

WYKORZYSTANIE INTERFEROMETRII SATELITARNEJ DO MONITORINGU DEFORMACJI POWIERZCHNI TERENU NA PRZYKŁADZIE LGOM

SATELLITE INTERFEROMETRY FOR GROUND DEFORMATION MONITORING, LGOM EXAMPLE

MAREK GRANICZNY¹, ZBIGNIEW KOWALSKI¹, PRZEMYSŁAW KOWALSKI¹, MARIA PRZYLUCKA¹

Abstrakt. W artykule przedstawiono zmiany powierzchni terenu zaistniałe w obszarze górniczym Rudna między 28 listopada a 10 grudnia 2016 r. Zmiany zarejestrowano na interferogramie różnicowym pozyskanym ze scen najnowszego satelity radarowego Sentinel-1. Interferogram jest obrazem rastrowym, będącym złożeniem dwóch scen radarowych, na którym jest przedstawiona różnica faz odbitego sygnału. Różnica ta odzwierciedla zmiany zaistniałe na powierzchni terenu w postaci prążków interferometrycznych, które można interpretować jako kolejne warstwy zmian morfologii terenu. W badanym okresie zidentyfikowano zmiany rzędu 3 cm. Wszystko wskazuje na to, że były one związane ze wstrząsem sejsmicznym z dnia 29 listopada, co zostało potwierdzone przez porównanie lokalizacji epicentrum zjawiska i wystąpienia deformacji terenu.

Słowa kluczowe: InSAR, LGOM, zjawiska sejsmiczne, prążki interferometryczne, Sentinel-1.

Abstract. The article presents surface deformations and changes in the Rudna mining areas, which occurred between 28 November and 10 December 2016. These changes were recorded on the radar differential interferogram derived from the scenes of the ESA radar satellite Sentinel-1. The interferogram is a raster image that is a combination of two radar scenes, showing the phase difference of the reflected microwave signal. This difference reflects changes occurring on the earth surface in the form of interferometric stripes called “fringes”. They are interpreted as contours of changes in earth morphology. During the analyzed period, 3-cm variations were identified. All indications show that they were related to the November 29 seismic shock, which was confirmed by comparing the location of the earthquake epicentre with the recorded fringes.

Key words: InSAR, LGOM, seismic event, fringes, Sentinel-1.

WSTĘP

Jednym z najpoważniejszych zagrożeń towarzyszących górnictwu rud miedzi w Polsce jest sejsmiczność. 29 listopada 2016 r. doszło w, należącej do KGHM Polska Miedź S.A., kopalni miedzi Rudna w Polkowicach do silnych samoistnych wstrząsów, które wywołały zawał na głębokości ponad 1000 m. Wstrząsy spowodowały poważne zniszczenia. Siłę tych drgań oceniono na 8 w górniczej 10-stopniowej skali i były one odczuwalne nawet w oddalonym o ok.

20 km Głogowie. Według serwisu earthquaketrack.com magnituda wstrząsów sięgała 4,4. Jest to jednak wartość znacznie zawyżona. Obliczenia wykonane przez Instytut Geofizyki (IGF) z sieci pomiarowej „LUMINEOS” z użyciem lokalnego modelu prędkościowego dały wartości $M = 3,4-3,5$.

Ocenia się, że była to największa katastrofa, tragiczna w skutkach, na terenie Legnicko-Głogowskim Okręgu Miejskim od chwili powstania zagłębia. Wstrząsy sejsmicz-

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; e-mail: zbigniew.kowalski@pgi.gov.pl, przemyslaw.kowalski@pgi.gov.pl, maria.przylucka@pgi.gov.pl.

ne odzwierciedliły się również w postaci przemieszczeń na powierzchni terenu, co wykazała analiza interferometryczna zdjęć satelitarnych, wykonanych w zakresie mikrofal. Analizę danych przeprowadzono, wykorzystując dane z najnowszego satelity radarowego Sentinel-1. Tradycyjna radarowa interferometria różnicowa (ang. *Differential Synthetic Aperture Radar Interferometry* – DInSAR) wykorzystuje zobrażenia mikrofalowe z radaru bocznego wybierania z anteną syntetyzowaną SAR (ang. *Synthetic Aperture Radar*). Różnica faz powracającego sygnału zarejestrowanego dla obrazów tego samego obszaru, pozyskanych w różnym czasie, służy do detekcji deformacji powierzchni terenu. Deformacje przedstawia się w postaci interferogramu, gdzie prążki interferometryczne odpowiadają wielkości i zakresowi deformacji powierzchni zachodzącej w czasie między dwoma zobrażeniami. Do metody różnicowej wykorzystano 2 sceny radarowe: pierwszą na dzień przed wstrząsem (28.11.2016 r.) i drugą 11 dni po wstrząsie (10.12.2016 r.). W wyniku przetworzenia tych scen otrzymano obraz niecki przemieszczeń o kształcie elipsy o osiach 2,5 km (N–S) i 2 km (W–E). Ostatecznie można wyciągnąć wniosek, że przemieszczenie w kierunku padania wiązki radarowej (line-of-sight, LOS) w okresie 28.11.16 r. –10.12.16 r. (12 dni) wyniosło na powierzchni terenu ok. 3 cm.

