



Elżbieta PILECKA*

Teledetekcja jako metoda analizy ruchów masowych

Streszczenie: W artykule omówione zostały możliwości zastosowania teledetekcji do badania ruchów masowych. Przeprowadzono analizę wykorzystania teledetekcji satelitarnej, lotniczej i naziemnego skanera laserowego do skanowania terenów osuwiskowych. Omówiono zagrożenie ruchami osuwiskowymi na terenie Polski. Przedstawiono przykłady zniszczeń spowodowanych osuwiskami w budynkach i infrastrukturze komunikacyjnej. Szkody takie powstają szczególnie po obfitych opadach deszczu, bowiem woda jest jednym z głównych czynników aktywujących ruch osuwiskowy. W artykule przedstawiono schemat tworzenia się osuwiska i czynniki wpływające na jego uaktywnienie. Porównano zalety i ograniczenia każdego z poziomów teledetekcji: satelitarnej, lotniczej i naziemnej. Do monitorowania powierzchniowego osuwisk wybrano metodę naziemnego skanowania jako najbardziej odpowiednią w zakresie rozdzielczości przestrzennej i czasowej. Obraz otrzymany tą metodą to trójwymiarowy model składający się z milionów pojedynczych punktów. Chmura punktów stanowi pewnego rodzaju dokumentację przestrzenną, do której możemy w każdej chwili wrócić, aby wykonać dodatkowe pomiary, analizy lub odtworzyć stan z dnia wykonania skanu. Ruchy masowe można śledzić na podstawie modelu różnicowego konstruowanego na podstawie dwóch lub więcej przestrzennych modeli.

Słowa kluczowe: teledetekcja, ruchy masowe

Remote sensing as the method for analysis of mass movements

Abstract: The paper describes the applicability of remote sensing to the study of mass movements. An analysis of the use of satellite remote sensing, aerospace and terrestrial laser scanner to scan the landslide areas was carried out. Risk of landslide movements on the area of Poland was characterized. The examples of the devastation in buildings and transport infrastructure caused by landslides were presented. Such damage would occur especially after heavy rains, as water is one of the main factors activating mass movements. This paper presents the scheme to create a landslide movement and factors affecting its activation. The advantages and limitations of each level remote sensing: satellite, aerospace and terrestrial laser scanner were presented. For monitoring of the landslide surface scanning method was selected as the terrestrial laser scanner for the most appropriate spatial and time resolution. Image by this method was a three-dimensional model consisting of millions of individual points. Cloud of points is a kind of spatial documentation to which we can

* Dr hab. inż., Zakład Geoinżynierii i Inżynierii Środowiska, Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków; e-mail: pilecka@min-pan.krakow.pl

return at any time to perform additional measurements, analysis, or restore the status of the implementation of the scan. Mass movements can be tracked on the basis of the constructed differential model based on two or more spatial models.

Key words: Remote Sensing, mass movements

Wprowadzenie

Celem artykułu jest przedstawienie teledetekcji jako metody analizy ruchów masowych. Porównano metodę teledetekcji naziemnej z wersjami teledetekcji na innych poziomach: satelitarnym i lotniczym. Omówiono przyczyny i zagrożenie osuwiskami oraz podano przykłady literaturowe zastosowań teledetekcji do monitorowania deformacji. Przeprowadzono także analizę ograniczeń tej metody.

Teledetekcja (ang. *remote sensing*) to rodzaj badań wykonywanych z pewnej odległości (zdalnie, bezdotykowo) przy wykorzystaniu specjalistycznych sensorów (czujników). Badania teledetekcyjne można wykonywać z przestrzeni kosmicznej, samolotów lub z powierzchni terenu (Perski, Wojciechowski, Wójcik 2012). Metody teledetekcyjne dzielą się na aktywne i pasywne. W aktywnej teledetekcji sygnał jest wysłany z instrumentu, a po odbiciu od obiektu, odbierany i analizowany. Przykładami aktywnej teledetekcji jest aktywny radar, w którym wysyłane są mikrofały, lidar – w tym przypadku wysyłane jest światło, czy sodar lub sonar – wtedy wysyłane są fale akustyczne. Pasywnymi metodami teledetekcji są metody oparte na analizie sygnałów emitowanych przez obserwowany obiekt. Zdjęcie fotograficzne jest przykładem teledetekcji pasywnej.

Techniki teledetekcyjne używają tzw. metod odwrotnych do oceny interesujących właściwości. Metody odwrotne polegają na oszacowaniu właściwości obiektu po cechach zarejestrowanego obrazu. Zadanie to jest znacznie trudniejsze do rozwiązania niż zadanie proste, które polega na pomiarzeniu cech znanego obiektu. Pomyślność rozwiązania zagadnienia odwrotnego zależy od informacji, jakie posiadamy na temat założeń dotyczących naszego modelu.

Zarejestrowany obraz musi być zinterpretowany z punktu widzenia jego treści merytorycznej.

1. Teledetekcja

1.1. Teledetekcja satelitarna.

Teledetekcja jest metodą, która umożliwia monitorowanie ruchów powierzchni terenu. Aktualnie deformacje powierzchni terenu monitoruje się poprzez sensory umieszczone w satelitach, samolotach i technikę skanowania naziemnego.

W teledetekcji satelitarnej do monitorowania ruchów powierzchni terenu najczęściej używane są zakresy fal radarowych, niemniej jednak w zakresie pasma widzialnego można także prowadzić obserwację zmian powierzchni terenu po uaktywnieniu się ruchów masowych. W zakresie pasma widzialnego rejestrowane są wizualne zmiany powierzchni

terenu, np. pojawienie się rumoszu skalnego. Teledetekcja może być także pomocna w lokalizacji stref nieciągłości na obszarach górniczych (Pilecka i in. 2006). Metodami teledetekcji satelitarnej pasywnej można dokonać pomiarów natężenia wiązki fali odbitej, pomiarów i przetwarzań wiązki fali w zakresie widma termalnego czy podczerwieni dla lokalizacji źródeł ciepła (np. czynne strefy tektoniczne, złoża mineralne). Teledetekcja aktywna natomiast pozwala na rejestrację odległości, jaką przebywa wysłana z satelity wiązka promieni elektromagnetycznych; otwiera to nowe możliwości dla precyzyjnych pomiarów. Przykładowo można rejestrować milimetrowe zmiany przy osiadaniu terenu (Graniczny i in. 2006; Piątkowska, Graniczny 2006). Dane teledetekcyjne dostarczają coraz dokładniejszych i bardziej wszechstronnych informacji o zjawiskach zachodzących w środowisku naturalnym Ziemi. Szczególnie przydatne są dla rejonów trudno dostępnych, ale również i silnie zurbanizowanych z uzupełnieniem o informacje z pomiarów powierzchniowych.

W ostatnich latach zwiększył się udział satelitów pracujących w technologii radarowej w stosunku do dotychczas przeważających ilościowo satelitów optycznych. Najnowsze satelity wykorzystujące system radarowy to niemieckie satelity TerraSAR-X/TanDEM-X, wysoko rozdzielcze satelity COSMO-SKYMED i SENTINEL-1 (wystąpienie planowane na 2013 r.). Upowszechnianie się technologii radarowej umożliwiającej pozyskiwanie obrazów niezależnie od zachmurzenia ma istotne znaczenie dla polskiego użytkownika ze względu na warunki pogodowe, które często ograniczają dostępność obrazów optycznych. Obróbka obrazów wykonanych w paśmie mikrofalowym wymaga bardziej zaawansowanych technik przetwarzania niż tych wykonanych w paśmie optycznym i potrzeba bardziej zaawansowanego oprogramowania dostarczanego aktualnie przez nielicznych dostawców w skali światowej.

