

Zaawansowane techniki InSAR w monitorowaniu osuwisk

Zbigniew Perski¹



Advanced InSAR techniques in landslide monitoring. Prz. Geol., 67: 351–359; doi: 10.7306/2019.29

A b s t r a c t. In recent years, there has been a rapid development of SAR acquisition techniques and all new satellite radar missions are equipped with SAR devices allowing beam steering. This paper presents results of experimental application of TerraSAR-X in ultra-high resolution SpotLight and Staring SpotLight modes for the area of the Just landslide in the Rożnow lake area. Another analyzed example was to use data of the medium resolution Sentinel-1 data acquired in the TOPS mode for the Huciska and Zapadle landslides in Szymbark. In this case, a network of 12 radar reflectors (corner reflectors) was installed to make the results independent of vegetation conditions on landslides. This study presents preliminary results of measurements and discusses the potential of applications and directions of further work.

Keywords: landslide hazard, monitoring, SAR, beam steering, InSAR, corner reflector

InSAR czyli Interferometria SAR (*Synthetic Aperture Radar*) to rozwijana od ponad 20 lat technika służąca do uzyskiwania informacji dotyczących względnych danych wysokościowych przy wykorzystaniu zdalnych, przede wszystkim satelitarnych, obserwacji radarowych (Goldstein i in., 1988). Dobry przegląd podstaw metodyki, potencjału i obszarów zastosowań InSAR można znaleźć w wielu pracach o charakterze podstawowym: (Bamler, Hartl, 1998; Massonnet, Feigl, 1998; Perski, 1999; Bürgmann i in., 2000). Z początkiem XXI w. technika InSAR rozwinęła się w kierunku analiz szeregów czasowych (MTI – *Multi Temporal InSAR*). Okazało się to możliwe dzięki zastosowaniu metod punktowych, opartych na selekcji pikseli zachowujących koherencję w czasie (Ferretti i in., 1999; Berardino i in., 2002; Hooper i in., 2004). Na przestrzeni lat interferometria SAR rozwijała się zarówno w kierunku polepszenia dokładności, jak i rozdzielczości przestrzennej przez uzyskiwanie jak największej ilości punktów (Hooper i in., 2012).

InSAR W MONITOROWANIU OSUWISK

Zainteresowanie wykorzystaniem technik InSAR pojawiło się niemal na samym początku rozwoju tej metody (Fruneau i in., 1996; Refice i in., 2001). W późniejszych okresach niemal każda innowacja technik InSAR była testowana na obszarach osuwiskowych. Pełny przegląd potencjału wykorzystania InSAR do monitorowania osuwisk przedstawili Colesanti i Wasowski (2006) oraz Wasowski i Bovenga (2014). Są one również od wielu lat stosowane do badań osuwisk w Karpatach, które z uwagi na zalesienie są bardzo trudnym obiektem badawczym. Pierwsze próby zostały podjęte przez Ziółkowskiego (2007), natomiast pierwsze udane wykorzystanie techniki PSI (*Persistent Scatterers Interferometry* – jedna z pierwszych i najpowszechniej stosowanych metod wieloczasowych) zostało opisane przez Wasowskiego i in. (2007), Wojciechowskiego i in. (2008), a także Perskiego i in. (2009). W dalszej

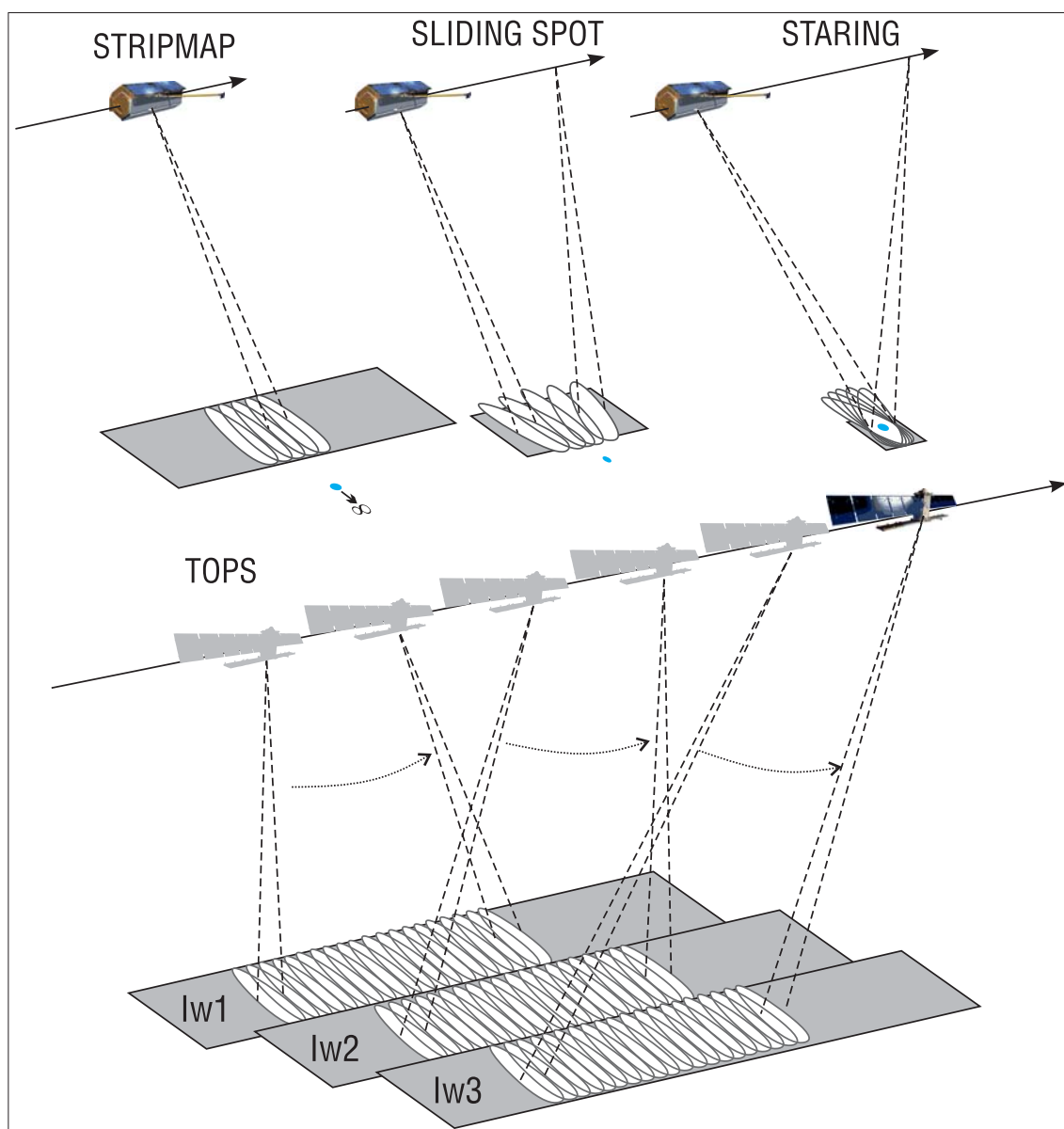
części artykułu przedstawiono wyniki przeprowadzonych eksperymentów, których celem było określenie, czy i na ile najnowsze osiągnięcia technologiczne w obrazowaniu radarowym poprawiają wyniki interferometrycznego określania przemieszczeń na obszarach osuwiskowych, również porośniętych wysoką lub gęstą roślinnością.