CHARAKTERYSTYKA GEOLOGICZNA I SEJSMICZNA OBSZARU BADAŃ

Do ważnych czynników sprzyjających generowaniu wysokoenergetycznych wstrząsów sejsmicznych należy między innymi znaczne zaangażowanie tektoniczne eksploatowanego złoża, przejawiające się zwłaszcza występowaniem dyslokacji o dużych zrzutach. Obszar Legnicko-Głogowski Zagłębia Miedziowego (LGOM) jest położony w południowo-zachodniej części monokliny przedsudeckiej. Jej budowa strukturalna jest zdeterminowana poszczególnymi fazami sedymentacji i ruchami górotwóru, co sprawia, że złoża rud miedzi są silnie zaburzone licznymi uskokami, które charakteryzują się zrzutami do 100 m i głównym przebiegiem w kierunku NW–SE. Wśród nich można wyróżnić największe: Rudnej Głównej, Głównego Lubina i Szklar Górnych (Butra, 2010). Warto również zauważyć, że wspomniane uskoki są położone w obrębie dwóch regionalnych lineamentów: północnej i południowej Odry, wyznaczonych

na podstawie zdjęć satelitarnych, charakteryzujących się zbliżonym przebiegiem względem stron świata oraz podwyższoną sejsmicznością (Graniczny, 1991).

Obszar badań znajdował się na terenie kopalni Rudna (fig. 1), gdzie eksploatacja jest prowadzona w trzech rejonach wydobywczych: Rudna Główna, Rudna Zachodnia R-IX oraz Rudna Północna. Zasoby przemysłowe kopalni wynoszą 432 miliony ton rudy miedzi (wg stanu na 31.12.2015 r.), a obecna zdolność produkcyjna kopalni Rudna sięga 12 mln ton rudy rocznie.

Obszar LGOM znajduje się przy południowej granicy permskiego basenu europejskiego (PBE) na kontakcie tektonicznym z blokiem przedsudeckim. Skąły podłoża są złożone z proterozoicznych i staropaleozoicznych gnejsów, łupków krystalicznych i granitoidów. Utwory te są przykryte niezgodnie przez zdeformowane utwory karbonu: konglomeraty, piaskowce i mułowce, oraz przez permskie mało zaburzone utwory składające się z wulkanitów i skał klastycznych. Czerwony spągowiec jest zbudowany z utworów ziarnistych, z ziarnami detrytycznymi scementowanymi hematytem lub getytem, lokalnie gipsem oraz z ziarnami skaleni zmienionymi w minerały ilaste. Czerwony spągowiec podzielono na dolny i górny pakiet typu „red beds”. Składają się one z czerwono-brązowych kon-

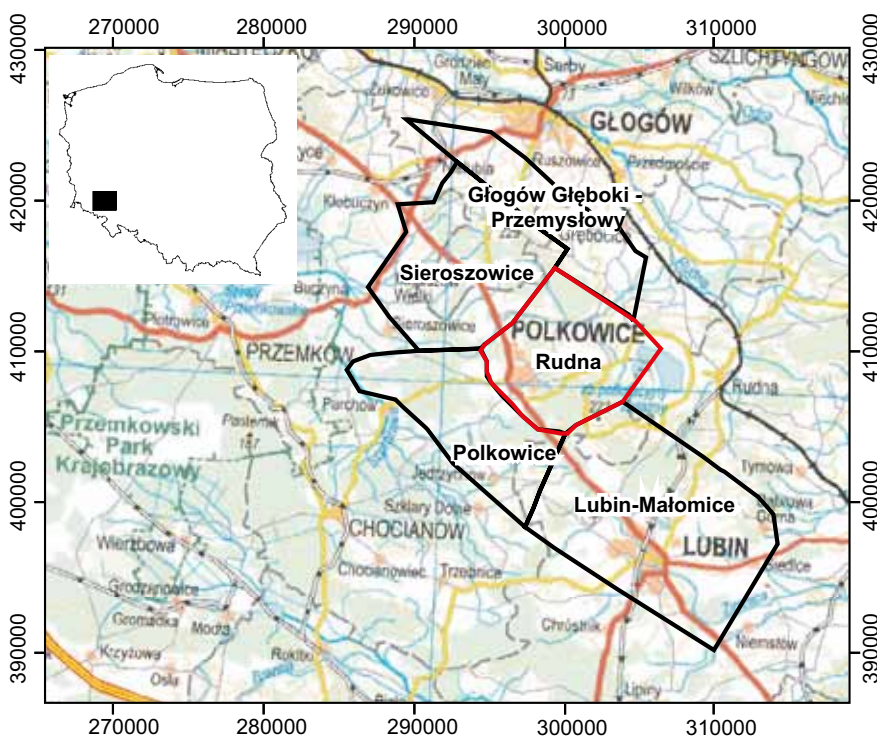
←

Fig. 1. Obszary górnicze między miastami Głogów (na północy) i Lubin (na południu)

Obszar górniczy Rudna zaznaczono na czerwono. Współrzędne w układzie PL-1992

Mining areas between the cities of Głogów (in the north) and Lubin (in the south)

The Rudna mining area is marked in red. Coordinates in PL-1992



glomeratów, piaskowców i mułowców. Osady czerwonego spągowca są przykryte przez biały spągowiec. Jest on pozbawiony hematytu i getytu, a w rejonie obszaru górniczego zawiera siarczki jako spoiwo oraz ziarna detrytyczne. Biały spągowiec to w części odbarwiony w czasie transgresji cechsztyńskiej czerwony spągowiec. Kontakt czerwonego i białego piaskowca jest nieostry i nieregularny. Utwory permu dolnego są zgodnie przykryte przez cyklotemy permu górnego i przez triasowy pstry piaskowiec. Białe piaskowce przykrywa wapień podstawowy. Jest to mikryt z domieszką materiału ilastego. Kontakt z nim ma łupek miedzionośny. Jest on zbudowany z materiału ilastego, drobnoziarnistego dolomitu i materiału organicznego. Łupek miedzionośny ma miąższość ok. 1 m i przechodzi stopniowo w ciemnoszare bogate w materiał organiczny wapienie mikrytowe dolomityczne i sparytowe. Węglańki stopniowo przechodzą w anhydrydy, hality i pozostałe utwory cechsztynu.