W Polsce zostały przeprowadzone badania przydatności metody interferometrii radarowej InSAR na obszarze środkowej części polskich Karpat. Na rysunku 1 pokazano przykład analizy przemieszczeń osuwiska w Kłodnem w czasie katastrofalnych osunięć w 2010 roku (Perski, Wojciechowski, Wójcik 2012).

Wstępnie przeanalizowano także przydatność metody PS InSAR na obszarze okolic Wieliczki i Nowego Sącza (Perski, Wojciechowski, Wójcik 2012). Uzyskane dotychczas wyniki badań, polegających na wykazaniu przydatności satelitarnej interferometrii radarowej w analizach osuwisk, pokazały trudności metody InSAR związane z koherencją oraz z geometrii systemu satelitarnego danych SAR. Zastosowanie metody PSInSAR dla obszarów badawczych dało satysfakcjonujące rezultaty (Wojciechowski, Perski, Wójcik 2008). Uzyskano dane o kilkudziesięciu stabilnych rozpraszaczach. Obszar Wieliczki poddano szczegółowym analizom, z których wynika, że 44 punkty PS (*Permanent Scatterer*) wykazują aktywność, a 27 z nich występuje na terenie osuwisk. Najwięcej takich obiektów rozpoznano w obrębie osuwisk w Lednicy Górnej i Chorągwicy, które są zaliczane do aktywnych. Prędkości zsuwu, osiągające 74,8 mm/rok, udało się określić dla 11 punktów PS w obszarze Wieliczka (rys. 2). Uzyskane wyniki pozwalają z optymizmem patrzeć na dalszy rozwój metodyki PSInSAR w badaniu osuwisk.

Zastosowanie teledetekcji satelitarnej do monitoringu terenów górniczych i jednocześnie objętych ruchami masowymi przedstawiono w artykule J. Wąsowski, F. Bovrnga, R. Nutricato, D. Conte, A. Refice, M. Graniczny i Z. Kowalski (2009). Do badań testowych wybrano obszar Wieliczki jako jedno z testowych miejsc projektu ALOS ADEN 3595,

którego głównym celem jest zastosowanie zintegrowanych metod (teledetekcyjnych oraz *in situ*) do wyznaczania rejonów potencjalnych geozagrożeń oraz monitoringu osiadań i powierzchniowych ruchów masowych. Badania przeprowadzono metodą PSInSAR. Analiza danych wykazała ciągłe osiadanie o wartości 1–2 cm/rok, zaobserwowane w latach 1992–2000. Szerokość strefy podlegającej osiadaniu wyraźnie odpowiada zasięgowi podziemnej kopalni soli, natomiast jej długość (4,5 km) jest nieco krótsza od zasięgu prac górniczych i granicy rozpoznanych złóż soli. Maksymalne osiadania stwierdzono w zachodniej części miasta (do 2,4 cm/rok), gdzie przestrzenne rozmieszczenie radarowych punktów pomiarowych wskazuje na obecność owalnej niecki osiadań o długości około 2,5 km. Ważnym wynikiem analizy interferometrycznej jest zaobserwowanie prawdopodobnego związku pomiędzy osiadaniem wywołanym działalnością górniczą a dużymi osuwiskami. Aby jednoznacznie stwierdzić taki związek, należy jednak przeprowadzić szczegółowe badania i pomiary terenowe.

1.2. Laserowa teledetekcja lotnicza

Monitorowanie osuwisk można wesprzeć metodą teledetekcyjną laserowego skanowania lotniczego zwaną LIDAR (*Light Detection and Ranging*), wykorzystującą najnowszy skaner LiteMapper 6800i, przenoszony na pokładzie lekkiego samolotu Cessna. Zasada skaningu laserowego oparta jest na wyznaczeniu odległości od skanera na pokładzie samolotu do badanej powierzchni, poprzez pomiar czasu pomiędzy wysłaniem a odbiorem impulsu laserowego. Impuls laserowy dzięki właściwości przenikania przez pokrywę roślinną potrafi zarejestrować informacje o rzeczywistym ukształtowaniu terenu. Jest to bardzo cenna dla geologów cecha, zwłaszcza w górach, gdzie pokrywa lasów często maskuje drobne zmiany rzeźby terenu. Możliwe jest prawie natychmiastowe sformułowanie prognozy rozwoju osuwiska i określenie stopnia zagrożenia. Metoda laserowego skanowania lotniczego osuwisk (rzadko stosowana głównie ze względu na wysokie koszty), okazała się niezwykle przydatna w sytuacji awaryjnej i umożliwiła sformułowanie szybkiej i dokładnej prognozy rozwoju zjawiska. W artykule Wojciechowski i in. (2012) opisali metodykę i wyniki dynamiki osuwiska w Zbyszycach, które w 2010 roku wyrządziło duże straty na drodze nr 975 w rejonie Jeziora Rożnowskiego. Na rysunku 3 przedstawiono wyniki tych prac. Metoda LIDAR pozwala na szybkie pomiary i podjęcie szybkich działań naprawczych we właściwych miejscach osuwiska.

Wykorzystanie lotniczego skaningu do inwentaryzacji i monitoringu osuwiska w rejonie Łańnicy (gmina Lanckorona) przedstawiono w artykule M. Granicznego, M. Kamińskiego, A. Piątkowskiej i A. Surały (2012). Zastosowana technika lotniczego skaningu laserowego dla terenu osuwiska w rejonie Łańnicy obejmowała wykonanie Numerycznego Modelu Terenu (NMT), Numerycznego Modelu Pokrycia Terenu (NMPT) na bazie chmury punktów. Wykonana została również ortofotomapa przy użyciu kamery cyfrowej digi CAM. Metoda LIDAR pozwala na szybką inwentaryzację osuwisk i monitoringu ruchów oraz podjęcie szybkich działań naprawczych we właściwych miejscach osuwiska.

1.3. Teledetekcja naziemna

Teledetekcja naziemna realizowana jest poprzez naziemne skanery 3D. Proces skanowania laserowego polega na automatycznym pomiarze obiektów lub terenu, charakteryzujący się bardzo wysoką częstotliwością próbkowania – pomiaru przestrzennego (3D) – rzędu dziesiątek, a nawet setek tysięcy punktów na sekundę w czasie rzeczywistym (Lisowski i in. 2010). W wyniku pomiaru otrzymujemy quasi-ciągłe odwzorowanie otaczającej przestrzeni reprezentowanej przez punkty, z których każdy ma określone współrzędne x , y , z i jest dodatkowo wzbogacony o intensywność, która jest parametrem (w formie barwnej) powstałym w wyniku różnej siły (intensywności) odbicia sygnału pomiarowego od skanowanej powierzchni (uzależnionym od rodzaju, koloru, chropowatości dobijającego materiału). W przypadku zastosowania dodatkowo kamery lub aparatu cyfrowego można rejestrować składowe RGB mierzonych obiektów – nanosząc je w procesie kameralnej obróbki na pomierzone punkty i tworząc dodatkowe barwne tekstury, wiernie odwzorowujące rzeczywiste kolory obiektu.

Zbiór powstałych w wyniku skanowania punktów nazywamy chmurą punktów, których liczba może dochodzić do wielu milionów, tworząc już na wstępie wizualizację mierzonych obiektów. Chmura punktów stanowi pewnego rodzaju dokumentację przestrzenną, do której możemy w każdej chwili wrócić, aby wykonać dodatkowe pomiary, analizy lub odtworzyć stan z dnia wykonania skanu.

