

## Zapis typu ruchu osuwiska w rzeźbie terenu i jego obraz na wysokorozdzielczych numerycznych modelach terenu (NMT) na przykładzie wybranych osuwisk ze wschodniej części Beskidu Niskiego (Karpaty zewnętrzne, Polska)

Jarosław Kaczorowski<sup>1</sup>



**Landslide movement type record in morphology and its visualization on high resolution digital terrain models, exemplified by some landslides in the eastern part of the Low Beskid Mts. (Polish Outer Carpathians).** Prz. Geol., 65: 44–52.

*Abstract.* Landslides are very common features in the Polish Outer Carpathians. In the classical cartography, landslides are recognized based on characteristic land relief: main and side scarps, toe, minor scarps, transverse ridges, recesses and cracks. Formerly, landslide mapping was carried out in the field, preceded by interpretation of topographic maps and aerial photographs. Nowadays, we use spatial data from airborne laser scanning (ALS). Spatial data reprocessing permits to achieve a high-resolution (pixel 1×1 m or more precise) digital terrain model (DTM). Exploration of land relief in search for landslides has become simpler and more accurate. DTM interpretation allows delimiting the boundaries of landslides and elements of their relief. By analysing groups of landforms it is possible to determine the type of colluvium movement. In the eastern part of the Low Beskid Mts., four types of landslides predominate: rotational slides, translational slides, flows, and complex movements. Types of landslides are usually very well visible on the DTM. Information about types of mass movements can be useful during modelling further landslide activity and designing instrumental identification works and possibility of stabilization.

**Keywords:** landslide, digital terrain model, DTM, rotational slide, translational slide, flow, complex landslide, Low Beskid Mts., Outer Carpathians

## GeoSym<sup>2016</sup>

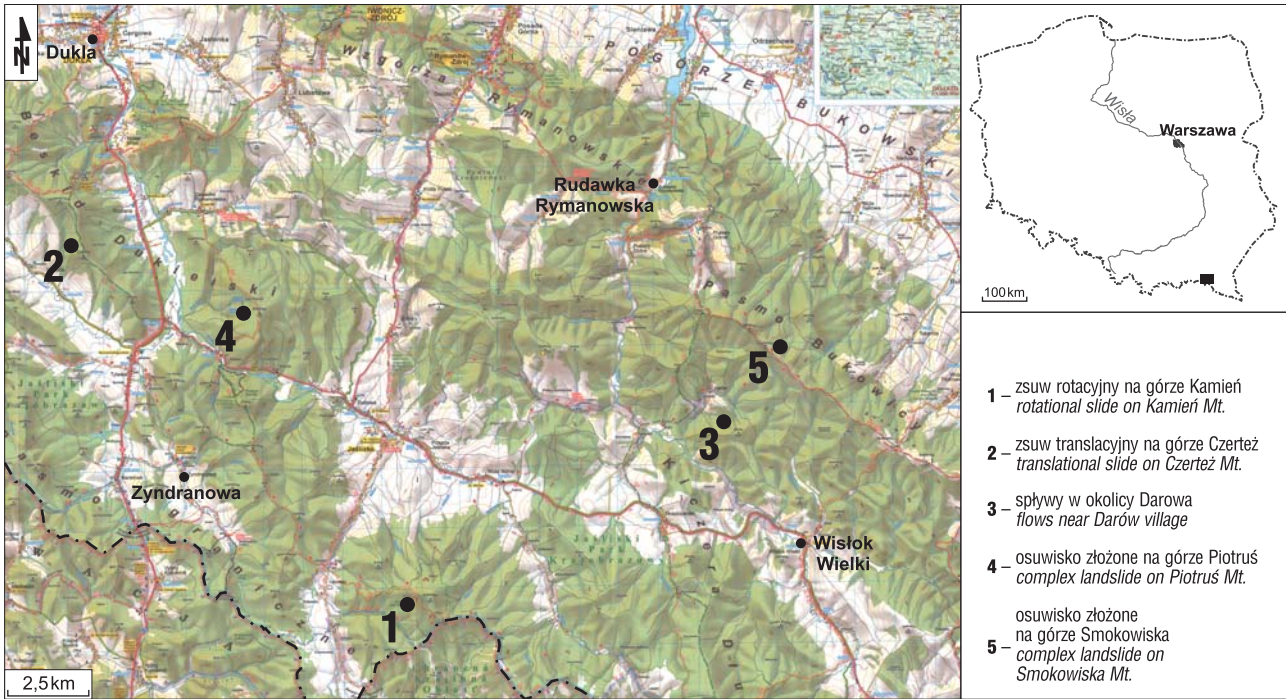
Karpaty zewnętrzne są obszarem Polski, gdzie osuwiska występują najliczniej i stanowią największe zagrożenie. Te przemieszczenia materiału skalnego były tematem wielu opracowań naukowych zarówno bardzo szczegółowych, dotyczących pojedynczych osuwisk (m.in. Zuber & Blauth, 1907; Bober i in., 1997; Margielewski, 2004, 2009; Kamiński, 2012), jak i regionalnych, obejmujących swym zasięgiem większe obszary oraz liczne osuwiska (m.in. Mastella, 1975; Bober, 1984; Wójcik & Zimnal, 1996; Poprawa & Rączkowski, 2003; Rubinkiewicz i in., 2015). Są one także jednym z elementów przedstawianych w opracowaniach kartograficznych, w tym na Szczegółowych Mapach Geologicznych Polski w skali 1 : 50 000 oraz na mapach opracowywanych na potrzeby projektu „System Osłony Przeciw Osuwiskowej” SOPO (od 2006 r.). W jego ramach stworzono instrukcję (Grabowski i in., 2008), która ujedynoliciła i wskazała zasady kartografii osuwiskowej. Ponadto ruchy masowe są tematem wielu dokumentacji geologiczno-inżynierskich, w których ocenia się stabilność stoku objętego procesem osuwania oraz możliwości jego zabezpieczenia. Badania te wymagają jak najdokładniejszego wyznaczenia granic osuwisk, rozpoznania ich budowy wewnętrznej, geometrii powierzchni poślizgu oraz sposobu przemieszczania się koluwiów.