Ekonomiczne zawartości Cu występują głównie w białych piaskowcach (~50% zasobów), czarnym łupku (~20% zasobów) oraz w dolomicie (~30% zasobów). Średnia miąższość horyzontu zmineralizowanego wynosi ok. 4 m (Kucha, Pawlikowski, 2010).

W Polsce notowane są liczne zjawiska indukowane działalnością górniczą. Rejon odkrywkowej kopalni pod Bełcha-

towem, Górnosląskie Zagłębie Węglowe czy LGOM są odpowiedzialne za dużą część polskiej sejsmiczności. Innymi formami działalności człowieka, mogącymi skutkować aktywnością sejsmiczną, są budowy dużych zapór wodnych, odwierty geotermalne lub szczelinowanie w poszukiwaniu gazu łupkowego, ale zjawiska te są mniejsze i dotychczas nie osiągnęły w Polsce poziomu odczuwalności (magnituda ok. 2,5).

Zasadniczą przyczyną powstawania wstrząsów górniczych jest pojawianie się naprężeń w górotworze w trakcie prowadzonej eksploatacji. Wybieranie znacznych ilości skał, składowanie hałd, prace strzałowe – wszystko to narusza naturalną równowagę. Gdy naprężenia kumulujące się w nich przekroczą próg mechanicznej wytrzymałości, następuje ich nagłe wyzwolenie. Stosuje się też strzelania wyzwalające, gdy naprężenia zbliżają się do punktu krytycznego, aby w bezpieczny sposób odprężyć górotwór, nie narażając górników na niebezpieczeństwo. Największym obszarem indukowanej aktywności sejsmicznej w Polsce jest LGOM.

Przedmiotem przedstawionych badań były przemieszczenia terenu zaistniałe w wyniku wstrząsów z 29 listopada 2016 r., które spowodowały poważne zniszczenia zarówno na powierzchni, jak i w górotworze. Niektóre wyrobiska oraz jeden z szybów zostały zasypane. W katastrofie straciło życie 8 górników, a wielu zostało rannych.

SATELITARNA INTERFEROMETRIA RADAROWA

Pionowe deformacje terenu na terenach górniczych są monitorowane przy wykorzystaniu tradycyjnych metod geodezyjnych (niwelacja precyzyjna i techniczna oraz pomiary GNSS) oraz sporadycznie za pomocą różnicowych analiz wysokorozdzielczych numerycznych modeli terenu pozyskanych za pomocą LIDAR-u. Szybki rozwój teledetekcyjnych metod obrazowania Ziemi pozwala na badanie możliwości ich wykorzystania do detekcji i monitoringu dynamicznych zmian powierzchni terenu. Wśród tych metod najbardziej użyteczną okazała się różnicowa interferometria radarowa. Przykłady jej wykorzystania na terenach górniczych na świecie można znaleźć w pracach Carnec i Delacourt, 2000; Wegmuller i in., 2004; Herrera i in., 2007; Becke i in., 2012.

Interferometria jest to grupa technik, w której w wyniku złożenia na siebie dwóch fal, na ogół elektromagnetycznych, uzyskuje się informację o względnej zmianie właściwości fali. Satelitarna interferometria radarowa wykorzystuje zobrazenia mikrofalowe z radaru bocznego wybierania z anteną syntetyzowaną SAR (ang. *Synthetic Aperture Radar*). Fale radarowe mają kluczowe znaczenie dla szeregu zastosowań obrazowania ziemi, gdyż ten system obrazowania pozwala na penetrację chmur i jest niezależny od oświetlenia słonecznego (może operować w nocy). Obraz ziemi, pochodzący z pojedynczej rejestracji podczas przelotu satelity, zawiera informację o amplitudzie i fazie odbitego od jednostki terenowej sygnału. Złożenie dwóch obrazów tego samego obszaru, pozyskanych z dwóch różnych pozycji sa-

telity w tym samym czasie (dwie anteny na tej samej platformie obrazujące jednocześnie) lub pozyskanych w różnym czasie przez tego samego satelitę (jedna antena obrazująca ten sam obszar w dwóch różnych momentach czasowych) skutkuje powstaniem nowego obrazu, który zawiera informację o różnicy faz i nazywany jest interferogramem. Zmiana fazy zapisana na interferogramie odzwierciedla różnicę odległości satelity od punktu pomiarowego w funkcji położenia satelity i czasu rejestracji obrazu. Obraz interferogramu pozwala na wygenerowanie numerycznego modelu terenu oraz na bardzo dokładny pomiar zmian powierzchni terenu. Na takim obrazie prążki interferometryczne układają się jak kolejne warstwy zmian morfologii terenu, które odpowiadają wielkości i zakresowi deformacji powierzchni zaszelej w czasie między dwoma zobrazeniami. Technika tworzenia interferogramów różnicowych nazywa się **interferometrią różnicową SAR** (ang. *differential SAR interferometry* – DInSAR, Ferretti i in., 2007).

