

Identyfikacja osuwisk w gminie Łososina Dolna na podstawie danych lotniczego skanowania laserowego

Identification of landslides in Łososina Dolna commune based on spatial data from airborne laser scanning

Paweł Kroh¹, Paweł Struś¹, Elżbieta Gorczyca²,
Dominika Wrońska-Wałach², Michał Długosz³

¹Institut Geografii, Uniwersytet Pedagogiczny
ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków,

e-mail: pkroh@up.krakow.pl, pstrus@up.krakow.pl,

² Institut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków,

e-mail: elzbieta.gorczyca@uj.edu.pl, dominika.wronska-walach@uj.edu.pl

³ Institut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyckiego PAN
ul. Św. Jana 22, 31-018 Kraków
e-mail: dlugosz@zg.pan.krakow.pl

Abstract: Airborne Laser Scanning (Light Detection and Ranging – LiDAR) have proven to be a helpful tool in the analysis of mass movements. Even though LiDAR has been used in the environmental sciences recently, studies using these methods in the analysis of landslides are numerous.

The aim of the study was to determine the ability to identify landslides in the commune scale based on spatial data from airborne laser scanning within the framework of "Information System of the National Guards against extraordinary threats" (ISOK).

The assumption of the applied method was to determine the landslides areas, without fieldwork mapping, based only on data obtained from point clouds and afterwards to verify gathered results. Two researchers, lacking knowledge concerning study area, prepared the Digital Elevation Model from the point clouds and based on these data recognized the landslides as well as hazardous areas. The second part of the research team who previously made a detailed terrain landslides mapping in the study area had the task of verifying the outcomes of the first stage. Subsequently, combined analysis of mistakes made by the first part of research team was carried out and the capabilities and limitations of the method was established.

Comparison of materials obtained from diverse data sources permit to perform two-way verification of conducted research. Mistakes coming from either vague parts of point cloud' DEM or terrain landslide mapping in forested areas were recognized.

Słowa kluczowe: LiDAR, numeryczny model terenu, osuwiska, społeczność lokalna

Key words: LiDAR, digital elevation model, landslides, local community

Wstęp

Skanowanie laserowe stało się jednym z podstawowych narzędzi w badaniach ruchów masowych (Jaboyedoff i in. 2012). Krótki czas zbierania danych źródłowych w terenie, bardzo wysoka precyzja pomiaru, wielowymiarowość zawartych informacji w danych źródłowych i inne cechy tej metody spowodowały dynamiczny rozwój stosowania narzędzi związanych ze skanowaniem laserowym w naukach przyrodniczych. Możliwości wykorzystania danych skaningowych znajdują zastosowanie w geomorfologii (np. Jaboyedoff i in. 2012; Owerko i in. 2013), hydrologii (np. Milan 2009), naukach leśnych (np. Alberti i in. 2013; Wężyk i in. 2013), archeologii (Valzano i in. 2005; Cruthley 2009) i wielu innych.

Opracowania wykorzystujące tę metodę w badaniu osuwisk są liczne, a wnioski z nich płynące wydają się bardzo obiecujące dla przyszłych badań. Skanowanie laserowe wydaje się więc zarówno wciąż wkraczającym, jak i już standardowym narzędziem w badaniach geomorfologicznych.

Przy badaniach osuwisk lub innych ruchów masowych stosowane jest zarówno skanowanie naziemne (terrestrial laser scanning – TLS) jak i lotnicze (airborne laser scanning – ALS). Przykładami opracowań opartych na TLS mogą być analizy zagrożenia obrywami na wzniesieniu zbudowanym z tufów wulkanicznych (Fanti i in. 2012), niestabilności ścian skalnych (Oppikofer i in. 2012), monitoring stanu osuwiska pokrytego wtórną roślinnością (Franz i in. 2013) czy analiza zmian morfologii klifów nadmorskich (Kramarska 2011). Połączone dane naziemne i lotnicze zastosowane zostały przy analizie objętości mas skalnych przemieszczonych w wyniku spływu gruzowego (Bremer, Sass 2012) dając bardzo precyzyjne wyniki. Skanowanie laserowe wykorzystywane jest też do monitoringu osuwisk prowadzonego przez Oddział Karpacki Państwowego Instytutu Geologicznego między innymi w ramach Systemu Osłony Przeciwosuwiskowej (SOPO).

Jedną z pierwszych prac dotyczących bezpośrednio identyfikacji osuwisk na danych lidarowych była praca zespołu badawczego z Holandii, który analizując numeryczny model terenu określał zasięgi osuwisk w terenie leśnym. Porównano interpretacje siedmiu niezależnych ekspertów mających za zadanie określenie zasięgu osuwisk na modelu terenu. Wyniki tej pracy wykazały bardzo duże rozbieżności w interpretacji NMT, a powierzchnie osuwisk określone przez poszczególnych badaczy wahały się między 116 a 744 ha (Van den Eeckhaut i in. 2007).

Końcem poprzedniej i początkiem obecnej dekady studia nad osuwiskami oparte o NMT wykonane na podstawie chmury punktów ze skanowania laserowego w znacznym stopniu się rozwinęły (np. Ardizzone i in. 2007; Booth i in. 2009; Bell i in. 2012; Razak i in. 2013 i inne)

Badania w Polsce z wykorzystaniem lotniczego skanowania laserowego były wykonywane na osuwiskach w Zbyszycach na Pogórzu Ciężkowickim (Wojciechowski i in. 2012) oraz w Łańcicy w Lanckoronie na Pogórzu Wielickim (Graniczny i in. 2012). Identyfikacja osuwisk na podstawie NMT wykonanego z chmury punktów wykonana została także przez A. Wójcika i

in. (2013) i dostarczyła bardzo interesujące wyniki związane z osuwiskami powstającymi na podłożu granitoidowym.

