

Analiza ruchów powierzchni terenu wynikających z konwergencji komór solnych przy wykorzystaniu zobrazenia radarowego satelity z misji Sentinel 1

Analysis of ground movements caused by salt cavern convergence with the use of radar imaging from the Sentinel 1 mission satellite



*Dr hab. inż. Agnieszka Malinowska**



*Inż. Artur Guzy**



*Mgr inż. Wojciech Witkowski**



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



*Mgr inż. Paweł Ulmaniec**)*

Treść: Problem optymalizacji pomiarów geodezyjnych na obszarach poddanych wpływom ciągłych deformacji powierzchni terenu wciąż stanowi wyzwanie. Pomiarów ruchów powierzchni na terenach górniczych najczęściej wykonywane są przy wykorzystaniu klasycznych metod geodezyjnych, takich jak niwelacja, tachimetria czy pomiary GNSS. Technika pomiarowa jest dobierana w odniesieniu do dynamiki zjawiska, stopnia zagrożenia powierzchni terenu i potencjału finansowego, którym dysponuje zleceniodawca. Przekształcenia powierzchni terenu obserwowane są z pewnym opóźnieniem w stosunku do czasu prowadzenia wydobycia. Opóźnienie to wynika m.in. z warunków górniczo-geologicznych otoczenia złoża i jest zdecydowanie największe w przypadku prowadzenia wydobycia soli. Powolna konwergencja podziemnych wyrobisk powoduje osiadania powierzchni terenu dochodzące maksymalnie do kilku centymetrów rocznie. Pomiar tego typu deformacji wymaga wysokiej precyzji, a w przypadku intensywnego zagospodarowania powierzchni terenu, również znacznej gęstości sieci pomiarowej. Dlatego też, optymalnym rozwiązaniem wydaje się być wykorzystanie zobrażeń radarowych satelity Sentinel 1-A jako metody wspierającej monitoring przemieszczeń pionowych powierzchni terenu na terenach znajdujących się nad złożem solnym. Prezentowane badania dotyczyły analizy możliwości wykorzystania zobrażenia satelitarnego pochodzącego z misji Sentinel dla wsparcia monitoringu deformacji powierzchni terenu na obszarze miasta Wieliczka na bazie technologii DInSAR. Wynikiem przeprowadzonych analiz jest powierzchniowy rozkład rocznych przyrostów osiadań w okresie 2015-2016 nad konwergującymi wyrobiskami górniczymi. Otrzymane wyniki, poddane analizie dokładnościowej poprzez ich porównanie z pomiarami geodezyjnymi realizowanymi na liniach obserwacyjnych, potwierdziły bardzo wysoką dokładność pomiarów satelitarnych. Prowadzone badania pozwoliły na wyłonienie rejonów o największej dynamice ruchów pionowych, również w strefach, w których klasyczne pomiary geodezyjne nie są prowadzone.

**) Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków **) Kopalnia Soli „Wieliczka”, Wieliczka k. Krakowa*

Abstract: The geodetic measurements optimization problem plays still a crucial role in the mining areas affected by continuous ground deformation. Measurements of those movements are most frequently conducted by the use of the classical geodetic methods such as: levelling, tachymetry or GNSS. The measuring technique is selected with respect to the dynamics of the chosen phenomena, surface hazard degree, as well as the financial potential of the mining entrepreneur. Land surface changes caused by underground exploitation are observed with some delay due to mining and geological conditions of the deposit surroundings. This delay reaches the highest values in case of salt deposits extraction due to slow convergence process that implies ground subsidence maximum up to a few centimetres per year. Measurement of the deformation of this type requires high precision instruments or methods, and in the case of intensively developed urban areas, use of high density of benchmark network. Therefore, the best solution supporting the monitoring of vertical ground displacements in the areas located above the salt deposits seems to be the application of the Sentinel 1A radar imaging satellite system. The presented study involved the analysis of the possibility of applying satellite monitoring of surface deformation for Wieliczka town, using imaging radar from the Sentinel 1 mission. The outcome of the analysis - based on DInSAR technology - is the surface distribution of annual growth of settlements above mining excavations affected by the convergence process in the period of 2015-2016. Comparison of the results with levelling - which has been carried out on the benchmark network - confirmed the high accuracy of satellite observations. What is important, the studies allowed to identify the areas characterized by the greatest dynamics of vertical ground movements, also in the regions where classical geodetic measurements are not conducted.

Słowa kluczowe:

interferometria różnicowa, powolne osiadania powierzchni terenu, Sentinel- 1A, kopalnia soli

Key words:

differential interferometry, slow mining subsidence, Sentinel 1A, salt mine

1. Wprowadzenie

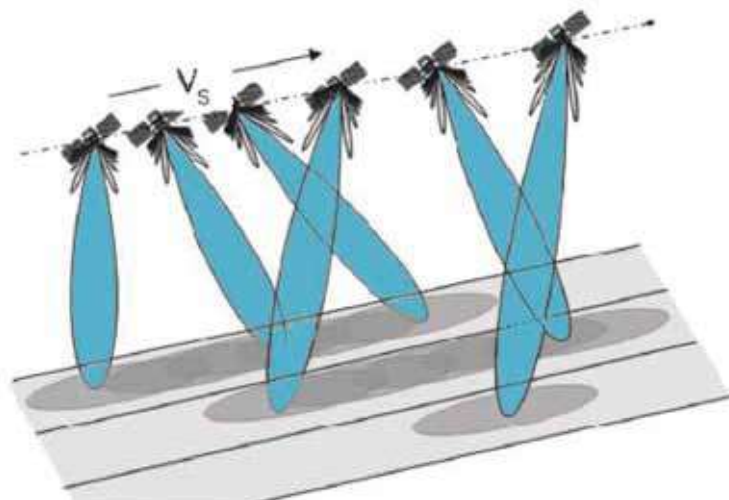
Pomiary przemieszczeń i deformacji wykonywane przez dział mierniczo-geologiczny kopalni soli „Wieliczka” S.A. obejmują cały obszar oddziaływania podziemnych, historycznych wyrobisk solnych i są prowadzone głównie metodą niwelacji precyzyjnej. Układ linii obserwacyjnych pokrywających powierzchnię jest na tyle gęsty, że możliwa jest interpolacja rozkładu obniżzeń (rys. 1). Przyrost obniżzeń od wielu lat jest praktycznie liniowy i wynosi do ok. 0,03 m rocznie. W obszarach, które podlegają zabezpieczeniom prędkość osiadań nawet spada. Z uwagi na tak niewielkie przyrosty przemieszczeń, niezwykle ważna jest dokładność wykonywanych pomiarów oraz znajomość czynników wpływających na ich niepewność (niestabilność i uszkodzenia znaków wysokościowych, ruchy naturalne powierzchni, itp.). Zwiększa to znacznie pracochłonność pomiarów klasycznych i ich opracowanie. Dział mierniczo-geologiczny podejmuje wysiłki w kierunku optymalizacji prac pomiarowych, z równoczesnym zwiększaniem skuteczności monitoringu dla zapewnienia bezpieczeństwa użytkowników powierzchni. Stąd liczne koncepcje zmierzające m.in. do wdrażania innych technologii pomiarowych, jako uzupełnienia klasycznych po-