Dokładność pomiarów wykonywanych przez skanery laserowe zależy – podobnie jak w tachimetrach elektronicznych – przede wszystkim od dokładności pomiaru odległości i dokładności wyznaczania kątów. Na jakość otrzymanych wyników składają się także inne czynniki, takie jak zdolność powierzchni do odbijania wiązki lasera, a także wpływ warunków atmosferycznych, takich jak np. „oślepienie” skanera mocnym światłem słonecznym, niska temperatura, gęsta mgła, czy opady deszczu. Wszystkie te utrudnienia w skrajnych przypadkach mogą całkowicie uniemożliwić wykonanie pomiarów lub odsunąć je w czasie. Wpływ na jakość finalnego produktu ma również zakładana i wyrównywana osnowa w postaci punktów kontrolnych (odniesienia) oraz w bardzo dużej mierze proces łączenia ze sobą chmur punktów z różnych stanowisk pomiarowych – zwany rejestracją skanów.

Ważnym parametrem skanerów jest zdolność rozdzielcza (minimalna odległość między mierzonymi punktami) oraz wielkość plamki, której średnica rośnie wraz z odległością (w wyniku rozbieżnego charakteru wiązki promienia laserowego). Najnowsze instrumenty impulsowe mają zdolność rozdzielczą na poziomie około 1 mm. Rozdzielczość czasowa w przypadku naziemnych skanerów laserowych zależy od zadania i jest dobierana przez użytkownika.

Pierwsze próby zastosowania tej technologii na osuwisku na klifie w Jastrzębiej Górze wykonywał Państwowy Instytut Geologiczny – Instytut Badawczy z bardzo dobrym rezultatem. Badania przeprowadzone skanerem laserowym wykazały maksymalne przesunięcia rzędu 0,5 m; maksymalne przesunięcie czoła osuwiska wyniosło 8 m, a jego wysokość osiągnęła maksymalnie 2 m (rys. 4).

W literaturze światowej zastosowanie naziemnego skanera laserowego do monitorowania osuwisk jest szeroko opisywane zarówno do monitorowania typowych skarp i zboczy, jak i do zboczy zagrożonych kombinacją ruchów masowych np. zsuwu i obrywów skalnych. Skanowanie laserowe jest możliwe w miejscach niedostępnych. W artykule J. Kaspersky i in.

(2010) pokazali możliwości zastosowania skaningu laserowego do monitoringu aktywnego osuwiska Séchillienne we francuskich Alpach. Osuwisko to stanowi zagrożenie dla ludzi i dla drogi RD1091. Monitoring objął lata 2004–2007, a wyniki pokazano na rysunku 5.

2. Zagrożenia spowodowane osuwiskami

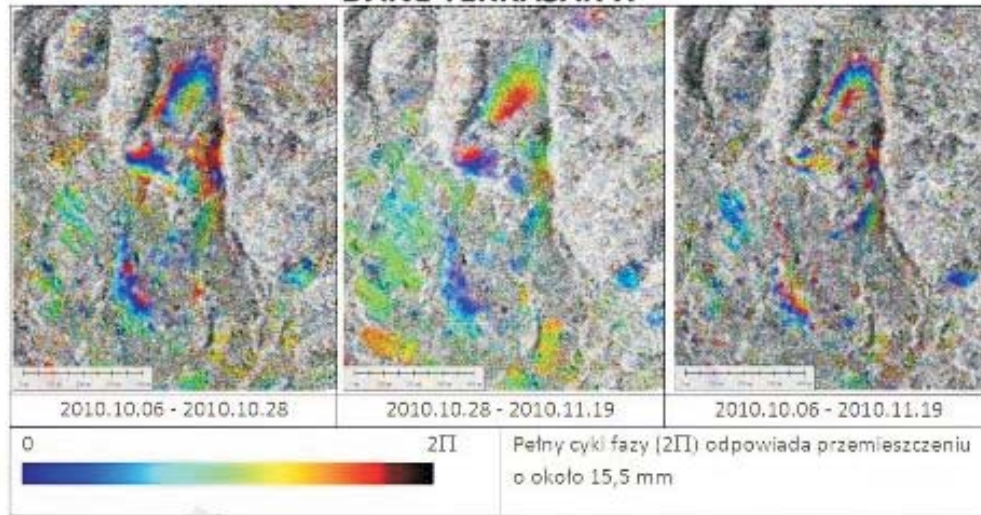
W Polsce występuje zagrożenie spowodowane osuwiskami w następujących rejonach (rys. 6):

1. Karpaty – 95% ogólnego występowania na terenie Polski, pozostałe obszary 5% (pkt. 2–7).
2. Sudety.
3. Góry Świętokrzyskie.
4. Pas wyżyn środkowopolskich.
5. Doliny rzeczne centralnej i północnej Polski.
6. Młodogłacjalne obszary Polski północnej.
7. Wybrzeże Morza Bałtyckiego.

Osuwiska i tereny zagrożone osuwiskami występują przede wszystkim na obszarze Karpat (osuwiska karpackie stanowią 95% wszystkich osuwisk i terenów zagrożonych w Polsce), w strefie brzegowej Bałtyku oraz na stokach dolin rzek nizinnych (rys. 7). W 2005 r. liczbę osuwisk i terenów zagrożonych osuwiskami w Karpatach oceniano wstępnie na ponad 20 000. Prace prowadzone w ramach Projektu SOPO (System Osłony Przeciwośuwiskowej) (<http://geoportal.pgi.gov.pl/portal/page/portal/SOPO>) pozwoliły te dane uszczegółowić na terenie wybranych gmin karpackich i dane te ekstrapolować na pozostały obszar Karpat. Obecnie szacuje się, że liczba osuwisk w Karpatach może zawierać się w przedziale 50–60 tys. „Wskaźnik osuwiskowości” wyrażający wielkość obszaru objętego i zagrożonego osuwiskami w stosunku do powierzchni terenu ogółem jest w Karpatach szacowany na 30–40%. W utworach fliszowych ryzyko powstania osuwiska związane jest z ułożeniem warstw na przemian piaskowca i łatwo rozmakalnego łupka ilastego oraz długotrwałym nawodnieniem tych utworów. Straty spowodowane działaniem żywiołu w okresie maj/czerwiec 2010 r. – według danych Ministerstwa Spraw Wewnętrznych i Administracji – wyniosły 2,9 mld euro.

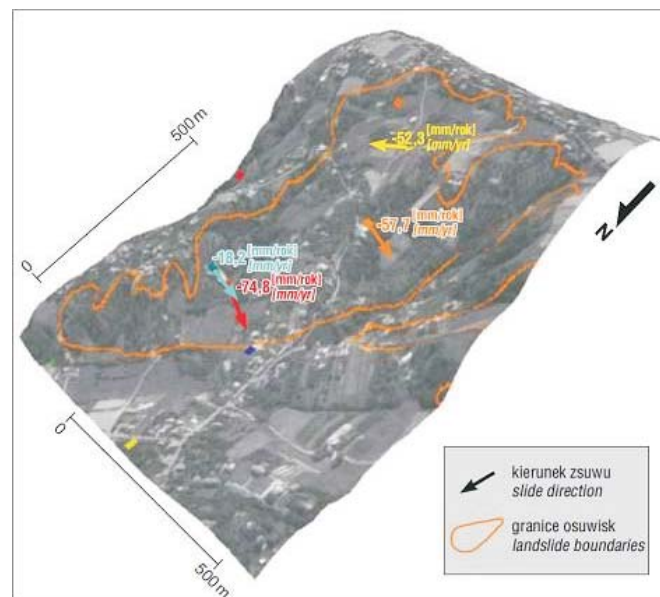
W 2010 roku w województwie małopolskim wystąpiło ponad 1300 osuwisk. Najczęściej (więcej niż 100) w gminie Lanckorona (powiat wadowicki), powiecie limanowskim (gmina Laskowa, gmina Limanowa – głównie w Kłodnem ok. 30, gmina Tymbark) i powiecie nowosądeckim (ok. 200 – głównie w gmina Łososina Dolna i gmina Gródek nad Dunajcem (65 domów)). Uszkodzonych i zagrożonych uszkodzeniem zostało ponad 1000 domów, a około 500 osób przesiedlono. Osuwiska uszkodziły również budynki i infrastrukturę w powiecie myślenickim (prawie 90 osuwisk), wielickim, nowosądeckim (ponad 50), nowotarskim, oświęcimskim, suskim (głównie w Zembrzycach), tarnowskim, bocheńskim, brzeskim, miechowskim oraz w Krakowie i Nowym Sączu. W Kurowie droga wojewódzka nr XX całkowicie osunęła się do Jeziora Rożnowskiego. Z powodu ulewnych deszczy osunęło się również zbocze krakowskiego kopca Piłsudzkiego. W czerwcu uaktywniły się następne osuwiska. W Kłodnem zniszczonych zostało 30 budynków, a kolejne są zagrożone, z wioski ewakuowano 434 osoby. Uaktywniły się osuwiska w miejscowości Łąpszanka i Szczawnica w powiecie nowotarskim, a także w Mniszku nad Popradem oraz w gminie