Lotnicze skanowanie laserowe otwiera możliwości badań wielkopowierzchniowych. Duża dostępność danych ze skanowania lotniczego (o czym poniżej) powoduje, że wypracowanie metodyki wyznaczania terenów zagrożonych ruchami masowymi opartej na tych danych wydaje się istotnym i bardzo aktualnym problemem. Wykonanie w Polsce „Informatycznego Systemu Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami” (ISOK) otwiera ogromne możliwości wykorzystania danych ALS. Pomimo tego, że projekt ten ma na celu przede wszystkim ochronę przeciwpowodziową, dane mogą służyć w wielu analizach przyrodniczych. Jedną z potencjalnych możliwości jest określenie terenów zagrożonych osuwaniem. Wypracowanie metody identyfikacji tych terenów umożliwiłoby nie tylko ich wyznaczenie, ale także weryfikację miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego pod tym kątem.

Obszar badań

Obszar badań – gmina Łososina Dolna – leży w Karpatach fliszowych, na pograniczu Beskidów (Beskid Wyspowy) i Pogórza Karpackiego (Pogórze Wielickie) (Starkel 1972). Najwyższe wzniesienia obszaru badań występują w części beskidzkiej i osiągają 900 m n.p.m. (Jaworz, 921 m n.p.m.). Część pogórska gminy osiąga wysokości dochodzące do 400 m n.p.m. (Ostra Góra 455 m n.p.m.).

Gmina Łososina Dolna położona jest w obrębie Karpat Zewnętrznych, obszar ten zbudowany jest ze skał fliszowych płaszczowiny magurskiej, jednostki grybowskiej, płaszczowiny śląskiej i strefy Michalczowej wieku głównie kredowego i paleogeńskiego (Burtan, Skoczylas-Ciszewska 1964; Cieszkowski 1990; Burtan i in. 1991; Paul 1997). Część górską zajmuje około 49,5% całkowitej powierzchni gminy i jest to obszar występowania jednostki magurskiej i grybowskiej. Część pogórska gminy zbudowana jest ze skał jednostki śląskiej i strefy Michalczowej (Cieszkowski 1992).

Rzeźba części beskidzkiej posiada głównie cechy typu gór niskich i średnich oraz pogórzy średnich (Starkel 1972). Przeważające nachylenia stoków mieszczą się w przedziale od 10 do 35°, zaś wysokości względne kształtują się w przedziale od 300 do 340 m w części górskiej i od 140 do 180 m w części pogórskiej. Długość stoków wynosi tu od 0,6-0,8 km do ok. 1 km. W części pogórskiej rzeźba cechuje się typem pogórzy niskich i niewielkimi płatami pogórzy średnich. Wraz ze zmianą typu rzeźby zmienia się także przedział wysokości względnych od 120 do 150 m, stoki są zdecydowanie krótsze od beskidzkich, a nachylenia mieszczą się w przedziale od 5 do 25°.

Obszar gminy leży w dużym stopniu nad Zbiornikiem Rożnowskim zbudowanym w latach 30-tych XX wieku na rzece Dunajec. Pozostała część gminy jest odwadniana przez Łososinę. Obszar gminy charakteryzuje się przeważającym udziałem użytków rolnych (54%) w ogólnym areale gruntów. Tereny leśne stanowią 26% powierzchni. Gmina ma profil rolniczo-

sadowniczy i turystyczny. Zabudowa na terenie gminy jest w dużym stopniu rozproszona, większe skupiska zabudowań występują w dnach dolin. Pojedyncze gospodarstwa występują w bardzo dużym rozproszeniu, na stokach, w obszarach wododzielnych, na polanach śródleśnych. Zabudowa występuje do wysokości 700-750 m n.p.m.

Rozwój osuwisk na stokach w gminie Łososina Dolna

W gminie Łososina Dolna w latach 2010-2011 w ramach prac w Projekcie SOPO rozpoznano i udokumentowano 572 osuwiska o łącznej powierzchni 1280 ha. Stwierdzono w tym czasie 298 osuwisk aktywnych na całej powierzchni, 69 form częściowo aktywnych i 205 osuwisk nieaktywnych (Gorczyca, Wrońska-Wałach 2011).

Wskaźnik osuwiskowości powierzchniowej (stosunek łącznej powierzchni osuwisk na danym terenie do powierzchni tego terenu) dla gminy Łososina Dolna jest wysoki i wynosi 17,2%. Drugi wskaźnik – gęstości osuwisk (stosunek liczby osuwisk na danym terenie do powierzchni terenu) wynosi 8 osuwisk na km² (Bober 1984). Większość z zarejestrowanych osuwisk ma charakter zsuwów skalno-zwietrzelinowych i zwietrzelinowych (translacyjnych, rotacyjnych lub złożonych). Największą osuwiskowością cechuje się obszar przylegający do zbiornika Rożnowskiego (Gorczyca, Wrońska-Wałach 2011).

Średnia wielkość badanych osuwisk wynosi 2,3 ha, a maksymalna 45 ha. Ponad połowa (325 form) udokumentowanych osuwisk to są formy bardzo małe i małe o powierzchni <1 ha (łączna powierzchnia 102,5 ha). 185 osuwisk ma powierzchnię 1-5 ha (łączna powierzchnia 425,9 ha), 33 osuwiska mają powierzchnię 5-10 ha (łączna powierzchnia 223,46 ha), a tylko 29 osuwisk ma wielkość powyżej 10 ha (łączna powierzchnia 525,43 ha). Duże osuwiska występują najczęściej w części beskidzkiej, na obszarach zalesionych, najczęściej w górnych częściach stoków i w lejach źródłowych (Gorczyca, Wrońska-Wałach 2011; Gorczyca i in. 2013).

