

# Pomiary przemieszczeń wywołanych wstrząsem górniczym przy zastosowaniu satelitarnej interferometrii radarowej InSAR

**Subsidence surveying caused by the induced mining seismicity with the use of InSAR**



*Prof. dr hab. inż. Ryszard Hejmanowski\**



*Dr hab. inż. Agnieszka Malinowska\**



*Mgr inż. Wojciech Witkowski\**



*Mgr inż. Artur Guzy\**

**Treść:** Badania ruchów powierzchni spowodowanych wstrząsami sejsmicznymi są kosztowne i kłopotliwe w planowaniu eksperymentu z uwagi na trudny do przewidzenia czas wystąpienia wstrząsu. Z tego względu jedynie ciągle bądź quasiciągłe obserwacje mogą się przyczyniać do lepszego poznania tych zjawisk. Technologie teledetekcyjne, a w szczególności interferometria radarowa (InSAR) coraz częściej spełniają cechy takich obserwacji. W artykule zaprezentowane zostały skutki wstrząsu sejsmicznego o magnitudzie 4,7, który miał miejsce 07.12.2017 r. i wystąpił na terenie górniczym O/ZG Rudna w KGHM. Badania osiadań powierzchni po wstrząsie prowadzono w oparciu o satelitarną interferometrię radarową. Analiza przemieszczeń powierzchni terenu wywołanych tym wstrząsem pozwoliła na lepsze poznanie powstrząsowej dynamiki przekształceń powierzchni terenu. W przeprowadzonych badaniach określono rozkład osiadań powierzchni terenu wywołanych tym wstrząsem, wyznaczając rozpiętość powstrząsowej niecki obniżeniowej i maksymalne przemieszczenia pionowe oraz skonfrontowano zarejestrowane ruchy powierzchni terenu z budową geologiczną górotworu.

**Abstract:** The investigation on ground subsidence caused by the mining-related seismicity is expensive and difficult in terms of conducting research and planning the experiment. The tremors occurrence is usually unexpected, that is why surveying of ground deformation should be carried out in a special way. The most convenient monitoring method are continuous measurements. Thus, the remote sensing and InSAR are commonly applied to monitor ground displacements in the areas induced by seismicity. The effects of one huge induced tremor with the motion of 4.7, which occurred on 7 December 2017 are the objective of this paper. The tremor occurred in the mining area of the underground copper ore mine "Rudna" belonging to the KGHM Mining Company. The research of the subsidence caused by this tremor has been conducted by the use of InSAR. The subsidence analysis allowed to get some new knowledge about the kinematics of the surface changes after the tremors. The distribution of the surface subsidence, maximal subsidence and the dimensions of the subsidence trough have been presented in the paper. The correlation of subsidence with the geological structure was discussed.

\* AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza WGGiŚ, Kraków

## Słowa kluczowe

InSAR, wstrząsy górotworu, pomiary przemieszczeń

## Keywords

InSAR, mining seismicity, subsidence surveying

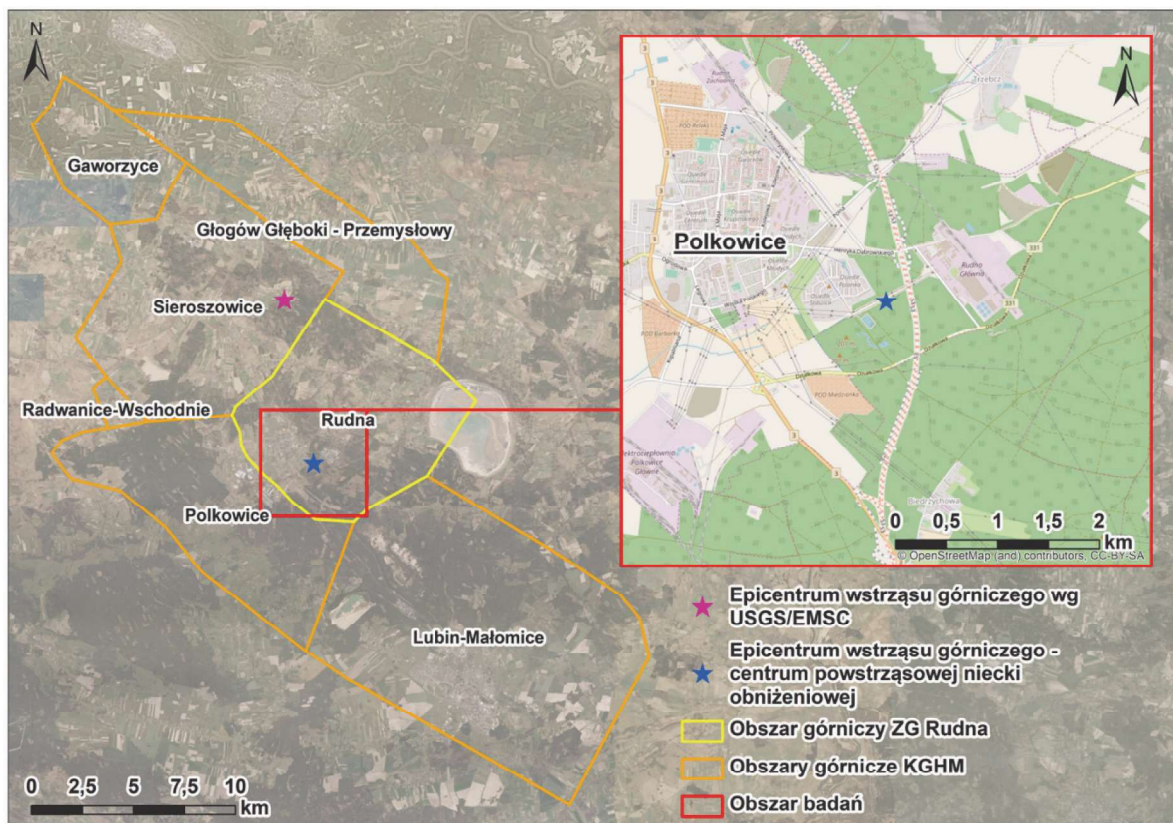
## 1. Wprowadzenie

Wstrząsy sejsmiczne występujące na terenie Polski charakteryzują się magnitudami często zbliżonymi do intensywności klasycznych trzęsień ziemi określanych mianem „dość silnych”. Antropogeniczne pochodzenie krajowych wstrząsów, które występują często (choć nie tylko) w rejonach eksploatacji surowców mineralnych ogranicza czas ich trwania. Jest to korzystne z punktu widzenia zagrożenia infrastruktury technicznej i budynków na powierzchni, powstaje jednak pytanie o inne skutki, które mogą być wynikiem zjawisk tego typu. Badania prowadzone m.in. przez zespół AGH Kraków dowodzą, że do innych skutków można zaliczyć przemieszczenia powierzchni (Hejmanowski i in. 2012). Nie mają one związku z drganiami sejsmicznymi i ich amplifikacją, są jednak ich bezpośrednim skutkiem. Prędkość przemieszczania się powierzchni, nieodwracalność tego procesu i jego lokalizacja są, jak się wydaje, efektem dużo szybszego ruchu górotworu w rejonie hipocentrum i przyspieszonej kompaktacji warstw skalnych w tych rejonach. Powstrząsowe ruchy powierzchni o charakterze nieodwracalnym mogą być przyczyną błędnego wnioskowania o innych, łatwiej poddających się interpretacji zjawisk. Można do nich zaliczyć np. przemieszczenia wywołane głębinną eksploatacją złóż surowców, uszkodzenia budynków, uszkodzenia podłoża dróg i autostrad bądź tras szynowych, niestałość punktów geodezyjnych i in.

Badania ruchów powierzchni spowodowanych wstrząsami sejsmicznymi są kosztowne i kłopotliwe w planowaniu ekspe-

rymentu z uwagi na trudny do przewidzenia czas wystąpienia wstrząsu. Z tego względu jedynie ciągłe lub quasiciągłe obserwacje mogą się przyczynić do wzrostu ich wiarygodności. Technologie teledetekcyjne, a w szczególności interferometria radarowa (InSAR), coraz częściej spełniają cechy takich obserwacji. Pozytywne rezultaty uzyskane przez zespół autorów po wstrząsie sejsmicznym o magnitudzie 4,5 z 29.11.2016 r, który wystąpił w rejonie jednej O/ZG Rudna w KGHM Polska Miedź S.A. wskazują na kilka zasadniczych cech tego typu przemieszczeń. Przede wszystkim przed wstrząsem rejestruje się brak lub bardzo niewielkie ruchy powierzchni, które wynikają z ujawniania się wpływów eksploatacji górniczej – nie przekraczają one zazwyczaj kilku milimetrów na dobę. W okresie doby po wstrząsie ujawnia się zasadnicze osiadanie terenu, dochodzące do ok. 70-80 mm, tj. ok. 90% maksymalnych wartości obniżenia. Po okresie zasadniczych ruchów, w kolejnych 4-5 dobach, ruchy powierzchni wracają do wartości z okresu przed wstrząsem. Ukształtowana w ten sposób lokalna, powstrząsowa niecka obniżeniowa przyjmuje w przybliżeniu kształt zrobów poeksploatacyjnych, w rejonie których zlokalizowane jest epicentrum wstrząsu, a jej wymiary mogą dochodzić do 2 km x 2 km.