miarów. Prezentowane w niniejszym artykule badania mają na celu ocenę możliwości zastosowania technologii różnicowej interferometrii radarowej dalekiego zasięgu (DInSAR) do badań ruchów powierzchni w rejonie kopalni soli, w aspekcie dokładnościowym. Celem było zbadanie możliwości wdrożenia tej technologii jako uzupełniającej klasyczne pomiary w sensie czasowym, zwłaszcza w tych rejonach, w których pokrycie znakami geodezyjnymi jest rzadsze.

W ramach programu Copernicus zarządzanego przez Komisję Europejską przy współpracy z Europejską Agencją Kosmiczną ESA (ang. *European Space Agency*) rozwijana jest misja Sentinel. Do analiz interferometrycznych zaprojektowane zostały dwa satelity wchodzące w skład omawianej misji: Sentinel 1-A oraz Sentinel 1-B. Pierwszy z nich ma status operacyjny od października 2014 r., drugi dostarcza zobrażeń powierzchni terenu od września 2016 r. Satelity Sentinel dostarczają bezpłatnych, ogólnodostępnych danych, umożliwiając prowadzenie monitoringu stanu środowiska naturalnego. Na terenie Polski każdy satelita zapewnia pokrycie tego samego fragmentu powierzchni terenu w interwale 6 dni, z okresem przesunięcia wykonywania zobrażenia przez satelitę Sentinel 1-A w stosunku do satelity Sentinel 1-B, który wynosi 3 dni (De Zan, Guarnieri 2006). Zamontowane na sa-



Rys. 1. Linie pomiarowe w rejonie miasta Wieliczka
Fig. 1. Geodetic network near Wieliczka town



Rys. 2. Idea pracy w trybie IW TOPSAR satelitów Sentinel-1 (SUHET 2013)
 Fig. 2. Interferometric Wide Swath (IW) TOPSAR for Sentinel 1 satellite (SUHET 2013)

telitach systemu SAR (ang. *Synthetic Aperture Radar*) pracują w paśmie C o częstotliwości 5,405 GHz. Zdjęcia wykonywane są w trybie tzw. szerokich pasów interferometrycznych IW (ang. *Interferometric Wide Swath Mode*), z zastosowaniem metody progresywnego skanowania TOPSAR (ang. *Terrain Observation with Progressive Scans SAR*) (Farr i in. 2007). Metoda ta polega na wykonywaniu zobrazowania interferometrycznego danej powierzchni w 3 tzw. pod-pasach (ang. *sub-swath*) o długości 250 km i rozdzielczości sytuacyjnej 5 m na 20 m każdy, przy wykorzystaniu ruchomej anteny, która kieruje wiązkę fali radarowej cyklicznie w kierunku od i do azymutu przelotu satelity (rys. 2). Zastosowane rozwiązanie pozwala na zobrazowanie większej powierzchni w czasie jednego przelotu, ale jednocześnie wymaga aplikacji nowych algorytmów w obróbce danych. Tryb skanowania TOPS był wcześniej implementowany eksperymentalnie w satelitach TerraSAR-X oraz RADARSAT-2 (Yague-Martinez 2016b).

2. Charakterystyka rejonu badań

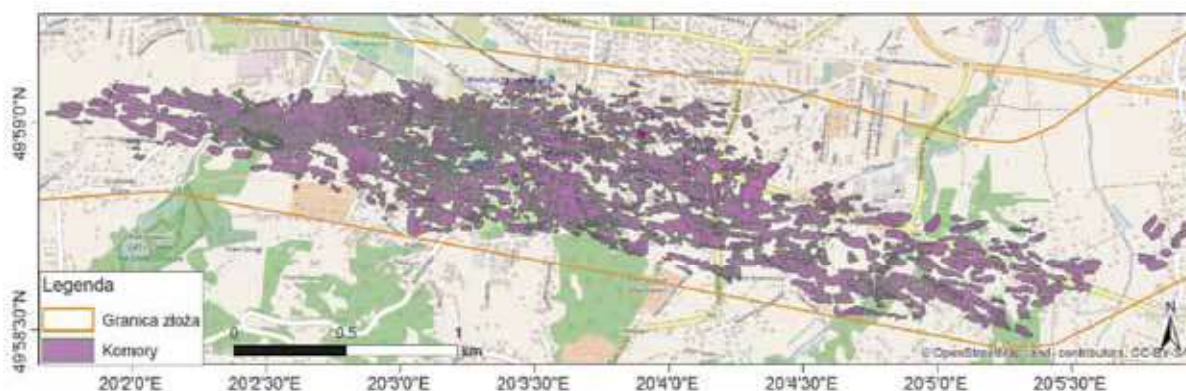
Badania prowadzone były w rejonie miasta Wieliczka znajdującego się nad zabytkową kopalnią soli. Analizami objęto całą powierzchnię terenu, która zlokalizowana jest nad pustkami poeksploatacyjnymi, był to obszar o powierzchni około 18 km² (rys. 3).

