

Dane lotniczego skaningu laserowego w badaniu osuwisk – przykład osuwiska w Zbyszycach (Karpaty zewnętrzne)

Tomasz Wojciechowski¹, Andrzej Borkowski², Zbigniew Perski¹, Antoni Wójcik¹



T. Wojciechowski



A. Borkowski



Z. Perski



A. Wójcik

Airborne laser scanning data in landslide studies at the example of the Zbyszycze landslide (Outer Carpathians). Prz. Geol, 60: 95–102.

Abstract. The study is focused on an active landslide located on the right bank of the Dunajec Valley in Zbyszycze. The potentials of application of the data derived from airborne laser scanning (ALS) in the context of an inventory of landslides has been presented. The ALS data used in this study covers the area of 40 km² on the eastern side of Lake Roznowskie in the Carpathians. Scanning data were acquired on April 1,

2010, and the resulting cloud of points was used as the basis to generate the DTM with a resolution of 0,5 m. Geological interpretation of the data was conducted on the example of the largest and complex landslides in the study area located in the village Zbyszycze. Using different visualization techniques were able to determine extent of landslides and its internal morphological elements. Attempts to determine the degree of activity in different zones of the landslide have been also undertaken. Very good results were obtained in wooded areas, complementing the state of knowledge about this landslide.

Keywords: Airborne laser scanning, Digital Terrain Model, landslides mapping, Carpathians

Karpaty (szczególnie fliszowe) są obszarem szczególnie narażonym na ruchy masowe. Według dotychczasowych badań występuje tam około 95% osuwisk dotąd zinwentaryzowanych na obszarze Polski (Poprawa & Rączkowski, 2003). Szacuje się, że ich liczba może przekraczać 50 000 (Grabowski, 2008). W latach 1997, 2000, 2001, 2004 i 2010 w Karpatach stwierdzono dużą aktywność ruchów masowych związaną z ekstremalnymi opadami atmosferycznymi (Rączkowski & Mrozek, 2002; Poprawa & Rączkowski, 2003; Gorczyca, 2004). Spowodowały one znaczne uszkodzenia i zniszczenia budynków oraz infrastruktury komunikacyjnej. W województwie małopolskim w 2010 r. stwierdzono liczne przemieszczenia grawitacyjne, często związane z uaktywnieniem się starych osuwisk. Ich rozpoznanie jest podstawą wyznaczania stref zagrożonych ruchami masowymi i opiera się głównie na obserwacjach terenowych.

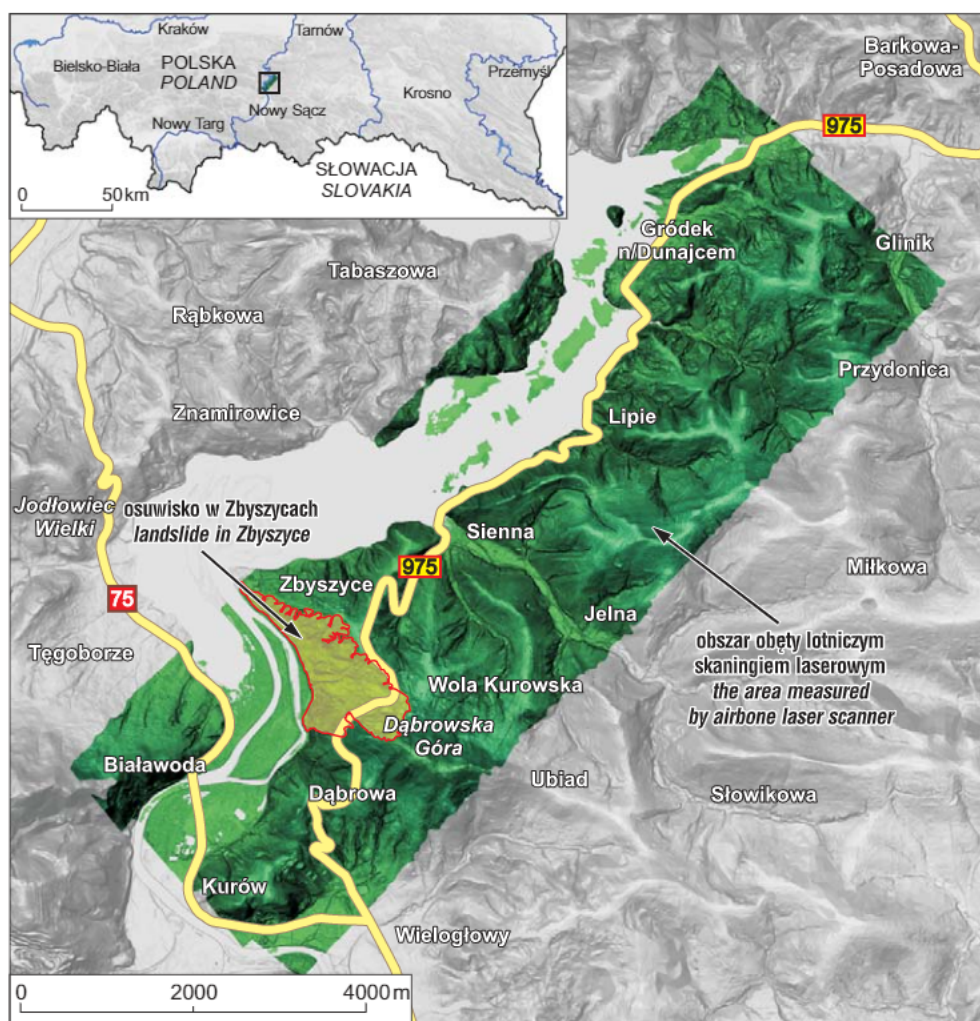
Podstawowym celem terenowego kartowania osuwisk jest wyznaczenie ich zasięgu i określenie stopnia aktywności (Grabowski i in., 2008). Prace terenowe prowadzone na stokach górskich i zboczach dolin polegają na identyfikacji występujących tam form, które niekiedy mogą być mylone z innymi elementami rzeźby terenu. Skarpy o charakterze tektonicznym czy też skarpy rolnicze mogą być błędnie interpretowane jako skarpy osuwiskowe, leje źródłowe mające cylindryczny kształt jako zasięg osuwiska, stare wykroty w lesie jako zdeformowana powierzchnia jezora itp. (Ozimkowski i in., 2010). Szczególne trudności mogą występować w obszarach leśnych oraz terenach zabudowanych, gdzie stok może być obserwowany tylko fragmentarycznie, co utrudnia prawidłowe rozpoznanie i zakla-

syfikowanie osuwiska. Terenowe kartowanie osuwisk bazuje w głównej mierze na podkładach topograficznych w różnej skali, a dokładność i czas trwania tych prac uzależniony jest m.in. od zawartych na nich rysunkach poziomicowych. Najczęściej wykorzystywane mapy topograficzne, wykonane w skali 1 : 10 000, często nie przedstawiają wiernie rzeźby terenu. Niejednokrotnie znajdują się na nich informacje uogólnione i nieaktualne. Prace terenowe mogą być także wspomagane analizą zdjęć lotniczych i numerycznych modeli terenu, jednak dokładność i aktualność tych danych jest często niewystarczająca ze względu na ich wykonanie w okresie poprzedzającym powstawanie form osuwiskowych.