Analiza jednego zjawiska, nawet dobrze udokumentowanego, nie jest jednak wystarczająca do uogólnień. Dlatego też zespół autorów z AGH Kraków opracował i udokumentował skutki kolejnego wstrząsu sejsmicznego o magnitudzie 4,7, który miał miejsce 07.12.2017 r. o godzinie 17:42 i wystąpił na tym samym terenie górniczym, w odległości kilku kilome-



Rys. 1. Obszar badań  
Fig. 1. Research area

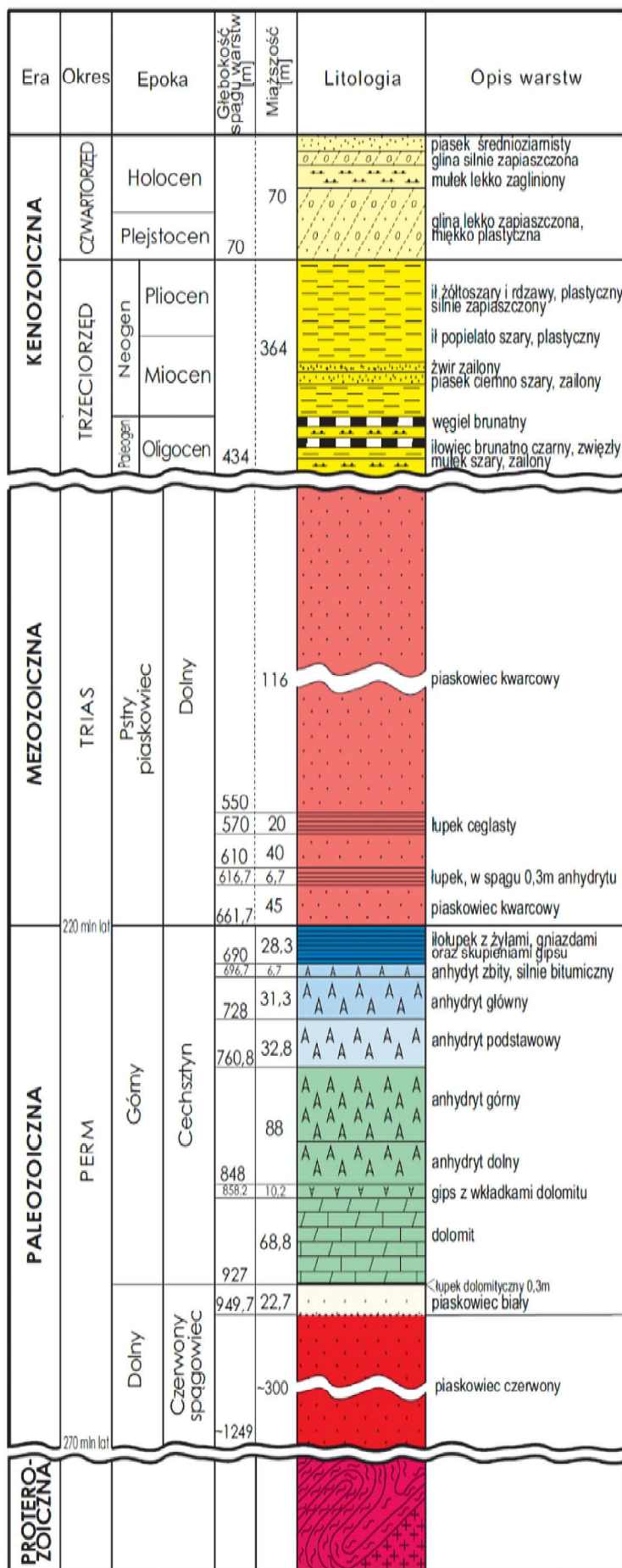


trów od wstrząsu uprzednio wspomnianego. Analiza przemieszczeń powierzchni po tym wstrząsie - uzupełniona analizą tektoniki górotworu - pozwala na wyciągnięcie ciekawych spostrzeżeń. Niecka lokalna, która kształtuje się w wyniku wstrząsu jest płytka (kilkadziesiąt milimetrów) i stosunkowo rozległa, zatem naprężenia występujące w jej dennej części i strefach maksymalnych odkształceń poziomych nie powinny zagrażać infrastrukturze powierzchni i budynkom. W artykule zbadano również ten aspekt pola przemieszczeń powstrząsowych oraz jego kinematykę.

**2. Rejon badań**

Na podstawie danych amerykańskiej służby geologicznej (ang. USGS – *United States Geological Survey*) oraz Europejskiego Śródziemnomorskiego Centrum Sejsmologicznego (ang. EMSC – *European Mediterranean Seismological Centre*) epicentrum wstrząsu górniczego, który jest przedmiotem prezentowanych badań miało miejsce na terenie KGHM Polska Miedź S.A., we wschodniej części O/ZG Polkowice-Sieroszowice. Na podstawie przeprowadzonych w artykule analiz można jednak stwierdzić, iż centrum niecki obniżeniowej wywołanej tym wstrząsem umiejscowione jest w południowo-zachodniej części O/ZG Rudna, w rejonie oddziału G-3, ok. 1,5 km na wschód od centrum miasta Polkowice (United ... 2018; European ... 2018). W niniejszym artykule badaniami objęto część powierzchni terenu górniczego O/ZG Rudna, która znajdowała się w bezpośrednim otoczeniu zidentyfikowanej w trakcie badań lokalnej niecki obniżeniowej – był to obszar o powierzchni ok. 25 km<sup>2</sup> (rys. 1).

Pod względem geologicznym Legnicko-Głogowski Obszar Miedziowy położony jest w centralnej części monokliny przedsudeckiej. Podłoże tej formacji geologicznej zbudowane jest ze słabo rozpoznanych skał krystalicznych proterozoiku i osadowych utworów karbońskich – m.in. granitoidów, gnejsów i łupków. Wyżej zalegają osady paleozoiczne okresu permskiego, które zapadają się w kierunku północnego wschodu pod kątem ok. 1-6°. Są one reprezentowane przez czerwoną spągowiec i cechszryn. Utwory te przykryte są grubą serią osadów trzeciorzędowych, m.in. piaskowcami, wapieniami i iłowcami. Najmłodsze utwory skalne tworzą luźne osady neogenu i paleogenu, wśród których wyróżnia się m.in. piaski, żwiry i ropy (Kaczmarek, Rożek, 2008; KGHM ... 2018) (rys. 2).



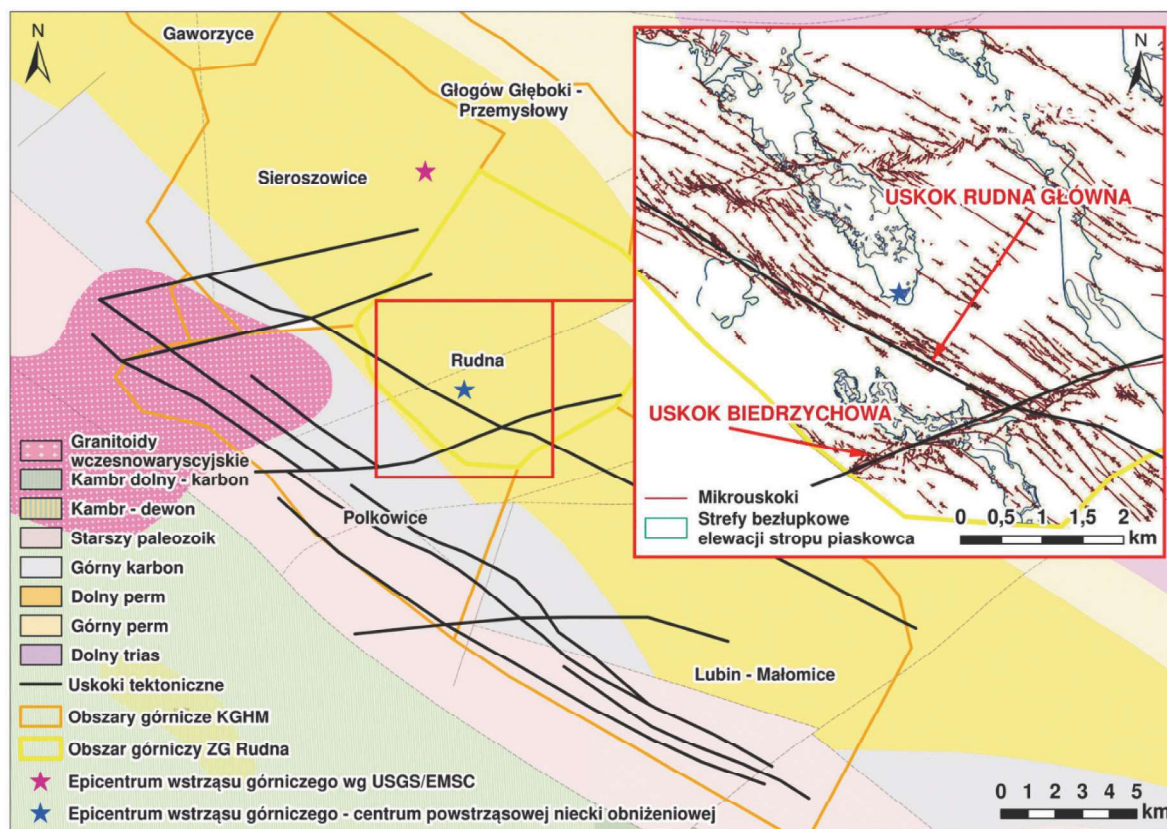
Rys. 2. Profil geologiczny utworów skalnych w rejonie oddziału G-3 O/ZG Rudna (Laskowski i in. 2014)  
 Fig. 2. Geological cross-section of rock mass strata in the G-3 area of Rudna Copper Ore Mine (Laskowski i in. 2014)

Miedzionośne skały złożowe mają postać siarczków miedzi, które zalegają na głębokości ok. 1000 m p.p.t. i uformowane zostały na pograniczu czerwonego spągowca oraz cechsztynu. Najniższe warstwy serii złożowej zbudowane są z jasnoszarych piaskowców kwarcowych czerwonego spągowca, na których zalegają czarne łupki ilasto-dolomityczne, dolomit smugowany, skrytokrystaliczny oraz dolomit laminowany – najwyższe ogniwo złożowe. Przedmiotowe złożo rudy miedzi ma niejednorodną miąższość, która waha się od ok. 7,5 m do 13 m (rys. 2). Rozciąga się ono w kierunku północny zachód – południowy wschód i zapada pod kątem ok. 2° do 4° ku północnemu wschodowi, zgodnie z kierunkiem upadu monokliny przedsudeckiej (KGHM ... 2018; KGHM ... 2012-2013).