2.1. Warunki górniczo-geologiczne

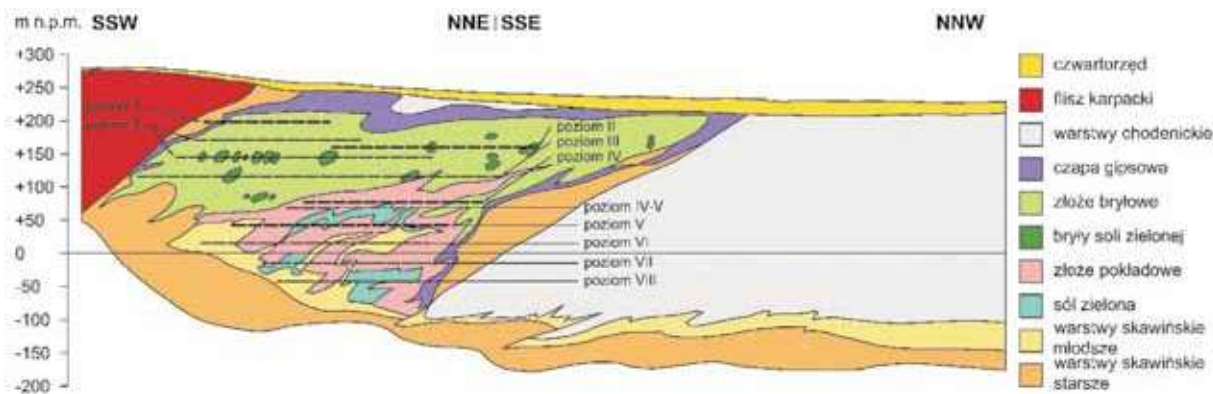
Złoże soli kamiennej pod miastem Wieliczka przebiega w układzie zbliżonym geometrycznie do rozciągniętego pasa o szerokości około 1,5 km i długości 10 km. Głębokość zalegania złoża waha się od trzydziestu kilku metrów ppt. do około 340 m ppt. Złoże soli podzielić można na płycej zalegającą formację bryłową oraz zalegającą pod nią złoże pokładowe (Hanssen 2001, Kleczkowski 1993, Praca zbiorowa 1991).

Złoże bryłowe wykształcone jest w postaci skał płonnych (dominują ilowce margliste) z rozproszonymi w nich bryłami soli kamiennej (tzw. zubry solne). Charakteryzuje się ono wyraźną laminacją wynikającą z różnego stopnia zanieczyszczenia łem przestrzenni międzykrystalicznej. Złoże soli bryłowej eksploatowane było od XVI w., zarówno metodami na „sucho”, jak i na „mokro”. Wydobycie na sucho prowadzone było do końca XIX w., poprzez odbijanie bloków solnych. W XX w. wydobycie realizowane było przy wykorzystaniu materiałów wybuchowych. W drugiej połowie XX w. złoże bryłowe eksploatowane było poprzez ługowanie soli wodą słodką. Metoda ta wykorzystywana w nadmiarze doprowadzała kilkakrotnie do utraty stateczności pewnych partii złoża. W niektórych rejonach było to przyczyną międzypoziomowej migracji pustki, a w niektórych rejonach kopalni zwiększonego dopływu wody do wyrobisk podziemnych.

Złoże pokładowe wykształcone jest w postaci różniących się litologicznie pokładów soli kamiennych, poprzedzielanych



Rys. 3. Rozmieszczenie komór w rejonie złoża wielickiego
 Fig 3. Salt caverns located below the Wieliczka town



Rys. 4. Przekrój geologiczny przez złożo Wieliczka w rejonie szybu Kościuszko (Praca zbiorowa 1991)

Fig. 4. Geological cross section for the salt seam near Kościuszko shaft (Collective work 1991)

przerostami skały płonnej. Eksploatacja w złożu pokładowym prowadzona była głównie metodą filarowo-komorową oraz poprzez ługowanie komór zalegających na najgłębszych poziomach. Eksploatacja w tym złożu została zakończona w 1996 r.

Podkreślić należy, że złożo wielickie charakteryzuje się bardzo dużą zmiennością zarówno w profilu pionowym, jak i w przekroju poziomym. W rejonie kopalni wyodrębnić można cztery zasadnicze strefy różniące się budową geologiczną (rys.4). Część zachodnia złoża (na zachód od szybu Kościuszko) charakteryzuje się stosunkowo niewielkim zaburzeniem złoża pokładowego. Złożo bryłowe praktycznie nie zostało wykształcone w tym rejonie. W części centralnej, w rejonie szybów św. Kingi i Daniłowicz, reprezentowanej przez trzy łuski złoża pokładowego oraz płycej zalegające złożo bryłowe, zaburzenie struktur geologicznych jest zdecydowanie największe. Miąższość czapy anhydrytowo-gipsowej w tej części złoża jest stosunkowo wysoka, jedynie w północnej części tej partii następuje jej wycienienie. W rejonie szybu Wilson i Boża Wola złożo jest uformowane w postaci antykliny. Na bloku wapieni górnej jury spoczywają utwory skawińskie (podsolne), na których zalega kolejno złożo pokładowe i bryłowe. Część wschodnia złoża, podobnie jak zachodnia, jest mniej zaburzona tektonicznie. Zaobserwować można wycienienie czapy anhydrytowo-gipsowej w tym rejonie w stosunku do części centralnej złoża.

Biorąc pod uwagę dużą zmienność budowy geologicznej, która miała istotny wpływ na stosowanie różnych systemów wydobywania, geometria pozostałych pustek poeksploatacyjnych jest silnie zróżnicowana, podobnie jak stan techniczny komór oraz stopień ich zabezpieczenia. Komory złoża bryłowego charakteryzują się regularnymi kształtami zbliżonymi geometrią do elipsoidalnych bloków solnych. Zróżnicowana jest natomiast wielkość brył, które przyjmują charakter od niewielkich pustek nieprzekraczających 8 m^3 do komór, które przechodzą przez 3 poziomy kopalni, osiągając wysokość nawet 35 m. Komory soli zielonej należące do trasy turystycznej zostały w większości zabezpieczone kasztami lub skotwione. Pozostałe komory docelowo zostaną zlikwidowane przez podsadzenie. Natomiast komory złoża pokładowego charakteryzują się urozmaiconymi formami, zależnymi od ukształtowania złoża oraz tektoniki. Część komór wybieranych metodą komorowo-filarową ma regularne kształty, są to prostopadłości o wymiarach 2-3 m na 20-30 m. Geometria komór eksploatowanych metodą ługowania jest znana tylko z pewnym przybliżeniem. Komory te mają dużą objętość i nieregularne kształty. Na stopień zaciśnięcia pustek wpływ ma również panujące w górotworze ciśnienie, które – ge-

neralnie – zwiększa się wraz z głębokością. Szacuje się że całkowita ilość wszystkich komór wynosi około 2400. Ich pierwotna objętość przed podsadzeniem to około $8,1 \text{ mln m}^3$. W wyniku stale prowadzonych prac zabezpieczających podsadzone zostały komory o sumarycznej objętości wynoszącej $4,9 \text{ mln m}^3$. Pozostała pustka poeksploatacyjna wynosi aktualnie $3,2 \text{ mln m}^3$ i ulega powolnej konwergencji, która jest jedną z głównych przyczyn zarówno deformacji powierzchni terenu, jak górotworu (Praca zbiorowa 1991).