Pierwszym europejskim satelitą radarowym był European Remote Sensing (ERS-1), wystrzelony przez Europejską Agencję Kosmiczną w 1991 r. Szybka rozbudowa systemu o bliźniaczego satelitę ERS-2 w 1995 r. umożliwiła rejestrację danych w bardzo korzystnej dla technik interferometrycznych konstelacji „tandem”, kiedy obraz tego samego obszaru zostaje zarejestrowany z dwóch różnych pozycji, ale w trakcie bardzo podobnych warunków atmosferycznych. Od tego czasu techniki interferometrii radarowej SAR (ang. *Interferometric SAR* – InSAR) rozbudowano o nowe algoryt-

my. W niedługim czasie na orbitach znalazło się wiele innych systemów, a przetwarzanie interferogramów stało się bardzo użyteczne nie tylko dla tworzenia wysokorozdzielczych numerycznych modeli terenu, ale również do detekcji ruchów powierzchni terenu związanych z takimi zjawiskami, jak trzęsienia ziemi, deformacje związane z sejsmicznością i wulkanizmem, osuwiskami, działalnością górniczą, gruntami słabonośnymi lub ruchami neotektonicznymi (Ferretti i in., 2007). W 2014 r. Europejska Agencja kosmiczna uruchomiła nowego satelitę radarowego – Sentinel-1 – będącego kontynuacją misji ERS i Envisat (Torres i in., 2012). Dane satelity Sentinel-1 są częścią międzynarodowego pro-

gramu Copernicus (<https://scihub.copernicus.eu/>) i są udostępniane nieodpłatnie, co daje unikalne możliwości rozwoju techniki i poszerzenia zakresu jej wykorzystania.

Satelitarna interferometria radarowa była wykorzystywana do badań pionowych zmian powierzchni terenu na terenie LGOM (m.in. Krawczyk, Perski, 2000; Popiołek i in., 2004; Popiołek, Krawczyk, 2006). Badania te ukazały przydatność interferogramów do detekcji osiadania spowodowanego podziemnym wydobyciem złóż. Wykorzystane interferogramy ERS umożliwiły określenie zasięgu i wielkości niecek, a widoczne zmiany dochodziły do 10 cm osiadania w czasie dwóch miesięcy.

ANALIZA DANYCH SEJSMICZNYCH

W pracy wykorzystano dane zgromadzone przez International Seismological Centre (ISC), Instytut Geofizyki PAN oraz opracowania statystyczne danych KGHM Polska Miedź S.A., dokonane przez Machonia (2013). Historycznie obszar ten wykazywał się niską sejsmicznością – w danych historycznych jest zaledwie kilka wzmianek o odczuwalnych zjawiskach w tym rejonie (Guterch, 2009). Analizie czasowej i przestrzennej poddano dane o ponad 6000 zjawisk z terenu LGOM. Dane pochodzące z IGF PAN są bardziej wiarygodne od tych z innych agencji sejsmicznych ze względu na znajomość lokalnych warunków geologicznych, prędkości rozchodzenia się fal sejsmicznych w tym rejonie, a w ostatnich latach ze względu na rozmieszczenie nowej, lokalnej sieci pomiarowej, służącej wyłącznie zbieraniu danych z terenu LGOM. Dane z innych europejskich agencji pochodzą z obliczeń nieuwzględniających lokalnych modeli prędkości-

wych. Często zjawiska mają błędnie wyznaczoną głębokość, co bezpośrednio przekłada się na błąd lokalizacji, a więc także magnitudy. Tam, gdzie było to możliwe, wykorzystano magnitudę podawaną przez IGF PAN, obliczaną z najbliższej położonej stacji w Książu k. Wałbrzycha. Dane z lokalnej sieci pomiarowej IGF, która zapewnia najlepszą informację na temat sejsmiczności na terenie LGOM, dostępne są od 10 grudnia 2013 r. Od tej daty informacje podawane przez inne agencje nie są brane pod uwagę jako dużo mniej dokładne.

Aktywność sejsmiczna dla LGOM w pierwszych latach eksploatacji nie była wystarczająco dobrze monitorowana. Zarówno krajowa, jak i światowa sieć sejsmiczna nie raportowały w tym czasie wszystkich zjawisk. Za całe lata 70. XX w. w bazie danych ISC jest ich zaledwie 8. Wraz ze wzrostem wydobywania, otwieraniem nowych kopalń i ich oddziałów, pojawiały się kolejne wstrząsy, a ich liczba i energia rosła.