Zaawansowane tryby obrazowania SAR – SL i ST, TOPS

Nowoczesne satelity są wyposażane w zaawansowane urządzenia SAR, które mają możliwość programowania anteny i elektronicznego sterowania wiązką sygnału. Cechy te pozwalają na uzyskiwanie zobrażeń o niedostępnych dotychczas właściwościach. Należą do nich m.in. tryby wysokorozdzielcze i szerokiego pasa obrazowania, które wykorzystano w niniejszym opracowaniu. W trybie SpotLight dla uzyskania wysokiej rozdzielczości następuje sterowanie wiązką w kierunku azymutu (ryc. 1). Wydłuża to czas obserwacji i zwiększa tzw. aperturę syntetyczną, co w efekcie prowadzi do podwyższenia rozdzielczości przestrzennej w kierunku azymutu. Sterowanie anteną odbywa się kosztem znacznego zmniejszenia długości pasa obrazowanego terenu. Tryb SpotLight posiada (np. TerraSAR-X) dwa warianty: SLiding spot (SL) i High-res spot (HS), różniące się szybkością ruchu anteny. W wariacie SL prędkość ta jest mniejsza. Staring Spotlight (ST) to tryb, w którym wykorzystano maksymalny zakres sterowania wiązką (w zakresie $\pm 2,2^\circ$), co umożliwiło uzyskanie zobrażeń o rozdzielczości azymutalnej ok. 21 cm. (Mittermayer i in., 2014; Ge i in., 2018). Tryb ST satelity TerraSAR-X (TSX) zastosowano początkowo eksperymentalnie w latach 2014–2016, umożliwiając naukowcom testowanie danych i ich nowych zastosowań z myślą o przyszłych misjach satelitarnych.

Odmianą filozofią działania charakteryzuje się tryb TOPS (*Terrain Observation by Progressive Scans*) (De-Zan,

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Centrum Geozagrożeń, ul. Skrzatów 1, 31-560 Kraków; zbigniew.perski@pgi.gov.pl



Ryc. 1. Geometria pozyskiwania obrazów w trybach SLiding spot, Staring i TOPS w porównaniu z tradycyjną metodą StripMap. Opracowano na podstawie: De-Zan, Guarnieri (2006) Fritz, Eineder (2013) i Mittermayer i in. (2014)
Fig. 1. Image acquisition geometry in case of SLiding Spot, Staring and TOPS mode with respect to traditional StripMap mode. Compilation based on: De-Zan, Guarnieri (2006) Fritz, Eineder (2013) and Mittermayer et al. (2014)

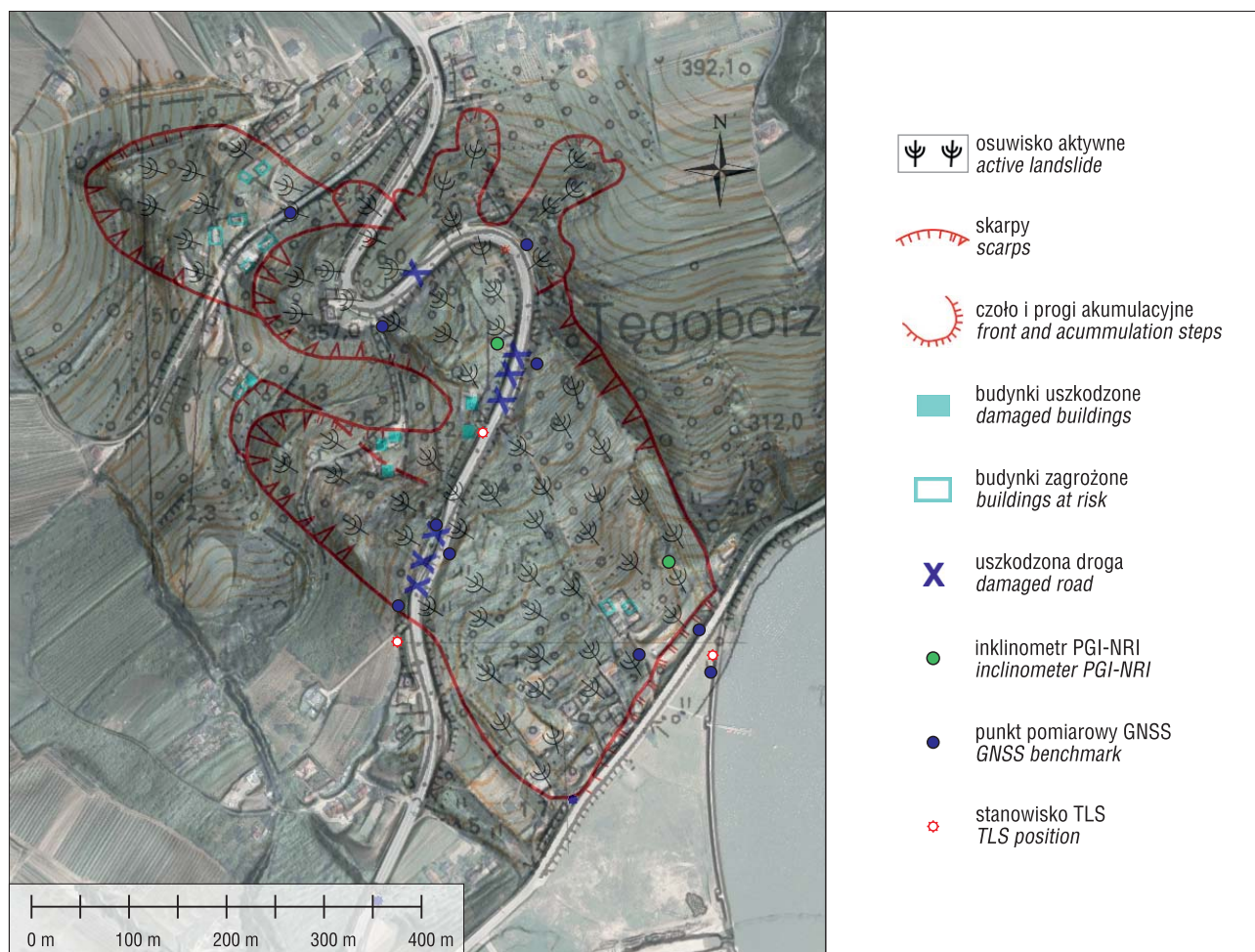
Guarnieri, 2006). Jest on podstawowym sposobem rejestracji danych radarowych dla obszarów lądowych europejskiego satelity Sentinel-1. Tryb ten umożliwia rejestrację bardzo szerokiego pasa obrazowania (250 km), przy zachowaniu średniej rozdzielczości terenowej ok. 25 m. Rejestracja odbywa się impulsowo (Bursts) dla 3 podścieżek (*sub-swath*) – IW1, IW2, IW3 (ryc. 1). Rejestracja każdej podścieżki odbywa się z jednoczesnym elektronicznym sterowaniem wiązką w kierunku azymutu, a ruch wiązki następuje od tyłu do przodu.

PRÓBA ZASTOSOWANIA ULTRAWYSOKOROZDZIELCZYCH DANYCH TerraSAR-X SL i ST W MONITOROWANIU OSUWISKA JUST

Jako obszar badań wybrano zespół osuwisk występujących poniżej Przełęczu św. Justa w miejscowości Świdnik

nieopodal Nowego Sącza. W dalszej części tekstu obszar ten jest dla uproszczenia nazywany osuwiskiem Just. Osuwisko to rozpoczyna się skarpą główną o wysokości ok. 10 m, a jego jezor schodzi do Jeziora Rożnowskiego. Podłoże osuwiska stanowią piaskowce magurskie (górna część osuwiska) oraz utwory łupkowo-piaskowcowe warstw podmagórskich (dolna część osuwiska). Osuwisko zostało szczegółowo opisane przez Wójcicka i Nowicką (2010). Przez osuwisko przebiega 1,5-kilometrowy fragment drogi krajowej nr 75, będącej jednym z najważniejszych szlaków komunikacyjnych tego regionu. Obserwowana od wielu lat aktywność osuwiska powoduje permanentne niszczenie drogi, generując wysokie koszty jej utrzymania.