2.2. Warunki hydrogeologiczne złoża

Dotychczasowe badania pozwoliły na rozpoznanie w otoczeniu złoża wielickiego czterech pięter wodonośnych (Krawczyk, Perski 2010). Najpłycej zalegające, czwartorzędowe piętro wodonośne związane jest z soczewkami oraz nieciągłościami w warstwach, które reprezentowane są przez piaski, żwiry i gliny pylaste. W warstwie tej występują wody zawieszone gruntowe, które charakteryzują się swobodnym zwierciadłem wody. Ten poziom wodonośny zalega do głębokości kilku metrów.

Kolejna, zalegająca głębiej neogeńska warstwa wodonośna zbudowana jest z warstw grabowieckich i chodenickich. Warstwy grabowieckie zbudowane są głównie z piasków bogucieckich, które występują na północ od strefy przygranicznej złoża. Są one zasobnym kolektorem wodnym, mogą zasilać znajdujące się pod ich spągiem przepuszczalne warstwy chodenickie. Natomiast warstwy chodenickie są uznane za dominujący kolektor wodny w rejonie złoża wielickiego. Warstwy te zbudowane są z piaskowców drobnoziarnistych oraz piaskowców zasilonych i pylastych o miąższości do około 20 m. Skomplikowana budowa tektoniczna o wysokim stopniu zaburzenia stanowi dogodne warunki połączeń hydraulicznych z warstwami zalegającymi płycej. Spękania i szczeliny ułatwiają połączenia hydrauliczne dla przepływu wód do kopalni nawet z odległych rejonów. W związku z tym poziom ten stanowi główne zagrożenie wodne dla kopalni. Poniżej zalegający fliszowy poziom wodonośny jest praktycznie nieprzepuszczalny w obrębie złoża wielickiego.

Piętro jurajskie ma formę oddzielonych kolektorów wodnych o charakterze szczelinowo-aporowym związanym z wapieniami. Wody jurajskie są jednak izolowane od spągu złoża solnego, nie stanowiąc zagrożenia wodnego dla kopalni.

W Kopalni Soli w Wieliczce jest prowadzony systematyczny monitoring wycieków na poziomach od I do IV (Rejestr 2010). Jak wynika z wieloletnich obserwacji, największe zagrożenie wodne związane jest z północnym rejonem granicy złoża. Silnie zawodnione warstwy chodenickie znajdujące

się poza złożem przy jego północnej granicy oraz duże zagęszczenie wyrobisk w tej partii złoża mogą się przyczynić do zwiększonej migracji wody w tym rejonie. Znaczną ilość wycieków obserwuje się również w centralnej partii złoża, są to jednak wycieki kropłowe. Największe wydajności posiadają wycieki zlokalizowane przy północnej stronie złoża. Wody poziomu czwartorzędowego, ze względu na małą ich zasobność i nieciągłość warstw wodonośnych, stanowią mniejsze zagrożenie dla kopalni. Niemniej jednak woda z tego poziomu może dopływać do kopalni poprzez wyrobiska wykonane z powierzchni (szyby, otwory wiertnicze) czy systemy szczelin powstałych w wyniku ruchów górotworu. W historii kopalni zanotowano szereg zawałów komór poeksploatacyjnych załęgających najpłycej, co przyczyniło się do powstania dodatkowych dróg migracji wody. Bieżący rejestr wycieków potwierdza jednak malejącą tendencję obserwowanych dopływów wody do kopalni.

Tak zróżnicowane warunki górnico-geologiczne i hydrogeologiczne stanowią przyczynę złożonych procesów deformacyjnych, które zachodzą zarówno w rejonie wyrobisk górniczych, jak i na powierzchni terenu. Ocena dynamiki tych ruchów powinna być zatem przeprowadzana w oparciu o wielowymiarowe analizy przyczynowo-skutkowe, które łączą ze sobą warunki górnice, geologiczne i hydrogeologiczne z procesem deformacji wewnątrz górotworu i na jego powierzchni. Tylko takie podejście pozwoli na wiarygodne określenie przyszłych kierunków rozwoju deformacji w nawiązaniu do obserwowanych przyczyn tego zjawiska.

3. Metodyka badawcza

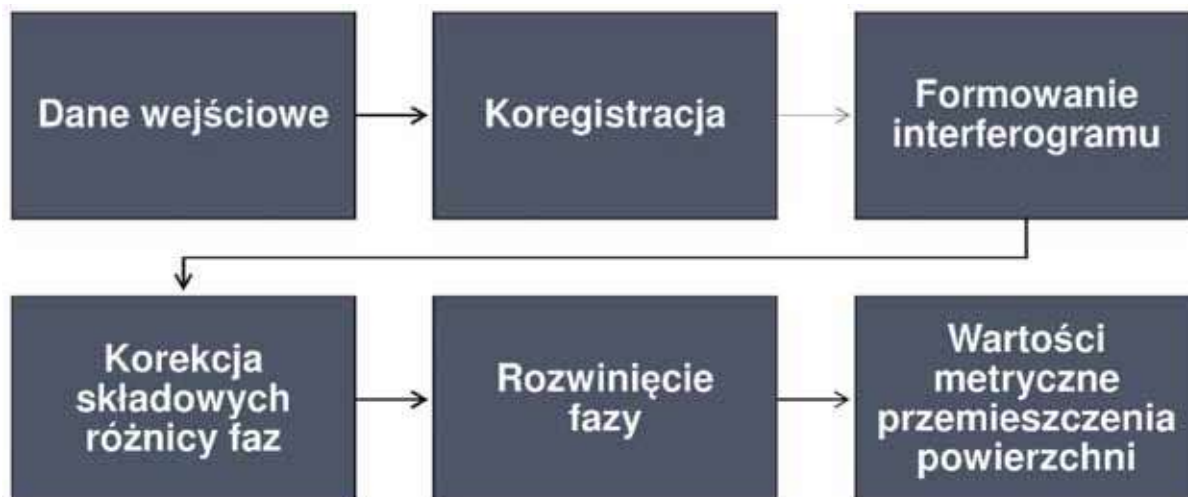
Głównym celem badań była ocena możliwości wykorzystania zobrazowania radarowego pochodzącego z satelity operującego w ramach misji Sentinel do oceny powolnych ruchów powierzchni terenu w rejonie miasta Wieliczka.