Dużym wsparciem w badaniu osuwisk mogą być dane z lotniczego skaningu laserowego (ALS – *Airborne Laser Scanning*), określanego również mianem LIDAR (*Light Detection and Ranging*). Obecnie jest to jedna z istotnych technik pozyskiwania informacji o powierzchni terenu, zarówno na świecie, jak i w Polsce (Borkowski, 2006; Vosselman & Mass, 2010). Dane LIDAR charakteryzują się dużą dokładnością wysokościową (0,1–0,3 m). Ponadto dzięki dużej efektywności systemów pomiarowych oraz dużej przenikalności wiązki laserowej przez pokrycie leśne (nawet do 70%) osiąga się duże zagęszczenie punktami pomiarowymi, dochodzące nawet do kilkudziesięciu punktów na metr kwadratowy. Dzięki tym cechom i odpowiedniej filtracji danych możliwe jest skonstruowanie szczegółowego i dokładnego NMT pozbawionego pokrycia roślinnością i wiernie obrazującego drobne formy mikro-rzeźby powierzchni terenu.

¹Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Karpacki, ul. Skrzatów 1, 31-560 Kraków; tomasz.wojciechowski@pgi.gov.pl, zbigniew.perski@pgi.gov.pl, antoni.wojcik@pgi.gov.pl.

²Instytut Geodezji i Geoinformatyki, Uniwersytet Przyrodniczy, ul. Grunwaldzka 53, 50-357 Wrocław; andrzej.borkowski@up.wroc.pl.



Ryc. 1. Obszar badań
Fig. 1. Study area

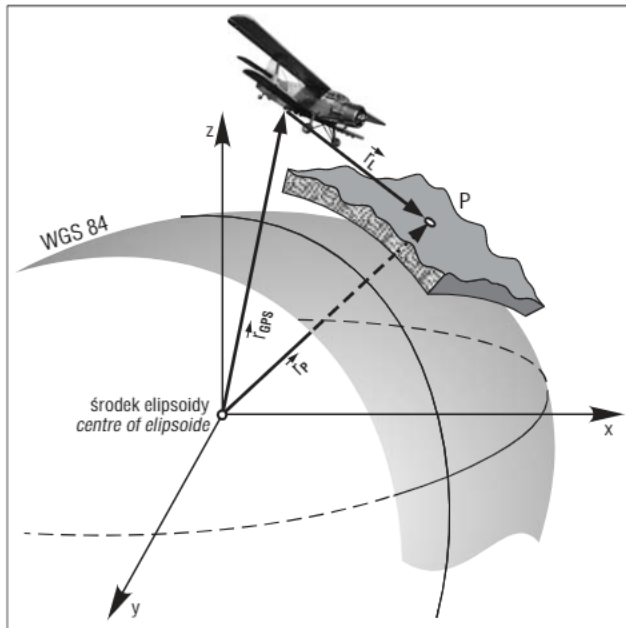
Geologiczną interpretację danych ALS przeprowadzono dla osuwiska zlokalizowanego we wsi Zbyszyce (Karpaty fliszowe) (ryc. 1), które w dużej części jest aktywne, ma urozmaiconą rzeźbę i jest pokryte zróżnicowaną szatą roślinną. Dzięki swojej różnorodności stanowi ono dobry poligon do badań testowych. Badania tego osuwiska prowadzone są od dawna przez Państwowy Instytut Geologiczny oraz przez inne grupy badawcze (Zuchiewicz, 1990; Nita i in., 2006; Wojciechowski, 2007).

LOTNICZY SKANING LASEROWY – ZARYS METODYKI

Lotniczy skaniny laserowy jest techniką pozyskiwania danych będącą integracją trzech innych, niezależnych technik pomiarowych: GPS (*Global Navigation System*) służący do wyznaczania pozycji, INS (*Inertial Navigation System*) wykorzystywany do określenia kątów orientujących platformę pomiarową w przestrzeni i LRF (*Laser Range Finder*) służący do laserowego pomiaru odległości do punktów na powierzchni ziemi. Umieszczone na pokładzie samolotu urządzenie laserowe emituje wiązkę światła laserowego w kierunku ziemi. Na podstawie czasu przebiegu i powrotu sygnału określana jest odległość od emitera do powierzchni ziemi lub obiektu, od którego

nastąpiło odbicie promienia laserowego. Jednocześnie rejestrowany jest kąt, pod którym została wysłana wiązka laserowa. W momencie pomiaru odległości musi być znane położenie (współrzędne w układzie WGS 84) skanera laserowego w przestrzeni, które jest wyznaczane za pomocą systemu GPS. Przestrzenną orientację samolotu względem układu zewnętrznego wyznacza system INS. Urządzenie żyroskopowe tego systemu wyznacza trzy kąty: podniesienia, przechyłu i obrotu samolotu. Zarejestrowane dane pomiarowe służą do wyznaczenia pozycji punktów na powierzchni ziemi, w układzie WGS84. Zasadę wyznaczenia współrzędnych zilustrowano na ryc. 2. Za pomocą GPS wyznaczany jest wektor r_{GPS} określający położenie, a skanery LRF i INS wyznaczają chwilowy wektor r_L . Suma tych dwóch wektorów wyznacza położenie punktu w układzie WGS 84, wektor r_p (Borkowski, 2006).

Uzyskana w wyniku skanowania tak zwana „chmura punktów” transformowana jest z lokalnego układu współrzędnych „x,y,z”. Nowoczesne systemy laserowe mogą rejestrować niemal dowolną liczbę odbić pośrednich impulsu (*full waveform*), np. od drzew. Zbiór punktów jest wtedy bardzo duży, a dzięki odpowiednim metodom filtracji można wygenerować zarówno numeryczny model pokrycia terenu, jak i numeryczny model rzeźby terenu. Rycina 3 ilustruje potencjał ALS na obszarze zalesionym;



Ryc. 2. Wyznaczenie pozycji punktu za pomocą lotniczego skaningu laserowego; r_{GPS} – wektor GPS, r_L – wektor LRF, r_P – wektor pozycji, P – punkt powierzchni terenu

Fig. 2. Point positioning using ALS; r_{GPS} – GPS vector, r_L – LRF vector, r_P – position vector, P – terrain surface point

po odfiltrowaniu punktów będących odbiciami od drzew pozostaje wciąż dostatecznie dużo punktów na powierzchni terenu, które pozwalają na generowanie numerycznego modelu rzeźby terenu, dobrze odzwierciedlającego strukturę osuwiska.