Z uwagi na ten fakt, w 2009 r. rozpoczęto monitoring tego osuwiska w ramach Projektu System Osłony Przeciwosuwiskowej (SOPO). Wiosną 2010 r., po nawalnych i długotrwałych opadach deszczu osuwisko ponownie się uaktywniło, powodując uszkodzenie drogi nr 75 i kilku budynków (ryc. 2).



Ryc. 2. Zasięg osuwiska Just z elementami systemu monitoringu oraz obiektami inżynierskimi na podstawie Wójcika i Nowickiej (2010) na tle ortofotomapy (geoportal.gov.pl) i danych wysokościowych ISOK

Fig. 2. Extend of the Just landslide including monitoring system and infrastructure after Wojcik and Nowicka (2010) on the background of orthophotomap (geoportal.gov.pl) and ISOK elevation data

Monitoring głębiny osuwiska Just prowadzono w dwóch otworach inklinometrycznych. Jego uzupełnienie stanowił monitoring powierzchniowy metodami geodezyjnymi na 12 punktach pomiarowych i naziemny skaning laserowy prowadzony z 4 stanowisk (ryc. 2). Monitoring głębiny został uzupełniony w 2012 r. o kolejne 8 otworów inklinometrycznych zainstalowanych przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA). Obecnie wszystkie otwory inklinometryczne uległy zaciśnięciu, co uniemożliwia kontynuację pomiarów.

W analizowanym okresie (styczeń 2015 – czerwiec 2016) osuwisko Just wykazywało aktywność we wszystkich otworach inklinometrycznych zarówno na głębokich (33,0, 26,0, 10,5 m p.p.t.), jak i płytkich (7,0, 6,0, 4,0 m p.p.t.) powierzchniach. Ruchy te wynosiły od 2 do 11 mm/rok. Przemieszczenia powierzchniowe zarejestrowano wzdłuż drogi DK75 (punkty nr 2, 3, 14, 15) oraz dla punktu przy inklinometrze nr 8. Średnia prędkość tych ruchów wynosiła ok. 5 mm/rok.

Rejestracja i przetwarzanie danych

W ramach projektu niemieckiej agencji kosmicznej DLR (GEO2477) dla obszaru osuwiska Just zarejestrowano w trybach SL i ST łącznie 40 obrazowań. Zobrazowania wykonywano w okresie 07.01.2015–18.06.2016 r. naprzemiennie SL/ST, uzyskując dwie serie po 20 obrazo-

wań SL i ST o 22-dniowej bazie czasowej pomiędzy kolejnymi zobrazowaniami tego samego typu (ryc. 3).

Z uwagi na sterowanie wiązką, dane SAR typu SL i ST charakteryzują się tym, że spektra fazowe tych danych nie oscylują wokół średniej wartości (tzw. *Zero Doppler*), a zmieniają się liniowo (Fritz, Eineder, 2013; Mittermayer i in., 2014). Cecha ta powoduje, że spektra obrazów nie są zbliżone do siebie i dla wpasowania przy przetwarzaniu interferometrycznym wymagają odpowiedniej transformacji. Dla uzyskania ich właściwego wpasowania na etapie próbkowania (*resamplingu*) należy zastosować model wielomianowy 6. rzędu z liniowym przesunięciem częstotliwości (Jendryke i in., 2013). Do przetwarzania danych wykorzystano oprogramowanie DORIS (Kampes i in., 2003) z modyfikacjami zaproponowanymi przez Jendryke i in. (2013).

Przetwarzanie danych przeprowadzono niezależnie dla dwóch serii obserwacji ST i SL metodą PSI – interferogramy były liczone dla jednej, optymalnej pod względem bazy czasowej i geometrycznej sceny referencyjnej (ryc. 4).

Omówienie wyników

W wyniku przetwarzania metodą PSI za pomocą oprogramowania StaMPS (Hooper, 2006) otrzymano dwa zestawy punktów PS dla obu serii danych (ryc. 5).

Dla obu serii otrzymano podobne zakresy deformacji od -9 do 5 mm/rok. Ilościowo otrzymano więcej punktów dla serii ST, co było spodziewane, gdyż im większa rozdzielczość przestrzenna danych, tym zgodnie z teorią spada udział rozpraszania objętościowego w komórce rozdziel-

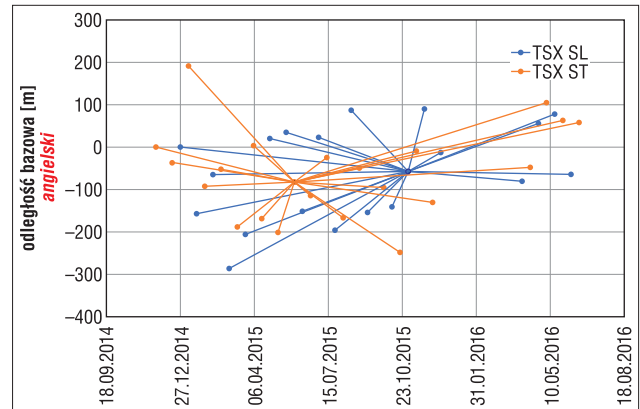
czości. Rośnie wówczas liczba pikseli o charakterystyce odbicia zwierciadlanego.

Jeśli chodzi o przestrzenny rozkład zmienności przyrostów deformacji na uwagę zasługuje odcinek umocnionego brzegu jeziora, który ulega stałemu obniżaniu w podobnym zakresie dla obu serii (ryc. 5). Deformacje dla serii SL wydają się niedoszacowane, szczególnie w środkowej części osuwiska. Jest to spowodowane prawdopodobnie błędami rozwinięcia fazy z uwagi na małą gęstość punktów i duże przyrosty deformacji. Dla serii ST otrzymano w tym rejonie przyrosty w granicach 4–5 mm/rok, co nadal jest