W niniejszym opracowaniu, w celu przetworzenia obrazów SAR, wykorzystano metodę tzw. satelitarnej interferometrii różnicowej DInSAR (ang. *Differential Interferometry SAR*), która pozwala na uzyskanie informacji o ruchu powierzchni terenu poprzez porównanie faz sygnałów dwóch zdjęć radarowych wykonanych nad tym samym obszarem w różnych okresach. Zastosowanie tej metody w rejonie miasta Wieliczka jest zasadne z uwagi na występowanie stosunkowo gęstej zabudowy terenu i mocno rozwiniętej infrastruktury technicznej – cechy własne obiektów tego typu pozwalają na stosunkowo silne odbicie fali radarowej i uzyskanie interferogramu o wysokiej wartości koherencji. Potwierdzeniem słuszności wyboru tej techniki mogą być przykłady wykorzystania metody DInSAR w detekcji deformacji nieciągłych (Yerro i in. 2014), czy ruchów ciągłych powierzchni terenu wywołanych eksploatacją górnictwem czy ekstrakcją wody (Chang, Hanssen 2016, Farr i in. 2007, Garlicki, Szybist 1995, Hwałek 1971, Lazecky i in. 2017, Milczarek i in. 2017, Mirek 2015, Perski i in. 2008, Perski 1999, Piątkowska i in. 2012a, 2012b, Porzycka, Leśniak 2012, Samieie-Esfahany i in. 2010, Shanker, Zebker 2007, Sowter i in. 2016, Yague-Martinez i in. 2016a, Szczerbowski, Walicki 2014).

Przetwarzanie danych zostało wykonane przy użyciu oprogramowania SNAP, którego dystrybucją zajmuje się ESA i obejmowało kilka następujących po sobie etapów (rys. 5).

W celu utworzenia interferogramu różnicowego wykorzystano 2 zdjęcia radarowe, które pozyskane zostały w 2015 i 2016 r., z tej samej orbity satelity Sentinel 1-A (tab. 1).

W pierwszej kolejności przeprowadzona została wzajemna rejestracja radarogramów (ang. *coregistration*), polegająca na przestrzennym dopasowaniu do pikseli zdjęcia nadrzędnego odpowiadających pikseli na zdjęciu podrzędnym. Proces ten wykonany został w oparciu o informacje o precyzyjnych orbitach satelity Sentinel 1-A oraz przy wykorzystaniu Numerycznego Modelu Terenu (NMT) o rozdzielczości terenowej 3" (ok. 90 m na 90 m) i dokładności wysokościowej



Rys. 5. Schemat procesu przetwarzania danych SAR

Fig. 5. Steps of SAR image processing

Tabela 1. Informacje o wykorzystanych zobrazowaniach radarowych pochodzących z satelity Sentinel 1-A

Table 1. Images obtained from Sentinel 1A satellite used in the investigation

Typ zdjęcia	Data wykonania zobrazowania SAR	Numer i rodzaj orbity satelity	Kąt padania wiązki radarowej [deg]	Długość bazy poprzecznej [m]	Odległość czasowa [dni]
Zdjęcie nadrzędne (ang. <i>master image</i>)	10.03.2015 r.	175, wstępująca	23	29	371
Zdjęcie podrzędne (ang. <i>slave image</i>)	15.03.2016 r.	175, wstępująca	23		

ok. 16,7 m, który pochodził z Shuttle Radar Topography Mission (Farretti i in. 2007). W następnym kroku, poprzez wielokrotne mnożenie amplitudy sygnałów dwóch radarogramów, uformowano interferogram, który zawierał informacje o różnicy faz (ϕ) między dwoma obrazami SAR oraz obliczoną wartość koherencji dla każdego piksela. Różnica faz obrazu interferometrycznego powinna zależeć wyłącznie od różnicy odległości między satelitami wykonującymi zobrazenie radarowe a danym punktem znajdującym się na powierzchni terenu. Wówczas, przy wykorzystaniu równania (1), możliwe jest obliczenie tej wartości i utożsamienie jej wyłącznie z przemieszczeniem punktu pomiarowego w kierunku padania wiązki fali radarowej LOS (ang. Line of Sight).

$$\Delta\phi_{\text{disp}} = \frac{4\pi\Delta R}{\lambda} \quad (1)$$

gdzie:

ΔR – różnica odległości między satelitami wykonującymi zobrazenie radarowe a danym punktem na powierzchni terenu;

λ – długość wiązki fali radarowej.

Obserwowana wartość różnicy faz jest jednak sumą pięciu elementów składowych (2)

$$\Delta\phi = \Delta\phi_f + \Delta\phi_{el} + \Delta\phi_{\text{disp}} + \Delta\phi_{\text{atm}} + \Delta\phi_n \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta\phi_f$ – część fazy wynikająca z krzywizny Ziemi;

$\Delta\phi_{el}$ – część fazy wynikająca z topografii terenu;

$\Delta\phi_{\text{disp}}$ – część fazy odpowiadająca za deformacje obserwowanej powierzchni;

$\Delta\phi_{\text{atm}}$ – wartość wynikająca z wpływu atmosfery (wilgotność, temperatura, ciśnienie);

$\Delta\phi_n$ – szum.

Podczas formowania interferogramu, w oparciu o precyzyjnie obliczone współrzędne satelitów oraz wykorzystany NMT, usunięto część fazy wynikającą z krzywizny Ziemi. W dalszej kolejności, w celu zredukowania szumu, wygenerowany interferogram poddano filtracji metodą Goldsteina. Ostatecznie, przy wykorzystaniu zaimplementowanego uprzednio do obliczeń NMT, usunięto składową odpowiedzialną za topografię terenu, otrzymując w ten sposób interferogram różnicowy, którego wartość różnicy faz utożsamiono z ruchem powierzchni terenu w kierunku padania wiązki fali radarowej.