Analiza warunków geologiczno-tektonicznych w obrębie O/ZG Rudna kieruje szczególną uwagę na występowanie licznych stref dyslokacyjnych, w tym przesunięć warstw skalnych o przebiegu subhoryzontalnym. Ich geneza związana jest z odmiennymi fazami sedimentacji osadów oraz ruchów górotworu, m.in. orogenezami: hercyńską i alpejską, w trakcie których dochodziło do wynoszenia bloku przedsudeckiego. Występujące w rejonie badań strefy uskokowe charakteryzują się dominującym przebiegiem w kierunku północny zachód – południowy wschód oraz nachyleniem od ok. 30° do ok. 90°, często zmiennym w rejonie pojedynczej dyslokacji tektonicznej. Liczne, różnokierunkowe splekania o pionowym przebiegu spowodowały wykształcenie się uskoków o zrzutach sumujących się, znoszących się lub przeciwnie skierowanych, o sumarycznej wysokości zrzutów do ok. 100 m. Z tego względu w rejonach tych wyróżnia się wiele wąskich zrębów i rowów, często równoległych do siebie. Spośród kil-

ku systemów uskoków, w rejonie badań za reprezentatywny uznać należy uskok Rudnej Główniej, w którym wysokość zrzutu (skrzydło północno-wschodnie) wynosi od ok. 21 m do ok. 32 m oraz uskok Biedrzychowa, o wartościach zrzutu do ok. 8 m (skrzydło południowe) (Gogolewska, Kaźmierczak 2014, KGHM ... 2012-2013, Goszcz 1999, Burtan 2010, Salski 1975, 1977) (rys. 3).

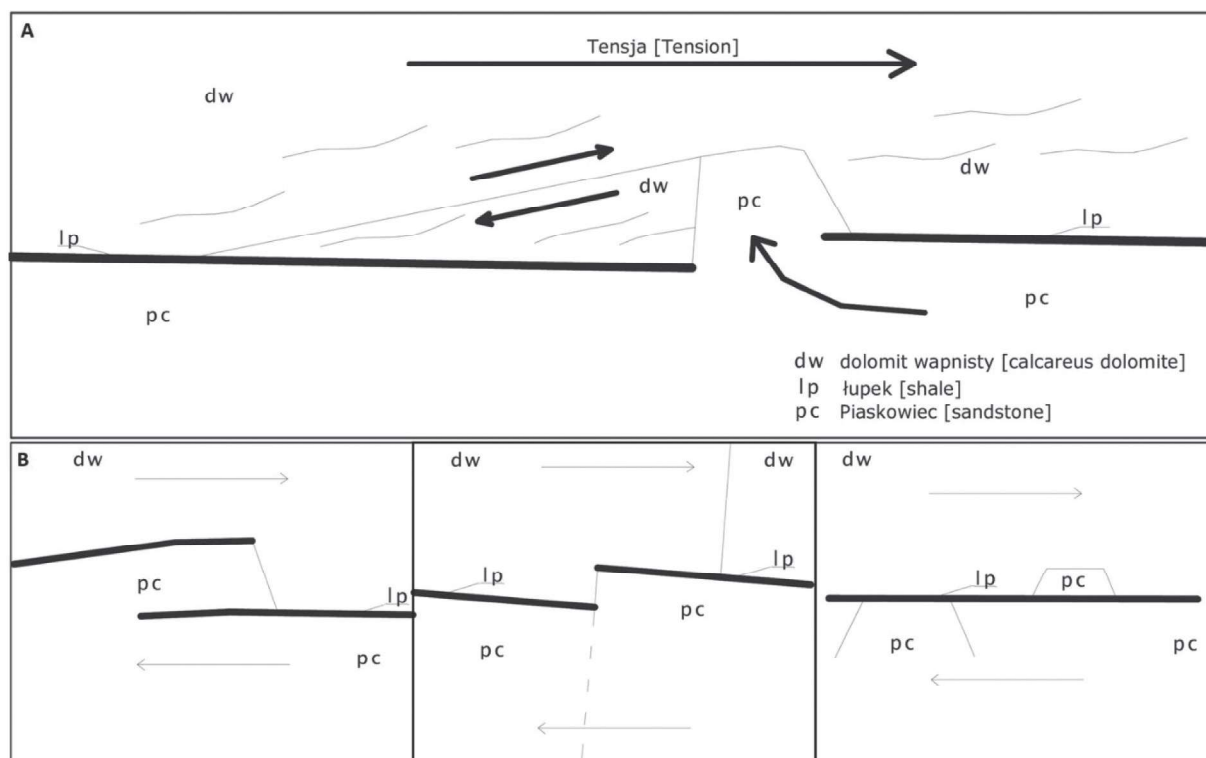
Dyslokacjom pionowym towarzyszą powszechnie struktury tektoniczne powstałe w wyniku działań zmiennych naprężeń poziomych, które doprowadziły do utworzenia deformacji ciągłych – pofałdowań i zmieć w obrębie miedzionośnych łupków ilasto-dolomitycznych. Mają one charakter wielopiętrowych i wielokierunkowych mikroszczelin i rys ograniczonych powierzchniami uławicenia. Bogaty inwentarz deformacji śródwarstwowych na pograniczu dolnego i górnego permu występuje m.in. w rejonie dwóch wspomnianych wcześniej uskoków: Rudnej Główniej i Biedrzychowa. Świadczą o tym liczne porwaki tektoniczne, którym towarzyszy pas horstów na przedpolu (rys. 4 A). Horsty mają charakter odkłóć pakietów dolomitu, którym towarzyszą przebiecia łupka w piaskowcu i przesunięcia powierzchni uskoków towarzyszących, przy czym ślad na powierzchni spągu cechsztynu nie pokrywa się ze śladem uskoku w skałach węglanowych (rys. 4 B). Głównym problemem wynikającym z występowania w górotworze naprzemianległych warstw skalnych o różnych właściwościach geomechanicznych są trudności w utrzymaniu stateczności stropów wyrobisk podziemnych, zwłaszcza w rejonach elewacji bezłupkowej, która w strefie O/ZG Rudna ma przebieg niewyraźny i nieregularny (Dumicz, Don, 1978, Markiewicz, Szarowski 1990; Markiewicz i in. 2007).



Rys. 3. Warunki geologiczne w rejonie obszaru badań na poziomie ścięcia 1000 m za (Goszcz, 1999; Państwowy ... 2018)

Fig. 3. Geological conditions in the research area at horizontal shearing level of 1000 m acc. to (Goszcz, 1999; Państwowy ... 2018)





Rys. 4. Schemat powstania porwaka i zrębu tektonicznego (A) oraz przykłady dyslokacji poziomych obecnych w strukturach tektonicznych (B) (Markiewicz i in. 2007)

Fig. 4. Scheme of the formation of xenolith and horst (A), examples of horizontal dislocations present in tectonic structures (B) (Markiewicz i in. 2007)

Wysoki poziom sejsmiczności na przedmiotowym obszarze determinowany jest przede wszystkim skomplikowaną budową geologiczną, parametrami geomechanicznymi skał i pierwotnymi naprężeniami górotworu, które bezpośrednio związane są z miąższym pakietem sztywnych warstw skalnych – piaskowców i dolomitów zalegających bezpośrednio w otoczeniu złoża rud miedzi i akumulujących znaczne ilości energii potencjalnej, w tym energii pochodzenia naturalnego. Sejsmiczność jest indukowana również prowadzeniem eksploatacji górniczej na dużej głębokości i wydobywaniem złoża o znacznej miąższości. Wpływ na wzrost naprężeń w warstwach skalnych mają również parametry techniczne eksploatacji. W rejonie O/ZG Rudna wydobywanie prowadzone jest od lat 80. XX w., systemem filarowo-komorowym – pierwotnie z zawalem stropu, a następnie z jego ugięciem, z zastosowaniem podsadzki hydraulicznej w partiach chronionych filarami i w obszarach złoża o dużych miąższościach. Wybieranie rudy miedzi prowadzone było z kierunku zachodniego, od granicy z O/ZG Polkowice-Sierowice w kierunku wschodnim, do uskoku Biedrzychowa. Doświadczenia związane z prowadzoną w przeszłości eksploatacją pozwalają stwierdzić, iż przez cały okres wydobywania zagrożenie wysokoenergetycznymi wstrząsami górniczymi utrzymywało się na wysokim poziomie. Każdego roku notowanych było co najmniej kilka wstrząsów o energii większej od 107 J. Znaczna liczba zarejestrowanych na tym obszarze wstrząsów wykazuje silną korelację z dyslokacjami stref uskokowych oraz rejonami, gdzie prowadzona była intensywna eksploatacja górnicza (Gogolewska, Kaźmierczak 2014, Butra 2010, Dubiński, Konopko 2000, Burtan 2010).