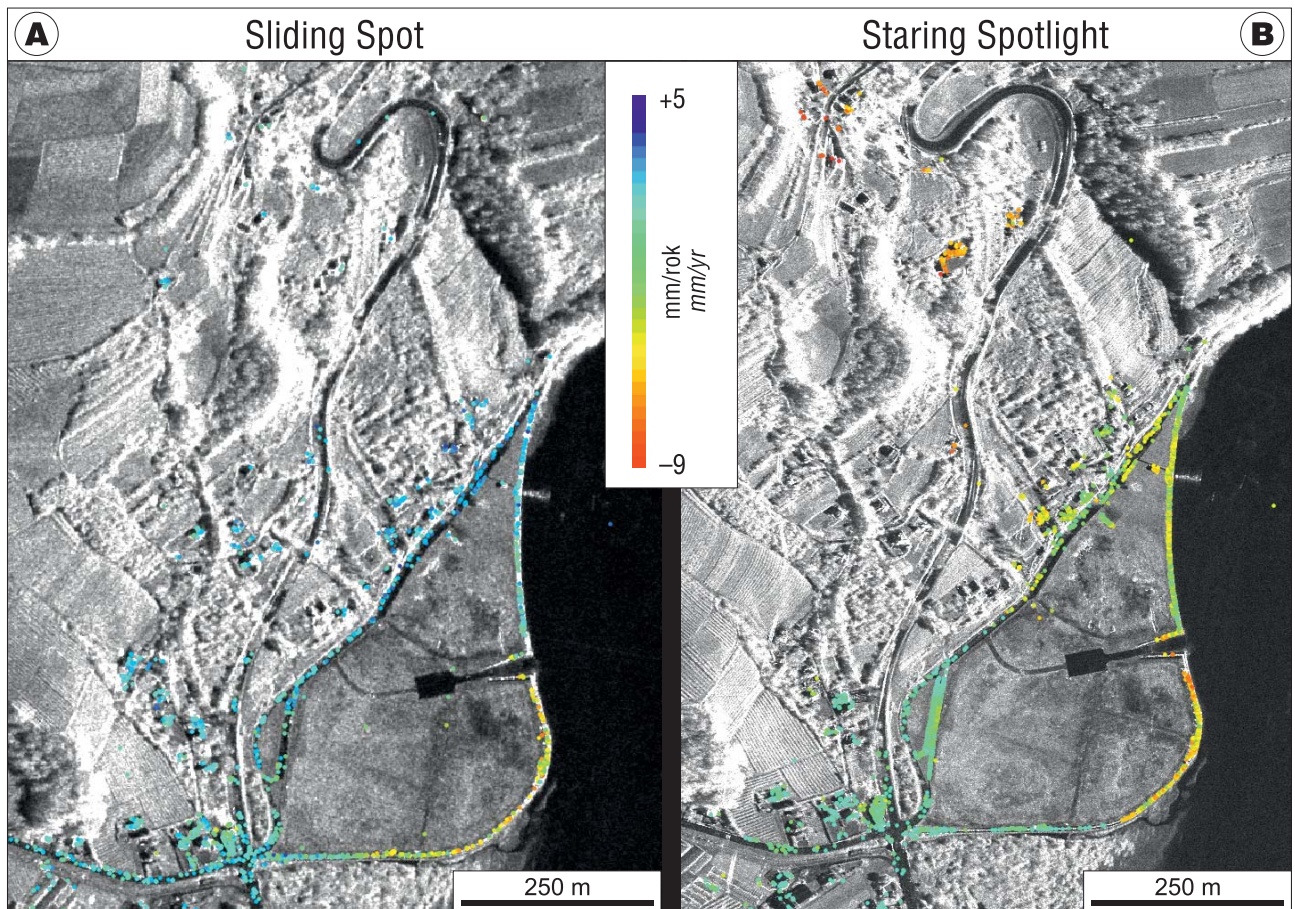
Ryc. 3. Zasięgi zarejestrowanych scen TerraSAR-X typu SL i ST na tle obrazu googleearth

Fig. 3. Spatial extents of TerraSAR-X SL and ST frames on the background of googleearth image



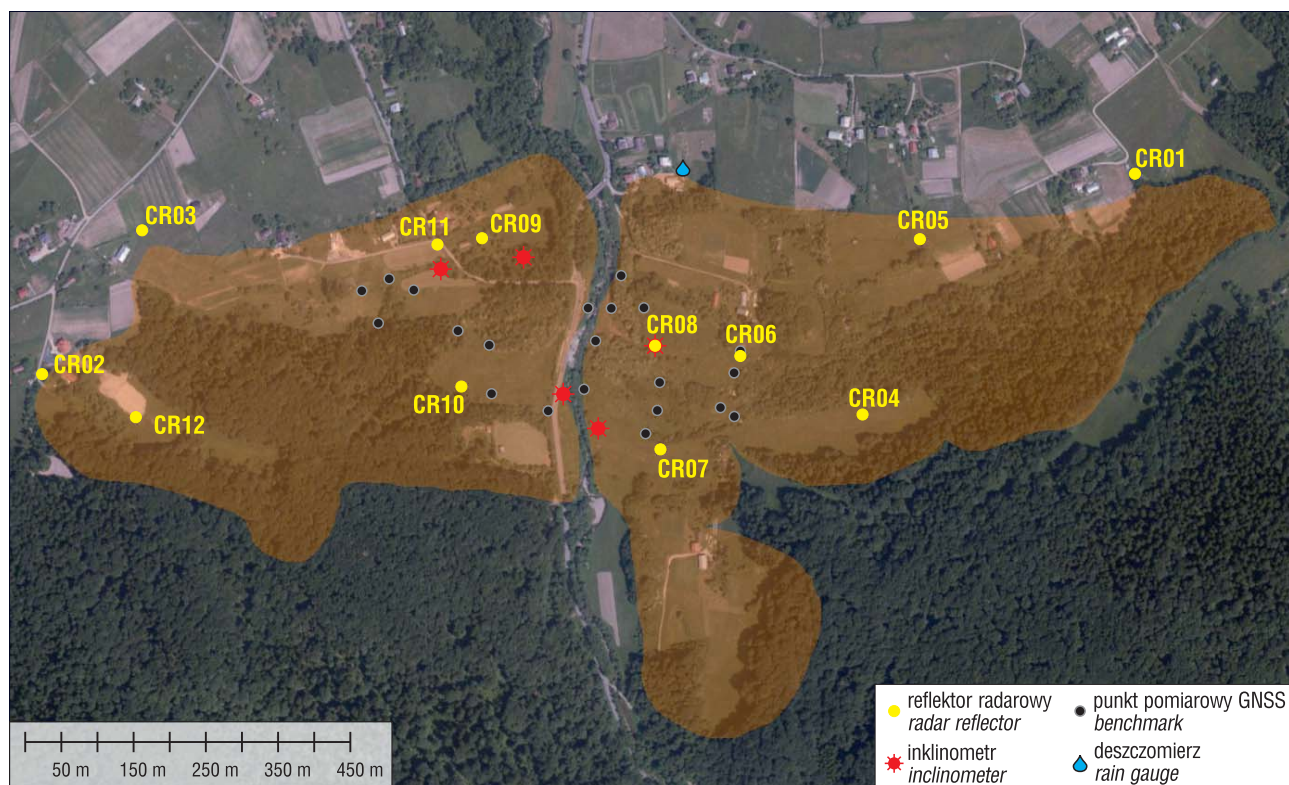
Ryc. 4. Zależności baz czasowych i geometrycznych w stosunku do sceny referencyjnej dla serii danych TSX SL i ST

Fig. 4. Temporal and geometrical relationships of SL and ST data series with respect to the master scene