Do niedawna wyznaczenie granic osuwisk oraz rozpoznanie ich budowy wewnętrznej było wykonywane tradycyjnymi metodami. Wykorzystywano analizę rysunku poziomicowego przedstawionego na mapach topograficz-

nych (m.in. Ozimkowski i in., 2010), analizę zdjęć lotniczych (m.in. Ziętara i in., 1990; Kamiński, 2012) oraz prace terenowe. Niestety metody te nie zawsze pozwalają wystarczająco dokładnie odwzorować obraz osuwiska na mapie. W przypadku analizy map topograficznych precyzja wyznaczania granic jest uzależniona od skali mapy oraz stopnia jej dokładności. Odwzorowanie rzeźby terenu za pomocą poziomic na mapach topograficznych bywa niedokładne. Wpływa to na jakość opracowań kartograficznych i wprowadza w błąd osobę wykonującą analizę. Główną przeszkodą w wyznaczeniu granic osuwisk na podstawie analizy zdjęć lotniczych jest pokrycie terenu, zwłaszcza gęstą roślinnością, która zasłania morfologię na dużych obszarach. Z wyżej wymienionych metod najbardziej wiarygodne wyniki przynoszą prace terenowe, jednak jest to metoda czasochłonna i wymagająca znacznych nakładów finansowych.

Na zwiększenie dokładności wykonywanych prac pozwala analiza wysokorozdzielczych, wysokościowych modeli powierzchni terenu, wygenerowanych z poddanej klasyfikacji i filtracji chmury punktów z lotniczego skaningu laserowego (ALS – *airborne laser scanning*). Metoda ta jest wykorzystywana na świecie do rozpoznawania osuwisk od kilkunastu lat (m.in. Carter i in., 2001; McKean & Roering, 2004; Schulz, 2004; Ardizzone i in., 2007; Razak i in., 2011; Jaboyedoff i in., 2012). W Polsce z tych danych zaczęto korzystać stosunkowo niedawno (m.in. Borkowski i in., 2011; Graniczny i in., 2012; Wojciechowski i in., 2012; Migoń i in., 2014; Kamiński, 2015; Kamiński & Nitychoruk, 2015). Podstawową wadą danych ALS jest wysoki koszt ich pozyskania, który w znacznym stopniu ograniczał dotychczas możliwość powszechnego stosowania tej metody. Udostępnienie danych z lotniczego skaningu

<sup>1</sup> Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; j.kaczorowski@student.uw.edu.pl.