W części beskidzkiej udokumentowano 178 osuwisk (44,5% powierzchni wszystkich osuwisk), występujących głównie w lejach źródłowych, w dolnych partiach stoków lub zajmujących całe stoki. Skarpy główne tych osuwisk mają w przewodzie wysokości 3-6 m, przy czym duże osuwiska mają skarpy wyższe do 10 m, nachylenia skarp w większości przypadków wynoszą ok. 35°. W większych osuwiskach dosyć liczne są skarpy wtórne, występują tu także progi akumulacyjne, pagórki z materiału koluwalnego, zagłębienia wewnątrzosuwiskowe, formy skałkowe oraz rowy rozpadlinowe. Większość udokumentowanych tu osuwisk ma czoła o wysokości do 3 m, ale zdarzają się również formy, których czoła osiągają wysokość 30 m. Czoła osuwisk przeważnie schodzą bezpośrednio do den dolin lub dochodzą do powierzchni taras rzecznych. Materiał koluwalny stanowią w przewodzie utwory zwietrzelinowe oraz skalno-zwietrzelinowe – gliny z rumoszem, iły i gliny.

Osuwiska rozpoznane w górnych partiach stoków i w lejach źródłowych porośnięte są przeważnie lasami i w większości nie zostały w

2010 r. uaktywnione. Natomiast większość aktywnych w 2010 r. osuwisk, usytuowanych w niższych partiach stoków i na stokach mniejszych dolin, znajduje się na obszarach otwartych – nieużytkach, pastwiskach i polach uprawnych.

W części pogórskiej rozpoznano 395 osuwisk, co stanowi około 69% wszystkich osuwisk w gminie. Łączna powierzchnia tych osuwisk wynosi 710,5 ha, co stanowi 55,5% powierzchni wszystkich osuwisk. Największa liczba osuwisk występuje w środkowej i wschodniej części gminy, w zlewni Dunajca nad zbiornikiem Rożnowskim. Osuwiska udokumentowane na tym obszarze występują głównie w dolnych partiach stoków i na zboczach. Część pogórska jest w bardzo dużym stopniu wylesiona i w znacznym stopniu przekształcona przez użytkowanie rolnicze. Granice zdecydowanej większości osuwisk są w miarę dobrze czytelne w terenie; zwłaszcza osuwisk uaktywnionych w 2010 r. Skarpy główne tych osuwisk mają przeważnie wysokości do 3 m, przy czym duże osuwiska mają skarpy wyższe 6-10 m. Nachylenia skarp w większości przypadków wynoszą ok. 20°. W większości osuwisk powyżej 5 ha występują progi akumulacyjne, pagórki z materiału koluwalnego i zagłębienia wewnątrzosuwiskowe.

Metoda

Celem badań było określenie możliwości identyfikacji terenów osuwiskowych w skali gminy na podstawie surowych danych przestrzennych z lotniczego skanowania laserowego wykonanego w ramach projektu ISOK (tzw. chmury punktów).

Ogólne założenia metody skanowania laserowego zostały już określone w wielu publikacjach (m.in. Heritage, Large 2009; Graniczny 2012; Wojciechowski 2012) i nie ma potrzeby ponownego ich wyjaśniania. Obszar, na którym prowadzono badania, znalazł się w strefie I systemu ISOK, gdzie gęstość punktów wynosi 4 pkt/m². Tak więc średnia rozdzielczość analizowanych danych przestrzennych wynosi 0,5 m.

Metodę, którą zdecydowaliśmy się zastosować w ramach tego projektu można by określić roboczym mianem „subiektywizmu specjalistycznego”. Założeniem tej metody było, by nie znając terenu badań określić tereny osuwiskowe na podstawie modelu terenu wykonanego z chmury punktów, a następnie wyniki poddać weryfikacji. Dwóch badaczy nie znających terenu badań, ale umiejących interpretować chmury punktów, wykonało numeryczny model terenu i na jego podstawie (po przetworzeniu na hillshade z azymutów 45°, 135°, 225° i 315°) wyznaczyło osuwiska. Ze względu na konieczne kwalifikacje (geografowie, którzy wielokrotnie mieli styczność zarówno z osuwiskami, jak i ich zobrazowaniami w postaci map lub innych danych przestrzennych), trudno mówić o obiektywnej interpretacji danych, stąd też założony w metodzie subiektywizm.

Na drugiej części zespołu badawczego spoczęło zadanie weryfikacji wyników wypracowanych w pierwszym etapie. Aby weryfikacja była wiarygodna, do badań wybrano obszar szczegółowo skartowany w terenie przez drugą część zespołu w skali 1:10 000. Po tej weryfikacji przeprowadzono wspólną

analizę popełnionych przez pierwszy zespół błędów. Następnie dokonano próby identyfikacji przyczyn, które spowodowały powstanie tych błędów, a tym samym określono możliwości i ograniczenia zastosowanej metody.

Dane źródłowe zostały więc pozyskane w dwojaki sposób. Jednym były badania terenowe, natomiast drugim – cyfrowa obróbka danych pochodzących ze skanowania laserowego.

Prace terenowe

Mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi dla gminy Łososina Dolna wykonano na podstawie prac terenowych przeprowadzonych w latach 2010-2011. Prace te polegały na rozpoznaniu i udokumentowaniu osuwisk oraz terenów zagrożonych ruchami masowymi na terenie gminy poprzez wykonanie zdjęcia geologicznego osuwisk, charakterystyki geomorfologicznej i geologicznej osuwisk, ocenie stopnia aktywności osuwisk i możliwości ich dalszego rozwoju oraz ocenie zagrożeń, jakie stanowią osuwiska dla zabudowań i infrastruktury gminnej. Wyniki rejestracji osuwisk, opartej na terenowych pracach geologiczno-kartograficznych, zostały przedstawione na mapach topograficznych w skali 1:10 000. Opracowanie to zostało wykonane zgodnie z zatwierdzonym przez Państwowy Instytut Geologiczny (PIG) programem prac geologicznych w ramach tematu „System Osłony Przeciwosuwiskowej SOPO”. Rejestrację wykonano zgodnie z „Instrukcją opracowania Mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi w skali 1:10 000” (Grabowski i in. 2008).