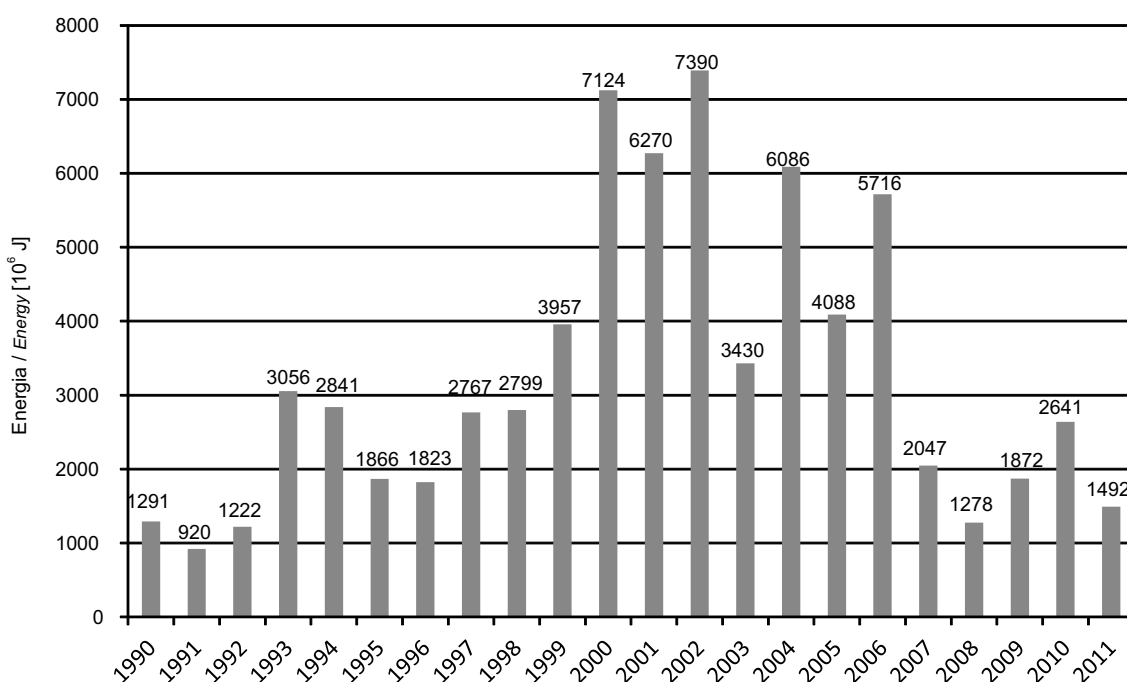


Fig. 2. Sumaryczna energia wstrząsów w latach 1990–2011. Oś pionowa w 10^6 J. Na podstawie Machoń, 2013

Total shock energy in 1990–2011. Vertical axis at 10^6 J. Based on Machoń, 2013

Pojawienie się w Europie nowego, silnego źródła sejsmicznego zaowocowało większym zainteresowaniem opracowaniem zjawisk, co przełożyło się na liczbę raportów zapisanych w bazie ISC. Regularne raportowanie lokalizacji LGOM do światowych centrów przez IGF PAN rozpoczęto jednak dopiero od 1999 r. i od tego czasu dane można traktować jako wystarczająco kompletne.

W swojej pracy Machoń, dysponujący danymi samego KGHM Polska Miedź S.A., zaprezentował wykres sumarycznej energii wstrząsów o $E \geq 103$ J w latach 1990–2011 (fig. 2).

Z wykresu widać, że aktywność sejsmiczna LGOM rosła sukcesywnie, aby osiągnąć maksimum w latach 2000–2002, po czym wyraźnie maleje. Stabilny poziom osiąga w latach 2007–2011. Pierwotny wzrost aktywności sejsmicznej od lat 70. XX w. do 2000 r. należy wiązać wprost ze wzrostem wydobywania (Machoń, 2013). Spadek aktywności w późniejszych latach wiąże się ze wzrostem głębokości eksploatacji, wkroczeniem w nieco odmienny geologicznie obszar, gdzie

zarówno w spągu, jak i w stropie znajdują się miększe skały o mniejszej wytrzymałości mechanicznej (Butra, 2010; Machoń, 2013). Obecnie eksploatowany obszar ma skłonność raczej do powolnego osiadania niż do gwałtownie zachodzących spękań.

Na figurze 3 zaprezentowano lokalizacje zjawisk, uzyskane z sieci pomiarowej IGF PAN przez platformę naukową EPOS (<http://tcs.ah-epos.eu>). Na sieć składa się obecnie (03.2017) 14 trójskładowych krótkookresowych stacji sejsmicznych, rozmieszczonych w obrębie LGOM. Ich rozmieszczenie i mała odległość od źródeł sygnału sejsmicznego pozwalają na uzyskanie najdokładniejszych lokalizacji nawet dla małych zjawisk. Na mapie umieszczono 2524 wstrząsy o magnitudach od M1 do M3,7. Zjawisko jakie miało miejsce 29 listopada 2016 r. na kopalni Rudna oznaczono czerwoną gwiazdką. Magnituda zjawiska wynosiła M 3,4, co stawia je w szeregu dużych ale nie największych, jakie miały miejsce w rejonie LGOM.