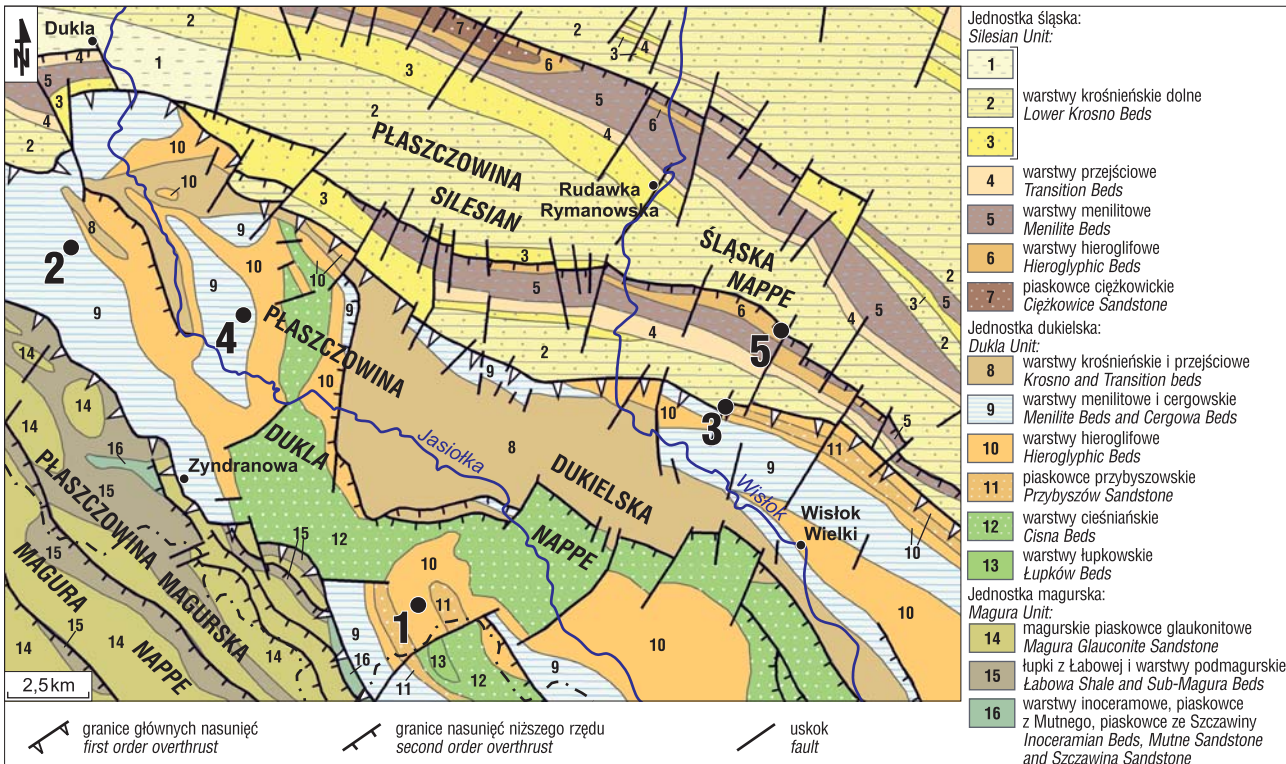


Ryc. 1. Mapa obszaru badań z lokalizacją wybranych osuwisk (na podkładzie mapy turystycznej Siwickiego, 2012)  
Fig. 1. Study area map with location of selected landslides (base map after Siwicki, 2012)

laserowego otrzymanych w ramach projektu ISOK (Informatyczny System Osłony Kraju), w tym ich pochodnych (m.in. numerycznego modelu terenu – NMT) otworzyło nowy etap w badaniach geomorfologicznych i geologicznych. Zastosowanie nowych danych jakimi są wysokorozdzielcze NMT, dzięki dokładnemu odwzorowaniu powierzchni terenu, pozwala na precyzyjne wyznaczenie granic osuwiska oraz szczegółowe rozpoznanie jego rzeź-

by wewnętrznej, a na tej podstawie określenie charakteru ruchu koluwiów.