Interferogramy - analiza przemieszczeń osuwiska w Kłodnem DANE TERRASAR-X



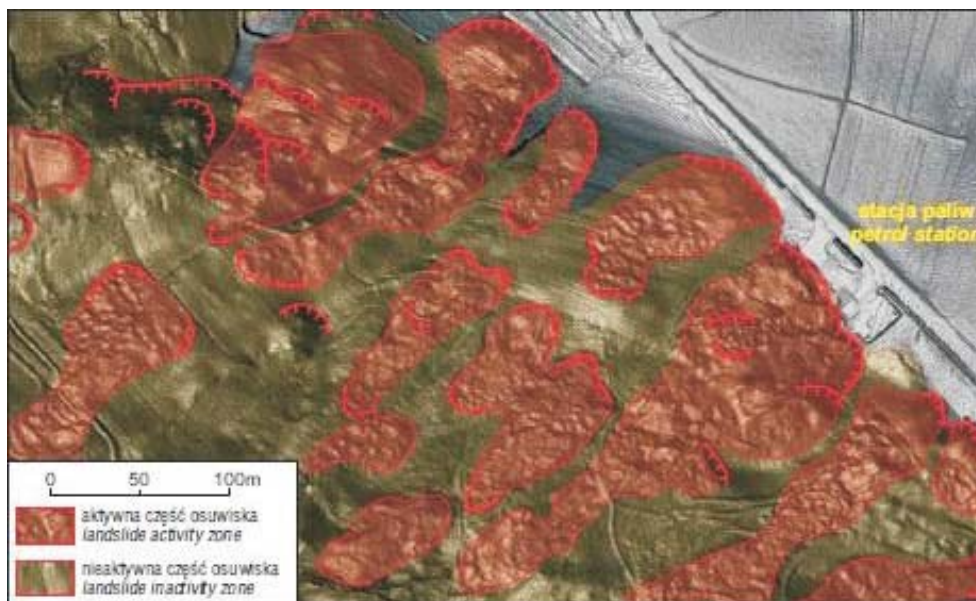
Rys. 1. Analiza przemieszczeń osuwiska w Kłodnem w 2010 roku (Perski, Wojciechowski, Wójcik 2012)

Fig. 1. Analysis of landslide displacements in Kłodnem in 2010 (Perski, Wojciechowski, Wójcik 2012)



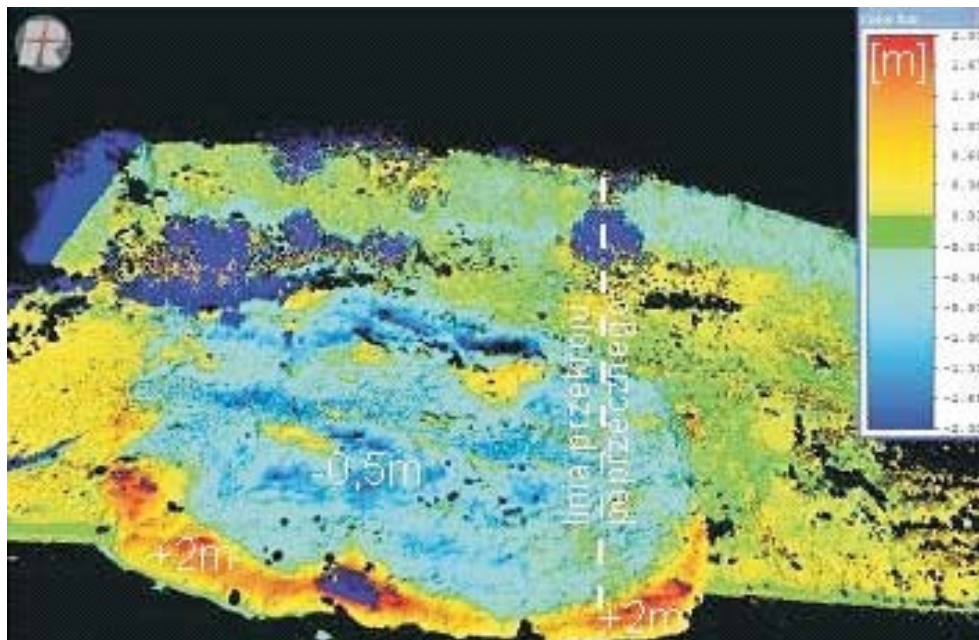
Rys. 2. Dynamika zsuwu w punktach PS obliczona dla osuwiska w Lednicy Górnej (Wojciechowski, Perski, Wójcik 2008)

Fig. 2. The dynamics of movement at points of PS calculated for the landslides in the Upper Lednicy (Wojciechowski, Perski, Wójcik 2008)