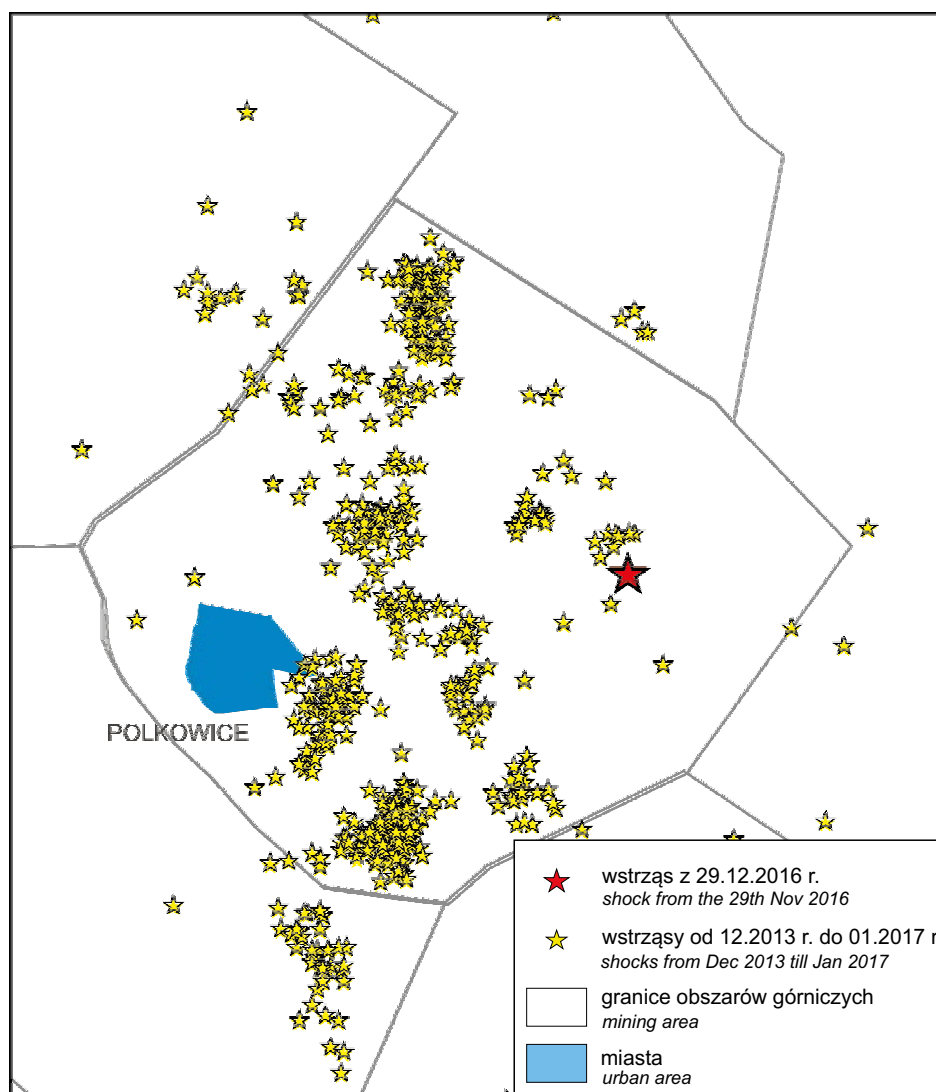


Fig. 3. Lokalizacje zjawisk sejsmicznych w rejonie miasta Polkowice.
Na podstawie danych z sieci pomiarowej IGF PAN (<http://tcs.ah-epos.eu>)

Locations of seismic phenomena in the area of Polkowice.
Based on data from the IGF PAS measurement network (<http://tcs.ah-epos.eu>)

ANALIZA INTERFEROMETRYCZNA

Analiza satelitarnych danych radarowych Sentinel-1, przetworzonych w technice interferometrii różnicowej, wykazała pionowe przemieszczenia terenu, mogące mieć związek ze wstrząsem sejsmicznym. Zarejestrowane zmiany dotyczą okresu między wykorzystanymi scenami, tj. 28 listopada a 10 grudnia 2016 r. i układają się w kształt elipsy o powierzchni ok. 16 km² (fig. 4). Największe przemieszczenie miało miejsce w centralnej jej części. Na figurze 4 można zaobserwować dwa kolejne prążki interferometryczne (ten sam kolor warstwy zmian występuje dwa razy), a w centralnej części następuje dekorelacja sygnału. Jeden prążek oznacza przemieszczenie ok. 2,75 cm, można więc wysnuć wniosek, że największa pionowa deformacja w badanym rejonie mogła wynosić ok. 3 cm i występuje ona niedaleko zarejestrowanego epicentrum wstrząsu sejsmicznego.

W dalszej części analizy próbowano powiązać nieckę z przebiegiem głównych uskoków o dużych zrzutach. Niestety nie stwierdzono bezpośredniego związku, ponieważ uskok Rudnej Główniej przebiega w południowej części obszaru górniczego Rudna. Z analizy literatury wynika, że przyczyną deformacji utworów pogranicza cechsztynu i czerwonego spągowca jest występowanie piaskowca o spoiwie anhydrytowym, jako skały podatnej na tąpnięcia (wstrząsy). Jeżeli chodzi o lokalizację powierzchniowej niecki w stosunku do lokalizacji epicentrum wstrząsów, wyznaczonych na podstawie sieci sejsmometrów (biuletyn ISC), to znajduje się ono w odległości 3,5 km na południowy zachód od niecki obniżeniowej.

