

## Monitoring dynamiki ruchów powierzchni osuwisk w warunkach zmiennego poziomu wód gruntowych z wykorzystaniem reflektorów radarowych

Zbigniew Perski<sup>1</sup>, Tomasz Wojciechowski<sup>1</sup>



Z. Perski



T. Wojciechowski

**Monitoring the dynamics of landslide surface movements under conditions of variable groundwater level with the use of radar reflectors.** Prz. Geol., 70: 661–670; doi: 10.7306/2022.20

*Abstract.* The main objective of the presented analysis was to investigate to what extent even minor changes in the hydrological and hydrogeological environment affect the changes in the dynamics of landslide surface displacement. The research was carried out for selected monitored landslides, which, in addition to the in-depth monitoring devices, were equipped with corner reflectors suitable for satellite radar interferometry measurements. The high temporal resolution of the interferometric data allowed demonstrating the existence of a relationship between the speed of surface movements and slight changes in the depth to the groundwater table. The analyses were performed for five landslides, which also showed a high dependence

of these compounds on the geological structure of the landslide and its substrate.

**Keywords:** landslide, monitoring, corner reflector, SAR interferometry, time series

Współczesne monitorowanie osuwisk polega na mierzeniu i zapisywaniu ich parametrów wgłębnych, takich jak ruch osuwiska w otworach inklinometrycznych oraz wahania zwierciadła wód podziemnych w otworach piezometrycznych; parametrów powierzchniowych, do których zalicza się przemieszczenia punktów pomiarowych, a także danych o wielkości opadów atmosferycznych. Dane te są rejestrowane punktowo, jednak umiejętne dobranie lokalizacji, poprzedzone wnikliwymi badaniami, pozwala charakteryzować zmiany zachodzące w osuwisku w sposób w miarę reprezentatywny. Niezmiernie ważnym elementem zbieranych danych jest interwał czasowy, w jakim dane są rejestrowane. Rejestracja danych opadowych i hydrogeologicznych przebiega automatycznie według ustalonego interwału, zazwyczaj jednej godziny. W przypadku długich, wieloletnich serii obserwacji możemy więc mówić o pomiarach quasi-ciągłych. Zupełnie inaczej są prowadzone pomiary deformacji wgłębnych czy powierzchniowych. Koszt urządzeń do pomiaru quasi-ciągłego, np. permanentnych stacji GNSS lub automatycznych stacji inklinometrycznych, jest bardzo wysoki. Sprzęt ten jest skomplikowany w utrzymaniu, m.in. ze względu na konieczność zapewnienia stałego źródła zasilania. W związku z tym pomiary tego typu są wykonywane w sesjach – jeden lub dwa razy w roku. Taki rodzaj danych sprawia, że wiarygodne wnioskowanie o dynamice ruchów i jej zależności od opadów jest obciążone dużą dozą niepewności. W niektórych przypadkach bardziej wiarygodne dane można uzyskać, stosując radarowe pomiary satelitarne na specjalnie posadowionych reflektorach. Częstotliwość powierzchniowych pomiarów deformacji można wówczas skrócić nawet do kilku dni, w zależności od liczby przelotów satelitarnych.

W artykule przedstawiono założenia techniczne stosowania reflektorów radarowych oraz dotychczasowe doświadczenia Centrum Geozagrożeń PIG-PIB, zebrane

w ciągu kilku lat wykorzystywania ich do badania oraz monitoringu wybranych osuwisk. Prace te są realizowane w ramach programu SOPO – System Osłony Przeciwosuwiskowej (Marciniak i in., 2019; Wojciechowski i in., 2021).

### InSAR Z WYKORZYSTANIEM REFLEKTORÓW RADAROWYCH

Interferometria SAR (InSAR) jest techniką teledetekcyjną pozwalającą mierzyć i monitorować przemieszczenia powierzchni terenu w czasie (Goldstein i in., 1988). Wykorzystuje ona różnice fazy sygnałów radarowych pochodzących z satelitarnych obserwacji mikrofalowych typu SAR (*Synthetic Aperture Radar*) danego obszaru. Dobry i szczegółowy przegląd podstaw metodyki, potencjału i obszarów zastosowań InSAR można znaleźć w wielu pracach (np. Bamler, Hartl, 1998; Massonnet, Feigl, 1998; Perski, 1999; Bürgmann i in., 2000; Rosen i in., 2000).

Metodę InSAR opracowano pod koniec lat 90. XX w. i doczekała się już licznych modyfikacji oraz rozwinięć likwidujących początkowe ograniczenia, które uniemożliwiały obserwowanie deformacji w długich interwałach. Na początku XXI w. wdrożono metody analizy szeregów czasowych (MTI – *Multi Temporal InSAR*). Bazują one na zastosowaniu algorytmów opartych na selekcji pikseli zachowujących koherentną fazę sygnału mimo upływu czasu. Metody MTI charakteryzują różne strategie przetwarzania i selekcji koherentnych pikseli (np. Ferretti i in., 1999; Berardino i in., 2002; Hooper i in., 2004). Ogólnie rzecz ujmując, InSAR to skomplikowany, wymagający ogromnych mocy obliczeniowych i zasobów pamięci proces przetwarzania danych, w którym kluczową rolę odgrywają rozwiązania algorytmiczne. Dobry przegląd ostatnich osiągnięć metodycznych przedstawili Hooper i in. (2012) oraz Crosetto i in. (2016). Próby wykorzystywania InSAR

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Karpacki, ul. Skrzatów 1, 31–560 Kraków; [zbigniew.perski@pgi.gov.pl](mailto:zbigniew.perski@pgi.gov.pl); [tomasz.wojciechowski@pgi.gov.pl](mailto:tomasz.wojciechowski@pgi.gov.pl); ORCID: Z. Perski – 0000-0002-6727-7448, T. Wojciechowski – 0000-0001-5858-0026

w badaniach deformacji osuwiskowych były prowadzone niemal od początków stosowania metody (Fruneau i in., 1996; Wojciechowski i in., 2008; Bovenga i in., 2012). Dobry przegląd osiągnięć w tej dziedzinie przedstawili Refice i in. (2001) oraz Colesanti i Wasowski (2006).

## REFLEKTORY RADAROWE – METODYKA

Metody InSAR bazują przede wszystkim na odbiciu sygnału radarowego od obiektów naturalnych. Dobrymi obiektami odbijającymi, tzw. rozpraszaczami (Perski i in., 2006), których charakterystyka odbicia nie zmienia się wraz z upływem czasu, są wychodnie skał i miejsca pozbawione roślinności. Do grupy takich obiektów należą także konstrukcje wykonane ręką człowieka: budynki, ogrodzenia, słupy linii przesyłowych, infrastruktura drogowa, kolejowa itp. Oprócz tego rodzaju „przypadkowych” obiektów istnieje oczywiście możliwość celowego instalowania specjalnych urządzeń zapewniających bierne odbicie sygnału radarowego w żądany sposób i o zadanej charakterystyce. Obiekty takie nazywamy reflektorami radarowymi lub ze względu na ich konstrukcję reflektorami narożnikowymi (*corner reflectors* – CR). W opracowaniach InSAR stosuje się je w dwóch podstawowych celach:

- do monitorowania deformacji z zamiarem uzupełnienia sieci naturalnych, stabilnych rozpraszaczy. Reflektory instaluje się wówczas w miejscach pozbawionych naturalnych rozpraszaczy – tj. tam, gdzie nie ma infrastruktury bądź wychodni skalnych – np. na obszarach upraw rolnych lub nieużytków. Dla uzyskania pożądanego wyniku instalację reflektorów należy poprzedzić interferometryczną analizą archiwalnych danych z tego obszaru;
- do walidacji wyników. Reflektor radarowy ma ściśle zdefiniowane, fizyczne centrum fazowe. Przyjmuje się, że jest to punkt, od którego następuje odbicie. Jego lokalizację można fizycznie zmierzyć, np. metodami geodezyjnymi, za pomocą niwelacji precyzyjnej czy GNSS. Pomiar taki jest w zasadzie jedynym sposobem zapewnienia absolutnej integracji pomiarów interferometrycznych z pomiarami geodezyjnymi i przeniesienia ich na geodezyjne układy odniesienia. Reflektory walidacyjne są jednocześnie uzupełnieniem sieci naturalnych rozpraszaczy.