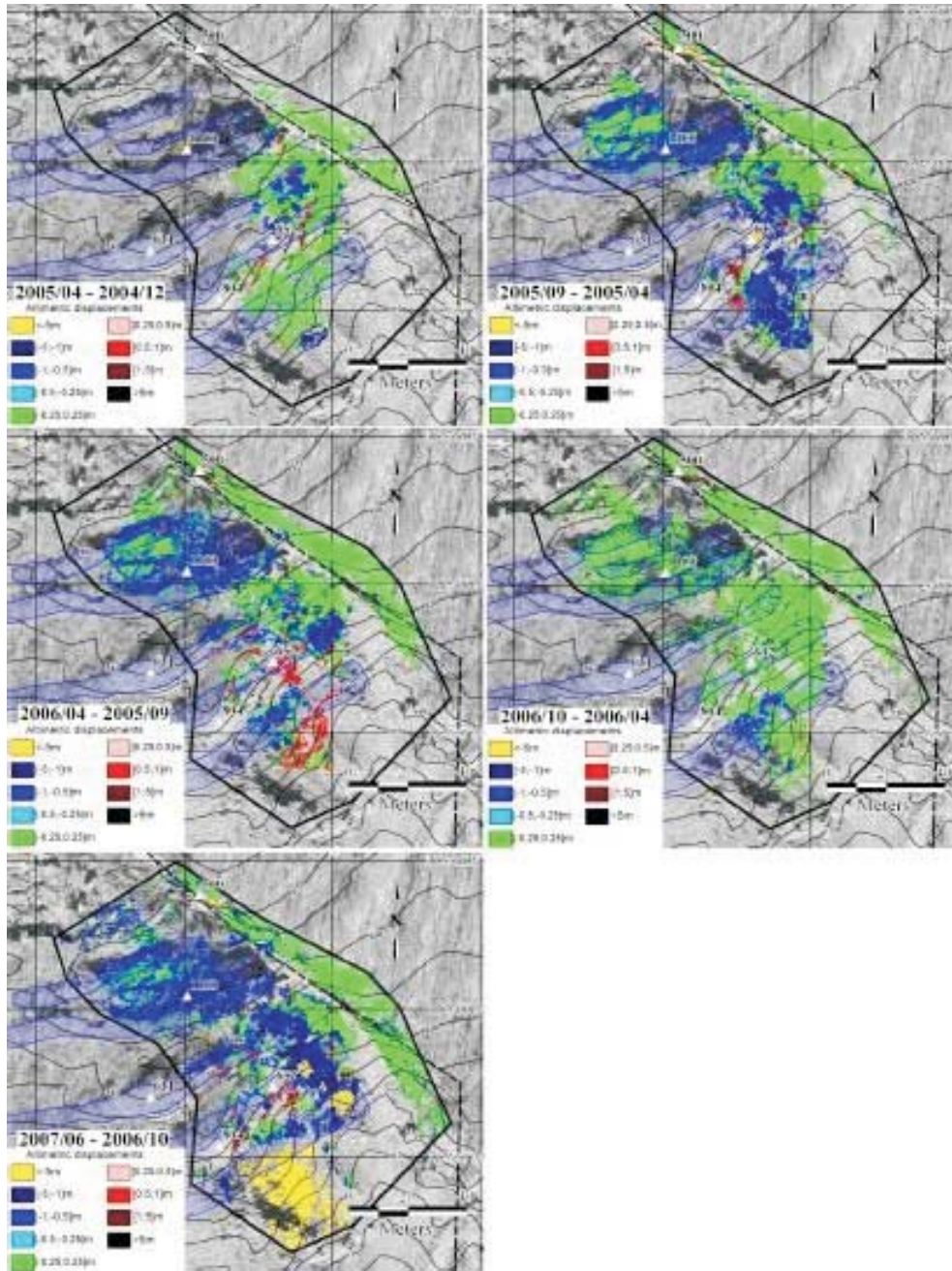
Rys. 3. Dynamika osuwiska w Zbyszycach – interpretacja wyników z zastosowania metody LIDAR (nalot: 1.04.2010) (Wojciechowski i in. 2012)

Fig. 3. The movements of landslides in Zbyszycze – interpretation of the results of the application of the method LIDAR (Wojciechowski i in. 201)



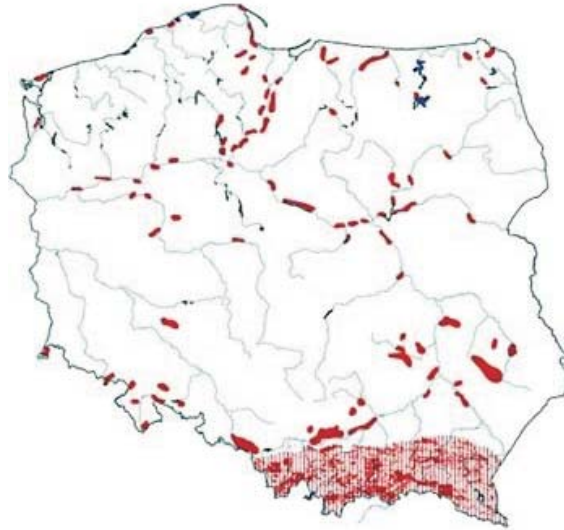
Rys. 4. Dynamika osuwiska w Jastrzębiej Górze (30.04–30.06.2010 r.) (Kramarska 2010)

Fig. 4. The movements of the landslide in Jastrzebia Gora (30.04–30.06.2010 r.) (Kramarska 2010)



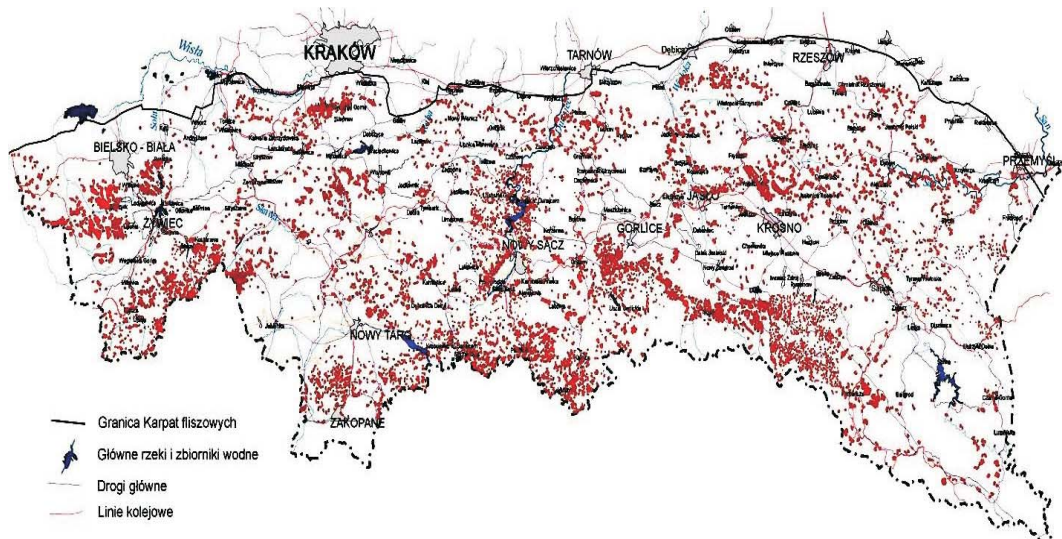
Rys. 5. Dynamika zsuwu osuwiska Séchilienne (Kaspersky i in. 2010)

Fig. 5. The movements of the landslide Séchilienne (Kaspersky i in. 2010)



Rys. 6. Tereny zagrożone osuwiskami w Polsce (<http://www.hotfrog.pl>)

Fig. 6. Areas at risk of landslides in Poland (<http://www.hotfrog.pl>)



Rys. 7. Osuwiska w Karpatach (Poprawa, Rączkowski 2003)

Fig. 7. Landslides in the Carpathians (Poprawa, Rączkowski 2003)

Tuchów, gdzie doszło przez to do wykolejenia pociągu osobowego. W Krzeczowie osuwisko na kilka godzin zatarasowało drogę krajową nr 7, podobnie w Tenczynie na tej drodze. Osuwiska nastąpiły również na wielu innych drogach, które zostały czasowo zamknięte (m.in. na drogach krajowych: w Radoczy, Czchowie, Wytrzyszczkach, czy w Muszynie). Na Podkarpaciu zagrożonych nimi pozostaje ponad 240 budynków i kilkanaście mostów. Najbardziej zagrożone tereny to powiaty: jasielski, strzyżowski (145 budynków), dębicki (52 budynki) i rzeszowski (23 budynki).

W 2011 i 2010 roku osuwiska spowodowały katastrofalne zniszczenia na trasach transportowych szczególnie na południu Polski. Nałożyły się na ten stan bardzo duże opady deszczu, które spowodowały uaktywnienie się ruchów masowych. Szczególnie kataklizm dotknął Polskę południową. Przykładowo, w miejscowości Lanckorona uaktywniło się osuwisko czyniąc ogromne szkody (rys. 8).

Osuwiska powodują szkody w infrastrukturze drogowej i kolejowej, co szczególnie jest dotkliwe dla transportu i okolicznych mieszkańców. Jako przykład pokazano na fotografii (rys. 9) skutki uaktywnienia się osuwiska w Woli Kurowskiej w 2010 roku.

