumberland and Durham Coalfield, UK. *Geosciences*, Vol. 7.
- GEUDTNER D., TORRES R., SNOEIJ P., DAVIDSON M., ROMMEN B. 2014 - Sentinel-1 System capabilities and applications. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*.
- GIBOWICZ J., KIJKO A. 1994 - An Introduction to Mining Seismology. *International Geophysics*, Vol. 55.
- GRZYBEK R. 2017 - Identification and analysis of mining areas subsidence with using InSAR technique based on sentinel-1 SAR imagery. *Geoinformatica Polonica*, Vol. 16, 53-67.
- KERANEN K.M., WEINGARTEN M. 2018 - Induced Seismicity. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, Vol. 46, 149-174.
- KONOPACKA Ż., ZAGOŹDŻON K.D. 2014 - Łupek miedzionośny Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego. *Monografia Politechniki Wrocławskiej, Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii*.
- KRAWCZYK A., GRZYBEK J. 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). *E3S Web of Conferences* 26, Vol. 26.
- MALENOVSKY Z., ROTT H., CIHLAR J., SCHEPMAN M. E., GARCIA-SANTOS G., FERNANDES R., BERGER M. 2012 - Sentinels for science: Potential of Sentinel-1, -2, and -3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 120, 91-101.
- MALINOWSKA A., WITKOWSKI W., GUZYA., HEJMANOWSKI R. 2018 - Mapping ground movements caused by mining-induced earthquakes using Sentinel-1 TOPS time series interferometry. *Engineering Geology*.
- MANZO M., FIALKO Y., CASU F., PEPE A., LANARI R. 2011 - A Quantitative Assessment of DInSAR Measurements of Interseismic Deformation: The Southern San Andreas Fault Case Study. *Pure and Applied Geophysics*, Vol. 169, 1463-1482.
- MILCZAREK W., BLACHOWSKI J., GRZEMPOWSKI P. 2017 - Wykorzystanie satelitarnej interferometrii radarowej w badaniach deformacji powierzchni w górnictwie odkrywkowym węgla brunatnego. „Górnictwo Odkrywkowe”, Vol. 58, 22-27.
- MLECZKO M., MRÓZ M. 2012 - Ewolucja techniki interferometrii radarowej - przegląd metod na przykładzie opracowania danych ERS-1/2 SAR. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 24, 221-229.
- MURDZEK R., MALIK H., LEŚNIAK A. 2018 - The use of the DInSAR method in the monitoring of road damage caused by mining activities. *E3S Web of Conferences*, Vol. 36.
- PINDŌR T. 2016 - Reindustrializacja Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego. „Barometr Regionalny”, Vol. 14, 103-109.
- PRZYLUCKA M., GRANICZNY M. 2015 - Kompleksowe wykorzystanie przetworzeń DInSAR i PSInSAR w badaniu pionowych przemieszczeń terenu w wybranych rejonach GOP. „Przegląd Górniczy”, Vol. 3, 80-88.
- SANDWELL D., MELLORS R., TONG X., WEI M., WESSEL P. 2011 - Open radar interferometry software for mapping surface Deformation. *EOS*, Vol. 92, 233-240.
- SHENG Y., WANG Y., GE L., RIZOS CH. 2009 - Differential radar interferometry and its application in monitoring underground coal mining-induced subsidence.
- THORPE S. 2017 - Time series analysis of surface deformation associated with fluid injection and induced seismicity in Timpson, Texas using DInSAR methods. *Electronic Thesis and Dissertation Repository*.
- VERVOORT A., DECLERCQ P.Y. 2017 - Surface movement above old coal longwalls after mine closure. *International Journal of Mining Science and Technology*, Vol. 27, 481-490.
- YANG CH., ZHANG Q., ZHAO CH., JI L., ZHU W. 2010 - Monitoring mine collapse by D-InSAR. *Mining Science and Technology (China)*, Vol. 20, 696-700.
- ZESPÓŁ WEWNĘTRZNY KGHM POLSKA MIEDŹ S.A. 2012 - RAPORT: Aktywa górnicze KGHM POLSKA MIEDŹ S.A.
- ZOU W., LI Y., LI Z., DING X. 2009 - Improvement of the Accuracy of InSAR Image Co-Registration Based On Tie Points - A Review. *Sensors*, Vol. 9, 1259-1281.
- Netografia  
[www.is-epos.eu](http://www.is-epos.eu), 10.11.2018  
[www.emsc-csem.org](http://www.emsc-csem.org), 10.11.2018  
[www.topex.ucsd.edu](http://www.topex.ucsd.edu), 10.11.2018  
[www.dm.pgi.gov.pl](http://www.dm.pgi.gov.pl), 10.11.2018  
[www.sentinel.esa.int](http://www.sentinel.esa.int), 10.11.2018

Artykuł wpłynął do redakcji – październik 2018  
 Artykuł akceptowany do druku 17.12.2018