Reflektory radarowe tworzą szczególną sieć rozpraszaczy PS (*Persistent Scatterers*), którą wykorzystuje się do analiz interferometrycznych. Obliczenia wykonuje się podobnie jak w metodach wieloczasowych, jednak w znacznie uproszczonej wersji, znane są bowiem współrzędne X, Y i Z centrów fazowych reflektorów CR i nie jest zatem konieczne ich wyszukiwanie za pomocą zaawansowanych algorytmów, jak się to czyni w przypadku rozpraszaczy naturalnych. Reflektory są zazwyczaj ustawione w niewielkiej odległości od siebie, zatem nie jest wymagane uwzględnianie wpływu czynników atmosferycznych na wyniki pomiarów. Wymagana jest jedynie korekta fazy uwzględniająca położenie reflektora wewnątrz komórki rozdzielczości (Perissin, 2010). Metody obliczeniowe stosowane w pomiarach interferometrycznych z użyciem reflektorów nazywa się czasami CRInSAR – *Corner Reflector Interferometry SAR* (Xia i in., 2002).

Zastosowanie reflektorów radarowych w InSAR ma długą historię. Zasada ich działania jest bowiem znana od

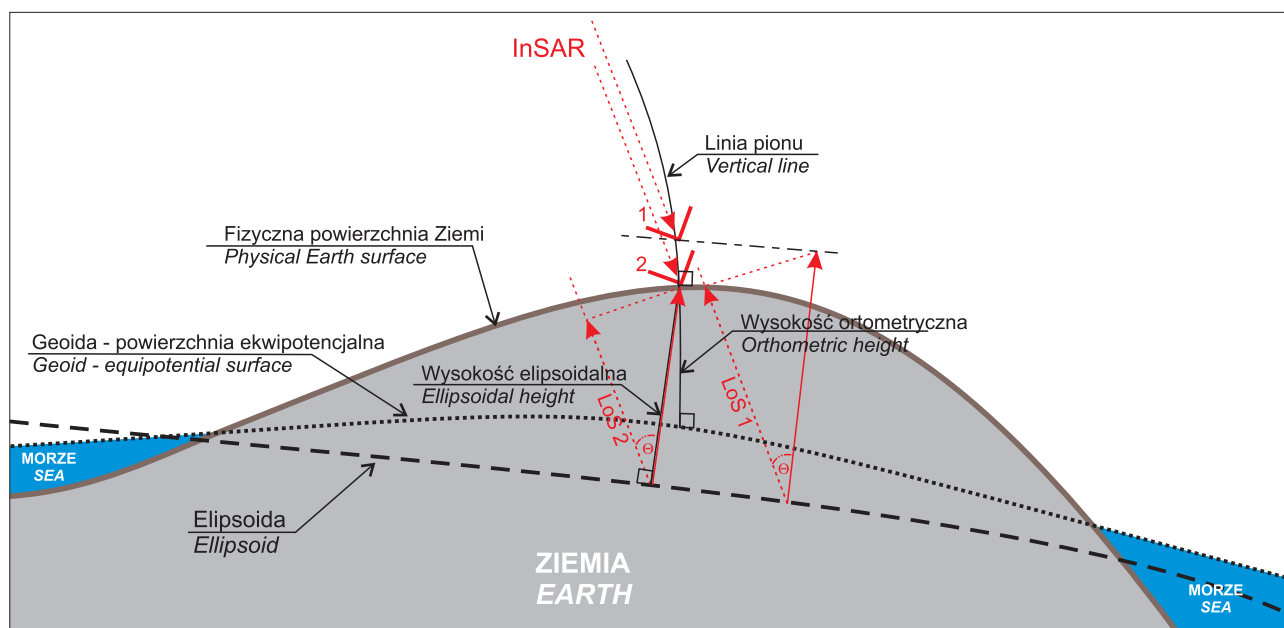
początków rozwoju techniki radarowej. Były one wykorzystywane do sprawdzenia, czy teoretyczne założenia metody InSAR mają odzwierciedlenie w rzeczywistości (Guarnieri i in., 1993; Hartl i in., 1993). Później wykorzystywano je do pomiarów w trudnych warunkach (Froese i in., 2008; Garthwaite i in., 2015), a także do walidacji metod wieloczasowych (Marinkovic i in., 2008; Qin i in., 2013). Ze względu na dużą wiarygodność uzyskiwanych w ten sposób wyników pomiarów reflektory są rutynowo stosowane w wielu miejscach świata do monitorowania przedsięwzięć przemysłowych związanych z eksploatacją surowców.

## ROZMIESZCZENIE REFLEKTORÓW, DEKOMPOZYCJA ITP.

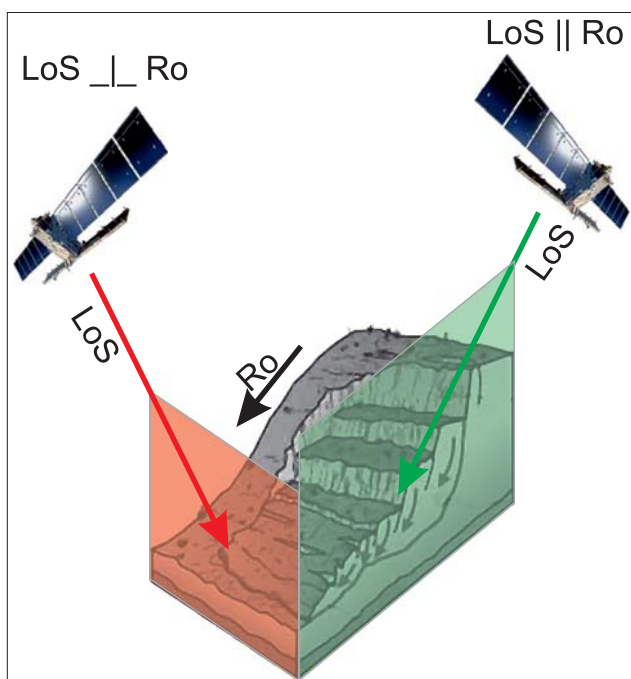
Analizując informacje o przemieszczeniach obiektów, należy zdawać sobie sprawę, jakie są geometryczne podstawy pozyskiwania tych danych z reflektorów i jak prawidłowo należy je odnosić do wartości otrzymywanych innymi metodami. Należy pamiętać o różnicach w pomiarze wysokości, jak i sposobie ich odniesienia. W przypadku danych niwelacji geometrycznej wysokość ortometryczna jest mierzona wzdłuż rzeczywistej linii pionu w stosunku do powierzchni odniesienia, którą jest geoida. Natomiast dla danych GNSS jest mierzona wysokość elipsoidalna wzdłuż normalnej do elipsoidy odniesienia. Dane InSAR stanowią natomiast wysokość elipsoidalną mierzoną w kierunku ukośnym, tj. padania wiązki radarowej (*Line of Sight* – LoS). Zależności te obrazuje ryc. 1.

Zakładając, że wysokość geoidy i elipsoidy nie uległy zmianie w czasie, jaki upłynął pomiędzy kolejnymi pomiarami, oblicza się tzw. podwójne różnice (*Double Differences*). Podwójne różnice swoją nazwę zawdzięczają temu, że dotyczą jednocześnie różnic wysokości oraz czasu. Różnice wysokości są obliczane pomiędzy danym punktem a punktem przyjętym za referencyjny, natomiast domena czasu określa czas pomiędzy danym pomiarem a pomiarem przyjętym za referencyjny. Obliczenie podwójnych różnic redukuje jednocześnie problem rozbieżności układów odniesienia (elipsoida lub geoida). Metodę podwójnych różnic stosuje się w wielu sytuacjach pomiarowych w geodezji. W InSAR podwójne różnice są ponadto wykorzystywane do obliczeń na punktach PS, których nie jesteśmy w stanie dowiązać do bezwzględnego układu współrzędnych (Ketelaar, 2008).