2.1. Czynniki wpływające na powstawanie osuwisk

Przyczyną powstawania wszelkich ruchów osuwiskowych jest działanie siły grawitacji. Osuwiska powstają poprzez utratę stateczności mas gruntu na zboczach i skarpach. Wy-



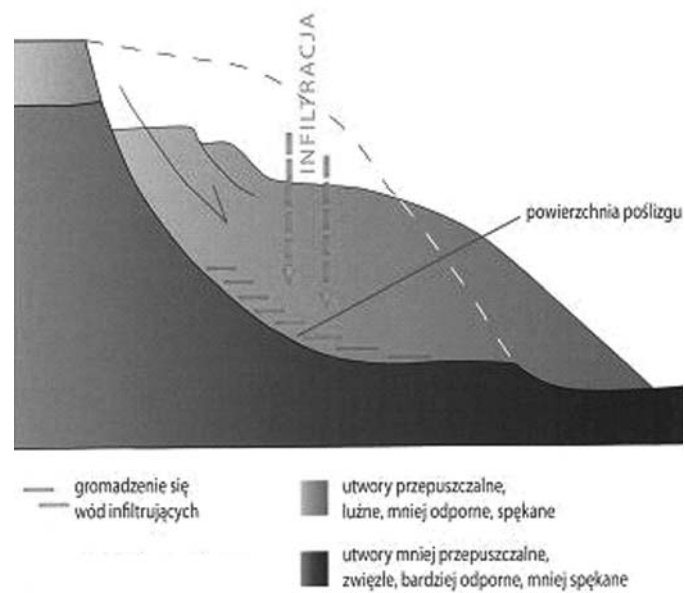
Rys. 8. Skutki uaktywnienia się osuwiska w Lanckoronie w 2010 roku (<http://polskalokalna.pl>)

Fig. 8. The effects of activation of landslides in Lanckorona in 2010 (<http://polskalokalna.pl>)



Rys. 9. Skutki uaktywnienia się osuwiska w Woli Kurowskiej w 2010 roku (<http://www.sadeczanin.info>)

Fig. 9. The effects of activation of landslides in Wola Kurowska in 2010 (<http://www.sadeczanin.info>)



Rys. 10. Schemat powstawania powierzchni poślizgu (Grabowski, Bagińska 2010)

Fig. 10. Creation scheme the slip surface (Grabowski, Bagińska 2010)

stępują one najczęściej na zboczach dolin rzecznych, wybrzeżach morskich i zboczach górskich; osuwiska skarp mogą towarzyszyć wykonywaniu głębszych wykopów, przekopów i wysokich nasypów. Utrata stateczności skarp i zboczy, będąca przyczyną osuwania się mas ziemnych, następuje w wyniku przekroczenia wytrzymałości gruntu na ścinanie wzdłuż dowolnej (ale ciągłej) powierzchni zwanej powierzchnią poślizgu (rys. 10) (Grabowski, Bagińska 2010). W przypadkach gruntów sypkich, wytrzymałość determinowana jest oporami sił tarcia wewnętrznego. W ośrodkach spoistych, o ich wytrzymałości decydują zarówno siły tarcia wewnętrznego jak i siły spójności.

Czynniki, które powodują powstawanie osuwisk można podzielić na aktywne czyli takie, które ulegają zmianom w czasie (wody opadowe, podziemne i powierzchniowe, zmiany temperatury, zmiany wysokości i nachylenia zbocza lub skarpy, statyczne i dynamiczne obciążenia, sposób użytkowania terenu itp.) oraz pasywne, czyli takie, które w zasadzie nie ulegają zmianom (budowa geologiczna, nachylenie warstw, uskoki, spękania itp.) (Kleczkowski 1955). Budowa geologiczna jest ważnym czynnikiem warunkującym powstanie osuwiska (Pilecka 2001). Z punktu widzenia sposobu oddziaływania na stateczność osuwiska czynniki można podzielić na:

- 1) zewnętrzne – związane z siłami (naprężeniami) wywołującymi ruch osuwiskowy. Siły te mogą wzrastać przy braku zmian wytrzymałości gruntu (np. zwiększenie kąta nachylenia lub wysokości zbocza lub skarpy, dodatkowe obciążenie zbocza lub skarpy – statyczne lub/i dynamiczne itp.),
- 2) wewnętrzne – związane ze zmianami wytrzymałości gruntu zbocza lub skarpy bez zmian sił (naprężeń) wywołujących ruch osuwiskowy (zmiany cech fizyczno-mechanicznych wskutek np. wzrostu zawilgocenia, procesów wietrzenia, wypłukiwania i rozpuszczania składników itp.).

Jednym z bardzo istotnych czynników wywołujących osuwisko jest woda. Należy jednak rozumieć to w szerszym znaczeniu czyli infiltracja wód opadowych, zawodnienia wskutek naturalnego lub sztucznego spiętrzenia wód, uszkodzenia lub złego działania kanałów, kanalizacji, wodociągów, systemów drenarskich itp. Woda jest tym czynnikiem, który z jednej strony powoduje obniżenie wytrzymałości na ścinanie skał i gruntów, a z drugiej wzrost ciężaru gruntu i wzrost sił dążących do utraty stateczności zbocza lub skarpy. Woda może powodować pojawienie się dodatkowych sił hydrodynamicznych przy przepływie przez ośrodek skalny. W polskich warunkach klimatycznych szczególną rolę przypisuje się opadom atmosferycznym. Stwierdzono, że osuwiska powstają, jeżeli wysokość miesięcznych opadów atmosferycznych przekracza 200 mm lub intensywność opadu dobowego przekracza 7 mm/dobę (Zabuski i in. 1999). Zależy to prawdopodobnie bardziej od intensywności opadu dobowego. Przykładowo, osuwisko na górze Palenica powstało przy średniej intensywności opadu 37 mm/dobę i wysokości opadu 111 mm przez trzy dni poprzedzające wystąpienie osuwiska (Rybicki i in. 1998).

Wiele osuwisk powstaje w wyniku nałożenia się czynników naturalnych i antropogenicznych. W warunkach polskich do powstawania osuwisk przyczyniają się głównie następujące czynniki: budowa geologiczna i rzeźba terenu, intensywne i/lub długotrwałe opady atmosferyczne oraz działalność człowieka (prowadząca m.in. do rozcinania i podcinania stoków oraz nadmiernego obciążenia stoku przez wznoszone obiekty budowlane).

3. Porównanie teledetekcji na różnych poziomach w monitorowaniu osuwisk

Aktualnie w Polsce stosuje się do monitoringu osuwisk odpowiednie metody zgodnie z obowiązującym prawem i instrukcjami. Metody monitoringu głównie oparte są na „Instrukcji obserwacji i badań osuwisk drogowych” Generalnej Dyrekcji Dróg Publicznych z 1999. Drugim aktualnie dokumentem, według którego należy projektować i wykonywać monitoring osuwisk jest „Instrukcja opracowania mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi” wydana w 2008 roku przez Państwowy Instytut Geologiczny.

W obydwu Instrukcjach metody monitorowania dzielą się tak samo: na powierzchniowe i wglębne.

Do monitorowania osuwisk można zastosować metody teledetekcyjne należące do metod powierzchniowych. Porównując zalety i ograniczenia każdego z poziomów teledetekcji czyli: satelitarnej, lotniczej i naziemnej, należy mieć na uwadze obiekt, jego rozmiary oraz cel monitoringu. Metodyka badań w zależności od danego obiektu musi uwzględnić podstawowe parametry metod teledetekcyjnych, takie jak: rozdzielczość przestrzenną, spektralną, czasową oraz radiometryczną. Rozdzielczość przestrzenna jest to terenowy wymiar piskela. Można mówić także o rozdzielczości w odwzorowaniu przyrostów w modelach różnicowych, co jest bardzo ważną informacją z punktu widzenia monitorowania osuwisk. Rozdzielczość spektralna jest to ilość i rodzaj zakresów promieniowania elektromagnetycznego wykorzystanego w badaniach teledetekcyjnych. Rozdzielczość czasowa to częstotliwość z jaką można wykonać ponownie zdjęcie tego samego obszaru. Rozdzielczość radiometryczna to maksymalna liczba wartości, jaka może być przypisana pojedynczemu pikselowi (tzw. dynamika zapisu), np. 1 bit (2^1) to dwa tony: biały i czarny, a 8 bitów (2^8) to 256 tonów szarości. Z punktu widzenia skanowania osuwisk najbardziej interesujące są dwa parametry: rozdzielczość przestrzenna, a w szczególności rozdzielczość pionowa, i rozdzielczość czasowa.