4. Walidacja uzyskanych wyników w oparciu o pomiary geodezyjne

W celu odniesienia uzyskanych z metody DInSAR wartości przemieszczeń powierzchni terenu do rzeczywistych

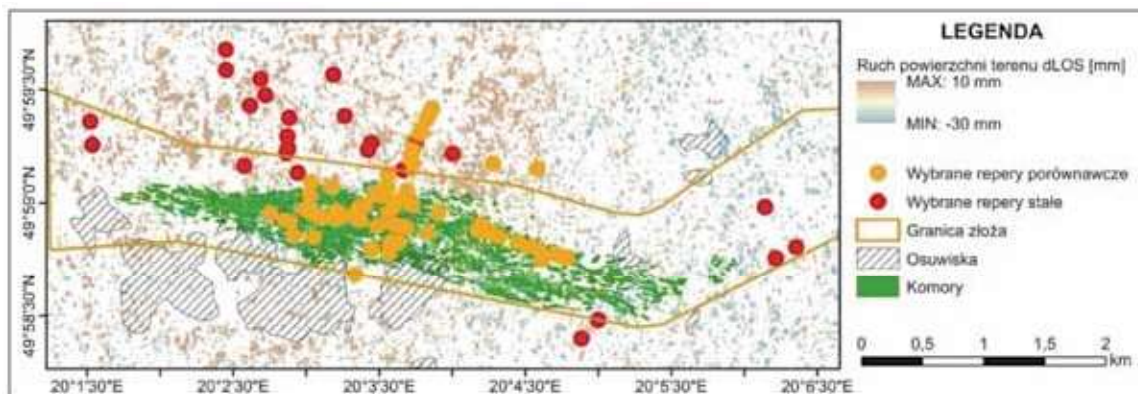
ruchów na badanym obszarze konieczne było ustalenie tzw. „stałej odniesienia”, czyli wartości obniżenia powierzchni terenu obliczonej na podstawie metody interferometrycznej w miejscach, gdzie obszar nie wykazywał ruchów dynamicznych w płaszczyźnie pionowej. W tym celu konieczne było wyłonienie grupy reperów, których wysokość w danym okresie pozostała niezmienna. Stałość reperów określono na podstawie wyników niwelacji precyzyjnej prowadzonej w 2015 i 2016 r. Za stałe uznano te punkty, których moduł rocznego przemieszczenia pionowego jest mniejszy od 0,1 mm. Dodatkowo, odrzucono te repery, które znajdują się na obszarze osuwiskowym, wewnątrz konturu dokonanej eksploatacji oraz w miejscach, gdzie koherencja interferogramu jest mniejsza od 0,6. Ostatecznie, w grupie stałych punktów odniesienia znalazło się 27 reperów (rys. 6).

W celu określenia tzw. „stałej odniesienia”, analizie poddano strefę wokół geodezyjnych punktów stałych będącą buforem o promieniu 42 m. Przy założeniu rozkładu normalnego wartości przemieszczeń obliczonych przy wykorzystaniu techniki DInSAR, obliczono średnią wartość tzw. „poziomu odniesienia” w obszarach, które zostały uznane za statyczne. Spośród 426 pikseli rastra interferogramu różnicowego znajdujących się wewnątrz określonych obszarów buforowych wyselekcjonowano 283 piksele istotne statystycznie. Obliczona na ich podstawie wartość tzw. „poziomu odniesienia” wyniosła -42,6 mm, a odchylenie standardowe +1,8 mm.

Poziomu odniesienia wykorzystano następnie do wygenerowania rastra reprezentującego rzeczywistą wartość ruchu powierzchni terenu w kierunku padania wiązki radarowej, w okresie 2015-2016. Porównanie wyników niwelacji precyzyjnej z wynikami pomiaru interferometrycznego zrealizowano w sposób analogiczny do procedury wyznaczania tzw. „stałej odniesienia”, w oparciu o 67 reperów, których wysokość określono metodą niwelacji precyzyjnej w okresie 2015-2016 (rys. 6). Różnicę między wartością ruchu powierzchni terenu obliczoną na podstawie interferogramu różnicowego a niwelacją precyzyjną określono na podstawie 714 pikseli obrazu interferometrycznego istotnych statystycznie spośród 1221 pikseli znajdujących się wewnątrz stref buforowych. Wyniosła ona 1,3 mm, przy odchyleniu standardowym równym +0,8 mm (rys. 7).

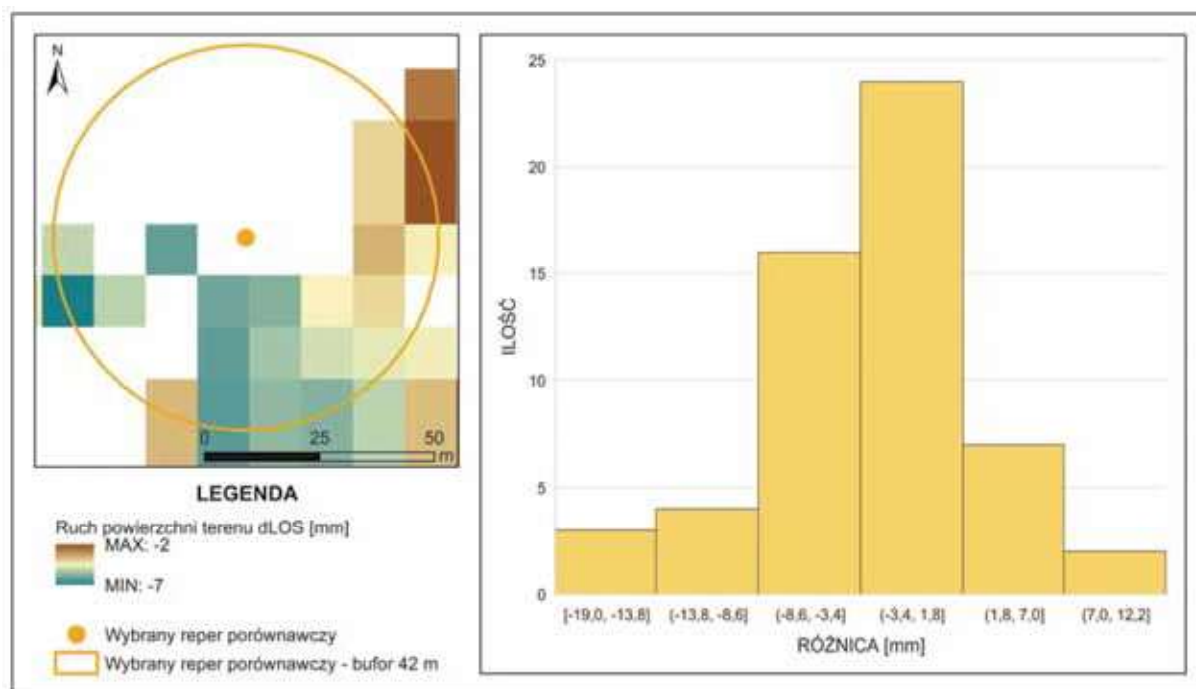
5. Omówienie uzyskanych wyników

Tereny podlegające ruchom powierzchni coraz częściej poddawane są różnorodnym analizom teledetekcyjnym, w tym badaniom przy zastosowaniu InSAR. W wielu przypadkach analiza tego ruchu na terenach przekształconych antropoge-