Do klasyfikacji osuwisk ze względu na rodzaj ruchu koluwiów oraz ich analizy wybrano obszar położony we wschodniej części Beskidu Niskiego (Karpaty zachodnie). Obejmuje on swym zasięgiem Beskid Dukielski na zachodzie, Pasma Bukowicy na północnym wschodzie oraz Pasma Graniczne na południu. Badany obszar jest po-



Ryc. 2. Mapa geologiczna obszaru badań z lokalizacją wybranych osuwisk (na podstawie Jankowskiego i in., 2004)  
Fig. 2. Geological map of the study area with location of selected landslides (based on Jankowski et al., 2004)

łożony między Duklą na północnym zachodzie, Rudawką Rymanowską na północnym wschodzie, Wisłokiem Wielkim na południowym wschodzie oraz Zyndranową na południowym zachodzie (ryc. 1). Jest to teren prawie w całości drenowany przez rzeki Wisłok oraz Jasiołkę.

Definicję osuwisk oraz ich klasyfikację przyjęto za artykułem „Landslide types and processes” (Cruden & Varnes, 1996), który jest zmienioną i uzupełnioną wersją publikacji „Slope movement types and processes” (Varnes, 1978). W polskiej literaturze naukowej problematykę nazewnictwa oraz definicji poszczególnych typów osuwisk poruszano wielokrotnie (Kleczkowski, 1955; Ziętara, 1969; Bober, 1984; Zabuski i in., 1999; Margielewski, 2004, 2009). Wśród nich najpełniejszy i odpowiadający klasyfikacji Varnesa (Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996) jest podział przedstawiony przez Margielewskiego (2004). Dokładnie opisał on charakter przemieszczeń w poszczególnych typach osuwisk (z pominięciem wpływów gruzowych i ziemnych), nawiązując do przykładów z Karpat fliszowych.

Celem publikacji jest zaprezentowanie i szczegółowe omówienie form rzeźby terenu związanych z różnymi typami osuwisk (ze względu na rodzaj ruchu) oraz ich odwzorowaniem na wysokorozdzielczych trójwymiarowych modelach terenu.

## ZARYS BUDOWY GEOLOGICZNEJ

Geologicznie badany obszar jest położony w obrębie dwóch płaszczowin, dukielskiej na południu oraz śląskiej na północy, oddzielonych od siebie dużym nasunięciem o orientacji WNW–ESE (ryc. 2). Na omawianym obszarze na powierzchni odsłaniają się głównie skały fliszowe od kredy górnej po oligocen (Jankowski i in., 2004).

W serii skalnej płaszczowiny śląskiej najstarszymi utworami mającymi wychodnie na badanym terenie są eoceńskie łupki i piaskowce warstw hieroglifowych (Cieszkowski i in., 1988) budujące jądra antyklin, odsłaniające się w szczytowych partiach pasma Bukowicy. Ponad nimi w profilu zalega kompleks skał oligoceńskich. W dolnej części są to ciemne łupki warstw menilitowych, które przechodzą w warstwy przejściowe, a następnie dolne warstwy krośnieńskie. Granice między tymi wydzieleniami są nieostre (Ślącza i in., 1991). W dolnych warstwach krośnieńskich, można wyróżnić dwie części, dolną zbudowaną głównie z szarych piaskowców oraz górną, w której dominują szare łupki. Rozciągłość warstw budujących płaszczowinę śląską jest zbliżona do orientacji głównego nasunięcia (WNW–ESE).

W południowej części badanego obszaru odsłaniają się skały płaszczowiny dukielskiej (ryc. 2), która w tym rejonie jest wyraźnie dwudzielna (Ślącza, 1971). Część północną budują głównie oligoceńskie piaskowce i łupki warstw krośnieńskich i przejściowych. Przy granicy nasunięcia odsłaniają się leżące niżej w profilu warstwy menilitowe (oligocen), piaskowce i łupki warstw cergowskich (oligocen) oraz piaskowce i łupki pstrze warstw hieroglifowych (eocen) (Cieszkowski i in., 1988; Ślącza i in., 1991; Jankowski i in., 2004). Rozciągłość warstw na tym obszarze jest zbliżona do kierunku WNW–ESE (ryc. 2). Odmienne charakter utworów litologicznych odsłaniających się na powierzchni reprezentuje południowa część jednostki