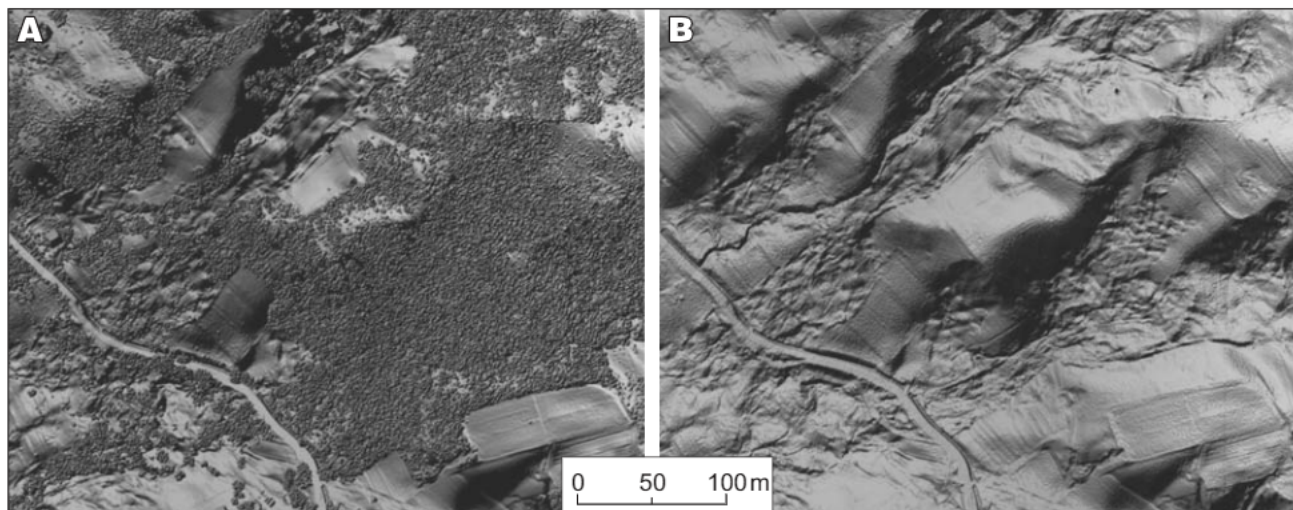
Ważnym etapem prac jest filtracja otrzymanej „chmury punktów”, polegająca na odrzuceniu punktów nie będących odbiciami od powierzchni terenu. W ramach opisywanych badań, filtrację danych wykonano z wykorzystaniem metody aktywnych powierzchni (Borkowski, 2004). Metoda ta polega na tym, że modelowanej powierzchni przypisana jest cecha zwana energią wewnętrzną i zewnętrzną, opisującą właściwości geometryczne powierzchni i danych. Energia wewnętrzna wyraża nachylenie (spadki) oraz krzywiznę modelowanej powierzchni. Energia zewnętrzna opisuje stopień niedopasowania modelowanej

powierzchni (terenu) do danych punktowych skaningu laserowego. Optymalną aproksymację powierzchni terenu otrzymuje się w wyniku minimalizacji obydwu energii. Algorytm realizowany jest iteracyjnie; szczegóły algorytmu podano w pracy Borkowskiego i Józkowa (2008). Na podstawie odfiltrowanej chmury punktów wygenerowano NMT o rozdzielczości 0,5 m. Równoległe ze skanowaniem laserowym wykonano zdjęcia lotnicze o rozdzielczości 10 cm.

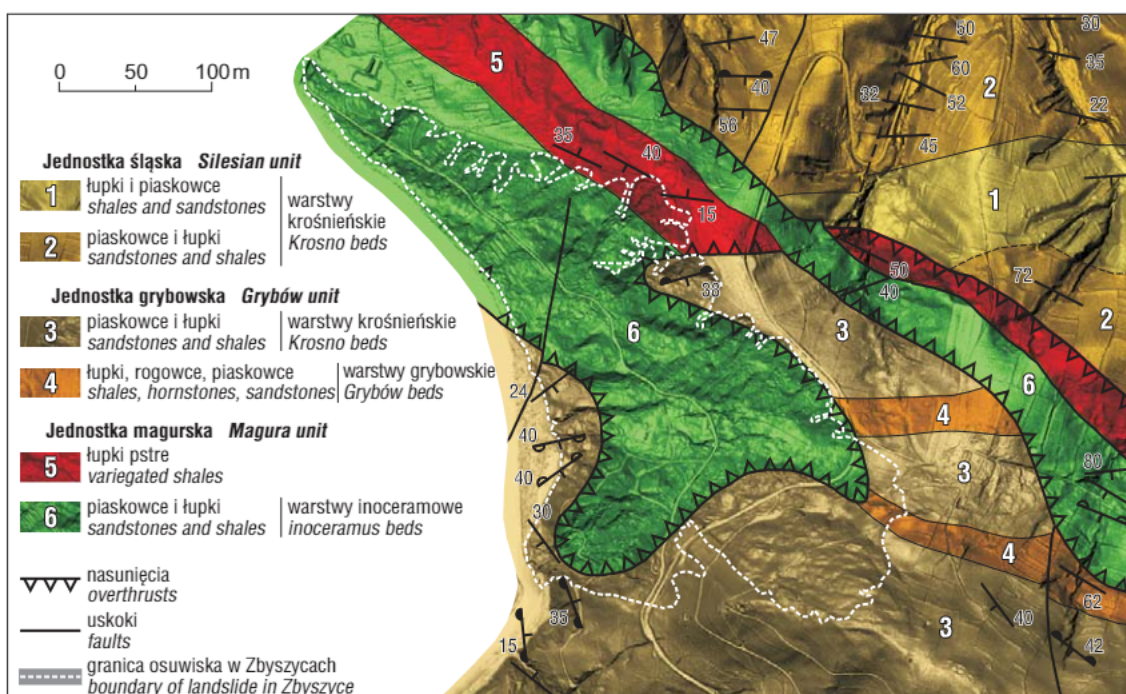
Metody ALS były już z powodzeniem wykorzystywane w badaniach ruchów masowych na świecie (Haugerud i in., 2003; Chigara i in., 2004; Sekiguchi & Sato, 2004; Schulz, 2007; Baldo i in., 2009; Jaboyedoff i in., 2010; Borkowski i in., 2011; Razak i in., 2011). W większości przypadków wyniki prezentują możliwości identyfikacyjne osuwisk, również w obszarach leśnych. Postęp metody jest bardzo duży, a coraz bardziej zaawansowane przyrządy pomiarowe pozwalają uzyskiwać NMT o coraz większych dokładnościach.