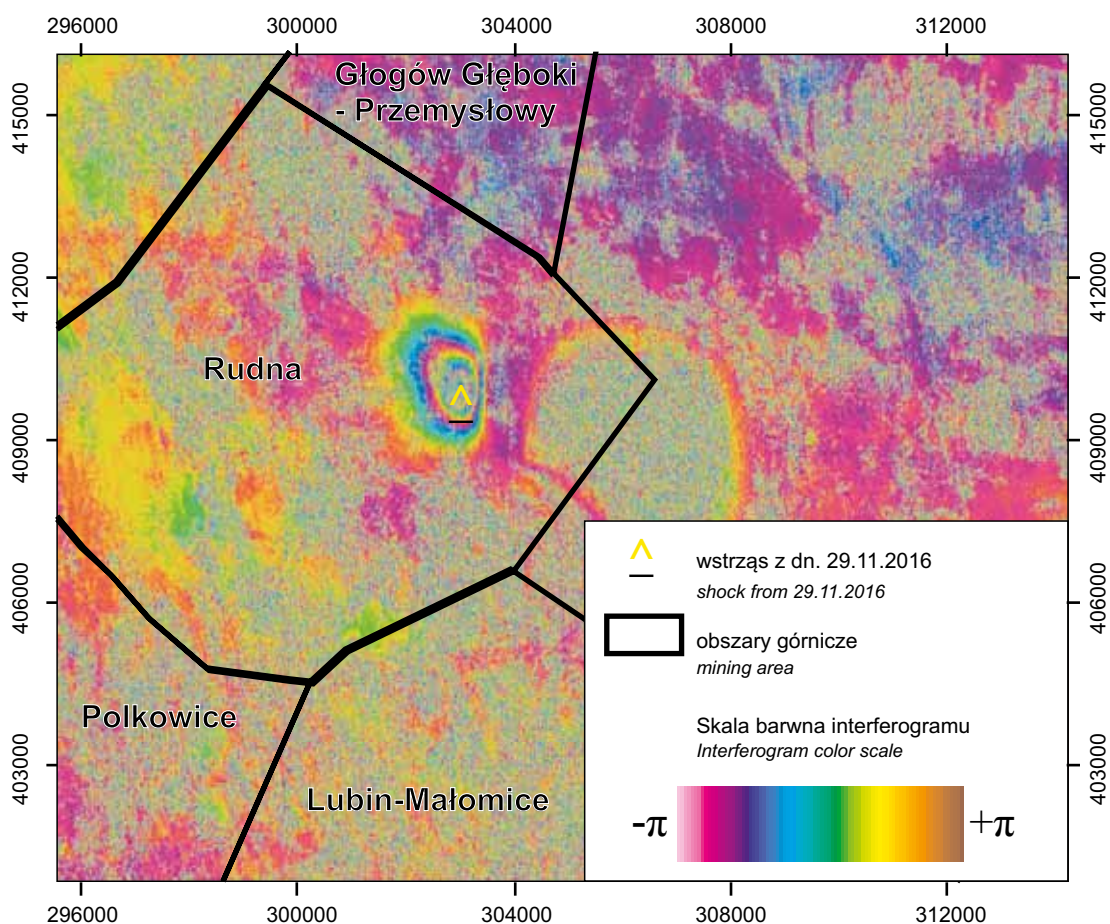


Fig. 4. Interferogram różnicowy na podstawie scen radarowych satelity Sentinel-1 z okresu 28.11.2016 r. –10.12.2016 r. Prążki interferometryczne, widoczne w okolicy zjawiska sejsmicznego z 29.11.2016 r. odwierciedlają zmiany na powierzchni terenu. Pelen cykl zmiany 2π oznacza zmianę równą połowie długości fali, a więc 2,75 cm. Współrzędne w układzie PL-1992

Differential interferogram based on Sentinel-1 satellite radar scenes from 28.11.2016 and 10.12.2016. Interferometric fringes visible in the area of the seismic event from 29.11.2016 reflect changes on the surface. The full colour cycle of phase change (2π) is equal to the deformation of a value of half of the wavelength, and therefore 2.75 cm. Coordinates in PL-1992

PODSUMOWANIE

1. Samoistne wstrząsy z 29 listopada 2016 r. w kopalni Rudna ocenia się na największą katastrofę na terenie LGOM od czasu rozpoczęcia eksploatacji miedzi. Ich magnitudę oceniono na 3,4–4,4 (w zależności od źródła).
2. Występowanie piaskowca o spoiwie anhydrytowym, który jest skałą podatną na tąpnięcia, umożliwia deformacje powierzchni terenu powodowane wstrząsami.
3. Analiza radarowych scen satelitarnych Sentinel-1, przetworzonych techniką DInSAR, umożliwiła identyfikację pionowych zmian powierzchni terenu. Największe przemieszczenie, zaobserwowane niedaleko epicentrum wstrząsu, wyniosło ok. 3 cm.
4. Biorąc powyższe pod uwagę, obszar LGOM powinien zostać objęty systematycznym monitoringiem przy zastosowaniu interferometrii satelitarnej. W tym kontekście warto podkreślić, że Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy dysponuje odpowiednim doświadczeniem i oprogramowaniem do wykonywania analiz interferometrycznych oraz bezpłatnym dostępem do bieżących materiałów satelitarnych znajdujących się w zasobach Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA).

Podziękowania. Autorzy pragną podziękować recenzentowi za wnikliwą recenzję i krytyczne uwagi.