dukielskiej (Ślącza, 1971). Odsłaniają się tu głównie warstwy hieroglifowe (eocen) oraz znacznie odporniejsze ciśnieńskie (kreda górna) zbudowane z gruboławicowych piaskowców (Cieszkowski i in., 1988; Ślącza i in., 1991; Kopciowski, 2006). Ponadto w części zachodniej znajdują się duże odsłonięcia warstw cergowskich (oligocen) wykształconych głównie w postaci gruboławicowych piaskowców budujących szczyty (np. Cergowa, góra Piotruś) oraz warstw krośnieńskich i przejściowych tworzących obszary obniżone (ryc. 2). Rozciągłość warstw w tej części płaszczowiny dukielskiej jest zmienna i zależna od lokalnych warunków tektonicznych. Na południowy zachód od badanego obszaru odsłaniają się utwory budujące płaszczowinę magurską (ryc. 2), nasuniętą na płaszczowinę dukielską. Są to skały klastyczne kredy górnej po oligocen (Cieszkowski i in., 1988; Ślącza i in., 1991; Jankowski i in., 2004). Na badanym obszarze występują silne deformacje tektoniczne, wyrażone zmiennością położenia warstw oraz występowaniem licznych struktur tektonicznych: fałdów, uskoków oraz nasunięć (Cieszkowski i in., 1988; Wdowiarz i in., 1988; Jankowski i in., 2004; Kopciowski, 2006, 2009) (ryc. 2).

Tak skomplikowana budowa geologiczna wraz z urozmaiconą morfologią powoduje możliwość występowania dużej liczby osuwisk o zróżnicowanej morfologii i charakterze. Wpływa na to zarówno zmienna litologia (obecność w profilu różnego typu skał klastycznych oraz niekiedy węglanowych lub krzemionkowych), sposób ułożenia warstw względem powierzchni stoku, jak i obecność nieciągłych struktur tektonicznych: uskoków, nasunięć czy splekań ciosowych.

## FORMY RZEŻBY OSUWISKOWEJ ORAZ PRZYJĘTA KLASYFIKACJA OSUWISK

Obszary objęte procesem osuwania się charakteryzuje specyficzna rzeźba terenu, na podstawie której jest możliwe ich rozpoznanie. Górna oraz boczne granice osuwiska są wykształcone w postaci skarpy lub szczeliny. Dolna granica pokrywa się z zasięgiem przemieszczonych w dół stoku koluwiów, tworzących próg akumulacyjny nazywany czołem osuwiska. W strefie przemieszczonych mas skalnych mogą występować różnego typu formy rzeźby wewnętrznej. Są to rowy osuwiskowe, zwykle zlokalizowane poniżej skarpy głównej, skarpy wtórne, szczeliny, różnego kształtu zagłębienia suche, wypełnione wodą lub osadami jeziornymi, a także wypłaszczenia i nabrzmienia powstałe w wyniku przemieszczania się koluwiów.

Na czytelność form rzeźby osuwiskowej wpływa wiele czynników. Są to m.in. charakter podłoża, rodzaj ruchu przemieszczonego materiału, wielkość osuwiska, głębokość oraz kształt powierzchni poślizgu, stopień zachowania charakterystycznych form oraz stopień dostępności osuwiska zależny od pokrycia obszaru badań. Zarówno w terenie, jak i na mapie zdecydowanie bardziej czytelne są formy osuwisk aktywnych w niedawnej przeszłości, o ostrych granicach oraz leżące w obszarach niepokrytych gęstą roślinnością. Z czasem granice osuwisk i inne elementy ich rzeźby ulegają zatarciu i stają się trudniejsze do jednoznacznego wyznaczenia w trakcie badań terenowych.

Czynnikiem mającym duży wpływ na kształt oraz charakter form rzeźby terenu związanych z osuwiskiem jest

typ ruchu koluwiów w jego obrębie. Jedną z najpełniejszych klasyfikacji osuwisk ze względu na rodzaj ruchu koluwiów jest wspomniana już klasyfikacja zaproponowana przez Varnesa (Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996). Podział ten opiera się na dwóch cechach: dominującym typie ruchu (obryw, przechył, zsuw rotacyjny i translacyjny, rozszerzenie boczne, spływ) oraz rodzaju podłoża, w którym rozwinęło się osuwisko (skalne, gruzowe, ziemne). Osobną kategorię stanowią osuwiska złożone, łączące zarówno różne typy ruchu, jak i rodzaj przemieszczanego materiału w obrębie jednej formy.