Kolejną ważną sprawą jest uwzględnienie faktu, że dane InSAR nie reprezentują kierunku prostopadłego do elipsoidy tylko kierunek w stosunku do niej ukośny (LoS). Co więcej, pomiar deformacji (bazujący na różnicy fazy) InSAR jest dokonywany w kierunku poprzecznym do kierunku przelotu satelity i reprezentuje tylko jeden wektor, będący tym samym jedynie pewną składową całkowitej deformacji. Dekompozycja na składowe trójwymiarowe (równoległe do kierunków świata E, N i h – *East, North and height*) jest częściowo możliwa, jeżeli dysponujemy danymi z przelotów orbit wstępujących (*ascending*) i zstępujących (*descending*; Wright i in., 2004). Z uwagi na nachylenie okołobiegunowych orbit satelitów teledetekcyjnych w stosunku do płaszczyzny równika (powyżej 95°) kierunek obserwacji LoS jest bardzo bliski kierunkowi E-W, dlatego dekompozycja jest w zasadzie możliwa jedynie względem wektorów E i H (ryc. 1). W niektórych przypad-



Ryc. 1. Przemieszczenia reflektora radarowego względem powierzchni odniesienia: geoidy i elipsoidy  
 Fig. 1. Movements of the radar reflector relative to the reference surface: geoids and ellipsoids



Ryc. 2. Znaczenie kierunku obserwacji satelitarnej w stosunku do kierunku ruchu osuwiskowego: **LoS** – kierunek obserwacji satelitarnej; **Ro** – ruch osuwiska. Obserwacja InSAR wykaze ruch osuwiska jedynie w przypadku, gdy  $LoS \parallel Ro$

Fig. 2. The importance of satellite observation direction in relation to landslide movement direction: **LoS** – direction of satellite observation; **Ro** – landslide movement direction. InSAR observation can only detect the landslide movement if  $LoS \parallel Ro$

kach składową N na podstawie danych SAR można uzyskać, wykorzystując techniki śledzenia przesunięć pikseli (*pixel tracking, coherence tracking*). Dokładność tych danych jest jednak niewielka i mają one zastosowanie jedynie w przypadkach deformacji o dużej magnitudzie, przekraczającej decymetry (Fialko i in., 2001; Singleton i in.,

2014). Z przedstawionych rozważań wynikają implikacje natury czysto praktycznej, ograniczające stosowanie reflektorów na osuwiskach do dosyć szczególnych przypadków, gdyż nie wszystkie lokalizacje będą się kwalifikować do pomiarów interferometrycznych. Wykorzystanie reflektorów będzie bowiem miało sens jedynie na osuwiskach, których główna składowa ruchu jest w przybliżeniu równoległa do kierunku E-W. W przypadku osuwisk o składowej ruchu zbliżonej do kierunku N-S dane interferometryczne wykażą jedynie deformacje wtórne, nie mające wiele wspólnego z główną składową przemieszczeń (ryc. 2).

Instalując reflektory należy wybierać miejsca pozbawione drzew, gdyż te mogą rozpraszać sygnał radarowy, zanim dotrze on do umieszczonego pod nimi reflektora. Warto wybierać również miejsca pozbawione wysokiej roślinności w promieniu ok. 20 m od reflektora, co później ułatwia odseparowanie od szumu tła sygnału odbitego od reflektora.

#### DANE RADAROWE Z KONSTELACJI SATELITÓW SENTINEL-1

Instalując reflektory, należy mieć na uwadze, dla jakich systemów satelitarnych SAR będą one przeznaczone. Wpływa to na ich rozmiary (zależne od długości fali używanej przez dany system) oraz orientację (dostosowaną do kierunków przelotów). Użycie reflektorów przynosi efekty dopiero po upływie co najmniej kilku lat, więc kluczowy jest również planowany czas misji satelitarnej. Obecnie najbardziej obiecująca dla takich zastosowań jest europejska misja Sentinel-1. Jest ona częścią europejskiego programu *Copernicus* i co ważne, wszystkie dane z terenu Polski są rejestrowane podczas każdego przelotu, a następnie powszechnie i nieodpłatnie udostępniane przez ESA (Torres i in., 2012).

Zakończone sukcesem wystrzelenie satelity Sentinel-1A nastąpiło 03.04.2014 r., natomiast 1B – 22.04.2016 r. Dane Sentinel-1 z obszarów lądowych są rejestrowane w typie *Interferometric Wide (IW) Swatch*, który jest realizowany



za pomocą trybu TOPS (*Terrain Observation by Progressive Scans*). Tryb ten umożliwia rejestrację pasa obrazowania o szerokości 250 km z zachowaniem rozdzielczości terenowej ok. 25 m (De Zan i in., 2008). Obecnie na orbicie znajdują się dwa satelity Sentinel-1: S1A i S1B, przy czym S1B uległ awarii pod koniec ubiegłego roku i trwają prace nad przywróceniem jego funkcjonalności. Czas rewizyty pojedynczego satelity (okres pomiędzy wykonaniem rejestracji o dokładnie tych samych parametrach geometrycznych) wynosi 12 dni. Jednak za sprawą wykorzystywania dwóch satelitów skraca się do 6 dni, a biorąc pod uwagę orbity sąsiednie (wspólne pokrycie sąsiednich ścieżek) oraz orbity zstępujące i wstępujące, czas ten ulega skróceniu do 3 dni. Możliwe jest zatem uzyskanie serii pomiarów przemieszczeń reflektorów na osuwiskach w interwale 3 dni. Tak wysoka rozdzielczość czasowa danych CRInSAR umożliwia traktowanie ich jako serii pomiarów quasi-ciągłych, a co za tym idzie wiarygodne porównywanie z danymi monitoringu hydrogeologicznego i opadowego osuwisk.

### REFLEKTORY RADAROWE W PROGRAMIE SOPO

Państwowa służba geologiczna, której funkcję pełni PiG-PIB, reflektory radarowe po raz pierwszy zastosowała w 2013 r., realizując projekt *Monitoring osiadania powierzchni terenu w 3 wybranych lokalizacjach poszukiwań gazu w formacjach łupkowych – projekt pilotażowy*. Wówczas to na każdym z 3 poligonów badawczych (w okolicach miejscowości Lewino, Babiak i Berejów) zainstalowano po 20 reflektorów radarowych dwóch typów – 15 dla

satelity TerraSAR-X i 5 dla satelity Sentinel-1. Po sukcesie tych eksperymentów (Perski i in., 2018), w 2017 r. rozpoczęto instalację pierwszych reflektorów radarowych na osuwiskach. Bazując na wcześniejszych doświadczeniach, zdecydowano się na pewne modyfikacje konstrukcji reflektora. Opracowany ostatecznie jego wzór stanowi zintegrowaną konstrukcję składającą się z tak zespolonych ze sobą dwóch reflektorów, by można było prowadzić pomiary wykorzystując orbity wstępujące i zstępujące. Taka konstrukcja zapewnia przeprowadzenie dwóch niezależnych serii obserwacji tego samego punktu i umożliwia dekompozycję wektora deformacji na H i E-W. Na potrzeby pomiarów walidacyjnych każdy z reflektorów wyposażono w specjalny trzpień do mocowania anteny GNSS (ryc. 3).

W 2017 r. zainstalowano reflektory na dwóch osuwiskach w Szymbarku: w przysiółkach Zapadle i Huciska; w następnych latach na osuwiskach w Grybowie i Kłodnem, a w 2020 r. na osuwisku w Słotowej. W każdej z wymienionych lokalizacji umieszczono 6 reflektorów – 4 na terenach osuwisk i 2 poza ich obszarami. Reflektory umieszczone w pobliżu osuwisk pełnią funkcję punktów referencyjnych. Wszystkie reflektory są montowane na żelbetonowych podstawach zagłębionych w gruncie na 1,5 m, dzięki czemu wyeliminowano wpływ przemarzania jego górnej warstwy oraz pełnienia warstw powierzchniowych. Wszystkie wymienione osuwiska były już wcześniej objęte monitoringiem wglębnym i powierzchniowym w ramach projektu SOPO (ryc. 4).

### CHARAKTERYSTYKA BADANYCH OSUWISK

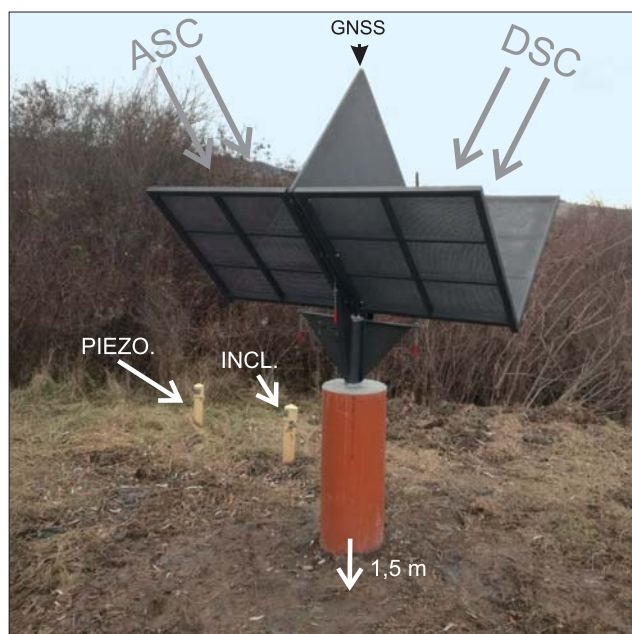
Skalno-zwietrzelinowe osuwiska w Szymbarku są formami złożonymi (Kos, Wójcik, 2022b, c), w ich obrębie odbywa się zarówno ruch rotacyjny, jak i translacyjny (Warmuz, Nescieruk, 2019). Rozwinęły się one w strefie kontaktu paleoceńsko-eoceńskich łupków pstrych z Łabowej i kompleksu piaskowców magurskich z Wątkowej.