Teledetekcja satelitarna opiera się na systemie InSAR (SAR Interferometry), który wykorzystuje do pomiarów fale radarowe. Rozdzielczość przestrzenna w obrazach radarowych w satelitach ERS1 i ERS2 wynosi 30 m. Działania w teledetekcji satelitarnej zmierzają do zwiększenia rozdzielczości przestrzennej i już np. satelita TerraSar-X ma rozdzielczość przestrzenną 1 m w trybie SpotLight do 16 m w trybie ScanSAR. Rozdzielczość przestrzenna w pionie jest w przypadku satelitów radarowych rzędu kilku centymetrów. Satelitarna interferometria radarowa InSAR (*Synthetic Aperture Radar Interferometry*) to technika, która wykorzystuje wzajemne przesunięcia fazy sygnałów radarowych dwóch satelitarnych obrazów SAR (Mirek, Isakow 2009). Przetwarzając różnice fazowe dwóch obrazów uzyskanych w czasie kolejnych nalotów satelity, uzyskujemy w efekcie jeden obraz interferometryczny. Podczas rejestracji fal odbitych od powierzchni Ziemi zapisywane są informacje o intensywności odbicia fal (tj. stopnia pochłaniania fal przez powierzchnię Ziemi) oraz fazy tych sygnałów w momencie dotarcia do odbiornika. Zmiana fazy sygnału na radarogramie o pełny cykl 360° odpowiada połowie długości fali sygnału. W przypadku satelitów ERS-1/2, czy ENVISAT długość fali wykorzystywanej przez urządzenie SAR wynosi 5,6 cm. Mając dwa radarogramy wykonane w różnym czasie można znaleźć wartości fazy o jaką różnią się te dwa sygnały. Obraz interferencyjny otrzymany z dwóch radarogramów będzie przedstawiał zmiany wysokościowe powierzchni terenu

w postaci obrazu interferencyjnego, gdzie zmiana fazy o pełny cykl 360° odpowiada długości 2,8 cm, czyli przesunięciu terenu jakie powstało w czasie pomiędzy wykonaniem kolejnych radarogramów. Jednak ze względu na kąt padania fali radarowych, który wynosi 23° , należy uwzględnić pewne poprawki; i tak obniżeniu 2,8 cm mierzonemu wzdłuż kierunku padania fali Ziemia – satelita, odpowiada obniżenie powierzchni odbijającej o 2,58 cm w kierunku pionowym.

Zalety teledetekcji satelitarnej to duża dokładność w pomiarze względnych deformacji terenu oraz niezależność pomiarów od warunków atmosferycznych. W przypadku metody PSInSAR można osiągnąć dokładności rejestrowania deformacji rzędu kilku/kilkudziesięciu mm/rok. Metoda PSInSAR daje nam obraz punktowy przemieszczeń w tzw. punktach PS. Rozdzielczość czasowa w przypadku teledetekcji satelitarnej zależy od rodzaju satelity, z którego będziemy pozyskiwać dane do analizy. Przykładowo, materiały z satelitów ERS1, ERS2, ENVISAT mają rozdzielczość 35-dniową, ponieważ taki jest cykl przelotu nad tym samym punktem na Ziemi. Aktualnie ten cykl ulega zmniejszeniu, dla satelity TerraSAR-X wynosi 11 dni (interwał obrazowania przy jednakowych parametrach) możliwe jest także zaplanowanie rewizyty tego samego miejsca dla interwału 2,5 dnia. Generalnie dla satelitów obserwuje się tendencję do zwiększania rozdzielczości przestrzennej i czasowej.

W przypadku teledetekcji lotniczej używającej skanerów laserowych w bliskiej podczerwieni rozdzielczość przestrzenna pikseli ma około 15–20 cm, natomiast pionowa rozdzielczość ma dokładność około 15 cm.

Naziemny skaner laserowy jest najdokładniejszym przyrządem o rozdzielczości przestrzennej rzędu kilku milimetrów. Średnica plamki skanera laserowego firmy Leica HDS 3000 wynosi np. 4 mm, a 25 mm skanera firmy RIEGL LMS Z390. Rozdzielczość pionowa jest także rzędu kilku milimetrów. W związku z tym konstruując model różnicowy można się spodziewać wykrycia deformacji rzędu kilku milimetrów.

Podstawowymi zadaniami, które wiążą się z wykonywaniem projektów z zakresu naziemnego skaningu laserowego są (Mitka 2007):

1. Zaprojektowanie, założenie, pomiar i wyrównanie osnowy geodezyjnej, pozwalającej na orientację wszystkich pozyskanych chmur punktów do jednego wspólnego układu geodezyjnego. Osnowa ta musi być dostosowana do geometrii mierzonego obiektu, a jednocześnie spełniać warunki dokładnościowe położenia punktów po wyrównaniu. Uzyskanie wymaganych dokładności w takich przypadkach wymaga zastosowania instrumentów o odpowiedniej precyzji pomiaru, jak też specyficznych procedur pomiarowych. Zazwyczaj też pomiary takie wykonuje się w układach lokalnych, jako że istniejące osnowy państwowe są zbyt mało dokładne. Zagadnienia te wymagają indywidualnego podejścia do każdego obiektu. Obecnie na świecie testuje się różne warianty zakładania osnow dla potrzeb naziemnego skaningu laserowego. Duże nadzieje wiązane są z możliwością integracji skanera laserowego z odbiornikiem GPS, co powinno znacznie przyspieszyć prace terenowe i usprawnić proces orientacji chmur punktów.
2. Zaprojektowanie stanowisk skanera laserowego, tak aby uzyskać pokrycie całego obiektu chmurami punktów o zadanej gęstości. Należy sprawdzić czy po zeskanowaniu danego obiektu zostały wyeliminowane wszystkie pola martwe (o ile jest to możliwe), czy obiekty o różnych rodzajach powierzchni zeskanowały się prawidłowo, czy nie występują partie chmur punktów, dla których uzyskano zbyt małą gęstość informacji.

3. Zaprojektowanie procesu technologicznego obróbki chmur punktów, tak aby dostać możliwie najlepszy efekt końcowy – dotyczy to orientacji bezwzględnej poszczególnych chmur punktów, procesu filtracji, w szczególności rodzajów zastosowanych filtrów, ich parametrów i kolejności w jakiej te filtry należy zastosować. Jest to szczególnie ważny i trudny etap przygotowania wykonania projektu, ze względu na to, że zagadnienia technologii obróbki danych ze skaningu laserowego to stosunkowo młoda i mało rozpoznana dziedzina. Należy znaleźć „złoty środek” pomiędzy likwidacją szumów i błędnych informacji innego rodzaju pojawiających się na chmurach punktów (np. błędne położenie punktów na krawędziach obiektów) a zachowaniem maksymalnie oryginalnej informacji o mierzonym obiekcie. Wiele zależy tutaj od charakterystyk samego skanera, które różnią się między sobą znacznie w zależności od producenta czy też modelu. Dlatego też bardzo często zachodzi konieczność dobrania odpowiedniego skanera do planowanego projektu. Kolejny ważny problem w zagadnieniach związanych z przetwarzaniem chmur punktów to możliwość automatyzacji pewnych procesów występujących na różnych etapach obróbki danych. W chwili obecnej zagadnienia związane z pozyskiwaniem, przetwarzaniem i automatyzacją pomiarów bazujących na chmurach punktów są przedmiotem badań w wielu ośrodkach badawczych, a ich wyniki są cennymi wskazówkami wykorzystywanymi w procesie produkcyjnym.