Rys. 6. Wybrane repery stałe i porównawcze

Fig. 6. Benchmarks stable and chosen for measurements comparison



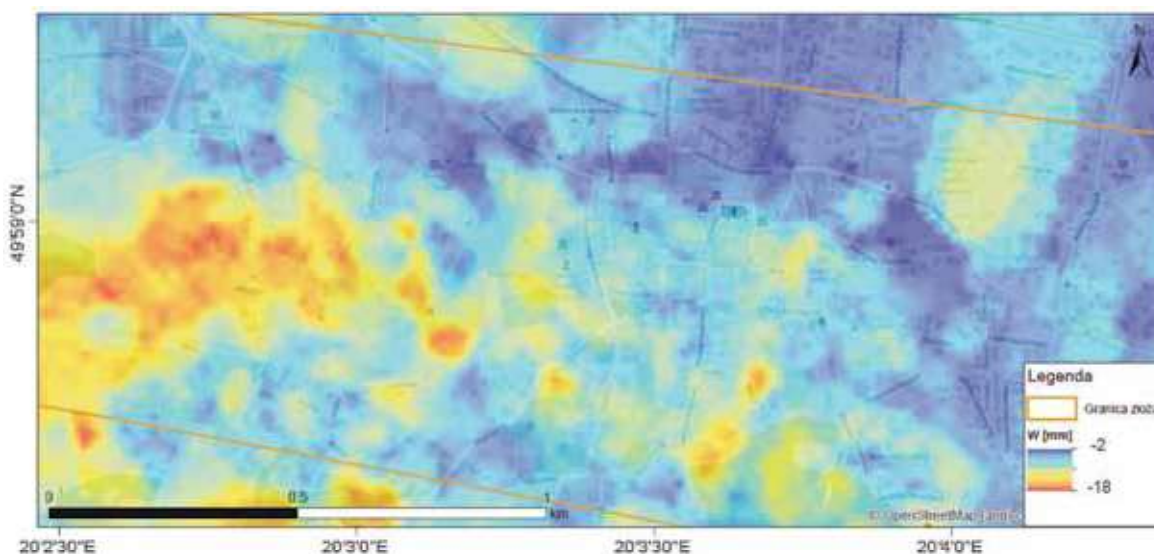
Rys. 7. Określenie różnic między przemieszczeniem określonym na podstawie interferogramu różnicowego względem niwelacji precyzyjnej

Fig. 7. Determination of subsidence differences indicated on the basis of SAR image and precise leveling

nicznie i naturalnie wykonywana jest bez uwzględnienia przyczyn obserwowanego zjawiska. Elementem niezbędnym dla uzyskania wiarygodności prowadzonych na podstawie obrazów radarowych analiz są jednak informacje pozwalające na walidację uzyskanych rezultatów, np. wyniki precyzyjnych, geodezyjnych pomiarów klasycznych. Istotą tego problemu starano się przedstawić poprzez zaprezentowany w niniejszym opracowaniu schemat opracowywania danych InSAR.

Wyniki przeprowadzonych badań pozwalają zauważyć (rys. 8), iż tereny położone na południe od obszaru górniczego kopalni podlegają naturalnym ruchom osuwiskowym. Z kolei całe centrum byłego obszaru górniczego i jego bezpośrednio

okolice są rejonem oddziaływania przekształceń pogórnicych. Z tego względu analiza stałości reperów i późniejsze obliczenia tzw. „stałej odniesienia” uwzględniały te fakty. W oparciu o uzyskane wyniki można powiedzieć, że w rejonie pogórnicych ruchów powierzchni terenu wyodrębniają się dwie strefy o różnych wartościach przemieszczeń pionowych: ruchów bardziej i mniej dynamicznych. Roczne osiadania o wartościach dochodzących do 30 mm występują zwłaszcza w zachodniej i częściowo w centralnej części byłego obszaru górniczego. Na wschodzie obserwuje się natomiast ruchy zanikające bądź bliskie zeru (rys. 8).



Rys. 8. Przestrzenny rozkład osiadań powierzchni terenu w okresie 2015-2016

Fig. 8. Observed ground subsidence in 2015-2016

6. Podsumowanie i wnioski

Przedstawione w artykule badania dowiodły, że zobrazenie radarowe pochodzące z misji Sentinel pozwala na wsparcie obserwacji geodezyjnych powolnych ruchów powierzchni terenu wynikających z konwergencji komór solnych. Opracowane zobrazenie ruchów powierzchni terenu w okresie 2015-2016 potwierdziło wysoką dokładność obserwacji prowadzonych przy wykorzystaniu technologii DInSAR. Walidacja otrzymanych wyników zobrazenia satelitarnego przeprowadzona została w oparciu o wyniki obserwacji geodezyjnych prowadzonych w tym rejonie. Klasyczne, precyzyjne pomiary geodezyjne są niezbędne dla zapewnienia odpowiedniej wiarygodności wyników pomiarów satelitarnych. Różnicę między obserwowanymi satelitarnie i geodezyjnie pionowymi ruchami powierzchni terenu obliczono na podstawie 714 pikseli obrazu interferometrycznego. Różnica ta wyniosła 1,3 mm, przy odchyleniu standardowym równym $\pm 0,8$ mm. Obserwacje satelitarne potwierdziły większą dynamikę osiadań powierzchni terenu w zachodniej części miasta, dochodzącą do 20 mm rocznie. Wschodnia część miasta poddana jest mniejszym osiadań. Obserwowane przekształcenia powierzchni terenu są zbliżone z wieloletnimi obserwacjami geodezyjnymi prowadzonymi na terenie miasta Wieliczka. Proponowana metodyka quasi-ciągłego monitoringu dynamiki przekształceń w rejonie Kopalni Soli „Wieliczka” S.A. pozwala na lepszą kontrolę stabilności górotworu w rejonie podziemnych pustek. Prezentowane podejście umożliwia wyłonienie stref, w których prędkość deformacji powierzchni terenu jest największa oraz na określenie wartości obniżen w rejonach, w których nie są prowadzone bezpośrednie pomiary geodezyjne. W kolejnych latach zobrazenie satelitarne może zostać z powodzeniem zaimplementowane jako metoda wspierająca klasyczne pomiary prowadzone przez pracowników Kopalni Soli Wieliczka S.A.