POŁOŻENIE OSUWISKA

Osuwisko w Zbyszycach położone jest w środkowej części Karpat w obrębie Płaskowyżu Rożnowskiego na Pogórzu Ciężkowickim (Starkel, 1972). Najwyższym wzniesieniem w tym rejonie jest Dąbrowska Góra (581 m n.p.m), od której w kierunku północno-zachodnim ciągnie się wąski grzbiet o wysokości 410–420 m n.p.m. Osuwisko obejmuje swoim zasięgiem północne stoki Dąbrowskiej Góry oraz zachodnie stoki schodzące do doliny Dunajca (ryc. 1). Obszar ten znajduje się w strefie nasunięcia płaszczowiny grybowskiej na śląską, na którą od południa jest nasunięta płaszczowina magurska zachowana w postaci czapki tektonicznej (Burtan & Skoczylas-Ciszewska, 1964; Burtan i in., 1992) (ryc. 4). Górna część grzbietu Dąbrowskiej Góry jest zbudowana z oligocen- skich piaskowców i łupków warstw krośnieńskich dolnych, podścielonych łupkami, rogowcami i piaskowcami warstw grybowskich należących do płaszczowiny grybowskiej (ryc. 4). Poniżej występują utwory płaszczowiny magurskiej, na które składają się głównie piaskowce cienko i średnioławicowe oraz łupki należące do warstw inoceromowych wieku paleocen-senon i paleoceńsko-eoceńskie łupki pstre. W kierunku północno-wschodnim pojawiają



Ryc. 3. Fragment osuwiska we wsi Zbyszyce. **A** – Numeryczny Model Pokrycia Terenu; **B** – Numeryczny Model Rzeźby Terenu
Fig. 3. Fragment of the landslide in the Zbyszyce village. **A** – Digital Surface Model; **B** – Digital Terrain Model



Ryc. 4. Mapa geologiczna obszaru badań na tle NMT (na podstawie Burtan & Skoczylas-Ciszewskiej, 1964)
 Fig. 4. Geological map of study area compared to DTM (after Burtan & Skoczylas-Ciszewska, 1964)

się warstwy krośnieńskie należące do płaszczowiny śląskiej (ryc. 4). Wszystkie utwory skalne są silnie sfałdowane i poprzecinane uskokami poprzecznymi. Występowanie masywnych piaskowców ponad warstwami łupków oraz obecność nasunięć i uskoki stanowi warunki korzystne do rozwoju osuwisk.

Osuwisko w Zbyszycach określić należy jako osuwisko złożone (Varnes, 1978; Dikau i in., 1996), formowane w trakcie kilku etapów rozwoju. Duża ilość skarpy wtórnych, jeziorów i zmienne kierunki przebiegu przemieszczeń grawitacyjnych pozwalają je określić również jako zespół osuwisk, kontaktujących się ze sobą w strefach odrywania materiału skalnego, a zwłaszcza mających wspólną strefę akumulacji w dolnych częściach stoków. Wyróżnienie granic poszczególnych osunięć jest miejscami trudne. Deformacjom grawitacyjnym podlegał obszar o powierzchni 132 ha. Obejmują one zarówno utwory zwietrzelinowe, jak i skały fliszowe. Szacowana miąższość koluwiów wynosi co najmniej 30 m. Deniwelacje osuwiska dochodzą do 282 m, a średnie nachylenie jego powierzchni – 16°. Najwyższe skarpy osuwiskowe o wysokości 15 m znajdują się na północnych stokach Dąbrowskiej Góry. Osuwisko posiada urozmaiconą rzeźbę, na którą składa się duża liczba elementów wewnątrzosuwiskowych, takich jak: progi, pagóry i nabrzmienia koluwalne, spłaszczenia i zagłębienia bezodpływowe. Dynamika osuwiska jest zróżnicowana, a w wielu miejscach przejawia się uszkodzeniami budynków i infrastruktury drogowej (Nita i in., 2006; Wojciechowski, 2007).

WYNIKI BADAŃ

Skaning laserowy osuwiska

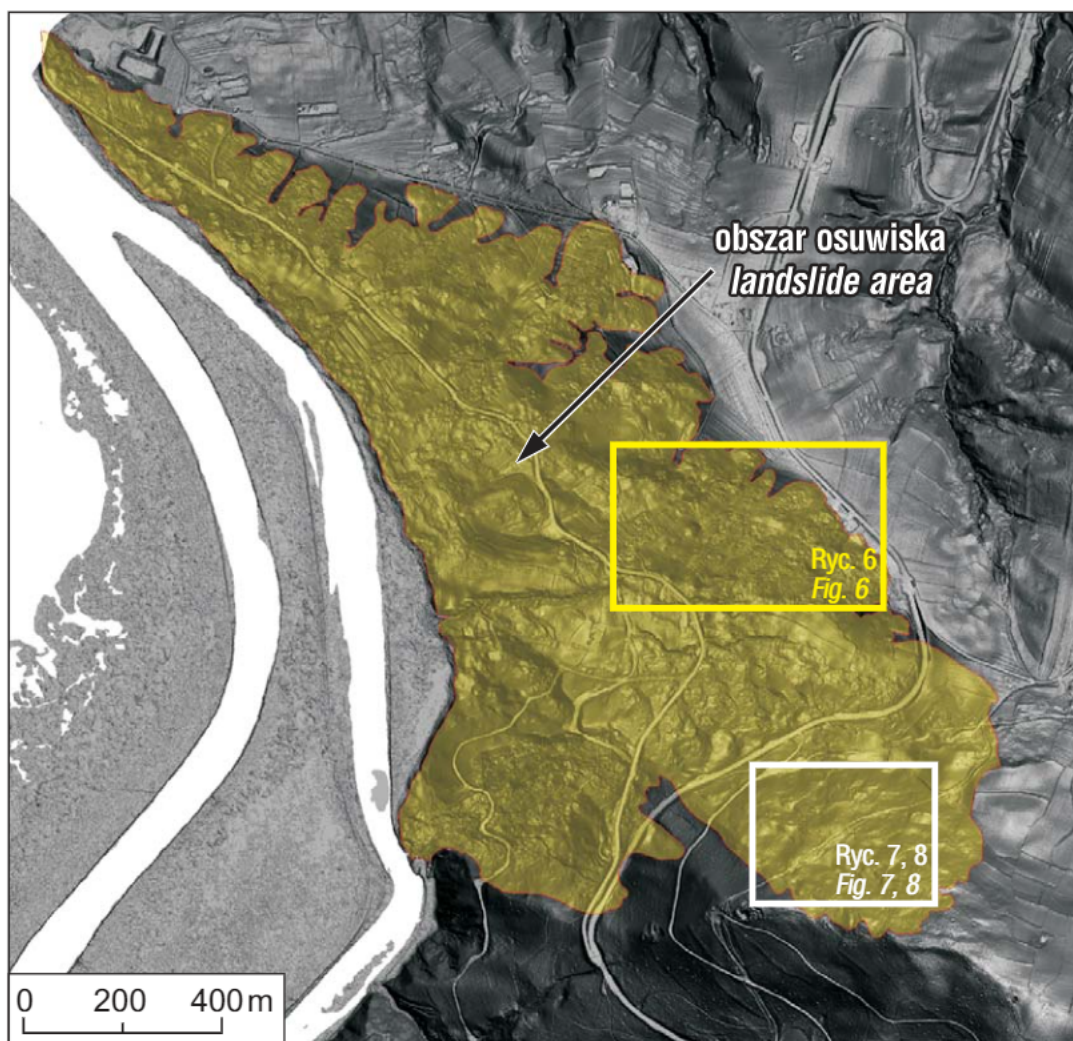
Lotniczy skaning laserowy wykorzystany w badaniach, których wyniki są prezentowane w niniejszej pracy, prze-