Wyniki prac w postaci map z zasięgami i stopniem aktywności osuwisk oraz wypełnionych kart rejestracyjnych są zgromadzone w bazie danych SOPO i ogólnodostępne dla wszystkich użytkowników za pośrednictwem Internetu.

Przyczyną tak dużej liczby osuwisk w obszarze badań może być występowanie w podłożu licznych nieciągłości (uskoków i spękań) oraz usytuowanie w obrębie nasunięcia płaszczowiny magurskiej na jednostkę śląską. Charakterystyczne w tym obszarze jest również występowanie na stosunkowo krótkich odcinkach skał o różnych właściwościach mechanicznych (piaskowce, łupki). Można przypuszczać, że infiltracja wód opadowych i roztopowych, a także sprzyjający układ spękanych warstw skalnych są przyczyną uruchomienia zdecydowanej większości osuwisk. Ważnym czynnikiem wpływającym na powstanie i rozwój osuwisk jest podcinanie erozyjne zboczy osuwiskowych czy też czoł osuwisk przez ciek. Zupełnie współczesną przyczyną intensyfikacji ruchów masowych jest powstanie w latach 30-tych XX w. zbiornika zaporowego na Dunajcu. Natomiast współcześnie, oprócz czynników naturalnych, na uaktywnianie osuwisk mogą wpływać także czynniki antropogeniczne, np. wstrząsy i wibracje związane z ruchem samochodowym czy brak odwodnienia.

W okresie poprzedzającym badania terenowe doszło do uaktywnienia dużej części osuwisk. Przyczyną tego były wysokie opady występujące w maju i czerwcu 2010 r. w południowej Polsce. Opady w okresie od kwietnia do września 2010 r. były w Karpatach wyraźnie wyższe niż średnie

w wieloleciu 1971–2000 (Biuletyn Monitoringu Klimatu Polski, IMGW). Największe znaczenie dla uaktywnienia osuwisk miały dwa kilkudniowe okresy opadowe. Pierwszy z nich miał miejsce w okresie od 15 do 20 maja i związany był z „deszczonośnym” niżem przemieszczającym się szlakiem V-B znad Adriatyku przez Bałkany nad Karpaty. Najwyższe opady wystąpiły w tym okresie w zachodniej części Karpat Polskich przekraczając 300 mm. Kolejny okres opadów wystąpił w dniach od 31 maja do 4 czerwca i związany był z zatokami układu niskiego ciśnienia, który pod koniec maja przemieścił się znad Atlantyku przez południowe Niemcy nad rumuńskie Karpaty. Najwyższe opady, przekraczające 150 mm na dobę, wystąpiły wówczas m.in. nad obszarem badań – nad Beskidem Wyspowym i Kotliną Nowosądecką. Seria dwóch zdarzeń opadowych w krótkim odstępie czasu, jaka wystąpiła w obszarze badań, jak i dodatkowo nałożenie się opadów nawalnych na rozlewne przyczyniły się do zaburzenia równowagi na stokach i intensyfikacji ruchów osuwiskowych na bardzo dużą skalę.

Cyfrowa obróbka danych

Postępowanie badawcze rozpoczęto od zakupu danych przestrzennych (sklasyfikowanej chmury punktów) z zasobów Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii. Następnie wyodrębniono z chmury punktów klasy niezbędne do przeprowadzenia wizualnej interpretacji rzeźby terenu i oszacowania liczby budynków wybudowanych na osuwiskach – klasę „grunt” i „budynki”. Z punktów chmury pochodzących z klasy „grunt” wygenerowano Numeryczny Model Terenu o rozdzielczości przestrzennej 0,5 metra przy pomocy narzędzi LasTools pracujących w środowisku ArcGIS. Na podstawie NMT utworzono mapę cieniowania rzeźby terenu. Standardowe cieniowanie, o kierunku oświetlenia z północnego zachodu (315°) okazało się niewystarczające, więc uzupełniono je o warianty zobrazowań oświetlone z innych kierunków (135° , 225° , 45°). Wyświetlanie na przemian poszczególnych obrazów cieniowanych w trakcie kreślenia zasięgu osuwisk znacznie ułatwiło podjęcie decyzji interpretacyjnych.

Obiekty z klasy „budynki” przekształcono na warstwę poligonową, łącząc punkty tej klasy będące bliżej siebie niż 2 metry używając funkcji „merge” (w pakiecie ArcGIS). Pozyskanie informacji o budynkach z chmury punktów, a nie z mapy ewidencyjnej umożliwiło przedstawienie faktycznego stanu zabudowy w danym momencie (2013). Z kolei tak wygenerowana warstwa zawiera w sobie wszystkie obiekty typu zadaszona, wolnostojące garaże itp., które trudno uznać za zabudowania w pełnym tego słowa znaczeniu. Warstwę „budynki”, utworzoną na podstawie chmury punktów, przecięto z warstwami osuwiskowymi wykonanymi przez różnych autorów (funkcja „intersect”) określając obszary wspólne. Uzyskano w ten sposób mapę liczby i przestrzennego rozkładu budowli położonych na terenach zagrożonych osuwaniem.

Sam proces kreślenia i szacowania obszarów osuwiskowych przeprowadzono na ekranie monitora (pakiet ArcGIS / QGIS). W przypadku obydwu rysowników na ten etap pracy poświęcono około 48 godzin pracy.

Wyniki

Podstawą do analiz powierzchniowych były trzy warstwy w formacie *.shp. Porównanie powierzchni skartowanej przez badaczy terenowych oraz dwóch niezależnych „rysowników” na numerycznym modelu terenu dało stosunkowo zbieżne wyniki. Łączna powierzchnia osuwisk skartowanych w terenie wyniosła 12,80 km² (tab. 1). Obaj badacze, analizujący materiały kartograficzne, wykazali większe powierzchnie podlegające osuwaniu. Rysownik 1. określił 14,55 km² jako tereny osuwiskowe. Rysownik 2. za takie tereny uznał 15,49 km². Przyjmując powierzchnię osuwisk skartowanych w terenie jako 100%, wartości te stanowiły odpowiednio 114 i 121% tej powierzchni.