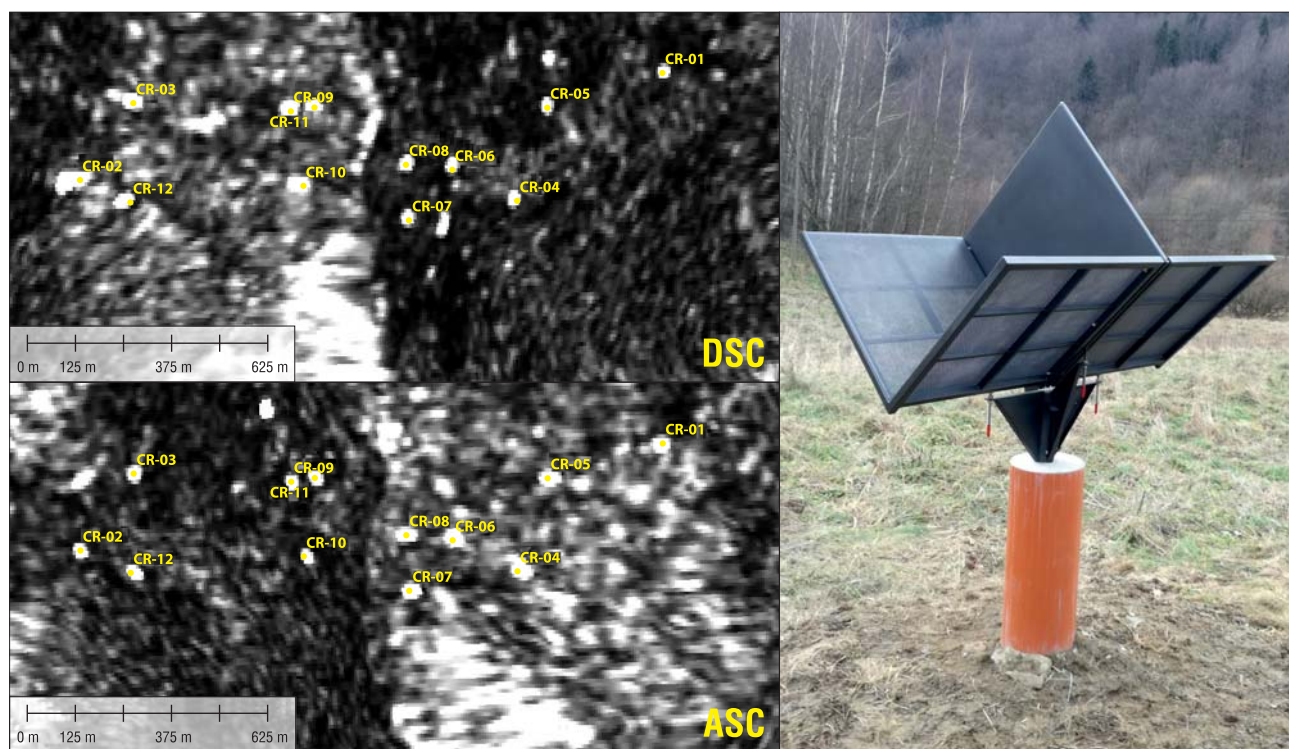


Ryc. 5. Wyniki przetwarzania interferometrycznego PSI. Seria SL (A) i seria ST (B)

Fig. 5. Results of PSI processing of SL data (A) and ST data (B)



Ryc. 6. Osuwiska Huciska (z lewej) i Zapadle (z prawej) w Szymbarku oraz elementy systemu monitoringu
Fig. 6. Huciska (left) and Zapadle (right) landslides in Szymbark and monitoring systems



Ryc. 7. Widoczność reflektorów na zobrazowaniach Sentinel-1 oraz wygląd ogólny reflektora
Fig. 7. Visibility of corner reflectors (CR) on Sentinel-1 images and general view of CR

wielkością niższą, niż ta wynikająca z pomiarów naziemnych. Możliwą przyczyną takiej sytuacji mogą być błędy rozwijania fazy oraz zbyt duże bazy czasowe (22 dni), co przy wartości długości fali równej 3,1 cm sprzyja niedoszacowaniu deformacji. Otrzymana gęstość punktów PS jest nieco większa, choć nadal niewystarczająca dla uzyskania pełnego obrazu deformacji, co wynika z formy użytkowa-

nia terenu (mało zabudowań, głównie sady i nieużytki). Zarówno sama nawierzchnia drogi DK75, jak i jej najbliższe otoczenie nie zawiera praktycznie żadnych punktów PS. Może to dziwić, ponieważ pozostałe drogi lokalne posiadają bardzo gęstą sieć PS. Wynika to prawdopodobnie z bardzo dużego natężenia ruchu i dużej dynamiki deformacji oraz zmiany kąta nachylenia drogi.

MONITORING OSUWISK ZAPADLE I HUCISKA W SZYMBARKU Z WYKORZYSTANIEM REFLEKTORÓW RADAROWYCH

Obszarem badawczym objęto dwa osuwiska nazwane od położonych w pobliżu miejscowości Huciska i Zapadle w gminie Szymbark w powiecie gorlickim. Są to osuwiska aktywne, przemieszczające materiał koluwalny od skalnej skarpy położonej w górnej części stoków do dna doliny potoku Bielanka. Aktywność osuwisk Zapadle i Huciska powoduje zaciskanie dna doliny, ograniczając przepływ wód w potoku. Efektem ruchów osuwiskowych są też uszkodzenia dróg, budynków, sieci przesyłowych i upraw rolnych (Rączkowski, Wójcik, 2007; Rączkowski, 2012, 2014). Podłoże osuwisk stanowią głównie eoceńskie łupki pstry, które zalegają pomiędzy piaskowcami magurskimi a utworami warstw inoceramowych. Uaktywniają się podczas szczególnie niesprzyjających warunków hydrometeorologicznych, głównie na wiosnę po topnieniu śniegu oraz w czasie letnich opadów atmosferycznych (Rączkowski, 2014). Pierwsze wzmianki o aktywności osuwiska Zapadle pochodzą z roku 1918 (Wójcik, 1959). Pierwsze badania przemieszczeń wykonano w latach 1972–1975 (Gil, Kotarba, 1977). Notowane wówczas przemieszczenia zastabilizowanych punktów pomiarowych wyniosły dla środkowej części osuwiska Zapadle 8,0 m w ciągu 3 lat. Monitoring ten był kontynuowany w latach 1996–1998 (Bochenek, Gil, 1998). Od 2009 r. oba wymienione osu-

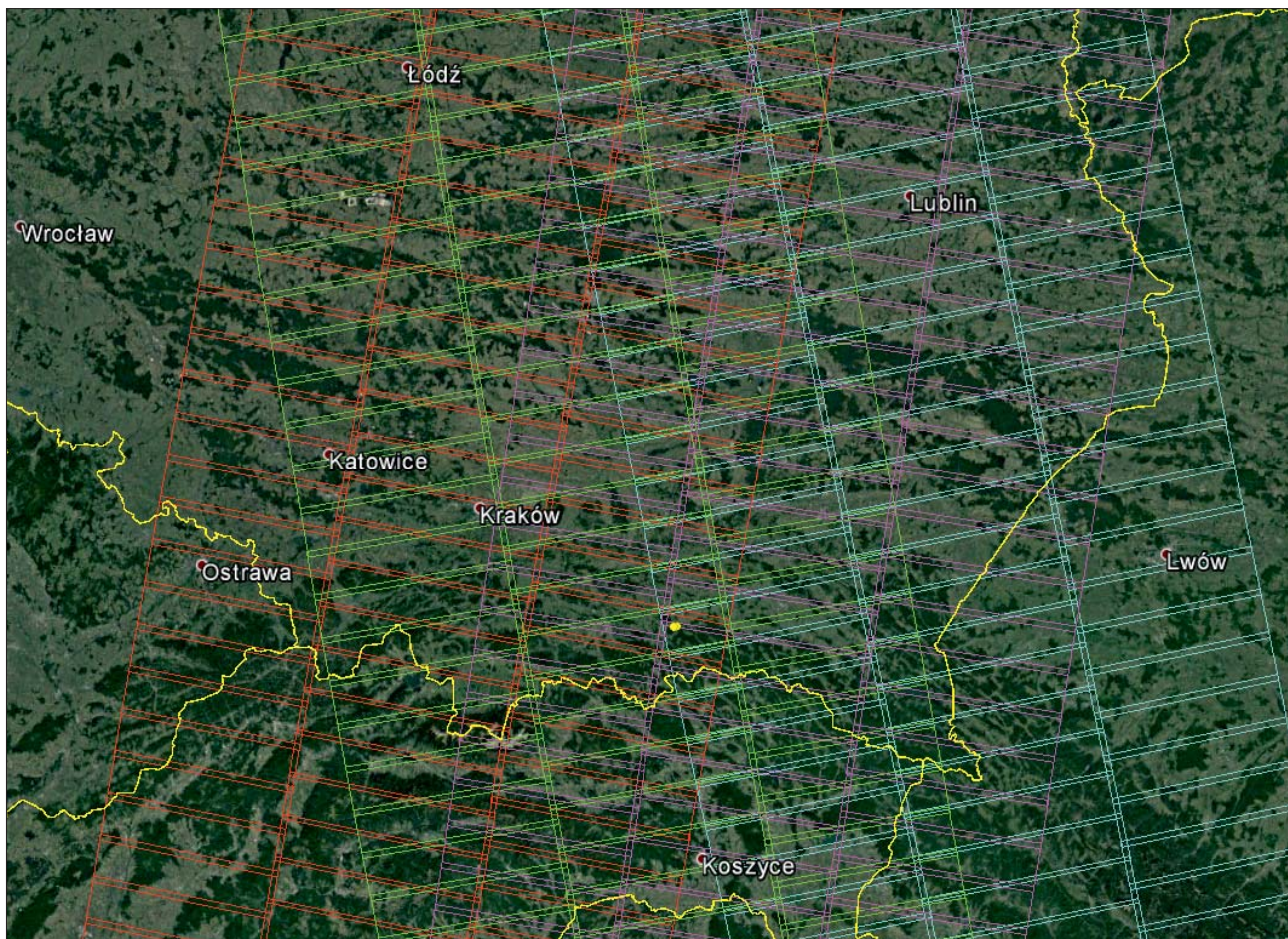
wiska są objęte monitoringiem wglębnym i powierzchniowym w ramach projektu SOPO (ryc. 6).