Literatura

- CHANG L., HANSSSEN R.F. 2016 - A Probabilistic Approach for InSAR, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2016, t.54, no 1, pp. 421-430.
- DE ZAN F., GUARNIERI, A. M. 2006 - TOPSAR: Terrain Observation by Progressive Scans. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on. 44(9), 2352-2360. doi:10.1109/TGRS.2006.873853.
- FARR T.G., ROSEN P.A., CARO E., CRIPPEN R., DUREN R., HENSLEY S., KOBRICK M., PALLER M., RODRIGUEZ E., ROTH L. 2007 - DInSAR Time-Series into 3-D in Combination with GPS in the Case of Low Strain Rates: An Application to the Hyblean Plateau, Sicily, Italy. 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. Rev. Geophys, pp. 45, 1-33.
- FERRETTI, A., PRATI, C., ROCCA F. 2001 - Permanent Scatterers in SAR Interferometry. IEEE Trans. Geoscience And Remote Sensing, 39(1), pp 8-20.
- GARLICKI A., SZYBIST A. 1995 - Ogólne założenia dla zabezpieczenia kopalni soli Wieliczka oraz nowy obraz geologiczny złoża wielickiego. Wieliczka (praca niepublikowana).
- HANSSSEN R. F. 2001 - Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, ISBN: 0-7923-6945-9.
- HWALEK S. 1971 - Górnictwo soli kamiennych i potasowych. Wyd. „Śląsk”, Katowice.
- KLECZKOWSKI A.S. 1993 - Wody podziemne w okolicach Krakowa – potencjał i zagrożenia. PTG – AGH. Masz. Arch. Kat. Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej WGGIOŚ, AGH, Kraków.
- KRAWCZYK A., PERSKI Z. 2010 - Doświadczenia wykorzystania technologii Permanent Scatters InSAR (PSI) do monitoringu deformacji terenów górniczych. „Przeгляд Górnicy” nr 10, s. 150-155.
- LAZECKÝ M., JIRÁNKOVÁ E., KADLEČÍK P. 2017 - Multitemporal monitoring of Karvina subsidence trough using Sentinel-1 and TerraSar-X interferometry. Acta Geodyn. Geomater., 14, No. 1 (185), pp. 53-59. DOI: 10.13168/AGG.2016.0027
- MILCZAREK W., BLACHOWSKI J., GRZEMPOWSKI P. 2017 - Application of PSInSAR for assessment of surface deformation in post-mining area – case study of the former Wałbrzych Hard Coal Basin (SW Poland). Acta Geodyn. Geomater., Vol. 14, No. 1 (185), 41-52, DOI: 10.13168/AGG.2016.0026.
- MIREK K. 2015 - Wykorzystanie metody InSAR do monitorowania osiadania na obszarach górniczych na podstawie danych satelity Sentinel-1A, „Budownictwo Górnicze i Tunelowe”; R. 21, nr 4, s. 13-18.
- PERSKI Z., HANSSSEN R., MARINKOVIĆ P. 2008 - Deformation of The Margin of Sudety Mountains (Southern Poland) Studied by Persistent Scatterers Interferometry, Fifth International Workshop on ERS/Envisat SAR Interferometry, ‘2008, FRINGE07’, Frascati, Italy, CDROM.
- PERSKI Z. 1999 - Osiedzenia terenu GZW pod wpływem eksploatacji podziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). „Przeгляд Geologiczny” nr 2, s. 171-174.
- PIĄTKOWSKA A., SURAŁA M., PERSKI Z., GRANICZNY M. 2012a - Zastosowanie satelitarnej interferometrii radarowej do identyfikacji mobilności terenu nad wysadem solnym w Inowrocławiu oraz form solnych centralnej Polski. Geology, Geophysics & Environment, Vol. 38, No. 2 pp. 209-220.
- PIĄTKOWSKA A., SURAŁA M., PERSKI Z., GRANICZNY M. 2012b - Zastosowanie satelitarnej interferometrii radarowej do identyfikacji form solnych centralnej Polski na przykładzie wysadu solnego Inowrocław. „Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego” nr 452, s. 237-244.
- PORZYCKA S., LEŚNIAK A. 2012 - Analiza czasowa powolnych deformacji terenu na obszarze Zagłębia Dąbrowskiego. „Przeгляд Górnicy” nr 66, 6, s. 70-75.
- Praca zbiorowa 1987 - Opisowa inwentaryzacja i wstępna dokumentacja geologiczno-historyczna wyrobisk zabytkowych I poziomu kopalni soli w Wieliczce, Arch. Działu Geologicznego Kopalni Soli Wieliczka.
- Praca zbiorowa 1991 - Kolejność podsadzania i zabezpieczania komór w aspekcie zagrożeń występujących w K.S. Wieliczka, Kraków.
- Rejestr wycieków kopalnianych 1969 – 2010. Arch. Działu Geologicznego Kopalni Soli Wieliczka.
- SAMIEIE-ESFAHANY S., HANSSSEN R.F., THIENEN-VISSER K. VAN, MUNTENDAM-BOS A. 2010 - On the effect of horizontal deformation on InSAR subsidence estimates, „Proceedings of Fringe 2009 Workshop”, t. 2009.
- SHANKER P., ZEBKER H. 2007 - Persistent scatterer selection using maximum likelihood estimation, Geophys. Res. Lett., vol. 34, no. 22, p. L22 301.
- SOWTER A., BIN M., AMAT C., CIGNA F., MARSH S., AND ATHAB A. 2016 - International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation Mexico City land subsidence in 2014 – 2015 with Sentinel-1 IW TOPS : Results using the Intermittent SBAS (ISBAS) technique, International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation, t.52, pp. 230-242.
- SUHET, Sentinel-1 User Handbook, „European Space Agency”, 2013, t.1, pp. 1-80.
- SZCZERBOWSKI Z., WALICKI M. 2014 - Nowoczesne techniki satelitarne w badaniach deformacji powierzchni terenu. „Przeгляд Górnicy” nr 8, s. 178-182.
- YAGUE-MARTINEZ N., PRATS-IRAOLA P., MEMBER S., GONZALEZ F.R., BRCIC R., SHAU R., MEMBER S. 2016a - Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data, t.54, no 4, pp. 2220-2234.
- YAGUE-MARTINEZ N., PRATS-IRAOLA P., MEMBER S., GONZALEZ F.R., BRCIC R., SHAU R., MEMBER S. 2016b - Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, t.54, no 4, pp. 2220-2234.
- YERRO A., COROMINAS J., MONELLS D., JORDI J. 2014 - Analysis of the evolution of ground movements in a low densely urban area by means of DInSAR technique Original. Engineering Geology, Volume 170, pp. 52-65.

Artykuł wpłynął do redakcji – styczeń 2017
Artykuł akceptowano do druku 5.04.2017 r.