Duża rozbieżność wyników pojawiła się w liczbie osuwisk. W trakcie prac terenowych skartowano 572 niezależne formy osuwiskowe. Liczba form skartowanych na podstawie NMT znacznie różni się od tej, która została skartowana w terenie. Pierwszy z kartujących określił tą liczbę na 489, drugi na 194 (tab. 1). Dyskusja tak odmiennych wyników została przedstawiona w dalszej części publikacji.

Określanie terenów osuwiskowych na podstawie skanowania laserowego oraz numerycznego modelu terenu może być bardzo przydatnym narzędziem nie tylko do celów naukowych, ale także do zastosowań aplikacyjnych. Aby zweryfikować przydatność zastosowanej metodyki do planowania przestrzennego podjęto próbę określenia liczby budynków położonych na terenach osuwiskowych. Zbieżność wyników obu analiz kameralnych jest bardzo duża (tab. 2).

Najmniejszą liczbę budynków (1364) stwierdzono na osuwiskach skartowanych w ramach prac terenowych, największą na osuwiskach określonych przez „Rysownika 2” na numerycznym modelu terenu (1423). Różnica między największą i najmniejszą liczbą budynków zagrożonych osuwaniem wynosi 59 obiektów, co stanowi zaledwie 4% łącznej ich sumy.

Tabela 1. Różnice w powierzchni osuwiskowej oraz liczbie osuwisk będącej efektem kartowania terenowego oraz kartowania na numerycznym modelu terenu.

Table 1. Discrepancy in the areas and number of landslides obtained based on detailed terrain landslide mapping and established on Digital Elevation Model.

	Powierzchnia [ha]	Powierzchnia [%]	Liczba osuwisk
Prace terenowe	1280	100	572
Rysownik 1	1455	114	489
Rysownik 2	1549	121	194

Tabela 2. Różnice w liczbie budynków położonych na osuwiskach w odniesieniu do różnych kartowań powierzchni osuwiskowych.

Table 2. Discrepancy in the number of buildings located on landslides in relations to different methods of landslide's area identification.

	Liczba budynków na zidentyfikowanych osuwiskach	Różnica w liczbie budynków [%]
Prace terenowe	1364	100
Rysownik 1	1402	103
Rysownik 2	1423	104

Dyskusja

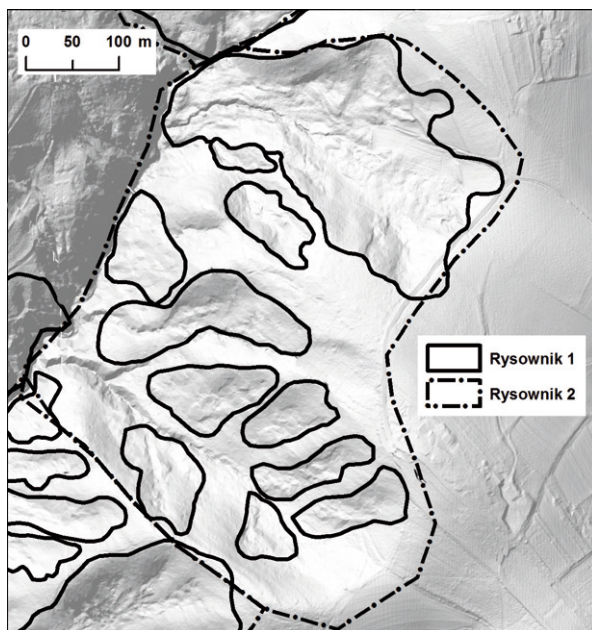
Interesująca jest bardzo duża rozbieżność danych w liczbie osuwisk. Wynika ona zarówno z charakteru występujących form, jak i metodyki pracy. W silnie osuwiskowych fragmentach gminy poszczególne osuwiska graniczą ze sobą lub wzajemnie na siebie nachodzą. W takich miejscach określenie, co jest jedną formą, a co dwoma lub trzema, jest często bardzo trudne i niejednoznaczne, a wykreślenie granicy między jedną a drugą formą jest arbitralne. Rodzi się także pytanie o celowość takich rozróżnień. Przy delimitacji osuwisk w skali całej gminy nie wydaje się istotne dokładne skartowanie poszczególnych form czy ich fragmentów. Istotne jest określenie, które z terenów podlegają osuwaniu, a które nie. Stąd też pojawiły się inne założenia metodyczne dwóch „rysowników”. Pierwszy z nich usiłował skartować poszczególne formy. Drugi łączył sąsiadujące ze sobą powierzchnie w jednolite poligony, koncentrując się bardziej na określeniu terenów osuwiskowych niż poszczególnych osuwisk (ryc. 1). Wynikiem tych różnic w podejściu metodycznym jest bardzo duża rozbieżność w liczbie osuwisk przy znacznie mniej rozbieżnej powierzchni skartowanego terenu. Powierzchnie określone jako osuwiskowe przez zespół terenowy zostały uznane jako podstawa do analiz liczbowych. Przyjęto, że łączna powierzchnia osuwisk skartowanych w terenie stanowi 100% osuwisk w gminie. Przeprowadzone badania wskazują, że takie założenie nie jest zgodne z rzeczywistością, ponieważ analiza NMT wykazała istnienie osuwisk, które nie zostały skartowane w terenie. Niemniej jednak określenie wzajemnej relacji wyników wymagało uznania jednej z warstw za warstwę podstawową. Świadomi mankamentu takiego założenia, uznaliśmy jednak, że postępowanie badawcze przyjęte w tej pracy daje legitymację do takiego podejścia. Głównym celem pracy była weryfikacja zastosowania skanowania laserowego do kartowania osuwisk, a dane terenowe są podstawą do tej weryfikacji, mogą więc zostać uznane za warstwę podstawową.