### 3. Metodyka badawcza – czasowy zakres badań

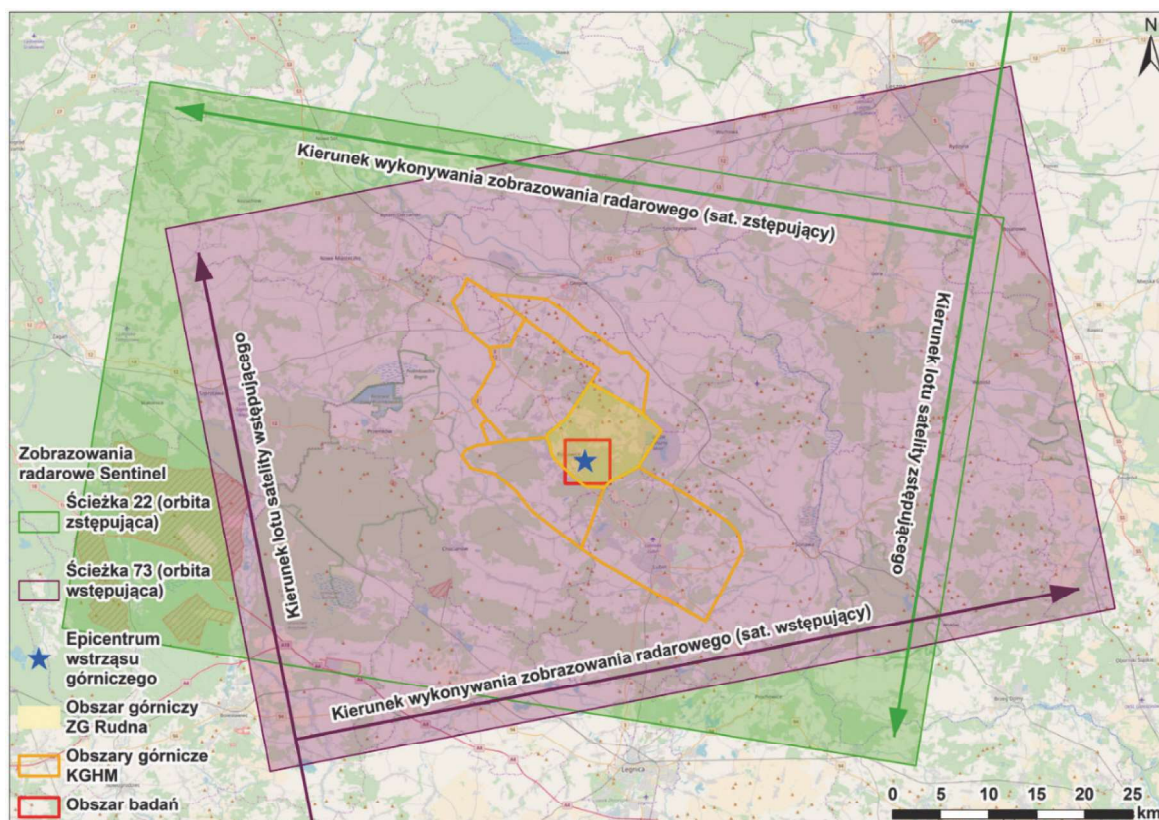
Analizę ruchów powierzchni terenu prowadzono przy wykorzystaniu danych z satelitów Sentinel. Pozyskano

zobrazowania radarowe Sentinel pochodzące z satelitów o orbicie zstępującej (ścieżka 22) i wstępującej (ścieżka 73). Przemieszczenia powierzchni terenu opracowane zostały przy wykorzystaniu tzw. satelitarnej interferometrii różnicowej DInSAR (ang. *Differential Interferometry SAR*) (Burgman i in. 2000, Hanssen, 2001, Massonet, Fiegl 1998, Zebker i in. 1997). Polega ona na przetworzeniu dwóch zdjęć radarowych do postaci interferogramu, który przedstawia różnicę fazy fali radarowych ( $\Delta\varphi$ ). Równanie (1) stanowi sumę składników odpowiadających za krzywiznę ziemi ( $\Delta\varphi_f$ ), topografię ( $\Delta\varphi_{el}$ ), ruchy powierzchni terenu ( $\Delta\varphi_d$ ), wpływ czynników atmosferycznych ( $\Delta\varphi_a$ ) oraz szum obserwacyjny ( $\Delta\varphi_n$ ). Do analiz ruchów powierzchni terenu istotne jest wyznaczenie składowej ( $\Delta\varphi_d$ ).

$$\Delta\varphi = \Delta\varphi_f + \Delta\varphi_{el} + \Delta\varphi_d + \Delta\varphi_a + \Delta\varphi_n \quad (1)$$

Pierwsze dwa składniki redukowane są w procesie tworzenia interferogramu. Wpływ atmosfery może zostać usunięty przy zastosowaniu metody *stacking-u*, która zakłada korelację przestrzenną zjawiska i brak korelacji czasowej (Zebker i in. 1997, Hanssen 2001). Tym samym z równania (1) otrzymujemy składową fazę odpowiedzialną za ruchy powierzchni terenu w kierunku satelity (*Line of Sight* - LOS), którą przeliczono na wartości metryczne proporcjonalnie do długości fali radarowej. W celu określenia składowej pionowej ruchów powierzchni terenu wykorzystano podwójną geometrię obrazowania satelity Sentinel-1 w rejonie wstrząsu (rys. 5) (Hanssen 2001).

Zjawisko sejsmiczne wystąpiło 07.12.2017 r. Analizowano ruchy powierzchni terenu w okresie ponad 3 tygodni. Pobrano zobrazowania radarowe z satelity o orbicie zstępującej z okresu od 20.11.2017 r. do 14.12.2017 r. (tabela 1), z satelity o orbicie wstępującej z okresu od 23.11.2017 r. do 17.12.2017 r. (tabela 2). Dla danych z satelitów o dwóch orbitach wyzna-



Rys. 5. Zobrazowania radarowe Sentinel wykorzystane w opracowaniu  
Fig. 5. Sentinel radar images used in the research

czono sześć interferogramów (tabela 1, tabela 2). Jak widać na rysunku (rys. 5), badaniami objęto znaczny powierzchniowo obszar.

W trakcie badań podjęto próbę wyznaczenia zasięgu i wartości maksymalnych przemieszczeń powierzchni w niecce powstrząsowej, a także wykonano analizę prędkości przemieszczeń pionowych.

Tabela 1. Zobrazowania radarowe Sentinel pochodzące z satelitów o orbicie zstępującej (ścieżka 22) wykorzystane w opracowaniu

Table 1. Sentinel radar images from descending orbit (track 22) used in the research

Nr interferogramu	Zdjęcie odniesienia (master)	Zdjęcie dostosowania (slave)	Długość bazy poprzecznej „B” [m]	Odległość czasowa [dni]
1	20.11.2017 r.	26.11.2017 r.	86,44	6
2	26.11.2017 r.	02.12.2017 r.	64,21	6
3	02.12.2017 r.	08.12.2017 r.	43,55	6
4	08.12.2017 r.	14.12.2017 r.	14,75	6
5	14.12.2017 r.	20.12.2017 r.	88,17	6
6	02.12.2017 r.	14.12.2017 r.	29,27	12

Tabela 2. Zobrazowania radarowe Sentinel pochodzące z satelitów o orbicie wstępującej (ścieżka 73) wykorzystane w opracowaniu

Table 2. Sentinel radar images from ascending orbit (track 73) used in the research

Nr interferogramu	Zdjęcie odniesienia (master)	Zdjęcie dostosowania (slave)	Długość bazy poprzecznej „B” [m]	Odległość czasowa [dni]
1	23.11.2017 r.	29.11.2017 r.	41,23	6
2	29.11.2017 r.	05.12.2017 r.	113,57	6
3	05.12.2017 r.	11.12.2017 r.	138,35	6
4	11.12.2017 r.	17.12.2017 r.	143,78	6
5	17.12.2017 r.	23.12.2017 r.	136,16	6
6	05.12.2017 r.	17.12.2017 r.	8,48	12

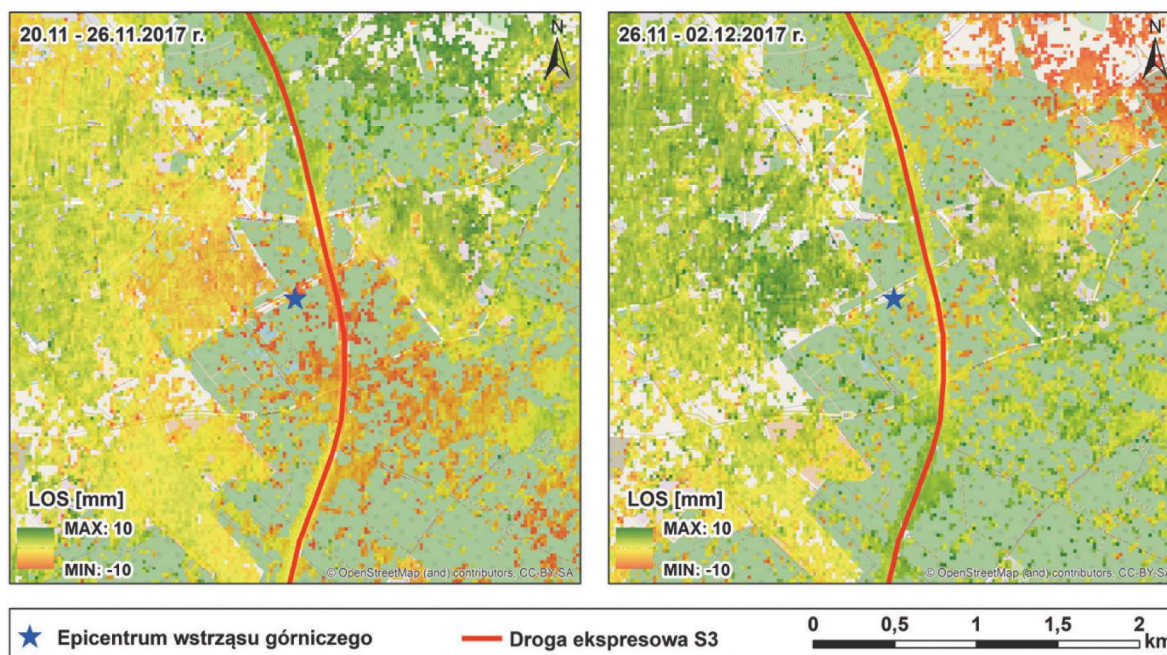


#### 4. Prezentacja wyników

Analizowano przemieszczenia powierzchni terenu w kierunku LOS, w okresie poprzedzającym wystąpienie wstrząsu, czyli 20.11.2017 r. – 05.12.2017 r.. Nie stwierdzono znaczących przemieszczeń powierzchni terenu poprzedzających wystąpienie wstrząsu. Maksymalne przemieszczenia LOS powierzchni terenu w tym okresie nie przekroczyły 10 mm (rys. 6 i 7).