Pobliskie osuwisko w Grybowie, gdzie przemieszczeniu ulegają zarówno skały podłoża, jak i zwietrzelina, również jest formą złożoną (Kos, Wójcik, 2022e). Wytworzyło się ono na kontakcie łupków pstrych i piaskowców ciężkowickich.

Złożone osuwisko skalno-zwietrzelinowe w Kłodnem (Kos, Wójcik, 2022d) powstało w 2010 r. na południowych stokach góry Chełm (793 m n.p.m.), na kontakcie piaskowców gruboławicowych warstw magurskich z ciemnymi łupkami warstw podmagurskich i łupków oraz drobnopławicowych, cienkoławicowych piaskowców warstw hierogliwowych.

Skalno-zwietrzelinowe osuwisko w Słotowej, w górnej części rotacyjne (Kos, Wójcik, 2022a), wykształciło się na obszarze płaszczowiny śląskiej. W jego podłożu występują silnie zaburzone tektonicznie utwory kredowe. Są one reprezentowane przez łupki cieszyńskie górne z wkładkami cienkoławicowych piaskowców wapienistych i syderytów; warstwy wierzowskie oraz warstwy Igockie (nierozdzielone). Koluwia osuwiskowe składają się z przemieszczonych pakietów skalnych, a także utworów gliniastych z rumoszem, pokrytych cienką warstwą lessów.

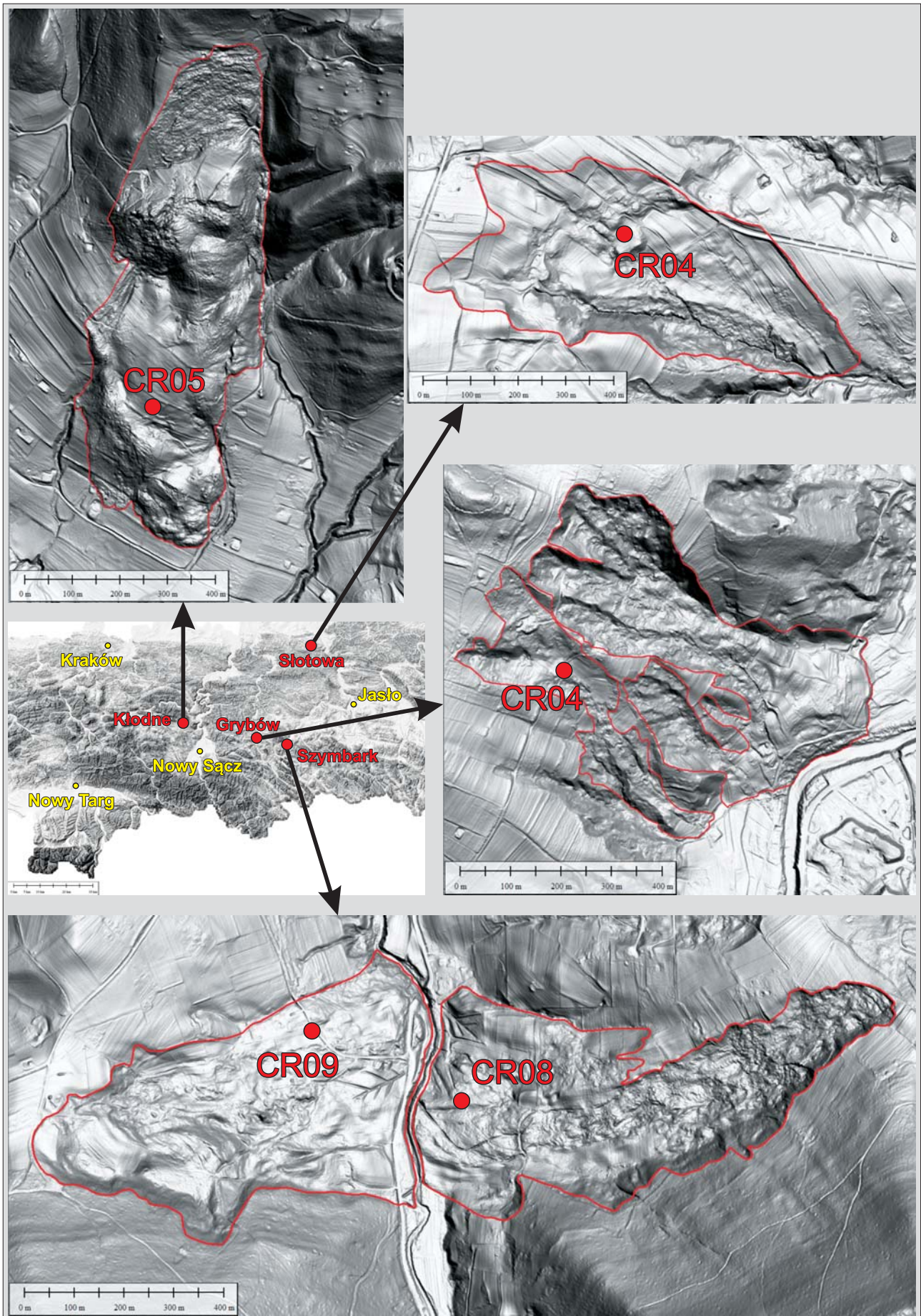
Istotnym aspektem interpretacji punktowych danych radarowych jest układ geologiczny. Znane są bowiem przypadki, że ruch rotacyjny koluwium nie musi się wiązać



**Ryc. 3.** Konfiguracja reflektora CR08 w Szymbarku Zapadle: **ASC**, **DSC** – kierunki obserwacji satelitarnych; **INCL** – otwór badawczy inklinometryczny; **PIEZO** – otwór badawczy piezometryczny. Betonowa podstawa zagłębiona w gruncie na 1,5 m

**Fig. 3.** The corner reflector configuration – example of the CR08 reflector in Szymbark Zapadle: **ASC**, **DSC** – directions of satellite observations; **INCL** – inclinometric borehole; **PIEZO** – piezometric borehole. Concrete base is buried into the ground to a depth of 1.5 m





Ryc. 4. Lokalizacja analizowanych reflektorów radarowych (czerwone punkty) na tle monitorowanych osuwisk  
Fig. 4. Location of the analysed radar reflectors (red dots) on the background of the extents of monitored landslides



z jego przemieszczeniem zgodnie z nachyleniem stoku, jak dzieje się podczas ruchu translacyjnego. Fragmenty jezora mogą być wówczas wypychane w górę, nieznacznie zmieniając współrzędne poziome. Informacja taka jest niezbędna do prawidłowej interpretacji deformacji stwierdzonej w obrębie reflektora radarowego, która w takich przypadkach może pozostawać w opozycji do wyników pomiarów wgłębnych, tj. inklinometrycznych.

Osuwiska w Szymbarku, Grybowie i Słotowej cechowały się długotrwałym, wieloetapowym rozwojem, wielokrotnym odmładzaniem i prawie ciągłą aktywnością. Natomiast osuwisko w Kłodnem powstało w czerwcu 2010 r., a jego aktywność była procesem jednorazowym, zainicjowanym po długotrwałych i intensywnych opadach. W związku z tym po okresie intensywnych przemieszczeń, trwających do września 2010 r., w następnych latach jego aktywność zmniejszyła się, a właściwie niemal całkowicie wygasła (Wójcik i in., 2011).

Na osuwisku w Szymbarku-Huciskach wyniki pomiarów wgłębnych (inklinometrycznych) wskazywały na aktywną powierzchnię poślizgu na głębokości 14 m p.p.t. Skumulowane przemieszczenie w ciągu 9 lat osiągnęło 110 mm, a więc jego średnia prędkość wynosiła około 12 mm/rok (Nescieruk i in., 2017a, 2021b; Warmuz, Nescieruk, 2019). Powierzchnie poślizgu osuwiska w Szymbarku-Zapadlu przebiegają na głębokości 13,5 i 17 m p.p.t. Dwa otwory pomiarowe na dolnej powierzchni poślizgu uległy zniszczeniu (w 2010 i 2018 r.), a prędkość przemieszczeń wzdłuż górnej powierzchni wynosi ok. 8,5 mm/rok (Nescieruk i in., 2017b, 2021a).