LITERATURA

- BENECKE N., BATESON L., BROWITT C., DECLERCQ P., GRANICZNY M., MARSH S., ZIMMERMANN K., 2012 — Perspectives concerning Satellite EO and geohazard risk management: the way forward – Community paper concerning inactive mines hazards. *W: The International Forum on Satellite EO and Geohazards* (red. Ph. Bally). Forum on Satellite EO and Geohazards, 21–23 May 2012, Santorini Greece., doi: 10.5270/esa-geo-hzrd-2012: 81–90.
- BUTRA J., 2010 — Eksploatacja złoża rud miedzi w warunkach zagrożenia tąpnięciami i zawałami. KGHM CUPRUM sp. z o.o. – Centrum Badawczo-Rozwojowe.
- CARNEC C., DELACOURT C., 2000 — Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, near Gardanne, France. *J. App. Geophys.*, **43**: 43–54.
- FERRETTI A., MONTI-GUARNIERI A., PRATI C., ROCCA F., MASSONET D., 2007 — InSAR Principles-Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation, TM-19, ESA Publications, Holandia, A-3-38.
- GRANICZNY M., 1991 — Możliwości wykorzystania fotolineamentów do oceny sejsmicznego zagrożenia terenu. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **365**: 5–46.
- GUTERCH B., 2009 — Sejsmiczność Polski w świetle danych historycznych. *Prz. Geol.*, **57**, 6: 513–520.
- HERRERA G., TOMAS R., LOPEZ-SANCHEZ J.M., DELGADO J., MALLORQUI J.J., DUQUE S., MULAS J., 2007 — Advanced DInSAR analysis on mining area: La Union case study (Murcia, SE Spain). *Engineer. Geol.*, **90**: 148–159.
- KRAWCZYK A., PERSKI Z., 2000 — Application of satellite radar interferometry on the areas of underground exploitation of copper ore in LGOM–Poland. In First International Congress of the International Society for Mine Surveying, **2**: 209–218.
- KUCHA H., PAWLIKOWSKI M., 2010 — Badania genezy cechsztyńskich złóż miedzi w Polsce. *Geologia*, **36**, 4: 513–539.
- MACHOŃ T., 2013 — Aktywność sejsmiczna w kopalniach rud miedzi KGHM Polska Miedź S.A. w latach 1970–2011. *Prz. Gór.*, **69**, 12: 81–88.
- POPIOŁEK E., KRAWCZYK A., 2006 — Post mining deformation monitoring based on satellite radar interferometry (InSAR). In Proceedings 12th FIG Symposium, Baden, Austria, 22–24 May 2006.
- POPIOŁEK E., BACHOWSKI C., KRAWCZYK A., SOPATA P., 2004 — The attempt to apply radar interferometry InSAR in the monitoring of the impact of the ore deposit exploitation in LGOM. In Proceedings of the fifth International Mining Forum, Cracow–Szczyrk–Wieliczka, Poland, 24–29 February 2004: 257.
- TORRES R., SNOEIJ P., GEUDTNER D., BIBBY D., DAVIDSON M., ATTEMA E., POTIN P., ROMMEN B., FLOURY N., BROWN M., TRAVER I.N., DEGHAJE P., DUESMANN B., ROSICH B., MIRANDA N., BRUNO C., L'ABBATE M., CROCI R., PIERTOPAULO A., HUCHLER M., ROSTAN F., 2012 — GMES Sentinel-1 mission. *Rem. Sens. of Environ.*, **120**: 9–24.
- WEGMULLER U., WERNER C., STROZZI T., WIESMANN A., 2004 — Monitoring mining induced surface deformation, *IGARSS*, **3**: 1933–1935.

SUMMARY

One of the most serious geohazard accompanying mining of copper ores in Poland is seismicity. Important factors contributing to the generation of high-energy shocks include, among other things, a significant degree of tectonic deformation of the exploited bed, which is manifested in particular by the presence of major faults. The Legnica–Głogów Copper Basin (LGOM) is located in the south-western part of the

Fore-Sudetic Monocline, whose structural and tectonic structure is determined by the different stages of sedimentation and rock formation. This condition makes the copper ore deposits highly disturbed by numerous tectonic faults, most of which are characterized by displacements up to 100 m, and trend NW–SE. The most prominent ones are the Main Rudna Fault, Main Lubin Fault and Upper Szklary Fault

(Burtan, 2010). It is also worth noting that these faults are located within two regional lineages (northern and southern Odra, interpreted on satellite imagery, characterized by similar directions and higher seismicity) (Graniczny, 1991). Strong seismic shocks took place on the 29th of November, 2016, in the Rudna Copper Mine in Polkowice. It killed 8 miners, and many others were wounded. The shocks caused also severe damages underground, *e.g.*, an avalanche at a depth of 1000 m. The excavations were covered up to the ceilings, and even one mine shaft was buried. Vibration power of the shocks was rated at 8 in the mining 10-grade scale. According to the internet service earthquaketrack.com, the magnitude of the shocks was 4.4. They were felt within a distance of about 20 km from Głogów. As reported by a KGHM Polish Copper S.A. spokesman the shocks occurred spontaneously and were not induced. The Rudna Mine is the largest copper ore mine in Europe and one of the largest in the world. Copper exploitation in the mine is carried out in three mining areas: Main Rudna, Rudna West R-IX, and Rudna North. The industrial resources of this mine are 432 million tonnes of copper ore (as of 31.12.2015). Mining has been running there since 1974, and the current capacity of the Rudna is 12 million tonnes of ore per year. It is estimated that the shock was the largest disaster in LGOM since the begin-

ning of mining operation. Effects of the seismic shocks are also reflected on the earth surface as shown by the interferometric analysis of satellite images made in the microwave field. Data analysis was performed using data from the ESA Sentinel-1 radar satellite. The traditional Differential Synthetic Aperture Radar (DInSAR) interferometric analysis uses microwave images from the SAR (Synthetic Aperture Radar) satellites. The phase difference of the returning radar signal registered at images of the same area acquired at different times serves to detect terrain deformation presented in the form of interferogram, where the radar wavelengths correspond to the size and extent of surface deformation that occurred over time between the acquisition of two images. Two radar scenes were used for interferometric processing of the differential method: the first one, one day before the shocks (28.11.2016), and the second one 11 days after the shocks (10.12.2016). As a result of the processing, interferometric stripes called “fringes” were obtained. The displacement basin is located in the Rudna mining area (north-eastern part) between Tarnówek and Komorniki. The area is an ellipse with the axes of 2.5 km (N–S) and 2 km (W–E). Finally, it can be concluded that the displacement in the period of 28.11.2016–10.12.2016 (12 days) was approximately 3 cm.