Wnioski

W artykule została przeprowadzona ocena możliwości zastosowania teledetekcji do badania ruchów osuwiskowych. Porównując teledetekcję naziemną z teledetekcją satelitarną i lotniczą widać, że teledetekcja naziemna ma wiele pozytywnych aspektów. Przede wszystkim nie ma ograniczenia w czasie tak jak satelitarna, co związane jest z czasem przelotu satelitów nad danym obszarem. Teledetekcja naziemna ma dużą rozdzielczość przestrzenną. Ponadto w stosunku do metody LIDAR jest tańsza. Przeprowadzono analizę pozytywnych aspektów zastosowania skanera laserowego do skanowania terenów osuwiskowych oraz ograniczeń metody. Chmura punktów stanowi pewnego rodzaju dokumentację przestrzenną, do której możemy w każdej chwili wrócić, aby wykonać dodatkowe pomiary, analizy lub odtworzyć stan z dnia wykonania skanu. Ruchy masowe można śledzić na podstawie modelu różnicowego konstruowanego na podstawie dwóch lub więcej przestrzennych modeli. W przypadku ruchów masowych ważna jest identyfikacja położenia reperów, które powinny mieć te same współrzędne w kolejnych pomiarach. Właściwe zaplanowanie prac, zapoznanie się z obiektem badań, odpowiedni program prac polowych i prac kameralnych gwarantuje prawidłowe wykonanie projektu. Ponadto zalecane jest, aby pomiary osuwisk prowadzone były wczesną wiosną i po intensywnych opadach generujących ruchy osuwiskowe.

Literatura

- Grabowski D., Bagińska A., 2010 – Folder PIG-IB „Uwaga zagrożenie osuwiskiem”, Warszawa.
Graniczny i in. 2006 – Graniczny M., Kowalski Z., Jureczka J., Czarnogórska M., 2006 – Wykorzystanie technologii PSInSAR dla obserwacji przemieszczeń powierzchni terenu na przykładzie Górnego Śląska.

- Mat. Symp. Warsztaty górnicze: Zagrożenia w Górnictwie. Sesja Okolicznościowa, Tomaszewice, 2–14 czerwca, Wyd. IGSMiE. Kraków.
- Graniczny i in. 2012 – Graniczny M., Kamiński M., Piątkowska A., Surała M., 2012 – Wykorzystanie lotniczego skaningu laserowego do inwentaryzacji i monitoringu osuwiska w rejonie Łańcicy (Gmina Lancokorona). Przegląd Geologiczny vol. 60, nr 2, 64–89.
- Instrukcja opracowania „Mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi” 2008. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Instrukcja obserwacji i badań osuwisk drogowych. Generalna Dyrekcja Dróg Publicznych, 1999.
- Kasperski i in. 2010 – Kasperski J., Delacourt C., Allemand P., Potherat P., Jaud M. and Varrel E. 2010 – Application of a Terrestrial Laser Scanner (TLS) to the Study of the Séchilienne Landslide (Isère, France) Remote Sens. 2(12), 2785–2802;
- Kleczkowski A., 1955 – Osuwiska i zjawiska pokrewne. Wyd. Geologiczne Warszawa.
- Lisowski S., Ajszpur B., Dudek P. 2007 – Geodezyjne pomiary skrajni budowli metodą skaningu laserowego na przykładzie stacji kolejowej. Nowoczesne Technologie i Systemy Zarządzania w Kolejnictwie. Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP (z. 154, 2010 r.), s. 395–409 Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 17b, p. 525–534.
- Mitka B., 2007 – Możliwości zastosowania naziemnych skanerów laserowych w procesie dokumentacji modelowania obiektów. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, Vol. 17b, 525–534.
- Mirek K., Isakow, 2009 – Preliminary analysis of InSAR data from south-west part of Upper Silesian Coal Basin. Gospodarka surowcami Mineralnymi t. 25, z. 3, 241–246.
- Perski Z., Wojciechowski T., Wójcik A., 2012 – Techniki naziemne, lotnicze i satelitarne w rozpoznawaniu osuwisk. Sympozjum Ogólnokrajowe „Hydrotechnika XIV 2012” prezentacja <http://prezi.com/jwpo1cmo498a/techniki-naziemne-lotnicze-i-satelitarne-w-rozpoznawaniu-osuwisk/>.
- Piątkowska A., Graniczny M., 2006 – Możliwości wykorzystania metod teledetekcyjnych dla identyfikacji mobilności mas solnych i związanych z nimi przemian powierzchni terenu. Mat. Symp. Warsztaty Górnicze, Wyd. IGSMiE. Kraków, 327–330.
- Pilecka E., 2001 – Geologiczne uwarunkowania rejonów osuwiskowych w jednostce zgólbickiej. Technika Poszukiwań Geologicznych, Geosynoptyka i Geotermia nr 6, 45–47.
- Pilecka i in. 2006 – Pilecka E., Piątkowska A., Stec K., Buła Z., Pilecki Z., Król M., 2006 – Związek lineamentów z sejsmicznością indukowaną na terenach górniczych Górnoląskiego Zagłębia Węglowego. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.
- Poprawa D., Rączkowski W., 2003 – Osuwiska Karpat. Przegląd Geologiczny vol. 51, nr 8, 685–692.
- Rybicki S., Rączkowski W., Wójcik A., 2004 – Zjawiska osuwiskowe w Karpatach zagrożeniem dla budownictwa komunikacyjnego. Mat. Se. Nauk.-Tech. AGH Kraków nt. „Budownictwo tunelowe w Karpatach i jego ekologiczne uwarunkowania” Krynica 7–8 czerwca 2004 r. Uczelniane Wyd. Nauk. Dydak., Kraków, 27–36.
- Wąsowski i in. 2009 – Wąsowski J., Bovenga F., Nutricato R., Conte D., Refice A., Graniczny M., Kowalski Z., 2009 – Przewidywanie rozmieszczenia osiadań w rejonie Kopalni Soli Wieliczka w świetle satelitarnych danych interferometrycznych. Przegląd Geologiczny vol. 57, nr 2, 164–172.
- Wojciechowski T., Perski Z., Wójcik A. 2008 – Wykorzystanie satelitarnej interferometrii radarowej do badań osuwisk w polskiej części Karpat. Przegląd Geologiczny vol. 56, nr 12: 1088–1091.
- Wojciechowski i in. 2012 – Wojciechowski T., Borkowski A., Perski Z., Wójcik A., 2012 – Dane lotniczego skaningu laserowego w badaniu osuwisk – przykład osuwiska w Zbyszycach (Karpaty zewnętrzne). Przegląd Geologiczny 60, 95–102.
- Zabuski L., Thiel K., Bober L., 1999 – Osuwiska we fliszu Karpat Polskich. Wyd. IBW PAN, Gdańsk.

Wykorzystane strony internetowe:

<http://www.hotfrog.pl>

R.Kramarska, www.pgi.gov.pl/attachments/article/2812/monitoring.pdf

<http://polskalokalna.pl/wiadomosci/malopolskie/news/rozbiorka-na-koszt-wlasny,1534291,219>

<http://www.sadecznanin.info/wiadomosci,5/jest-zielone-swiatlo-w-sprawie-odbudowy-drogi-w-kurowie,38618#>.

UWSF7zeevVI

<http://geoportal.pgi.gov.pl/portal/page/portal/SOPO>