Założeniem rysownika nr 1 było skartowanie każdego osuwiska niezależnie, tak więc ta warstwa jest najbliższa metodycznie pracom terenowym. W związku z tym 14 procentowa różnica w obu powierzchniach nie wydaje się duża. Zgodność wykonanej delimitacji jest bardzo wysoka. W większości osuwisk różnice w granicach nie odbiegają od zmienności, jaką uzyskujemy przez kartowanie tych samych terenów przez różnych badaczy. Założenie

drugiego rysownika, który bardziej skoncentrował się na określaniu terenów osuwiskowych, a nie pojedynczych obiektów przyniosło efekt w postaci pewnej nadinterpretacji w postaci obrysowywania całych stoków, na których występują liczne pojedyncze obiekty. Takie podejście nie daje ścisłych wyników, niemniej jednak jest znacznie bardziej skutecznie i w czytelny sposób przystaje do zadań planistycznych. Włączanie terenów położonych pomiędzy osuwiskami do jednorodnych poligonów z tymi osuwiskami siłą rzeczy zwiększa powierzchnię sumaryczną. 21% różnicy powierzchni przy takim założeniu rysowania także nie wydaje się istotną różnicą.

Podobna liczba budynków zlokalizowanych na terenach osuwiskowych wszystkich trzech źródeł kartowania wskazuje na wysoką przydatność metody do celów planistycznych. Nawet stosunkowo duża (21%, zob. tab. 1) różnica w skartowanej powierzchni osuwiskowej daje zbliżone wyniki w liczbie zagrożonych budynków. Trzeba jednak wziąć pod uwagę, że rzeczywiste różnice są większe niż wskazywałyby na to liczby sumaryczne. Tak wysoka zgodność jest częściowo efektem rzeczywistej zgodności danych, a częściowo rozproszenia błędów.

Na obszarze badań spotkaliśmy się z wszystkimi możliwymi wariantami niezgodności danych. Występowały budynki w terenie uznane za zagrożone osuwaniem, które nie zostały uznane za takowe przez badaczy pracujących na NMT. Występowały budynki uznane za zagrożone przez jednego lub obu „rysowników”, a pominięte w terenie. Były też sytuacje wykreślenia osuwiska



Ryc. 1. Porównanie wyników wykreślenia terenów osuwiskowych przez dwóch badaczy. Pierwszy kartował poszczególne formy, drugi koncentrował się na określeniu terenów osuwiskowych, a nie poszczególnych osuwisk (opracowanie P. Struś).

Fig. 1. Comparison of the results of landslide tracing by two researchers of which: first was focused on separated landslides and the second was concentrated on the recognition of landslides hazardous areas (drawn by P. Struś).

pod zabudowaniami tylko przez jednego z rysowników, bez potwierdzenia tej sytuacji w terenie i przez drugiego badacza pracującego tylko na materiale kartograficznym. Niższa sumaryczna liczba budynków określonych w terenie jako zagrożone (1364) nie oznacza więc, że wszystkie te budynki zostały uznane za zagrożone na NMT (ryc. 2). Pomimo tych różnic skuteczność metody dla potrzeb planowania przestrzennego wydaje się niezaprzeczalna i wydaje się, że bardzo szybko wkroczy do zastosowań aplikacyjnych.

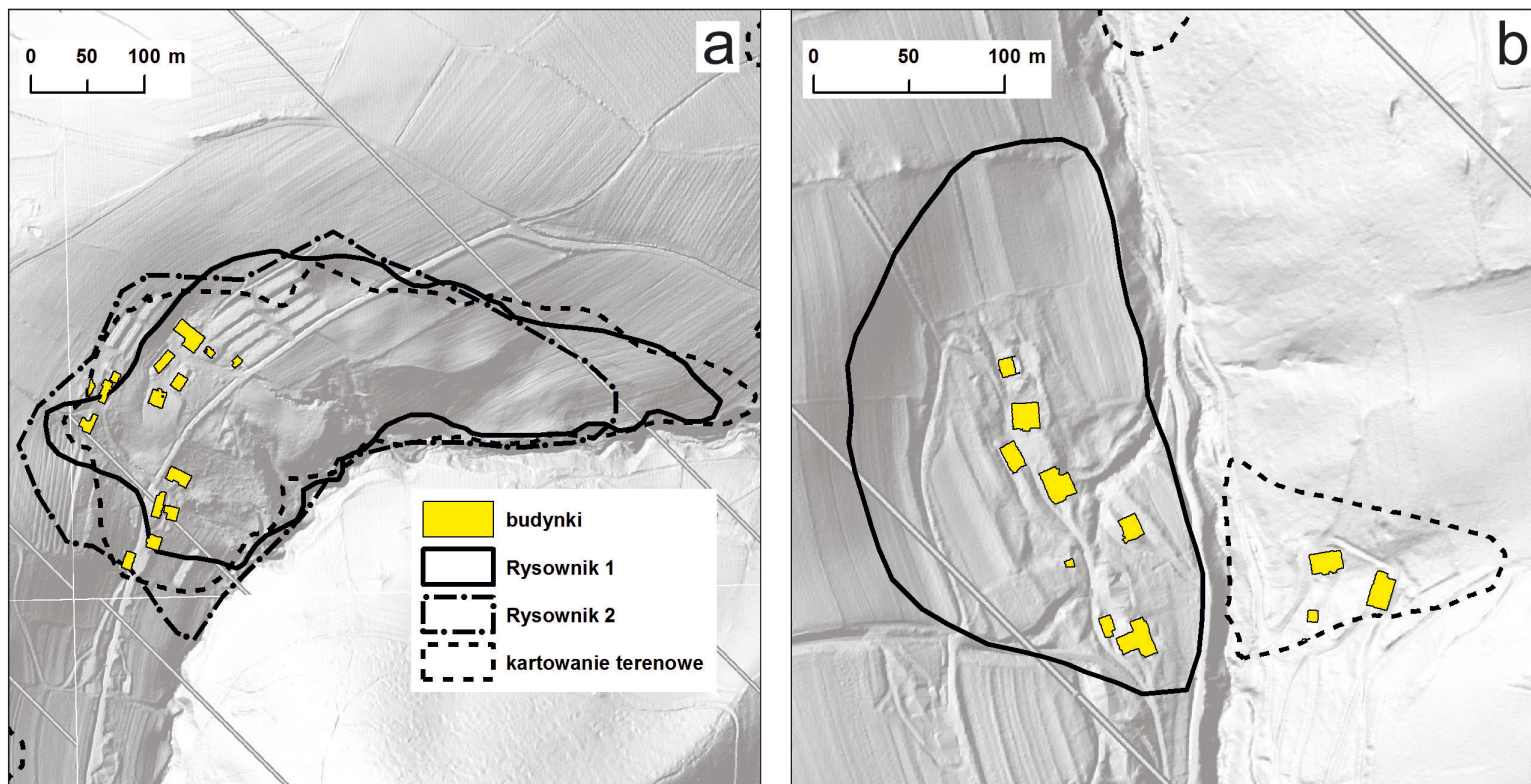
Na szczególną uwagę zasługują tereny osuwiskowe, które w nieznacznym sposób zaznaczają się w rzeźbie pomimo funkcjonujących procesów osuwania, a niemal wyłącznie twory działalności ludzkiej w środowisku (zabudowania, miedze, drogi) umożliwiają określenie ich granic. Takich terenów na obszarze badań pojawiło się kilka. Istotne z punktu widzenia planistycznego jest to, że mają one bardzo duży wpływ na działalność człowieka w przestrzeni. Głównym kryterium ich wyznaczenia są spękania na budynkach, świadczące o ruchach gruntu, pomimo bardzo słabej czytelności świadectw przemieszczania w morfologii terenu. Istotnym świadectwem są też przekształcenia miedz (jak np. brak ciągłości, zaburzenia w przebiegu, zmiany ich morfologii), które nie zawsze są widoczne na NMT ze względu na określoną gęstość skanowania. Takie fragmenty obszaru badań są świadectwem, że nawet bardzo precyzyjne dane w postaci chmury punktów nie zwalniają badaczy analizujących środowisko przyrodnicze z konieczności wykonania prac terenowych.