prowadzono w ramach projektu badawczego MNiSW „Projekt INSAR-LIDAR: integracja danych interferometrii radarowej i lotniczego skaningu laserowego na potrzeby badania zjawisk osuwiskowych” (N N526 146037), realizowanego w Instytucie Geodezji i Geoinformatyki Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Jednym z celów projektu było określenie przydatności skaningu laserowego w badaniu osuwisk. Skanowaniem objęto obszar 40 km², zlokalizowany po wschodniej stronie zbiornika

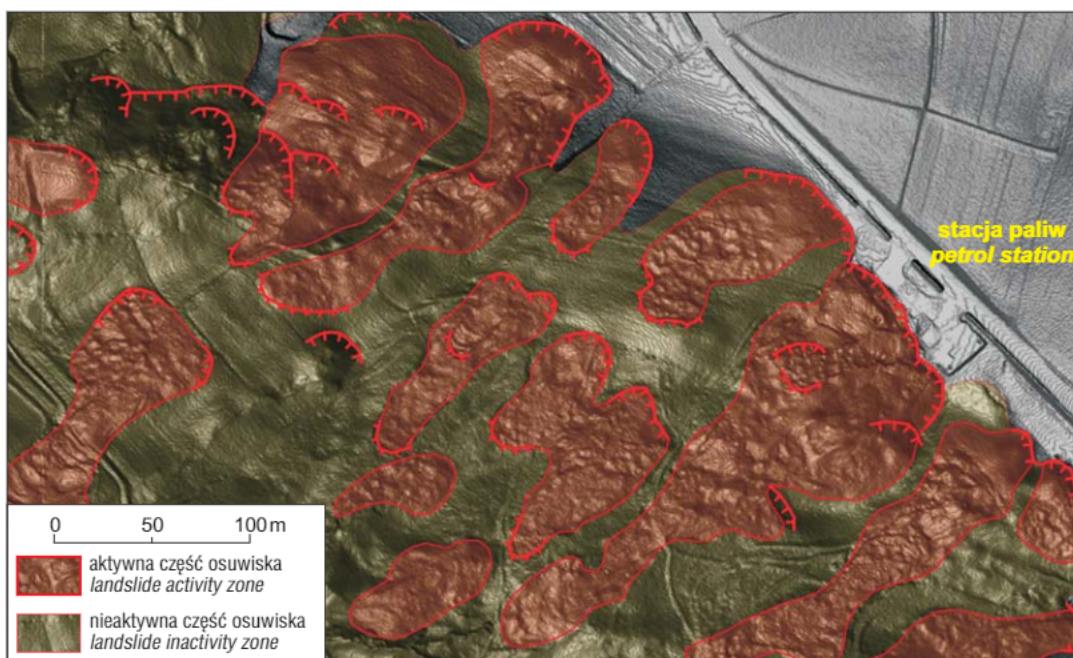
Tab. 1. Charakterystyka lotniczego skaningu laserowego dla badanego obszaru

Table 1. Metadata for the airborne lasers scanning in the study area

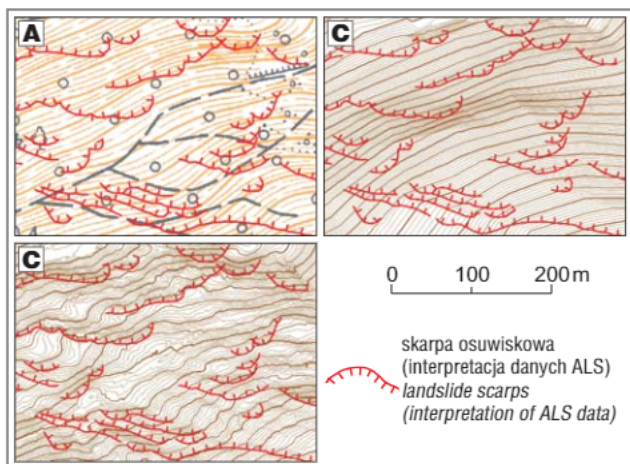
Data Acquisition	1.04.2010
System skanowania Scanning system	Riegl, LiteMapper 6800i
Skaner laserowy Laser scanner	LMS-Q680i
Typ skanera laserowego Scanner type	Full waveform
Długość fali lasera Laser wavelength	Nearinfrared
Rozbieżność wiązki lasera Laser beam divergence	≤ 0,5 rad
Mechanizm skanowania Scanning mechanism	Rotating polygon mirror
Częstotliwość powtarzania impulsów Pulse repetition rate	400 kHz
Prędkość skanowania Scan speed	200 lines /sec
Zakres dokładności Ranging accuracy	20 mm
Pole widzenia Field of view	60°
Rozdzielczość obrazu intensywności Intensity information resolution	16 bit