Na osuwisku w Grybowie wszystkie 3 założone kolumny inklinometryczne uległy ścięciu przez przemieszczające się koluwia (po 4, 5 i 6 latach od zainstalowania). Aktywne powierzchnie poślizgu występują tam na głębokości 7,5 i 18,5 m p.p.t., a prędkość przemieszczeń dochodzi do 30 mm/rok (Nescieruk i in., 2016).

Na osuwisku w Kłodnem w profilach otworów inklinometrycznych występuje kilka powierzchni poślizgu, spośród których jedynie dwie wykazują obecnie niewielką aktywność. Znajdują się one na głębokości 6,5 i 18 m, gdzie notuje się przyrosty przemieszczeń o około 1,5 mm/rok (Nescieruk i in., 2021c).

Osuwisko w Słotowej charakteryzuje się występowaniem 3 aktywnych powierzchni poślizgu – na głębokości 5, 22 i 26 m p.p.t. Jeden z 2 otworów inklinometrycznych uległ ścięciu w 2016 r. na najgłębszej powierzchni poślizgu. Przemieszczenia wgłębne osiągają tam ok. 20 mm/rok (Nescieruk i in., 2021d).

#### WYKORZYSTANE DANE I ICH ANALIZA

Co najmniej jeden reflektor zlokalizowano w bezpośrednim sąsiedztwie każdego z badanych osuwisk, umieszczając go (w zależności od lokalnych warunków) w odległości do kilkunastu metrów od pary otworów – inklinometrycznego i piezometrycznego. Taka lokalizacja punktów pomiarowych sprawia, że w tych szczególnych przypadkach dane uzyskiwane za pomocą reflektorów można wprost odnosić do wyników pomiarów piezometrycznych i inklinometrycznych. W niniejszym artykule opisano 5 takich zestawów danych – po jednym z każdego badanego osuwiska (ryc. 4).

Należy podkreślić, że przedstawione wyniki analiz są wstępne i na obecnym etapie badań wykorzystano dane interferometryczne niekorygowane, tj. wektory LoS dla orbit zstępujących. Nie jest to jednak błąd, ponieważ pod uwagę brano wartości podwójnych różnic, a celem porównań była analiza zmienności dynamiki poszczególnych serii danych i dyskusja zależności pomiędzy nimi, nie zaś porównywanie ich wartości.

Zebrane dane poddano analizie wizualnej – jest to metoda badania zbiorów danych z zastosowaniem ich wizualnej reprezentacji. Wizualizacja danych na wykresach pomaga identyfikować zależności i wzorce, a tym samym wyciągać prawidłowe wnioski.

Dla każdego z wytypowanych do badań punktów pomiarowych (gdzie reflektor znajdował się w pobliżu pary otworów pomiarowych) wykonano wykres wyników 4 niezależnych od siebie czasowych serii pomiarów (ryc. 5). Składają się na nie:

- ❑ średnie dobowe głębokości zwierciadła wód podziemnych, mierzone w otworze piezometrycznym;
- ❑ sumy dobowe opadów, mierzone w deszczomierzu zainstalowanym na terenie osuwiska lub w jego najbliższym sąsiedztwie;
- ❑ interferometryczne przemieszczenia reflektora, mierzone w kierunku LoS na bazie danych SAR konstelacji Sentinel-A/B;
- ❑ przemieszczenia w kierunku W-E reflektora, mierzone za pomocą odbiornika GNSS.

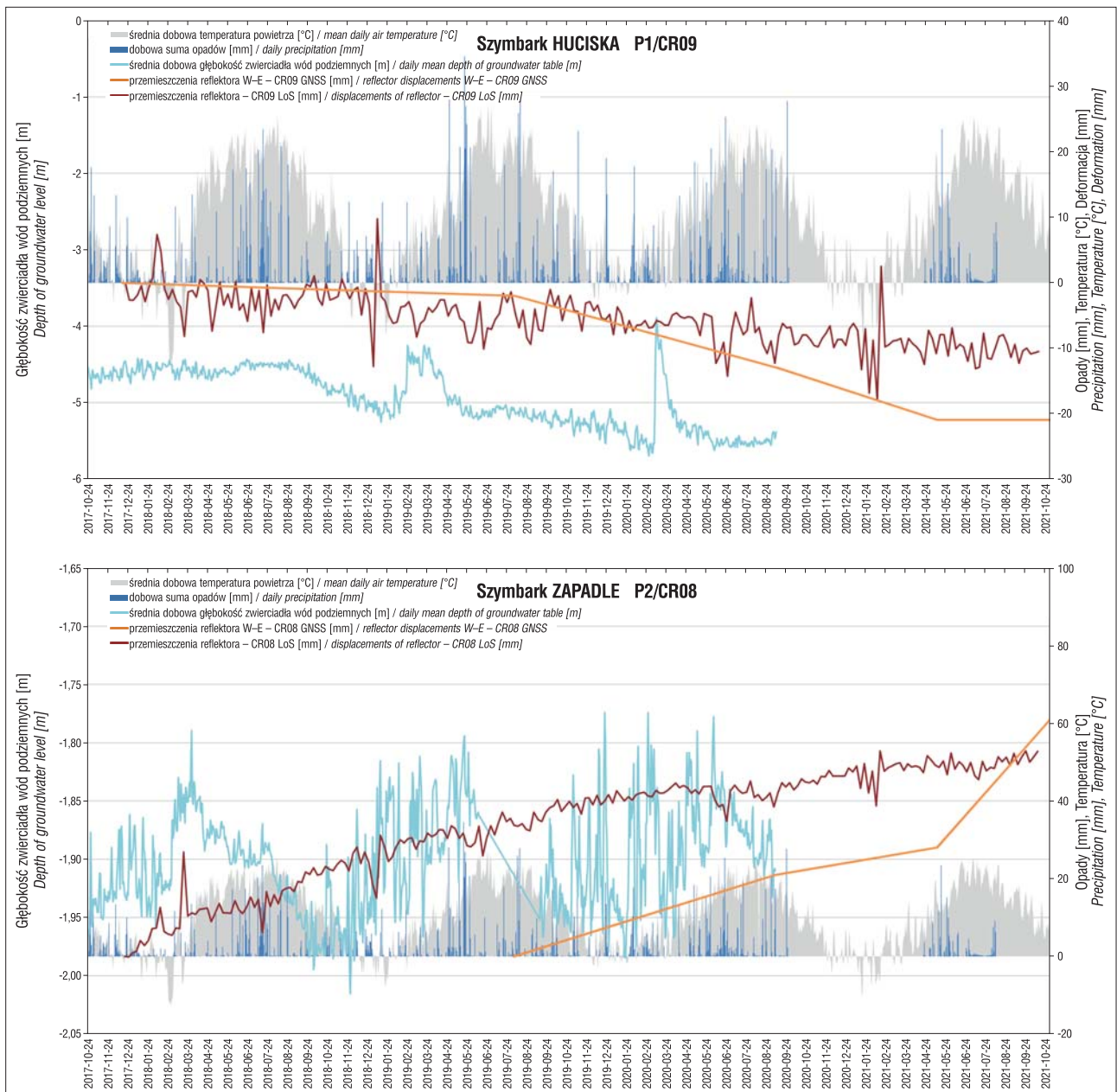
Dane te przedstawiono na tle średnich dobowych temperatur powietrza mierzonych w stacji meteorologicznej na lotnisku w Balicach (baza danych *Global Historical Climatology Network* – GHCN; Menne i in., 2012). Oczywiście dane temperaturowe nie są w pełni miarodajne, ze względu na znaczne oddalenie analizowanych osuwisk od stacji, dochodzące nawet do 100 km. Stanowią one jedynie tło i pomagają zrozumieć niektóre zależności. Dane GNSS były pozyskiwane sporadycznie, w około rocznych odstępach, więc nie mogą stanowić pełnowartościowego materiału analitycznego. Zamieszczono je jednak w celach poglądowych oraz jako zgrubną walidację danych InSAR.

#### WYNIKI I ICH INTERPRETACJA

Przyjęto założenie, że wszystkie analizowane serie danych są prawidłowe i nie zawierają błędów grubych (poza opisanymi w niniejszym artykule), a błędy przypadkowe zostały zminimalizowane, np. przez użycie wartości średnich dobowych. Poszczególne serie danych zawierają niekiedy luki, które powstały na skutek problemów technicznych z aparaturą, np. zatykania się deszczomierzy, lub przerw w zasilaniu urządzeń pomiarowych.