Przeprowadzone badania umożliwiają wstępne określenie zalet i wad zastosowanej metody. Najistotniejsze zalety to:

- znacząca większość osuwisk jest możliwa do identyfikacji;
- w znaczącej większości obiektów zgodność delimitacji osuwisk w terenie i na modelu jest wysoka i nie wykracza poza zmienność określania granic w terenie przez różnych badaczy;
- kartowanie osuwisk na podstawie NMT jest znacznie szybsze;
- na NMT możliwe jest dokładniejsze wykreślenie granic osuwisk, ponieważ mapa topograficzna ma niekiedy zbyt zgeneralizowany rysunek poziomicowy, by umożliwić precyzyjne wykreślenie granic w terenie;
- osuwiska na terenach leśnych (szczególnie przy gęstym podszycie i podroście) oraz obiekty wielkopowierzchniowe są lepiej widoczne na NMT niż w terenie, delimitacja granic jest łatwiejsza oraz bardziej precyzyjna.

Najistotniejsze wady metody to:

- na NMT nie jest możliwe określenie, czy osuwisko jest czynne;
- na NMT nie da się stwierdzić innych symptomów osuwania – haków drzewnych, zmian wysokości miedz, liniowych pęknięć gruntu, które w terenie są widoczne oraz są istotnymi wskaźnikami występujących procesów;
- nie jest możliwa identyfikacja krawędzi liniowych (zbyt mała gęstość skanowania), które są bardzo czytelne w terenie;
- nie jest możliwa identyfikacja terenów osuwiskowych, które nie odwzorowują się w rzeźbie, a są możliwe do stwierdzenia w terenie (pęknięcia domów, niewielkie ślady spełzywania).



Ryc. 2. Przykłady prezentujące zgodność (a) oraz niezgodność (b) w interpretacji rzeźby terenu oraz numerycznego modelu terenu powodujące różne wyniki dotyczące zagrożenia budynków osuwaniem (opracowanie: P. Struś).

Fig. 2. Examples showing accordance (a) and discordance (b) in the interpretation of terrain relief and Digital Elevation Model resulting in differences in the number of buildings endangered by landslide processes. (elaborated by P. Struś).

Wnioski

Metoda jest dobrym i skutecznym narzędziem do kartowania osuwisk, ale nie może być wyłączną metodą ich kartowania.

Rysując na NMT łatwiej popełnić błędy istotne w skutkach poprzez pominięcie osuwisk czynnych i zagrażających infrastrukturze, ale odwzorowanych w rzeźbie w niewielkim stopniu.

Wykorzystując NMT można bardzo przyspieszyć prace oraz wskazać miejsca konieczne do weryfikacji terenowej.