W 2018 r., objętym obserwacjami InSAR, przemieszczenia stwierdzane na punktach GNSS monitoringu powierzchniowego wynosiły 1–5 cm/rok (Huciska) i 1–65 cm/rok (Zapadle). Największą dynamikę przemieszczeń odnotowano w górnej części osuwiska Zapadle.

Reflektory radarowe i interferometria CRInSAR

Metody wieloczasowe InSAR opierają się na analizie fazy dla pikseli, które zachowują koherencję w długich okresach czasu. Natura rozpraszania wstecznego sygnału w obrębie takich pikseli może być różna, jednak w wielu przypadkach na dobrą jakość koherencji wpływa obecność tzw. rozpraszacza stabilnego w obrębie komórki rozdzielczości. Jest to zwykle obiekt charakteryzujący się bardzo wysokim rozpraszaniem wstecznym. Obiektami takimi są zwykle budynki, konstrukcje metalowe i słupy, ale również wychodnie skalne. Rozpraszacz stabilny wykorzystuje się w satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR) w tzw. metodzie interferometrii rozpraszaczy stabilnych PSI (Marinkovic i in., 2008).

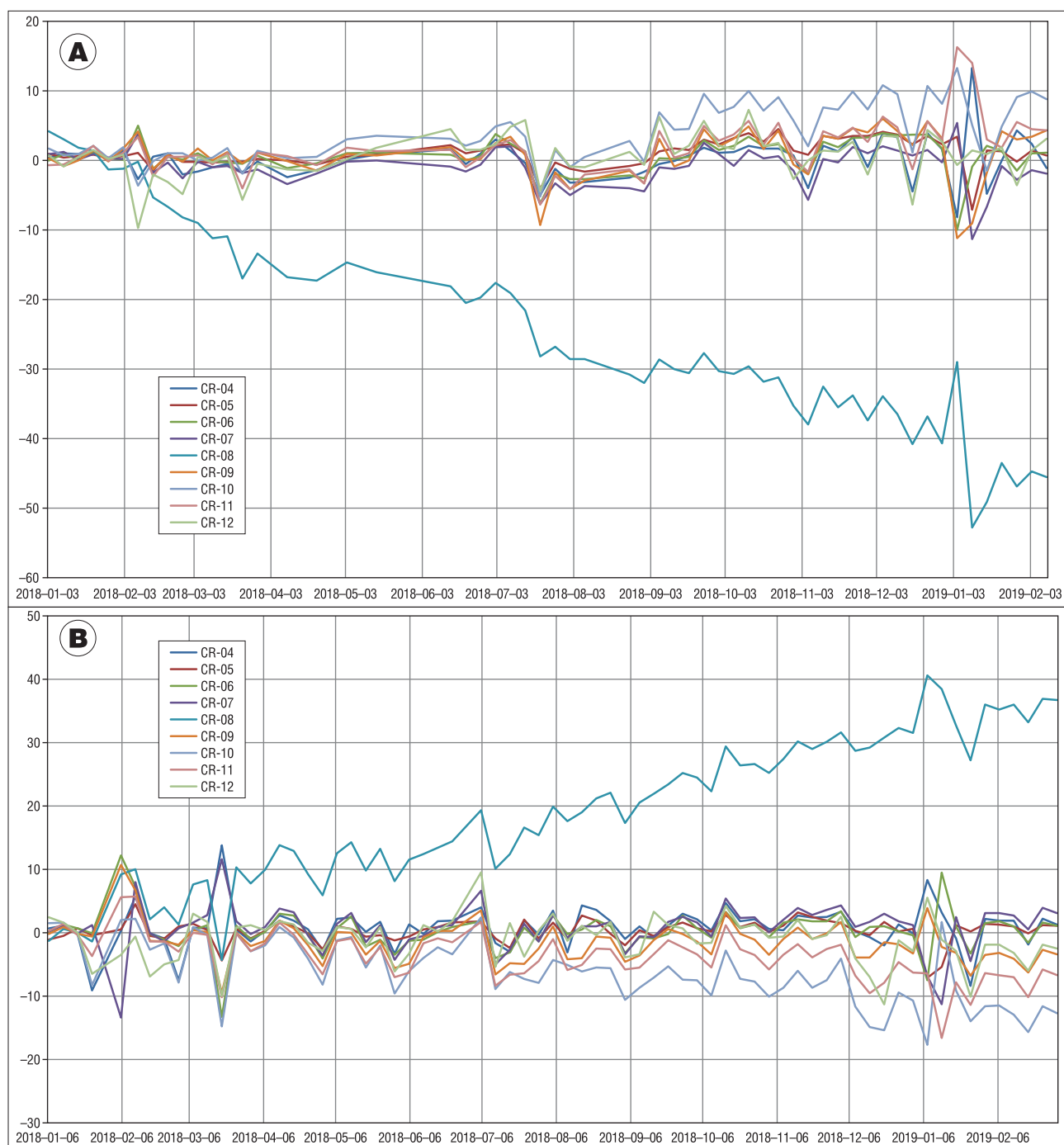
Oprócz naturalnych obiektów o charakterystyce rozpraszaczy stabilnych, w niektórych przypadkach instaluje się specjalne urządzenia zapewniające odbicie sygnału radarowego w żądany sposób. Obiekty takie nazywamy reflektorami radarowymi. Stosuje się je w dwóch podstawowych przypadkach. W pierwszym dla uzupełnienia sieci



Ryc. 8. Zasięgi danych SAR Sentinel-1 dla obszaru badań w Szymbarku. Kolorami przedstawiono poszczególne ścieżki obrazowania
Fig. 8. Extents of Sentinel-1 frames for the study area in Szymbark. Colors represent different satellite tracks

naturalnych rozpraszaczy: reflektory instaluje się wówczas w miejscach pozbawionych infrastruktury bądź wychodni skalnych – na obszarach upraw rolnych bądź nieużytków. W drugim przypadku – dla walidacji pomiarów deformacji: reflektor radarowy jest jedynym obiektem, gdzie interferometryczny pomiar deformacji można bezpośrednio odnieść do wyników pomiarów geodezyjnych. Reflektor radarowy ma ściśle zdefiniowane fizyczne centrum fazy, które można zmierzyć metodami geodezyjnymi (za pomocą niwelacji precyzyjnej lub GNSS). Pomiar taki zapewnia absolutną integrację pomiarów interferometrycznych z pomiarami geodezyjnymi i geodezyjnym układem odniesienia. Reflektory walidacyjne są jednocześnie uzupełnieniem sieci naturalnych rozpraszaczy.