##### Szymbark Huciska

W czasowej serii danych InSAR można dostrzec pewną niestabilność (ryc. 5A), charakteryzującą się dużymi różnicami sąsiednich wartości. Analizując te różnice na tle zmian temperatury powietrza, można stwierdzić, że pojawiają się one w okresach zimowych, gdy panują ujemne temperatury. Niestabilność taka nie pojawiła się jednak zimą 2019 r., co można tłumaczyć relatywnie wyższymi temperaturami niż w 2018 i 2020 r. Latem 2019 r. nastąpiło niewielkie przyspieszenie przemieszczeń reflektora CR09, obserwowane



**Ryc. 5.** Wykresy serii danych (średniej dobowej głębokości zwierciadła wód podziemnych, mierzonej w otworze piezometrycznym; dobowych sum opadów; interferometrycznych przemieszczeń reflektorów, mierzonych w kierunku LoS na podstawie danych SAR konstelacji Sentinel-A/B; przemieszczeń w kierunku W-E reflektorów, mierzonych za pomocą odbiornika GNSS, na tle średnich dobowych temperatur powietrza) charakteryzujących: **A** – osuwisko Szymbark Huciska; **B** – osuwisko Szymbark Zapadle  
**Fig. 5.** Plots of data series (mean daily depth to groundwater table, measured in the piezometric borehole; daily precipitation totals; interferometric reflector displacements, measured in LoS direction based on SAR data of Sentinel-A/B constellation; displacements in W-E direction of reflectors, measured with a GNSS receiver, against mean daily air temperature) characterising: **A** – Szymbark Huciska landslide; **B** – Szymbark Zapadle landslide

na podstawie danych InSAR, które odzwierciedlało się również w danych GNSS. Przyspieszenie to można korelować ze spadkiem poziomu zwierciadła wód podziemnych, następującym od lata 2018 r. Jest to dosyć nieoczekiwane zjawisko, gdyż w dotychczas stosowanych modelach większe prędkości przemieszczeń gruntu wiązano z podnoszeniem się zwierciadła wód podziemnych (Warmuz, Nescieruk, 2019). Niestety, pod koniec lata 2020 r. piezometr uległ awarii i nie jest możliwe śledzenie dalszego przebiegu zmian zwierciadła wód podziemnych w tym miejscu. Stałe przemieszczenia reflektora z prędkością 10–20 mm/rok

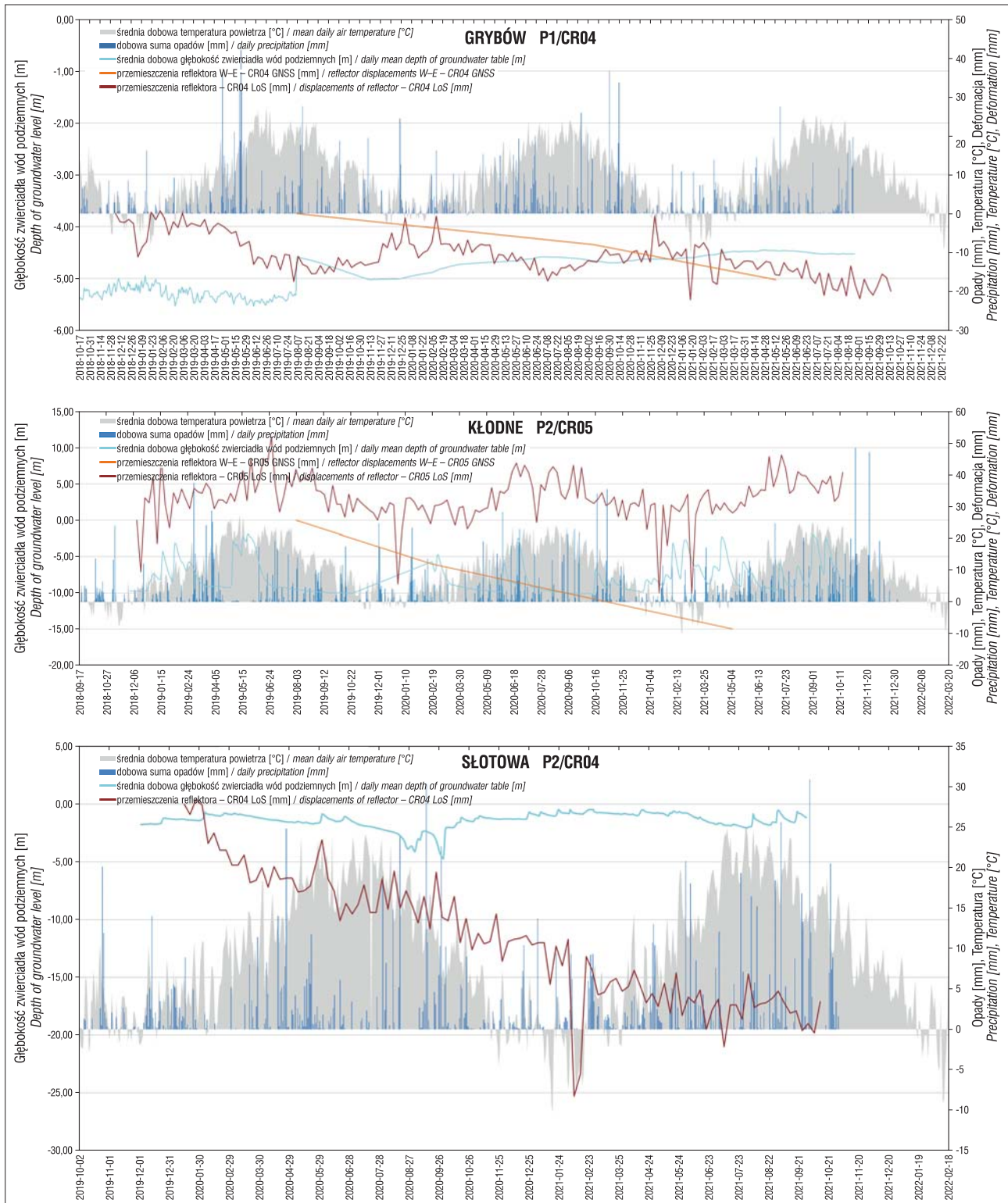
znajdują potwierdzenie w danych GNSS pochodzących z tego reflektora, jak i z sąsiednich reperów ziemnych.

### Szymbark Zapadle

W latach 2017–2021 reflektor CR08 podlegał stałym przemieszczeniom z prędkością ok. 30 mm/rok (ryc. 5B). Prędkość ta była nieco mniejsza niż od stycznia 2018 r. do lutego 2019 r. (Perski, 2019). Obserwowany wzrost tempa przemieszczeń wynika z przeciwległego zwrotu wektora przemieszczeń osuwiska. Podobnie jak na wykresie danych

z Szymbarku Hucisk można wyróżnić niestabilność przemieszczeń reflektora związaną z niskimi temperaturami w okresach zimowych. Wahania zwierciadła wód podziem-

nych są dużo większe niż w okolicy osuwiska w Szymbarku Huciskach, jednak bez wyraźnego trendu, z czego może wynikać w miarę stała średnia prędkość przemieszczeń.



**Ryc. 6.** Wykresy serii danych (średniej dobowej głębokości zwierciadła wód podziemnych, mierzonej w otworze piezometrycznym; dobowych sum opadów; interferometrycznych przemieszczeń reflektorów, mierzonych w kierunku LoS na podstawie danych SAR konstelacji Sentinel-A/B; przemieszczeń w kierunku W-E reflektorów, mierzonych za pomocą odbiornika GNSS, na tle średnich dobowych temperatur powietrza) charakteryzujących: **A** – osuwisko Grybów; **B** – osuwisko Kłodne; **C** – osuwisko Słotowa;  
**Fig. 6.** Plots of data series (mean daily depth to groundwater table, measured in the piezometric borehole; daily precipitation totals; interferometric reflector displacements, measured in LoS direction based on SAR data of Sentinel-A/B constellation; displacements in W-E direction of reflectors, measured with a GNSS receiver, against mean daily air temperature) characterising: **A** – Grybów landslide; **B** – Kłodne landslide; **C** – Słotowa landslide



## Grybów

Reflektor CR04 podlegał niewielkim przemieszczeniom z prędkością ok. 20 mm/rok (ryc. 6A). Na wykresie zmian poziomu zwierciadła wód podziemnych w piezometrze P2 wyraźnie zaznacza się wymiana urządzenia, której dokonano 08.08.2019 r. Od tego dnia rejestrowano znacznie mniejsze dobowe wahania poziomu wód podziemnych, wynikające ze specyfiki piezometru nowszej generacji. Mimo tego w całym analizowanym okresie można wyraźnie dostrzec sinusoidalną, sezonową zmienność poziomu wód podziemnych, która znajduje odzwierciedlenie w wahaniami prędkości przemieszczeń reflektora, o podobnej, sinusoidalnej charakterystyce, lecz z ok. 4-miesięcznym opóźnieniem. Przemieszczenia reflektora CR04 w Grybowie również wskazywały na związek niestabilności z ujemnymi temperaturami.