Literatura

- Alberti G., Boscutti F., Pirotti F., Bertacco C., De Simon G. i in., 2013. A LiDAR-based approach for a multi-purpose characterization of Alpine forests: an Italian case study. *IForest* 6, s. 156-168.
- Ardizzone F., Cardinali M., Galli M., Guzzetti F., Reichenbach P., 2007. Identification and mapping of recent rainfall-induced landslides using elevation data collected by airborne LiDAR. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7, s. 637-650.
- Bell R., Petschko H., Röhrs M., Dix A., 2012. Assessment of landslide age, landslide persistence and human impact using airborne laser scanning digital terrain models. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography* 94 (1), s. 135-156.
- Bober L., 1984. Rejony osuwiskowe w polskich Karpatach fliszowych i ich związek z budową geologiczną regionu. *Biuletyn Instytutu Geologicznego* 340, s. 115-158.
- Booth A.M., Roering J.J., Perron J.T., 2009. Automated landslide mapping using spectral analysis and high-resolution topographic data: Puget Sound lowlands, Washington, and Portland Hills, Oregon. *Geomorphology* 109 (3-4), s. 132-147.
- Bremer M., Sass O., 2012. Combining airborne and terrestrial laser scanning for quantifying erosion and deposition by a debris flow event. *Geomorphology* 138 (1), s. 49-60.
- Burtan J., Skoczylas-Ciszewska K., 1964. Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, arkusz Męcina (bez utworów czwartorzędowych), wydanie tymczasowe. WG Warszawa.
- Burtan J., Cieszkowski M., Ślącza A., Zuchiewicz W., 1991. Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000. arkusz Męcina (1018). Centralne Archiwum Geologiczne, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Cieszkowski M., 1992. Płaszczowina magurska i jej podłoże na północ od Kotliny Sądeckiej. *Przegląd Geologiczny* 40 (7), s. 410-416.
- Crutchley S., 2009. Using LiDAR in archaeological contexts: the English heritage experience and lessons learned. [w:] G.L. Heritage, A.R.G. Large (red.), *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Wiley-Blackwell, s. 180-200.
- Fanti R., Gigli G., Lombardi L., Tapete D., Canuti P., 2012. Terrestrial laser scanning for rockfall stability analysis in the cultural heritage site of Pitigliano (Italy). *Landslides* 10, s. 409-420.
- Franz M., Carrea D., Abellan A., Derron M-H., Jaboyedoff M., 2013. Vegetated landslide monitoring: target tracking with terrestrial laser scanner. *EGU General Assembly 2013, 7-12 April 2013, Vienna, Austria*.
- Gorczyca E., Wrońska-Wałach D., 2011. Objasnienia do mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi. Gmina Łososina Dolna. Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa.

- Gorczyca E., Wrońska-Walach D., Długosz M., 2013. Landslide hazards in the Polish Flysch Carpathians. Example of Łososina Dolna Commune. [w:] D. Loczy (red.), *Geomorphological impacts of extreme weather*, Springer Geography, s. 237-250.
- Grabowski D., Marciniec P., Mrozek T., Neścieruk P., Rączkowski W. i in., 2008. Instrukcja opracowania mapy osuwisk i terenów zagrożonych ruchami masowymi. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Graniczny M., Kamiński M., Piątkowska A., Surała M., 2012. Wykorzystanie lotniczego skaningu laserowego do inwentaryzacji i monitoringu osuwiska w rejonie Łańcicy (gmina Lanckorona), Pogórze Wielickie, Karpaty zewnętrzne. *Przegląd Geologiczny* 60 (2), s. 89-94.
- Heritage G.L., Large A.R.G. (red.), 2009. *Laser Scanning for the Environmental Sciences*. Wiley-Blackwell.
- Jaboyedoff M., Oppikofer T., Abbelan A., Derron M-H., Loye A. i in., 2012. Use of LiDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards* 61 (1), s. 5-28.
- Kramarska R., Frydel J., Jegliński W., 2011, Zastosowanie metody nadziemnego skaningu laserowego do oceny geodynamiki wybrzeża na przykładzie klifu Jastrzębiej Góry, *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 446, s. 101-108.
- Milan D., 2009. Terrestrial laser scan-derived topographic and roughness data for hydraulic modelling of gravel-bed rivers. [w:] G.L. Heritage, A.R.G. Large (red.), *Laser Scanning for the Environmental Sciences*, Wiley-Blackwell, s. 133-146.
- Oppikofer T., Bunkholt H.S.S., Fischer L., Saintot A., Hermanns R.L. i in., 2012. Investigation and monitoring of rock slope instabilities in Norway by terrestrial laser scanning. [w:] E. Eberhardt i in. (red.), *Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding*. Taylor and Francis Group, London, s. 1235-1241.
- Owerko T., Kwartnik-Pruc A., Kocierz R., Kuras P., Ortyl Ł. i in., 2013. Geomorphometric monitoring of active slopes and their impact on post-glacier lake in the Tatra mountains. 13th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2013 Conference Proceedings, June 16-22, 2013, s. 245-252.
- Paul Z., 1997. Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1:50 000, arkusz Męcina. Centralne Archiwum Geologiczne, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Razak K.A., Santangelo M., Van Westen C.J., Straatsma M.W., de Jong S.M., 2013. Generating an optimal DTM from airborne laser scanning data for landslide mapping in a tropical forest environment. *Geomorphology* 190, s. 112-125.
- SOPO (geoportal.pgi.gov.pl/portal/page/portal/SOPO) (dostęp: 28.06.2014)
- Starkel L., 1972. Charakterystyka rzeźby Polskich Karpat (i jej znaczenie dla gospodarki ludzkiej). *Problemy Zagospodarowania Ziemi Górskich* 10, s. 57-150.
- Valzano V., Bandiera A., Beraldin J.-A., 2005. Realistic Representations of Cultural Heritage Sites and Objects Through Laser Scanner Information, National Research Council of Canada, Ottawa.
- Van Den Eeckhaut M., Poesen J., Verstraeten G., Vanacker V., Nyssen J. i in., 2007. Use of LiDAR-derived images for mapping old landslides under forest. *Earth Surface Processes and Landforms* 32, s. 754-769.
- Wężyk P., Szostak M., Tompalski P., 2013. Use of airborne laser scanning data for a revision and update of a digital forest map and its descriptive database: a case study from the Tatra National Park. *The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability* 4, s. 615-627.
- 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 (2), s. 95-102.

Wójcik A., Wężyk P., Wojciechowski T., Perski Z., Maczuga S., 2013. Geologiczna i geomorfologiczna interpretacja danych z lotniczego skaningu laserowego (ALS) rejonu Kasprowego Wierchu (Tatry). *Przegląd Geologiczny* 61 (4), s. 234-242.