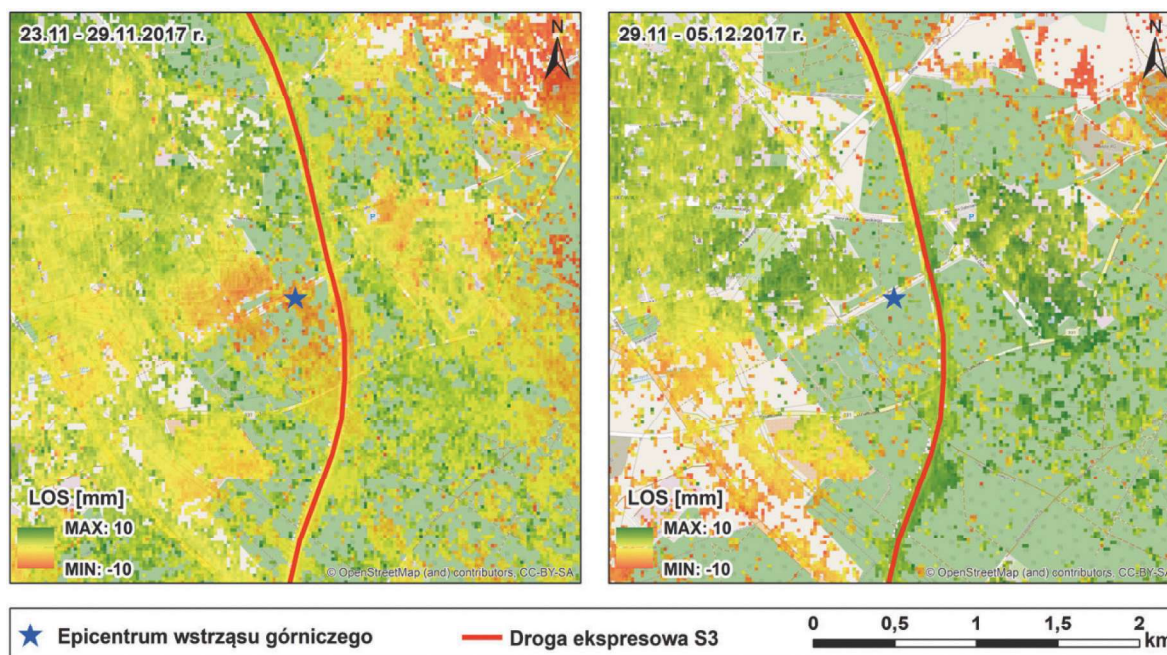
Analiza przemieszczeń powierzchni terenu w okresie, w którym wystąpił wstrząs możliwa była w oparciu o interferogramy wygenerowane w okresach 02.12 – 08.12.2017 r., 08.12. – 14.12.2017 r., 05.12 – 11.12.2017 r., 11.12 – 17.12.2017 r.

Dla zobrazowania uzyskanego z satelity o orbicie zstępującej uzyskano przemieszczenia LOS dochodzące do -75 mm w okresie 02.12 – 08.12.2017 r. (rys. 8). Były to ruchy powierzchni terenu, które pojawiły się na powierzchni terenu



Rys. 6. Ruchy powierzchni terenu w kierunku padania wiązki fali radiowej (LOS) wysłanej przez satelity Sentinel o orbicie zstępującej (ścieżka 22) w okresach: 20.11. – 26.11.2017 r. oraz 26.11. – 02.12.2017 r.

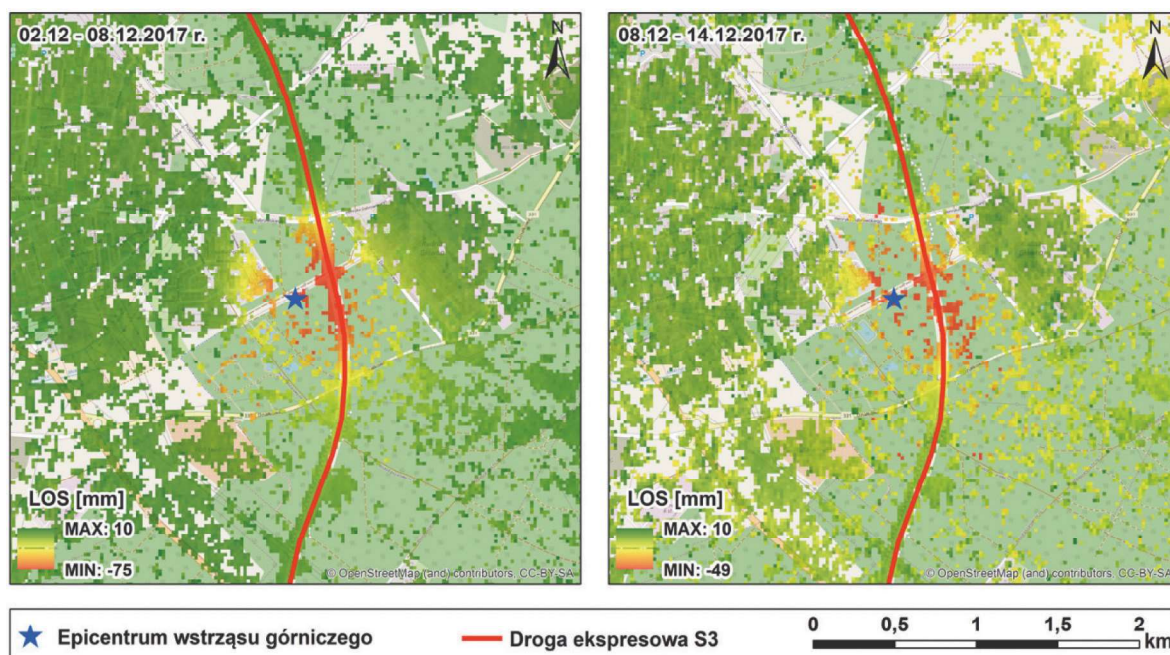
Fig. 6. LOS displacement rates from descending orbit (track 22) in the period of 20 November 2017 – 26 November 2017 and 26 November 2017 – 2 December 2017



Rys. 7. Ruchy powierzchni terenu w kierunku padania wiązki fali radiowej (LOS) wysłanej przez satelity Sentinel o orbicie wstępującej (ścieżka 73) w okresach: 23.11. – 29.11.2017 r. oraz 29.11. – 05.12.2017 r.

Fig. 7. LOS displacement rates from ascending orbit (track 73) in the period of 23 November 2017 – 29 November 2017 and 29 November 2017 – 5 December 2017





Rys. 8. Ruchy powierzchni terenu w kierunku padania wiązki fali radiowej (LOS) wysłanej przez satelity Sentinel o orbicie zstępującej (ścieżka 22) w okresach: 02.12. – 08.12.2017 r. oraz 08.12. – 14.12.2017 r.

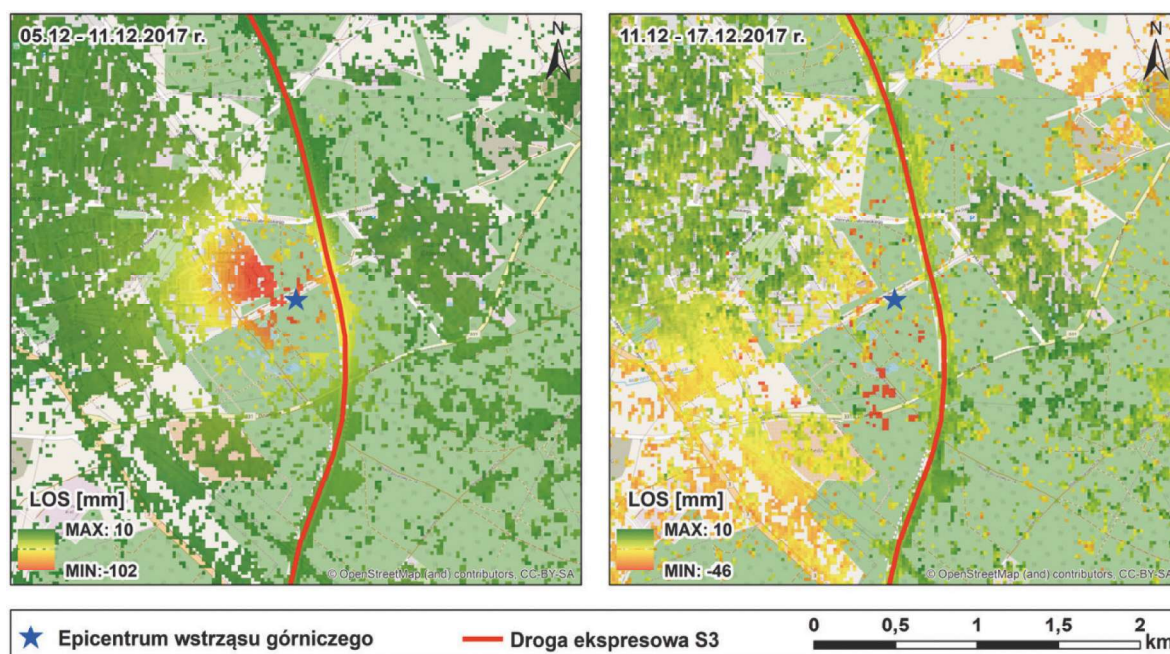
Fig. 8. LOS displacement rates from descending orbit (track 22) in the period of 2 December 2017 – 8 December 2017 and 8 December 2017 – 14 December 2017

na 5 dni i jeden dzień po wystąpieniu wstrząsu. Biorąc pod uwagę, że w okresie przed pojawianiem się wstrząsu nie rejestrowano na tym terenie żadnych znaczących przemieszczeń, wyniki uzyskane z satelity zstępującego dowodzą, że w jeden dzień po wstrząsie sejsmicznym przemieszczenia powierzchni terenu znacznie przyspieszyły. Analiza obrazów pozwoliła na przybliżone określenie epicentrum wstrząsu (gwiazdka na rysunkach). Można zaobserwować wyraźnie kształtującą się lokalną nieckę obniżeniową.