## Kłodne

Wykres przemieszczeń reflektora CR05 jest sinusoidalny i niemal idealnie skorelowany z sezonowymi zmianami temperatur powietrza (ryc. 6B). Odnotowano bardzo gwałtowne zmiany poziomu zwierciadła wód podziemnych, będące skutkiem silnego spękania piaskowców występujących w podłożu osuwiska. Są to nagłe wzrosty poziomu wód gruntowych tuż po intensywnych opadach, po których następują nieco wolniejsze spadki – do poziomu ok. 10 m p.p.t., czyli średniego w wieloletniu. Na wykresie nie widać korelacji pomiędzy zmianami położenia zwierciadła wód podziemnych a przemieszczeniami reflektora. Zaznacza się na nim natomiast, tak jak w pozostałych przypadkach, charakterystyczna niestabilność reflektorów w okresach ujemnych temperatur powietrza. Reflektor CR05, również w świetle wyników pomiarów GNSS, poza opisanymi przemieszczeniami sezonowymi i termicznymi nie ulegał innym ruchom.

## Słotowa

Osuwisko to najpóźniej wyposażono w reflektor, dlatego seria danych z jego obserwacji jest najkrótsza i obejmuje jedynie dwa lata (ryc. 6C). Dane piezometryczne charakteryzuje wysoki i stosunkowo stały poziom wód gruntowych z relatywnie dużym (ok. 2 m) spadkiem ich zwierciadła w lecie 2020 r. Zmiany położenia zwierciadła wód gruntowych prawie nie odzwierciedlają się w dużych i w miarę stałych prędkościach przemieszczeń reflektora (ok. 10 mm/rok). Podobnie jak na innych wykresach zaobserwowano niestabilność reflektorów związaną z ujemnymi temperaturami w lutym 2021 r. Brak związku deformacji osuwiskowych ze zmianami zwierciadła wód gruntowych można tłumaczyć budową geologiczną koluwiów – tzn. występowaniem pokryw lessowych na gliniastym podłożu – która sprzyja osuwaniu się gruntu niezależnie od nawodnienia.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wyniki wstępnych analiz potwierdziły wpływ wahań zwierciadła wód podziemnych, nawet stosunkowo niewielkich, na zmiany prędkości przemieszczania powierzchni osuwiska. Związek ten jest silnie uwarunkowany budową geologiczną. Jeśli zależność taka występuje, wysoka roz-

dzielczość czasowa danych CRInSAR umożliwia określenie, po jakim czasie powierzchnia terenu reaguje na zmiany hydrogeologiczne. Dalsze, wnikliwe analizy ilościowe powinny doprowadzić do wyznaczenia dokładnych interwałów takich reakcji i ich związków z budową geologiczną. Uzyskane dotychczas wyniki zachęcają do kontynuowania tego typu analiz, zwłaszcza że wydłużające się okresy obserwacji dają nadzieję na odkrycie kolejnych, interesujących zależności.

Dotychczasowe, kilkuletnie doświadczenia z wykorzystywania reflektorów radarowych do satelitarnych pomiarów przemieszczeń gruntu na powierzchni osuwisk pozwalają stwierdzić, że urządzenia te dobrze sprawdzają się na niezalesionych obszarach i w szczególnych przypadkach korzystnej orientacji kierunku ruchu osuwiskowego w stosunku do kierunku przelotów satelitów. Reflektory skorelowane z innymi urządzeniami monitoringu osuwisk są natomiast świetnymi narzędziami wspomagającymi tworzenie modeli, które pozwalają zrozumieć i ująć ilościowo zagrożenia wynikające z ruchu osuwisk w odniesieniu do budowy geologicznej danego terenu czy progów opadowych. Metoda ta rokuje możliwość określenia stanu aktywności osuwisk, przez co może znaleźć zastosowanie w ich monitoringu. Dotyczy to przede wszystkim osuwisk bardzo powolnych, o przejawach deformacji, które są niewidoczne dla ludzkiego oka i których mogą nie wykrywać inne, mniej czułe urządzenia pomiarowe. Implementacja takiego rozwiązania może się przyczynić do ograniczenia zagrożeń osuwiskowych.

Składamy podziękowania Recenzentom za poświęcony czas oraz cenne uwagi dotyczące artykułu.

## LITERATURA

- BAMLER R., HARTL P. 1998 – Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems*, 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 Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40 (11): 2375–2383.
- BOVENGA F., WASOWSKI J., NITTI D.O., NUTRICATO R., CHIARADIA M.T. 2012 – Using COSMO/SkyMed X-band and ENVISAT C-band SAR interferometry for landslides analysis. *Remote Sensing of Environment*, 119: 272–285.
- BÜRGMANN R., ROSEN P.A., FIELDING E.J. 2000 – Synthetic Aperture Radar interferometry to measure Earth's surface topography and its deformation. *Ann. Rev. of Earth and Planetary Sciences*, 28: 169–209.
- COLESANTI C., WASOWSKI J. 2006 – Investigating landslides with space-borne Synthetic Aperture Radar (SAR) interferometry. *Engineering Geol.*, 88 (3–4): 173–199.
- CROSETTO M., MONSERRAT O., CUEVAS-GONZÁLEZ M., DEVANTHÉRY N., CRIPPA B. 2016 – Persistent Scatterer Interferometry: A review. *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 115: 78–89.
- DE ZAN F., GUARNIERI A.M., ROCCA F. 2008 – Advances in SAR interferometry for sentinel-1 with TOPSIn. 2008 IEEE Radar Conference; <https://doi.org/10.1109/RADAR.2008.4720871>
- FERRETTI A., PRATI C., ROCCA F. 1999 – Permanent scatterers in SAR Interferometry. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 39: 8–20.
- FIALKO Y., SIMONS M., AGNEW D. 2001 – The complete (3-D) surface displacement field in the epicentral area of the 1999 Mw 7.1 Hector Mine earthquake, California, from space geodetic observations. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (16): 3063–3066.
- FROESE C., PONCOS V., SKIRROW R., MANSOUR M., MARTIN D. 2008 – Characterizing complex deep seated landslide deformation using Corner Reflector InSAR (CR-InSAR). Little Smoky Landslide, Alberta.
- FRUNEAU B., ACHACHE J., DELACOURT C. 1996 – Observation and modelling of the Saint-Étienne – de-Tinée landslide using SAR interferometry. *Tectonophysics*, 265 (3–4): 181–190.
- GARTHWAITE M.C., LAWRIE S., DAWSON J., THANKAPPAN M. 2015 – Corner reflectors as the tie between InSAR and GNSS measure-