Z uwagi na dużą efektywność i małą wrażliwość na błędy orientacji najczęściej stosowanym typem reflektora jest reflektor trójścienny (*tri-hedral*). Z uwagi na kształt jest zwany reflektorem narożnikowym (*Corner Reflector – CR*). Reflektory narożnikowe były od początku stosowane do walidacji i testów dokładnościowych radarowych systemów satelitarnych. Do walidacji pomiarów interferometrycznych użyto ich po raz pierwszy w marcu 1992 r. w trakcie tzw. Bonn Experiment (Guarnieri i in., 1993; Hartl i in., 1993; Prati i in., 1993). Obecnie reflektory radarowe są powszechnie wykorzystywane zarówno do walidacji (Marinkovic i in., 2008), jak i do pomiarów deformacji (Garthwaite i in., 2015; Xia i in., 2002). Na obszarze objętym badaniami rozmieszczono w grudniu 2017 r. łącznie



Ryc. 9. Przemieszczenia reflektorów dla ścieżki 051 (DESC) (A) i ścieżki 102 (ASC) (B)
Fig. 9. CR displacements for the track 051 (DESC) (A) and track 102 (ASC) (B)

12 reflektorów. Są to reflektory dwustronne, które zapewniają pomiar dla obu konfiguracji orbit (schodzącej i wschodzącej). Trzy spośród nich (CR01, CR02, CR03) są zlokalizowane poza obszarem aktywnych osuwisk i służą jako sieć referencyjna. Na osuwisku Zapadle zlokalizowano 4 reflektory, a na osuwisku Huciska 5 (ryc. 7).

Dla obliczeń interferometrycznych reflektory radarowe stanowią szczególną sieć PS. Obliczenia wykonuje się metodą PSI, jednak w znacznie uproszczonej wersji, gdyż zazwyczaj znane są dokładne współrzędne X, Y, Z centrum fazowego reflektora, które można dokładnie zmierzyć metodami geodezyjnymi. Reflektory zazwyczaj nie są zbyt odległe od siebie i nie jest wymagana korekta atmosferyczna (różnice APS – *Atmospheric Phase Screen*, pomiędzy reflektorami są zanedbywalne), a jedynie korekta fazy uwzględniająca położenie reflektora wewnątrz komórki rozdzielczości (Perissin i in., 2006; Qin i in., 2013).

Do obliczeń wykorzystano dane z konstelacji satelitów Sentinel-1a i Sentinel-1b rejestrowane od końca grudnia 2017 r. do grudnia 2018 r. w interwałach 6-dniowych. Dzięki ponad 50% wspólnemu pokryciu sąsiednich ścieżek do obliczeń wykorzystano cztery niezależne serie danych: dwie dla ścieżek schodzących (DESC) i dwie dla ścieżek wschodzących (ASC). Łącznie 730 scen (ryc. 8).

W przypadku osuwisk w Szymbarku omawiana metoda nie zdała jednak egzaminu z uwagi na bardzo duże przemieszczenia. Tak duża dynamika osuwiska sprawia, że reflektory podlegają nie tylko deformacjom pionowym, ale równocześnie silnym przesunięciom poziomym, w związku z czym muszą być traktowane jako obiekty ruchome (*moving targets*) (Singleton i in., 2014). Niemożliwą do uzyskania okazała się być współrejestracja danych do wspólnej sceny referencyjnej. Dla uzyskania współrejestracji należało ją przeprowadzić dwuetapowo – początkowo rejestrując sceny do dwóch sąsiednich w czasie (tj. wykonanych wcześniej i później), a następnie do wspólnej sceny referencyjnej. Z uwagi na stosunkowo duże deniwelacje wymagana okazała się również korekta troposferyczna uwzględniająca różnice w zawartości pary wodnej na różnych wysokościach. Obliczenia przeprowadzono przy wykorzystaniu interferometrycznego oprogramowania InTOP (*Interferometric Toolbox Of PGI*) rozwijanego w Państwowym Instytucie Geologicznym.

Wyniki opracowania danych InSAR dla reflektorów potwierdziły wysoką dynamikę przemieszczeń w 2018 r. Podobnie jak w przypadku punktów GNSS, większą dynamiką cechował się reflektor CR08 zlokalizowany w środkowej części osuwiska Zapadle, która wynosiła do 50 mm/rok (ryc. 9). Wykresy przedstawiają przemieszczenia reflektorów mierzone w kierunku padania sygnału (LoS – *Line of Sight*) w stosunku do stabilnych reflektorów referencyjnych. Przemieszczenia na osuwisku Huciska, jak i pozostałych reflektorach Zapadla nie przekroczyły 10 mm/rok.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Dane ultrawysokorozdzielcze trybów SL, a szczególnie ST pozwoliły uzyskać lepsze wyniki przetworzeń jednak w mniejszym zakresie niż przypuszczano. Potwierdzono teoretyczną zależność pomiędzy rozdzielczością a liczbą otrzymanych punktów PS. Stosunkowo mała gęstość PS na obszarze osuwiska Just i niemal zupełny ich brak w otoczeniu drogi nr 75 pozwalają przypuszczać, że przyjęty 22-dniowy interwał rejestracji okazał się zbyt duży w stosunku do występujących deformacji. Bardzo wysoka cena danych

TerraSAR-X rejestrowanych w trybie ST w chwili obecnej w zasadzie uniemożliwia ich praktyczne wykorzystanie w monitorowaniu osuwisk.

Analiza interferometryczna danych Sentinel-1 dla reflektorów na osuwiskach w Szymbarku okazała się znacznie trudniejsza niż zakładano, z uwagi na zbyt dużą dynamikę ruchów. Po przezwyciężeniu problemów metodologicznych otrzymane wyniki okazały się być doskonałym uzupełnieniem istniejącego monitoringu wglębnego i powierzchniowego. Po raz pierwszy otrzymano dane o ruchach powierzchniowych z tak dużą rozdzielczością czasową (6 dni dla każdej serii). Zatem, interferometria SAR wykorzystująca reflektory radarowe może być stosowana nawet na osuwiskach o dużej dynamice przemieszczeń.

Autor składa serdeczne podziękowania Europejskiej Agencji Kosmicznej i programowi Copernicus za udostępnienie danych Sentinel-1, Niemieckiej Agencji Kosmicznej za udostępnienie danych TSX w ramach projektu GEO2477. Piotrowi Nescierukowi, Wojciechowi Rączkowskiemu, Jackowi Dacce oraz Zbigniewowi Kowalskiemu wykonującym monitoring powierzchniowy i wglębny dziękuję za udostępnienie wyników i dyskusje nad ich interpretacją. Marcusowi Jendryke jestem wdzięczny za udostępnienie kodów źródłowych zmodyfikowanego oprogramowania DORIS umożliwiającego przetwarzanie danych TSX ST i SL. Petarowi Marinkovićowi dziękuję za dyskusję i porady w projektowaniu reflektorów radarowych, a przede wszystkim za pomoc w przetworzeniu danych Sentinel-1. Autor dziękuję również Recenzentom za wiele cennych uwag i poprawek w tekście.