Ryc. 5. Interpretacja osuwiska w Zbyszycach na podstawie danych ALS
Fig. 5. Interpretation of landslide in Zbyszycach based on ALS data



Ryc. 6. Aktywność osuwiska określona na podstawie NMT LiDAR
Fig. 6. Landslide activity determined using LiDAR-DTM



Ryc. 7. Porównanie mapy topograficznej w skali 1 : 10 000 (A) z danymi pochodzącymi z NMT LPIS 2003 (B) oraz z danymi ALS (C)

Fig. 7. Comparison of topographic map in scale of 1 : 10 000 (A) with data from the DTM LPIS 2003 (B) and ALS data (C)

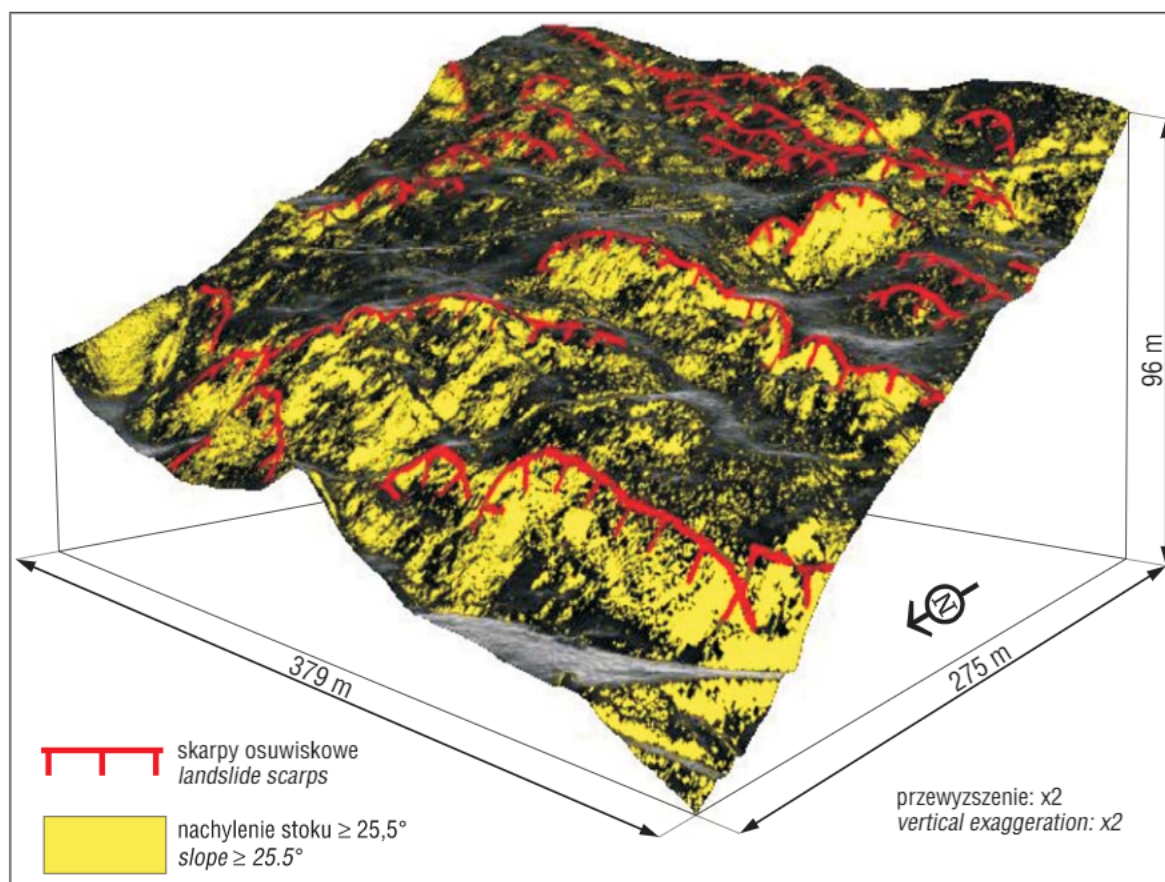
Rożnowskiego, charakteryzujący się dużą aktywnością osuwiska (ryc. 1). Skanowanie wykonano 1 kwietnia 2010 r., a więc w początkowym okresie wegetacji, kiedy stosunkowo słabe pokrycie terenu roślinnością zapewnia wysoką jakość uzyskanego NMT. Pomiar przeprowadziła firma MGGP Aero z Tarnowa przy użyciu systemu ALS LiteMapper 6800i. Specyfikacja pomiaru została przedstawiona w tabeli 1. Skanowanie wykonano ze średnią rozdzielczością 4 punkty na metr kwadratowy. Ponieważ

wspólne pokrycie sąsiednich pasów skanowania dochodziło do 50%, wynikowa rozdzielczość skanowania wyniosła średnio 7 punktów na metr kwadratowy.

Interpretacja danych ALS

Analizę danych ALS obrazujących badany obszar przeprowadzono stosując tradycyjne podejście do ruchów masowych. Osuwisko było wcześniej rozpoznane w oparciu o terenowe zdjęcie geologiczne, następnie wykorzystując różne metody wizualizacji NMT wyznaczono granicę osuwiska (ryc. 5) oraz główne jego elementy (ryc. 6). Zmienność zobrazowań danych ALS umożliwiła uzyskanie dodatkowych danych do interpretacji osuwiska. Zasięg osuwiska wyznaczono również stosując metodę zmiennego oświetlenia modelu (reliefu) cieniowanego oraz bazując na stereoskopowej interpretacji rzeźby terenu wizualizowanej w formie anaglif. W podobny sposób zidentyfikowano skarpy osuwiskowe i progi oraz wyznaczono obszary o wyraźnie pagórkowatej, pofalowanej powierzchni terenu, świadczącej o aktywności osuwiska (ryc. 6).

W modelu rzeźby terenu ALS (ryc. 6) wyraźnie zaznaczają się strefy oderwania materiału skalnego, deponowanego poniżej w formie aktywnego jęzora. Pagórkowata powierzchnia tych form świadczy o ich aktywności. Korzystając zatem z danych ALS podjęto próby wyznaczenia młodych i świeżych osunięć wraz z kierunkami transportu materiału koluwalnego. Ma to szczególne znaczenie na obszarach trudno dostępnych i porośniętych roślinno-



Ryc. 8. Interpretacja skarpy osuwiskowych na stoku Dąbrowskiej Góry na podstawie mapy spadków
Fig. 8. Interpretation of landslide scarps on the slope Dabrowska Gora on a slope map

ścią, która maskuje deformacje powierzchni terenu. Rycina 6 przedstawia fragment osuwiska rozwiniętego wzdłuż drogi wojewódzkiej nr 975. W jego centralnej części znajduje się plac ze stacją paliw, poniżej którego powstała skarpa główna osuwiska. W ciągu kilku ostatnich lat retrogresja skarpy głównej postępowała w kierunku drogi, coraz bardziej zagrażając obiektowi. Dane ALS prezentujące stan na kwiecień 2010 dokumentują aktywną strefę osuwiska powstałą bezpośrednio za stacją paliw. Wyraźnie widoczne są deformacje powierzchni w obrębie koluwiów poniżej skarpy głównej. Należy podkreślić, że dolna część tego obszaru znajduje się na terenach zalesionych.