- ments: Case study of resource extraction in Australia. European Space Agency Sp. Publ. 731 (1).
- GOLDSTEIN R.M., ZEBKER H.A., WERNER C.L. 1988 – Satellite radar interferometry: Two-dimensional phase unwrapping. *Radio Sci.*, 23 (4): 713–720.
- GUARNIERI A.M., PARIZZI F., PRATI C., ROCCA F. 1993 – SAR Interferometry Experiments with ERS-1. *Proceedings of IGARSS '93 – IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*: 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., ZEBKER H., SEGALL P., KAMPES B. 2004 – A new method for measuring deformation on volcanoes and other non-urban areas using InSAR persistent scatterers. *Geophys. Res. Lett.*, 31: L23611, doi:10.1029/2004GL021737
- HOOPER A., BEKAERT D., SPAANS K., ARIKAN M. 2012 – Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*, 514–517: 1–13.
- KETELAAR V.B.H. 2008 – Monitoring surface deformation induced by hydrocarbon production using satellite radar interferometry Delft, the Netherlands. Delft University of Technology.
- KOS J., WÓJCIK A. 2022a – Karta rejestracyjna osuwiska (numer ewidencyjny 18-03-065-071897) w miejscowości Słotowa; <http://mapa.osuwiska.pgi.gov.pl>
- KOS J., WÓJCIK A. 2022b – Karta rejestracyjna osuwiska (numer ewidencyjny 12-05-042-000145) w miejscowości Szymbark-Huciska; <http://mapa.osuwiska.pgi.gov.pl>
- KOS J., WÓJCIK A. 2022c – Karta rejestracyjna osuwiska (numer ewidencyjny 12-05-042-000141) w miejscowości Szymbark-Zapadle; <http://mapa.osuwiska.pgi.gov.pl>
- KOS J., WÓJCIK A. 2022d – Karta rejestracyjna osuwiska (numer ewidencyjny 12-07-072-014555) w miejscowości Kłodne; <http://mapa.osuwiska.pgi.gov.pl>
- KOS J., WÓJCIK A. 2022e – Karta rejestracyjna osuwiska (numer ewidencyjny 12-10-011-016892) w miejscowości Grybów; <http://mapa.osuwiska.pgi.gov.pl>
- MARCINIEC P., ZIMNAL Z., PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., RĄCZKOWSKI W., LASKOWICZ I., NESCIERUK P., GRABOWSKI D., KUŁAK M., WÓJCIK A. 2019 – Osuwiska w Polsce – od rejestracji do prognozy, czyli 13 lat projektu SOPO. *Prz. Geol.*, 67 (5): 291–297.
- MARINKOVIC P., KETELAAR G., LEIJEN F. VAN, HANSEN R. 2008 – InSAR Quality Control: Analysis of Five Years of Corner Reflector Time Series. [W:] *Proc. of FRINGE 2007 Workshop*, Frascati, Italy, 26–30 November 2007. *ESA SP-649*, February 2008.
- MASSONNET D., FEIGL K.L. 1998 – Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface. *Rev. Geophys.*, 36 (4): 441–500.
- MENNE M.J., DURRE I., VOSE R.S., GLEASON B.E., HOUSTON T.G. 2012 – An Overview of the Global Historical Climatology Network-Daily Database. *J. Atmospheric and Oceanic Technol.*, 29 (7): 897–910.
- NESCIERUK P., PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., WARMUZ B., KOWALSKI Z., KOWALSKI K., KARWACKI K., DACKA J. 2016 – Raport z prac monitoringowych przeprowadzonych w roku 2017 na osuwisku Grybów; <http://mapa.osuwiska.pgi.gov.pl>
- NESCIERUK P., PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., WARMUZ B., KOWALSKI Z., KOWALSKI K., KARWACKI K., DACKA J. 2017a – Raport z prac monitoringowych przeprowadzonych w roku 2017 na osuwisku Szymbark Zapadle; <http://mapa.osuwiska.pgi.gov.pl>
- NESCIERUK P., PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., WARMUZ B., KOWALSKI Z., KOWALSKI K., KARWACKI K., DACKA J. 2017b – Raport z prac monitoringowych przeprowadzonych w roku 2017 na osuwisku Szymbark Huciska; <http://mapa.osuwiska.pgi.gov.pl>
- NESCIERUK P., PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., WARMUZ B., KOWALSKI Z., KOWALSKI K., KARWACKI K., DACKA J. 2021a – Raport z prac monitoringowych przeprowadzonych w roku 2017 na osuwisku Szymbark Zapadle; <http://mapa.osuwiska.pgi.gov.pl>
- NESCIERUK P., PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., WARMUZ B., KOWALSKI Z., KOWALSKI K., KARWACKI K., DACKA J. 2021b – Raport z prac monitoringowych przeprowadzonych w roku 2017 na osuwisku Szymbark Huciska; <http://mapa.osuwiska.pgi.gov.pl>
- NESCIERUK P., PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., WARMUZ B., KOWALSKI Z., KOWALSKI K., KARWACKI K., DACKA J. 2021c – Raport z prac monitoringowych przeprowadzonych w roku 2017 na osuwisku Kłodne; <http://mapa.osuwiska.pgi.gov.pl>
- NESCIERUK P., PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., WARMUZ B., KOWALSKI Z., KOWALSKI K., KARWACKI K., DACKA J. 2021d – Raport z prac monitoringowych przeprowadzonych w roku 2017 na osuwisku Słotowa; <http://mapa.osuwiska.pgi.gov.pl>
- PERISSIN D. 2010 – SAR super-resolution and characterization of urban targets Italy. *VDM Verlag Dr. Müller*.
- PERSKI Z. 1999 – Osiedlenie terenu GZW pod wpływem eksploatacji podziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). *Prz. Geol.*, 2: 171–174.
- PERSKI Z. 2019 – Zaawansowane techniki InSAR w monitorowaniu osuwisk. *Prz. Geol.*, 67 (5): 351–359; <https://doi.org/10.7306/2019.29>
- PERSKI Z., KETELAAR V.B.H., MRÓZ M. 2006 – Interpretacja danych ENVISAT/ASAR o przemiennej polaryzacji na obszarach zurbanizowanych w kontekście charakterystyki stabilnych rozpraszaczy (Persistent Scatterers). *Arch. Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 16: 467–482.
- PERSKI Z., WARMUZ B., LASKOWICZ I., WÓDKA M., MROZEK T., MALATA T., KRAWCZYK M., CHOWANIEC-TOBIASZ K., MI-CHALSKI A. 2018 – Monitoring osiadania powierzchni terenu w 3 wybranych lokalizacjach poszukiwań gazu w formacjach łupkowych – projekt pilotażowy. *Państw. Inst. Geol.-PIB*; [https://www.pgi.gov.pl/images/geozagrozenia/interferometria/wyniki\\_lupki/gaz\\_upkowy\\_oprac\\_nauk\\_bad.pdf](https://www.pgi.gov.pl/images/geozagrozenia/interferometria/wyniki_lupki/gaz_upkowy_oprac_nauk_bad.pdf)
- QIN Y., PERISSIN D., LEI L. 2013 – The Design and Experiments on Corner Reflectors for Urban Ground Deformation Monitoring in Hong Kong. *Intern. J. Antennas and Propagation*; <https://doi.org/10.1155/2013/191685>
- REFICE A., BOVENGA F., GUERRIERO L., WASOWSKI J., INTER-ATENEO D., AMENDOLA V. 2001 – DInSAR applications to landslide studies. *IGARSS 2001. Scanning the Present and Resolving the Future. Proceedings. IEEE 2001 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2 (2): 3–5.
- ROSEN P., HENSLEY S., JOUGHIN I.R., LI F.K., MADSEN S., RODRÍGUEZ E., GOLDSTEIN R. 2000 – Synthetic Aperture Radar Interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88 (3): 333–382.
- 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 Sensing of Environment*, 147: 133–144.
- TORRES R., SNOEIJ P., DAVIDSON M., BIBBY D., LOKAS S. 2012 – The Sentinel-1 mission and its application capabilities. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2012: 1703–1706; <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2012.6351196>
- WARMUZ B., NESCIERUK P. 2019 – Dynamika przemieszczeń wybranych osuwisk w Karpatach. *Prz. Geol.*, 67 (5): 326–331.
- WOJCIECHOWSKI T., PERSKI Z., WÓJCIK A. 2008 – Wykorzystanie satelitarnej interferometrii radarowej do badań osuwisk w polskiej części Karpat. *Prz. Geol.*, 56 (12): 1087–1091.
- WOJCIECHOWSKI T., LASKOWICZ I., NESCIERUK P., UŚCINOWICZ G., CZERWIŃSKI T., PERSKI Z. 2021 – Zagrożenia geologiczne w Polsce w 2020 roku. *Prz. Geol.*, 69 (5): 303–311.
- WÓJCIK A., PERSKI Z., BORKOWSKI A., WOJCIECHOWSKI T. 2011 – Zastosowanie danych teledetekcji lotniczej i satelitarnej do badania dynamiki czynnych osuwisk w 2010 r. na przykładzie osuwiska w Kłodnem koło Limanowej. *Polski Kongres Drogowy*, 30.03–01.04.2011 r., Zakopane: 111–120.
- WRIGHT T.J., PARSONS B.E., LU Z. 2004 – Toward mapping surface deformation in three dimensions using InSAR. *Geophys. Res. Lett.*, 31: 5; <https://doi.org/200410.1029/2003GL018827>
- XIA Y., KAUFMANN H., GUO X. 2002 – Differential SAR interferometry using corner reflectors. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2: 1243–1246; <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1025902>

Praca wpłynęła do redakcji 1.07.2022 r.  
Akceptowano do druku 9.08.2022 r.