W okresie od 08.12 do 14.12.2017 r. dynamika ruchów powierzchni terenu zmalała, przemieszczenia poziome po-

wierzchni terenu osiągnęły maksymalnie -49 mm (rys. 8).

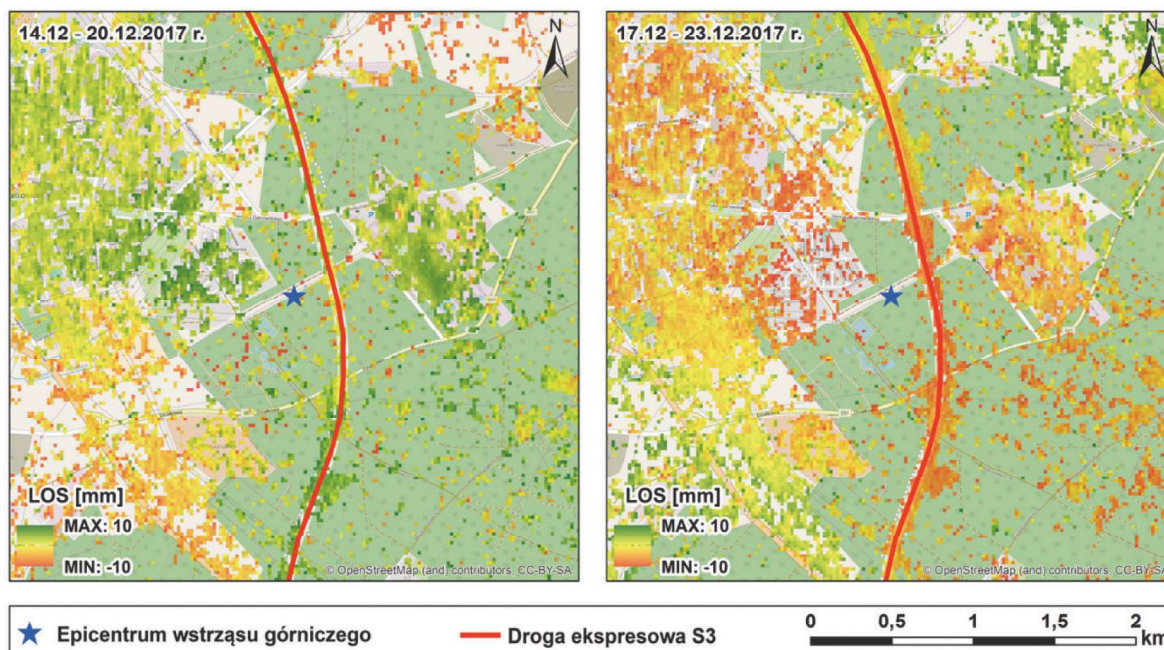
Dynamiczna faza ruchów powierzchni terenu została potwierdzona poprzez zobrazowanie z satelity o orbicie wstępującej. W okresie 05.12-11.12.2017 r. przemieszczenia powierzchni terenu w kierunku LOS osiągnęły maksymalnie -102 mm (rys. 9). Potwierdzono malejącą dynamikę ruchów powierzchni terenu w okresie 11.12-17.12.2017 r. Przemieszczenia powierzchni terenu osiągnęły w tej fazie ruchów -46 mm (rys. 9). Obraz niecki obniżeniowej powstałej w epicentrum wstrząsu jest bardzo wyraźny dla wyników uzyskanych w okresie 05.12-11.12.2017 r., czyli na 4 dni po



Rys. 9. Ruchy powierzchni terenu w kierunku padania wiązki fali radiowej (LOS) wysłanej przez satelity Sentinel o orbicie wstępującej (ścieżka 73) w okresach: 05.12. – 11.12.2017 r. oraz 11.12. – 17.12.2017 r.

Fig. 9. LOS displacement rates from ascending orbit (track 73) in the period of 5 December 2017 – 11 December 2017 and 11 December 2017 – 17 December 2017





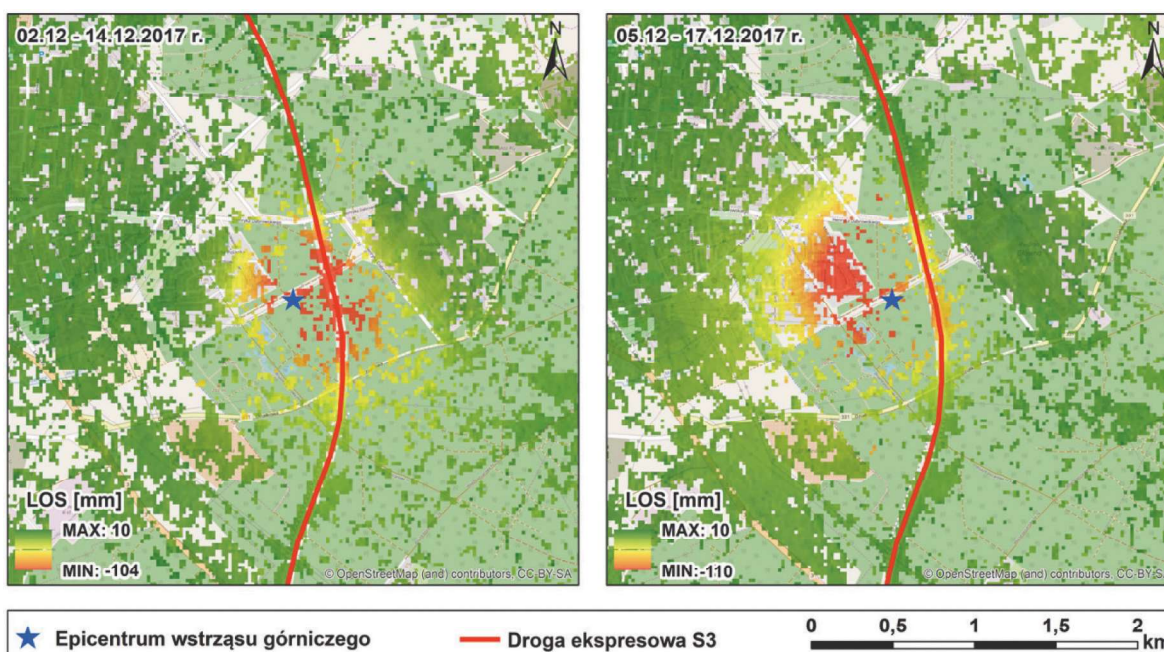
Rys. 10. Ruchy powierzchni terenu w kierunku padania wiązki fali radiowej (LOS) wysłanej przez satelity Sentinel o orbicie zstępującej (ścieżka 22) w okresie 14.12. – 20.12.2017 r. oraz wstępującej (ścieżka 73) w okresie 17.12. – 23.12.2017 r.

Fig. 10. LOS displacement rates from descending orbit (track 22) in the period of 14 December – 20 December 2017 and from ascending orbit (track 73) in the period of 17 December 2017 – 23 December 2017

wystąpieniu wstrząsu. Świadczy to dość wyraźnie o sejsmicie, jako wtórnej przyczynie przemieszczeń.

W 7 i 10 dni po wystąpieniu wstrząsu przemieszczenia powierzchni terenu zaczęły całkowicie zanikać. Zostało to potwierdzone poprzez zobrazowania z satelity Sentinel o orbicie zstępującej w okresie 14.12 – 20.12.2017 r. oraz wstępującej w okresie 17.12 – 23.12.2017 r. (rys. 10).

Prezentowane badania dowiodły, że faza ruchów dynamicznych powierzchni terenu kształtowała się do dwóch tygodni po wystąpieniu wstrząsu. Całkowite przemieszczenia powierzchni terenu w kierunku LOS generowane przez zjawisko sejsmiczne osiągnęły -110 mm (rys. 11).



Rys. 11. Ruchy powierzchni terenu w kierunku padania wiązki fali radiowej (LOS) wysłanej przez satelity Sentinel o orbicie zstępującej (ścieżka 22) w okresie 02.12. – 14.12.2017 r. oraz wstępującej (ścieżka 73) w okresie 05.12. – 17.12.2017 r.