Korzystając z danych ALS wygenerowano warstwice o cięciu 1 m i porównano z mapą topograficzną w skali 1 : 10 000 i danymi pochodzącymi z NMT LPIS 2003 (Preuss & Kurczyński, 2002; ryc. 7). Rysunek poziomicowy z danych ALS znacznie przewyższa szczegółowością dotychczasowe źródła informacji o tym terenie. Widoczne są zestromienia stoku związane ze skarpami osuwiskowymi lub z progami akumulacyjnymi oraz wypłaszczenia w obrębie osuwiska powstałe w wyniku przemieszczenia mas skalnych. Należy zaznaczyć, że obszar przedstawiony na rycinie porównawczej (ryc. 7) pokryty jest lasem, co dodatkowo podkreśla zalety skaningu laserowego, skutecznie eliminującego wpływ roślinności maskującej rzeźbę osuwiskową.

Porównując dane ALS z materiałami terenowymi pozyskiwanymi w latach 2004–2006 stwierdzono, że w obu przypadkach granice osuwiska są podobne. Dane laserowe ze względu na swoją wysoką dokładność umożliwiły uszczegółowienie informacji o osuwisku. Różnice są związane z aktywnością osuwiska, która powoduje ciągle powiększanie się jego granic w górnych częściach stoku. Dokładna analiza NMT ALS wykazała jednak problemy z identyfikacją skarp osuwiskowych zlokalizowanych na stromych stokach Dąbrowskiej Góry. Na stoku tym udokumentowano w terenie kilkanaście skarp osiągających 15 m wysokości, co nie znalazło jednoznacznego potwierdzenia w laserowym modelu rzeźby terenu. Przyczyny tego stanu rzeczy należy upatrywać w niewielkich różnicach pomiędzy nachyleniem skarp osuwiskowych a nachyleniem stoku. Nachylenie skarp jest często nieznacznie większe od stromego nachylenia stoku, przez co formy te nie są dostrzegane lub są słabo widoczne na poszczególnych wizualizacjach NMT. Dokładną lokalizację skarp wraz z ich geometrią udało się wyznaczyć poprzez analizy rysunków poziomicowych wygenerowanych z danych ALS (ryc. 7), zaś szczególnie pomocne okazały się tu wytyczone przekroje morfologiczne oraz sklasyfikowana mapa nachyleń powierzchni (ryc. 8). Średnie nachylenie stoku wynosi 16,4°, w związku z tym poszukiwano obszarów bardziej stromych od obliczonej wartości. Najlepsze rezultaty w klasyfikacji mapy spadków uzyskano po przyjęciu przedziału 25,5°–90° (ryc. 8). Na otrzymanych wynikach górne zasięgi bardziej stromo nachylonych obszarów układają się w półkoliste i cylindryczne formy, które zinterpretować można jako skarpy osuwiskowe. W oparciu o powyższe analizy, na północnych stokach Góry Dąbrowskiej zidentyfikowano 40 skarp wtórnych związanych z oderwaniem materiału skalnego. Często są to formy małe, które w skali 1 : 10 000 nie zostałyby zaznaczone na mapie.

PODSUMOWANIE I PERSPEKTYWY DALSZYCH BADAŃ

Rezultaty badań przedstawione w niniejszym artykule pokazują duże możliwości lotniczego skaningu laserowego w pomiarach inwentaryzowanych osuwisk. Wysokorozdzielczy NMT ALS dostarcza wiele informacji o rzeźbie osuwiska, jego zasięgu, morfometrii a nawet umożliwia wyznaczenie stref wzmoczonej aktywności. Dużą zaletą metody jest możliwość filtracji danych i eliminacji pokrycia roślinnego. Ma to szczególne znaczenie w interpretacji osuwisk pokrytych lasem, gdzie z dużą precyzją można wyznaczyć elementy wewnątrzosuwiskowe. Umiejętna analiza precyzyjnego NMT ALS pozwala na wstępną interpretację obszaru badawczego, co może znacznie przyspieszyć i ukierunkować prace terenowe. Jak wykazała interpretacja osuwiska w Zbyszycach, szczegółowe badanie wymaga jednak zastosowania kilku technik analitycznych i wizualizacyjnych oraz doświadczenia w konwencjonalnym kartowaniu osuwisk.

Prace związane z dalszą inwentaryzacją osuwisk na podstawie danych ALS będą kontynuowane na obszarze objętym skanowaniem. Ponadto podejmowane są próby integracji tych danych z satelitarną interferometrią radarową (Perski i in., 2011), a w przyszłości NMT ALS wykorzystany zostanie do określenia podatności osuwiskowej obszaru badań. Najważniejszym jednak zadaniem będzie obliczenie modelu różnicowego bazującego na danych laserowych, który w sposób ilościowy określi dynamikę ruchów masowych, jaką można było obserwować w roku 2010. Katastrofalne skutki intensywnych opadów atmosferycznych wiosną 2010 r., powodujących powstanie licznych osuwisk na obszarze Karpat, skłoniły Państwowy Instytut Geologiczny do przeprowadzenia lotniczego skaningu laserowego wykonanego w dniu 2 lipca 2010 r. na wybranych obszarach Karpat – jeden z tych obszarów dokładnie pokrywa się z prezentowanym w niniejszym artykule terenem badań.

Kolejnym zagadnieniem podjętym przez zespół jest automatyzacja poszczególnych etapów prac związanych z inwentaryzacją osuwisk, np. automatyczne wyznaczenie zasięgu osuwiska na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009–2012 jako projekt badawczy MNiSW N N526 146037.