LITERATURA

- BAMLER R., HARTL P. 1998 – Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Probl.*, 14: R1–R54.
- BERARDINO P., FORNARO G., LANARI R., SANSOSTI E. 2002 – A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 40: 2375–2383.
- BOCHENEK W., GIL E. 1998 – Obieg wody, substancji rozpuszczonych i zawieszony w zlewni Bystrzanki w latach hydrologicznych 1994–1997, [W:] Kostrzewski A. (red.), *Zintegrowany monitoring środowiska przyrodniczego. Funkcjonowanie i tendencje rozwoju geosystemów Polski. Materiały z IX Sympozjum ZMŚP, Storkowo, 2–4 września 1998.* Biblioteka Monitoringu Środowiska, PIOS, Warszawa: 93–103.
- BÜRGMANN R., ROSEN P.A., FIELDING E.J. 2000 – Synthetic Aperture Radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 28: 169–209.
- COLESANTI C., WASOWSKI J. 2006 – Investigating landslides with spaceborne synthetic aperture radar (SAR) interferometry. *Eng. Geol.*, 88: 173–199
- DE-ZAN F., GUARNIERI A.M. 2006 – TOPSAR: Terrain observation by progressive scans. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 44: 2352–2360. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2006.873853>
- FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. 1999 – Permanent Scatterers in SAR Interferometry, 1–3.
- FRITZ T., EINEDER M. 2013 – TerraSAR-X Basic Product Specification Document TX-GS-DD-3302. *Tech. Rep.*
- FRUNEAU B., ACHACHE J., DELACOURT C. 1996 – Observation and modelling of the Saint-Etienne-de-Tine'e landslide using SAR interferometry. *Tectonophys.*, 265: 181–190.
- GARTHWAITE M.C., LAWRIE S., DAWSON J., THANKAPPAN M. 2015 – Corner reflectors as the tie between InSAR and GNSS measurements: Case study of resource extraction in Australia. *Eur. Sp. Agency. Spec. Publ.*, ESA SP SP-731.
- GE N., GONZALEZ F.R., WANG Y., SHI Y., ZHU X.X. 2018 – Spaceborne Staring Spotlight SAR Tomography—A First Demonstration With TerraSAR-X. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.*, 11: 3743–3756. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2851752>
- GIL E., KOTARBA A. 1977 – Model of slide slope evolution in flysch mountains (An example drawn from the Polish Carpathians), *Catena*, 4 (3), Giessen, 233–248
- GOLDSTEIN R.M., ZEBKER H.A., WERNER C.L. 1988 – Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Sci.* 23: 713–720.

- GUARNIERI A.M., PARIZZI F., PRATI C., ROCCA F., MONTI GUARNIERI A. 1993 – SAR interferometry experiments with ERS-1. [W:] ESA SP-359, 991–993.
- HARTL P., REICH M., THIEL K.-H., XIA Y. 1993 – SAR interferometry applying ERS-1: some preliminary test results. [W:] ESA SP-359, 219–222.
- HOOPER A.J. 2006 – Persistent Scatterer Radar Interferometry for Crustal Deformation Studies and Modeling of Volcanic Deformation.
- HOOPER A.J., BEKAERT D., SPAANS K., ARIKAN M. 2012 – Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics* 514–517: 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.10.013>
- HOOPER A.J., ZEBKER H.A., SEGALL P., KAMPES B.M. 2004 – A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophys. Res. Lett.*, 31: 1–5. <https://doi.org/10.1029/2004GL021737>
- JENDRYKE M., BALZ T., JIANG H., LIAO M., STILLA U. 2013 – Using Open-Source Components to Process Interferometric TerraSAR-X Spotlight Data. *Int. J. Antennas Propag.*, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2013/275635>
- KAMPES B.M., HANSEN R.F., PERSKI Z. 2003 – Radar Interferometry with Public Domain Tools. [W:] Proceedings of FRINGE, 1–5.
- MARINKOVIC P., KETELAAR V.B.H., LEIJEN F.J. VAN HANSEN R.F. 2008 – InSAR Quality Control: Analysis of Five Years of Corner Reflector Time Series. Proceedings of Fringe Workshop, ESA SP-649, 26–30.
- MASSONNET D., FEIGL K.L. 1998 – Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Rev. Geophys.*, 36: 441–500.
- MITTERMAYER J., WOLLSTADT S., PRATS-IRAOLA P., SCHEIBER R. 2014 – The TerraSAR-X Staring Spotlight Mode Concept. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 52: 3695–3706. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2274821>
- PERISSIN D., FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. 2006 – On the physical characterization of SAR Permanent Scatterers in urban areas. *Proc. EUSAR'06*.
- PERSKI Z. 1999 – Osiedlenia terenu GZW pod wpływem eksploatacji pozdziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). *Prz. Geol.*, 47(2): 171–174.
- PERSKI Z., HANSEN R.F., WÓJCIK A., WOJCIECHOWSKI T. 2009 – InSAR analyses of terrain deformation near the Wieliczka Salt Mine, Poland. *Eng. Geol.*, 106. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.02.014>
- QIN Y., PERISSIN D., LEI L. 2013 – The Design and Experiments on Corner Reflectors for Urban Ground Deformation Monitoring in Hong Kong. *Int. J. Antennas Propag.* 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/191685>
- RĄCZKOWSKI W., WÓJCIK A. 2007 – Karta dokumentacyjna osuwiska (nr ew. 1205042-145). <http://mapa.osuwiska.pgi.gov.pl> (dostęp 19.02.2019 r.).
- RĄCZKOWSKI W. 2012 – Szymbark – Zapadłe. [W:] Wójcik A., Chowaniec J. (red.), *Osuwiska w województwie małopolskim*. Urząd Marszałkowski w Krakowie, 75–77.
- RĄCZKOWSKI W. 2014 – Karta dokumentacyjna osuwiska wraz z opinią (nr ew. 1205042-141) w miejscowości Szymbark. *Nar. Arch. Geol. PIG-PIB*, Kraków.
- REFICE A., BOVENGA F., GUERRIERO L., WASOWSKI J., INTERATENE D., AMENDOLA V. 2001 – DInSAR applications to landslide studie. *Proc. IGARS 2001 Sydney, Australia*, 3–5.
- SINGLETON A., LI Z., HOEY T., MULLER J.-P. 2014 – Evaluating sub-pixel offset techniques as an alternative to D-InSAR for monitoring episodic landslide movements in vegetated terrain. *Remote Sens. Environ.*, 147: 133–144. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.03.003>
- WASOWSKI J., BOVENGA F., NUTRICATO R., CONTE D., REFICE A., GRANICZNY M. 2007 – Satellite interferometry reveals spatial patterns of subsidence in the ancient Wieliczka Salt Mine (UNESCO Heritage Site, Poland). Proceedings of the Workshop Fringe 2009 – Advances in the Science and Applications of SAR Interferometry, 1–7.
- WASOWSKI J., BOVENGA F. 2014 – Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: current issues and future perspectives. *Eng. Geol.*, 174: 103–138.
- WOJCIECHOWSKI T., PERSKI Z., WÓJCIK A. 2008 – Wykorzystanie satelitarnej interferometrii radarowej do badań osuwisk w polskiej części Karpat. *Prz. Geol.*, 56: 1087–1091.
- WÓJCIK A. 1959 – Osuwiska ziemi w Beskidzie Niskim i w Bieszczadach. *Wierchy*, 27: 189–194.
- WÓJCIK A., NOWICKA D. 2010 – Karta dokumentacyjna osuwiska wraz z opinią (nr ew. 1210102-014) w miejscowości Świdnik. *Nar. Arch. Geol. PIG-PIB*, Kraków.
- ZIÓŁKOWSKI D. 2007 – Środowiskowe uwarunkowania efektywności interferometrii radarowej w badaniach ruchów masowych w terenach górskich. *Teledetekcja Środowiska*, 37: 101–160.
- XIA Y., KAUFMANN H., GUO X. 2002 – Differential SAR Interferometry Using Corner Reflectors. Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2: 1243–1246. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1025902>



Osuwisko Just. Fragment drogi krajowej DK75 niszczonej przez ruch osuwiska. Fot. Z. Perski, 06.11.2014 r.

Just landslide. A fragment of highway DK75 damaged by a landslide movement. Photo by Z. Perski, Nov. 5 of 2014