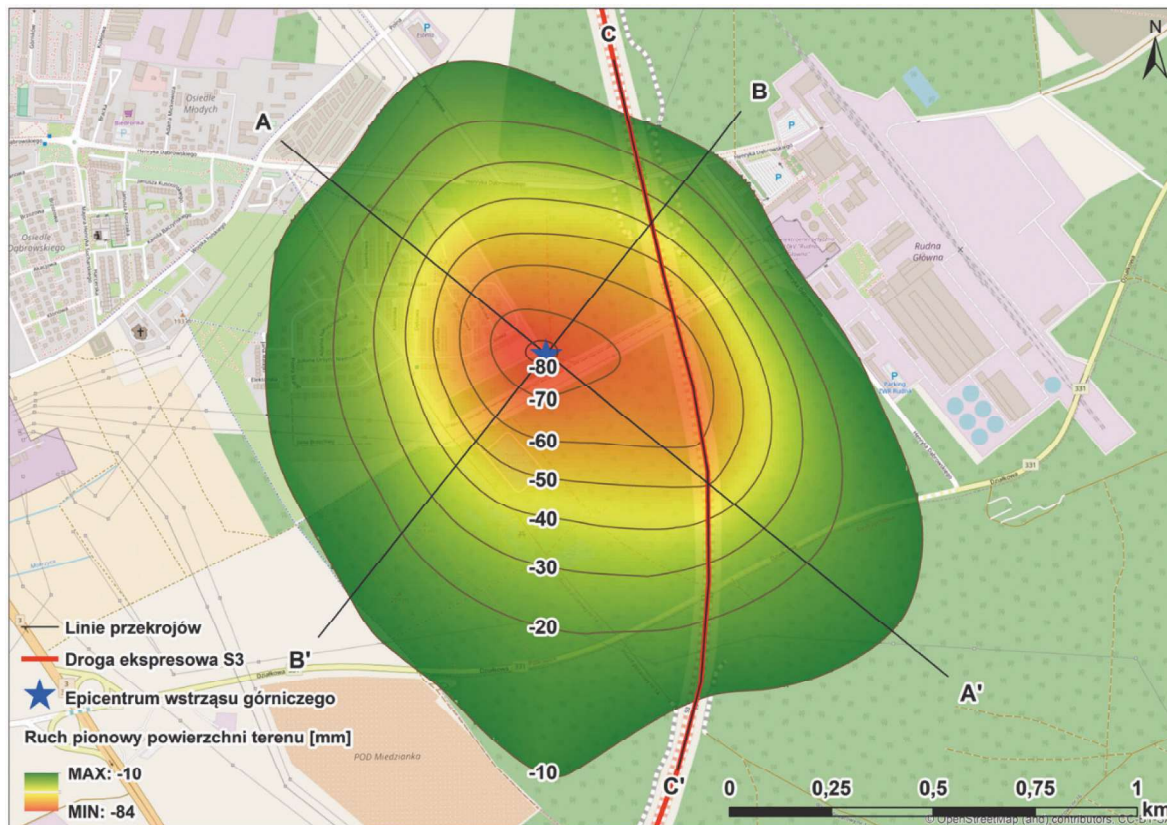
Fig. 11. LOS displacement rates from descending orbit (track 22) in the period of 2 December 2017 – 14 December 2017 and from ascending orbit (track 73) in the period of 5 December – 17 December 2017



Interferogramy dwutygodniowe pozwalają na określenie całkowitej niecki osiadań, która wykształciła się w tym rejonie (rys. 11 i 12). Przesunięcia w kierunku LOS zostały zredukowane do kierunku pionowego. Maksymalne przesunięcia pionowe wygenerowane na drodze interpolacji osiągnęły ostatecznie -84 mm. Rozpiętość niecki obniżeniowej wynosi około 1,9 kilometra (profil A-A') na 1,6 kilometra (profil B-B'), powierzchnia ok. 2,8 km<sup>2</sup>, a objętość ok. 41 tys. m<sup>3</sup>. Nieckę cechuje regularny kształt, jej centrum, z pewną toleran-

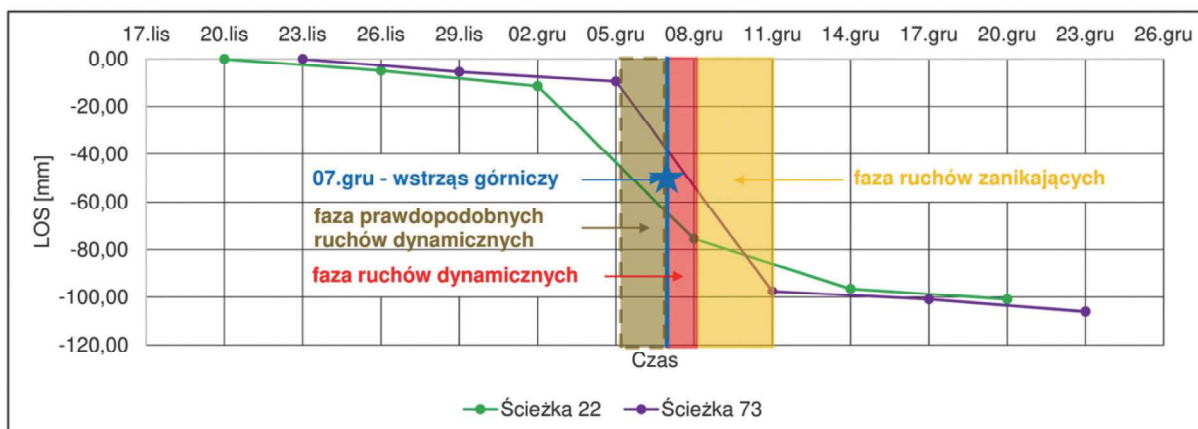
cją przestrzenną, przypuszczalnie zbieżne jest z położeniem epicentrum wstrząsu sejsmicznego pochodzenia górniczego z dnia 07.12.2017 r. Wobec braku bezpośrednich danych z O/ZG Rudna, nie jest to obecnie potwierdzona informacja.

Faza ruchów dynamicznych o największych wartościach i przyspieszeniu to zaledwie 4 dni. W tym okresie ujawnia się ponad 80% całkowitych, powstrząsowych przesunięć powierzchni terenu (rys. 13).



Rys. 12. Wartości ruchów pionowych powierzchni terenu na obszarze powstrząsowej niecki obniżeniowej o stanie ustalonym w okresie 02.12. – 17.12.2017 r.

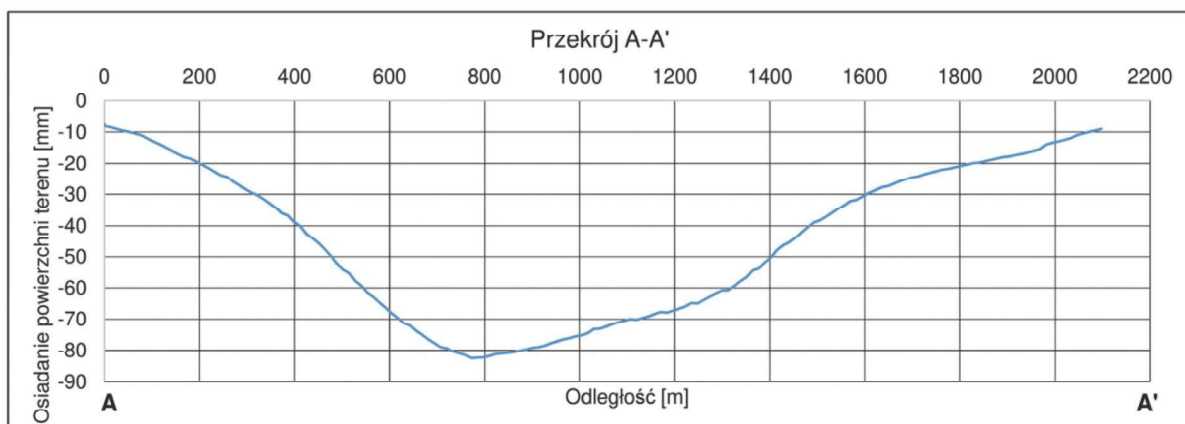
Fig. 12. Vertical ground displacements in the area of final subsidence bowl induced by post-mining tremor in the period of 2 December 2017 – 17 December 2017



Rys. 13. Rozkład ruchów powierzchni terenu w kierunku padania wiązki fali radiowej (LOS) punktu znajdującego się w epicentrum wstrząsu górniczego

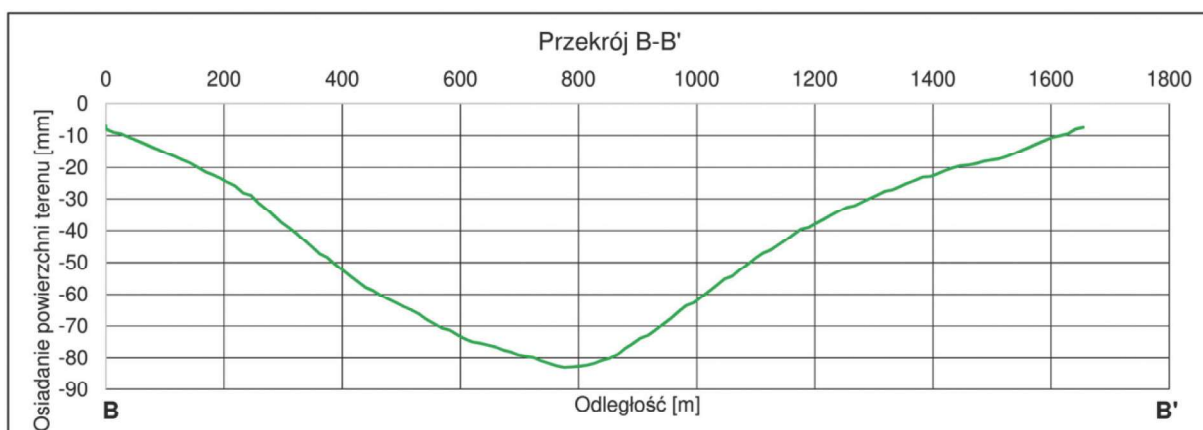
Fig. 13. LOS ground displacements distribution of a point located at the focal point of post-mining tremor