LITERATURA

- BALDO M., BIOCCHI C., CHIOCCHINI U., GIORDAN D. & LOLLINO G. 2009 – LiDAR monitoring of mass wasting processes: The Radicofani landslide, Province of Siena, Central Italy. *Geomorphology*, 10: 193–201.
- BORKOWSKI A. 2004 – Modellierung von Oberflächen mit Diskontinuitäten. *Deutsche Geodätische Kommission. München, Reihe C, Heft 575*, 91 s.
- BORKOWSKI A. 2006 – Lotniczy skaningu laserowy jako metoda pozyskiwania danych dla potrzeb modelowania hydrodynamicznego. Aktualne problemy rolnictwa, gospodarki żywnościowej i ochrony środowiska. AR Wrocław: 129–136.
- BORKOWSKI A. & JÓZKÓW G. 2008 – Airborne Laser Scanning Data Filtering Using Flakes. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVII, Part B3b: 179–184.
- BORKOWSKI A., PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., JÓZKÓW G. & WÓJCIK A. 2011 – Landslides mapping in Roznow lake vicinity,

- Poland using airborne laser scanning data. *Acta Geodyn. Geomater.*, 8, 3(163): 325–333.
- BURTAN J., CIESZKOWSKI M., JAWOR E. & ŚLĄCZKA A. 1992 – Budowa geologiczna okna tektonicznego Klęczan – Limanowej. *Przew. LXIII Zjazdu PTG*, Wydawnictwo Instytutu Nauk Geologicznych PAN, Koninki: 171–179.
- BURTAN J. & SKOCZYLAŚ-CISZEWSKA K. 1964 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1 : 50 000 (wydanie tymczasowe), arkusz Męcina, WG Warszawa.
- CHIGARA M., DUAN F., YAGI H. & FURUYA T. 2004 – Using an airborne laser scanner for the identification of shallow landslides and susceptibility assessment in an area of ignimbrite overlain by permeable pyroclastics. *Landslides*, 1: 203–209.
- DIKAU R., BRUNSDEN D., SCHROTT L. & IBSEN L.M. (eds.) 1996 – *Landslide Recognition: Identification, Movement and Causes*. Wiley & Sons, 251 s.
- GORCZYCA E. 2004 – Przekształcenie stoków fliszowych przez procesy masowe podczas katastrofalnych opadów (dorzecze Łososiny). Wydawnictwo UJ, Kraków, 101 s.
- GRABOWSKI D. 2008 – System Osłony Przeciwośuwiskowej SOPO. *Prz. Geol.*, 56: 537–538.
- GRABOWSKI D., MARCINIEC P., MROZEK T., NESCIERUK P., RĄCZKOWSKI W., WÓJCIK A. & ZIMNAL Z. 2008 – Instrukcja opracowania Mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi w skali 1 : 10 000. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa, 92 s.
- HAUGERUD R. A., HARDING D. J., JOHNSON S.Y., HARLESS J. L. & Weaver C. S. 2003 – High-Resolution Lidar Topography of the Puget Lowland, Washington – A Bonanza for Earth Science. *GSA Today*, 13 (6): 4–10.
- JABOYEDOFF M., OPPIKOFER T., ABELLA'N A., DERRON M. H., LOVE A., METZGER R. & PEDRAZZINI A. 2010 – Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*, 61 (1), 5–28.
- NITA J., BARDZIŃSKI W., KUROWSKA E., LEWANDOWSKI J., MANOWSKA M., SALAMON T. & WOJCIECHOWSKI T. 2006 – Opracowanie studium wykonalności możliwości przesiedlenia ludności zamieszkującej na obszarze osuwiska określonej w Karcie Dokumentacyjnej Osuwiska nr 1 – stabilizacja osuwiska w miejscowości Zbyszycze w ciągu drogi gminnej nr 2523087 Dąbrowa–Zbyszycze (12/10/032/1). Urząd Gminy Gródek n/Dunajcem, 41 s.
- OZIMKOWSKI W., RUBINKIEWICZ J., ŚMIGIELSKI M. & KONON A. 2010 – Metodyka prac analitycznych i kartograficznych w problematyce osuwisk karpackich w Polsce (w ramach projektu Systemu Osłony Przeciwośuwiskowej SOPO). Wydawnictwo Liber. Warszawa, 73s.
- PERSKI Z., BORKOWSKI A., WOJCIECHOWSKI T. & WÓJCIK A. 2011 – Application of persistent scatterers interferometry for landslide monitoring in the vicinity of Roznow Lake in Poland. *Acta Geodyn. Geomater.*, 8, 3(163), 319–323.
- POPRAWA D. & RĄCZKOWSKI W. 2003 – Osuwiska Karpat. *Prz. Geol.*, 51 (8): 685–692.
- PREUSS R. & KURCZYŃSKI Z. 2002 – Koncepcja wytworzenia ortofotomapy Polski dla potrzeb systemu identyfikacji działek rolnych – LPIS. *Szansa i wyzwanie. Geodeta*, 8, (87).
- RĄCZKOWSKI W. & MROZEK T. 2002 – Activating of landsliding in the Polish Flysch Carpathians by the end of the 20th century. *Stud. Geomorph. Carpatho-Balcan.*, 36: 91–111.
- RAZAK K. A., STRAATSMA M.W., VAN WESTEN C. J., MALET J.-P. & DE JONG S.M. 2011 – Airborne laser scanning of forested landslides characterization: Terrain model quality and visualization. *Geomorphology*, 126: 186–200.
- SCHULZ W.H. 2007 – *Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records*, Seattle, Washington. *Engineering Geology*, 89: 67–87.
- SEKIGUCHI T. & SATO H.P. 2004 – Mapping of microtopography using airborne laser scanning. *Landslides*, 1: 195–202.
- STARKEL L. 1972 – Charakterystyka rzeźby polskich Karpat i jej znaczenie dla gospodarki ludzkiej. *Probl. Zagosp. Ziem Górs.*, 10: 75–150.
- VARNES D. J. 1978 – Slope movement types and processes. [In:] Schuster R., Krizek R. (eds.) – *Landslides – Analysis and control*, Transportation Research Board, NRC Washington, D.C., Special Report, 176: 12–33.
- VÖSSELMAN G. & MAAS, H-G. 2010 – *Airborne and terrestrial laser scanning*. Whittles Publishing, Dunbeath.
- WOJCIECHOWSKI T. 2007 – Osuwisko w Zbyszycach. *Pr. Nauk. Inst. Gór. PWroc.*, 120, seria 49: 315–324.
- ZUCHIEWICZ W. 1990 – Utwory czwartorzędowe Pogórza Rożnowskiego w Karpatach Zachodnich. Quaternary deposits of the Rożnow Foothills, Polish West Carpathians. *Prz. Geol.*, 38 (7–8): 307–315.

Praca wpłynęła do redakcji 6.07.2011 r.

Po recenzji akceptowano do druku 3.11.2011 r.