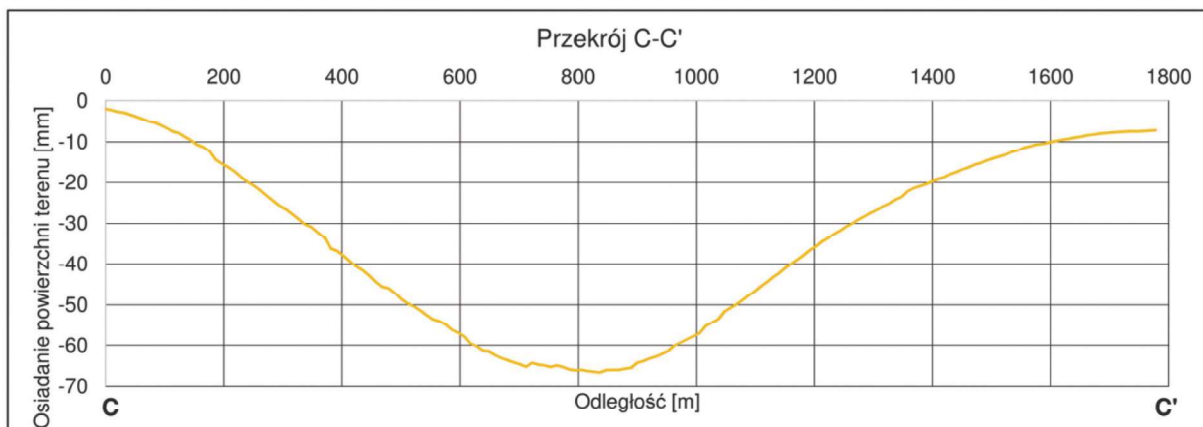
Rys. 14. Przekrój przez powstrząsową nieckę obniżeniową o stanie ustalonym wzdłuż linii A-A'

Fig. 14. Cross-section through the final subsidence bowl induced by post-mining tremor along A-A' line



Rys. 15. Przekrój przez powstrząsową nieckę obniżeniową o stanie ustalonym wzdłuż linii B-B'

Fig. 15. Cross-section through the final subsidence bowl induced by post-mining tremor along B-B' line



Rys. 16. Przekrój przez powstrząsową nieckę obniżeniową o stanie ustalonym wzdłuż linii C-C'

Fig. 16. Cross-section through the final subsidence bowl induced by post-mining tremor along C-C' line

Dla niecki obniżeniowej wygenerowano również profile, które pozwalają na szczegółową analizę ruchów pionowych (rys. 14 - 16). Ich przebieg pokazano powyżej, na rysunku (rys. 12).

## 5. Podsumowanie

W oparciu o zobrazowanie satelitarne możliwa jest detekcja ruchów powierzchni terenu wynikająca ze zjawisk sejsmicznego pochodzenia górniczego. Analizy przeprowadzone

metodą DInSAR w oparciu o radarogramy pozyskane z satelitów Sentinel pozwoliły na wygenerowanie przestrzennego rozproszenia ruchów pionowych wywołanych wstrząsem z 07.12.2017 r. o magnitudzie 4,7. Zidentyfikowana lokalna, dynamiczna niecka obniżeniowa o regularnym kształcie miała rozpiętości około 2 kilometrów, a maksymalne przemieszczenie pionowe na jej obszarze osiągnęło wartość -84 mm. Nie zaobserwowano znaczących ruchów powierzchni terenu przed pojawieniem się wstrząsu. Zobrazowania satelitarne pozwoliły na określenie przekształceń powierzchni terenu tuż po wystąpieniu wstrząsu. Faza ruchów dynamicznych

to około 2 tygodnie. Największe przyrosty przemieszczeń powierzchni terenu występują w okresie do 4 dni po wystąpieniu zjawiska dynamicznego. Po dwóch tygodniach ruchy powierzchni terenu zupełnie zanikają. Można zatem estymować średnią dobową prędkość osiadań powierzchni w fazie dynamicznej na kilkanaście mm/d. Dokładne wartości można by określić jedynie w oparciu o pomiary permanentne, których w tym rejonie nie prowadzono. Biorąc pod uwagę niezwykle zblizoną charakterystykę ruchów powierzchni obserwowaną przez Autorów w odniesieniu do wstrząsu analizowanego w niniejszym artykule oraz wstrząsu z 29.11.2016 r., można postawić kilka nowych hipotez badawczych, częściowo już potwierdzonych. Po pierwsze, nasuwa się wniosek o istnieniu związku powstawania dynamicznych niecek („powstrząsowych”) z momentem i lokalizacją epicentrum wstrząsów sejsmicznych o magnitudach 3,5-5,0. Po drugie, maksymalne przyrosty przemieszczeń w takich nieckach wynoszą w fazie dynamicznej 80-100 mm. Niecki powstrząsowe o parametrach przemieszczeniowych podanych w niniejszym artykule powstają w warunkach eksploatacji głębinowej, w skałach paleozoicznych czerwonego spągowca. Należy zaznaczyć, że eksploatacja górnicza prowadzona jest na dużych głębokościach (ok. 1000 m), systemami chroniącymi strop i ograniczającymi naprężenia w strefie zrobów poprzez stosowanie podsadzki, bądź ugięcia stropu na filarach technologicznych. Nie stwierdzono przy tym, w jakim stopniu lokalne parametry eksploatacji górnicznej (wysokość furty, wielkość i kształt parcel eksploatacyjnych) wpływały na maksymalne przemieszczenia w nieckach powstrząsowych. Do czynników przyczyniających się do generowania zjawisk sejsmicznych należy zaliczyć również lokalną tektonikę górotworu. Dalsze badania w tym kierunku są nadal prowadzone.

## Literatura

- BURGMANN R., ROSEN P. A., FIELDING E. J. 2000 - Synthetic aperture radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, s. 169-209.
- BURTAN Z. 2010 - Zagrożenie sejsmiczne w rejonach eksploatacji rud miedzi sąsiadujących ze strefą uskoku Rudnej Głównej. „*Górnictwo i Geoinżynieria*”, s. 131-140.
- BUTRA J. 2010 - Eksploatacja złoża rud miedzi w warunkach zagrożenia tąpnięciami i zawałami. Wrocław.
- DUBIŃSKI J., KONOPKO W. 2000 - Tąpnięcia: ocena, prognoza, zwalczanie. Główny Instytut Górnictwa, Katowice.
- DUMICZ M., DON J. 1978 - Analiza struktury monokliny przedsudeckiej w rejonie Polkowic. *Acta Universitatis Wratislaviensis*, s. 279-302.
- European Mediterranean Seismological Centre. (4. 01. 2018). Pobrano z lokalizacji [www.emsc-csem.org](http://www.emsc-csem.org).
- GOGOLEWSKAA., KAŻMIERCZAK M. 2014 - Aktywność sejsmiczna w wybranych polach eksploatacyjnych w KGHM Polska Miedź S.A. O/ZG Rudna. CUPRUM - „Czasopismo Naukowo-Techniczne Górnictwa Rud”, s. 35-54.
- GOSZCZ A. 1999 - Elementy mechaniki skał oraz tąpnięcia w polskich kopalniach węgla i miedzi. IGSMiE, Kraków.
- HANSSSEN R. F. 2001 - Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis, Kluwer Academic.
- HEJMANOWSKI R., JÓŻWIK M., MALINOWSKA A., CWIĄKAŁA P., SROKA A., PATYKOWSKI G. 2012 - Influence of mining tremors on deformation of terrain surface. TU Bergakademie Freiberg. Essen: VGE Verlag GmbH. Serie: Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg, s. 220-225.
- KACZMAREK W., ROŻEK R. 2008 - Budowa geologiczna i zagospodarowanie złoża Głogów Głęboki - Przemysłowy (KGHM Polska Miedź S.A.). „Gospodarka Surowcami Mineralnymi”, 24.
- KGHM Polska Miedź S.A. (4. 01. 2018). Pobrano z lokalizacji [www.kghm.com](http://www.kghm.com).
- KGHM Polska Miedź S.A. O/ZG Rudna, 2012-2013. Protokoły z posiedzeń Kopalnianego Zespołu ds. Tapań i Zawałów Pola G-3/4. Polkowice.
- LASKOWSKI M., SMOKAR Z., WRÓBEL J. 2014 - Wpływ zjawisk dynamicznych o charakterze regionalnym na wyrobiska górniczne i powierzchnię terenu na przykładzie tąpnięcia górotworu zaistniałego 19 marca 2013 r. w polu G-3/4 O/ZG „Rudna”. *Górnictwo - człowiek - środowisko: zrównoważony rozwój*, s. 78-91.
- MASSONNET D., FEIGL K. L. 1998 - Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Rev. Geophys.*, 36 (4), s. 441-500.
- MARKIEWICZ A., SZAROWSKI W. 1990 - Zjawiska tektoniczne w południowej części kopalni Lubin. Konferencja Polskiego Towarzystwa Geologicznego: Problemy tektoniki LGOM, 4-8. CUPRUM Wrocław.
- MARKIEWICZ A., SUCHAN J., TOMANIK R. 2007 - Eksploatacja górnicza a zuskokowanie spągowej partii utworów cechsztyńskich w Koplani „Rudna” KGHM Polska Miedź S.A. „*Górnictwo i Geoinżynieria*”, s. 395-407.
- Państwowy Instytut Geologiczny - Centralna Baza Danych Geologicznych. (4. 01. 2018). Pobrano z lokalizacji [http://geoportal.pgi.gov.pl/uslugi\\_gis](http://geoportal.pgi.gov.pl/uslugi_gis).
- SALSKI W. 1975 - Tektonika okolic Lubina. „*Biletyn Instytutu Geologicznego*”, s. 61-198.
- SALSKI W. 1977 - Rozwój tektoniczny obszaru między Lubinem a Sieroszowicami. *Polskie Towarzystwo Geologiczne*, Kraków.
- United States Geological Survey. (4. 01. 2018). Pobrano z lokalizacji [www.usgs.gov](http://www.usgs.gov).
- ZEBKER H. A., ROSEN P. A., HENSLEY S. 1997 - Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps, *Journal of Geophysical Research*, 102, s. 7547-7563.

Artykuł wpłynął do redakcji – maj 2018  
Artykuł akceptowano do druku 11.07.2018