### METODYKA BADAŃ

Do analizy użyto numeryczne dane wysokościowe w postaci gotowego numerycznego modelu terenu (NMT) pozyskanego z Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (CODGiK). W celu jego wytworzenia zostały wykorzystane zbiory danych pomiarowych pochodzące z ALS (tzw. chmury punktów). Dane źródłowe zostały poddane klasyfikacji ze względu na rodzaj powierzchni, od której nastąpiło odbicie wiązki lasera, a do wygenerowania NMT wykorzystano jedynie punkty reprezentujące powierzchnię terenu bez jego pokrycia. Gęstość punktów dla wykorzystanych danych pomiarowych ALS wynosi min. 4 pkt/m<sup>2</sup>, a średni błąd wysokości zawiera się w przedziale do 0,2 m (Wężyk, 2014). NMT został przedstawiony w strukturze GRID (siatki prostokątów) o pixelu 1×1 m. Do analiz dane zostały pozyskane w postaci plików w formacie ASCII GRID. W celu jak najlepszego zobrazowania rzeźby związanej z osuwiskami, NMT został przedstawiony w postaci mapy nachyleń (ryc. 3A), na której kolorem białym oznaczono obszary płaskie, natomiast czarnym obszary o nachyleniu większym niż 35°. Przejścia między wartościami skrajnymi mają charakter płynny (ryc. 3A, C), co pozwala na dostrzeżenie najdrobniejszych zmian w nachyleniu zobrazowanej powierzchni, jednakże

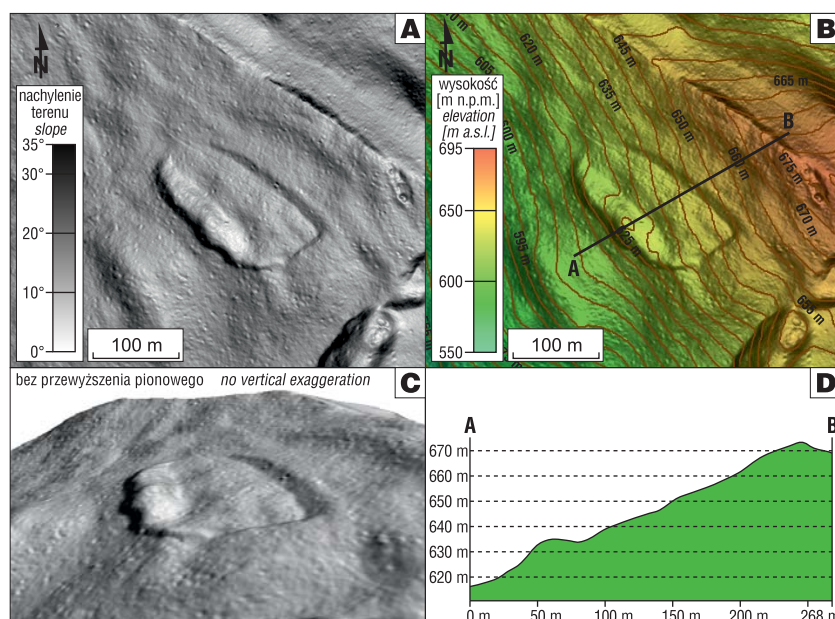
nie pozwala na jednoznaczne określenie czy forma ma charakter wypukły czy wklęsły, a tym samym określenia kierunku nachylenia stoku. Dla uniknięcia tego błędu, podczas analiz wykorzystano również NMT przedstawiony w postaci mapy hipsometrycznej (ryc. 3B), wizualizację 2,5D (pseudo-3D) (ryc. 3C) oraz profile morfologiczne wykonane na podstawie NMT (ryc. 3D). Metoda wykorzystująca mapę nachyleń oraz wizualizację 2,5D, w porównaniu z dotychczas zwykle stosowaną skośną iluminacją, pozwala na określenie całości granic zewnętrznych osuwiska oraz form wewnętrznych, bez konieczności zmian kierunku i kąta padania światła. Do zobrazowania NMT wykorzystano oprogramowanie Global Mapper v.15.

### KRYTERIA ROZPOZNAWANIA OSUWISK NA WYSOKOROZDZIELCZYCH NUMERYCZNYCH MODELACH TERENU

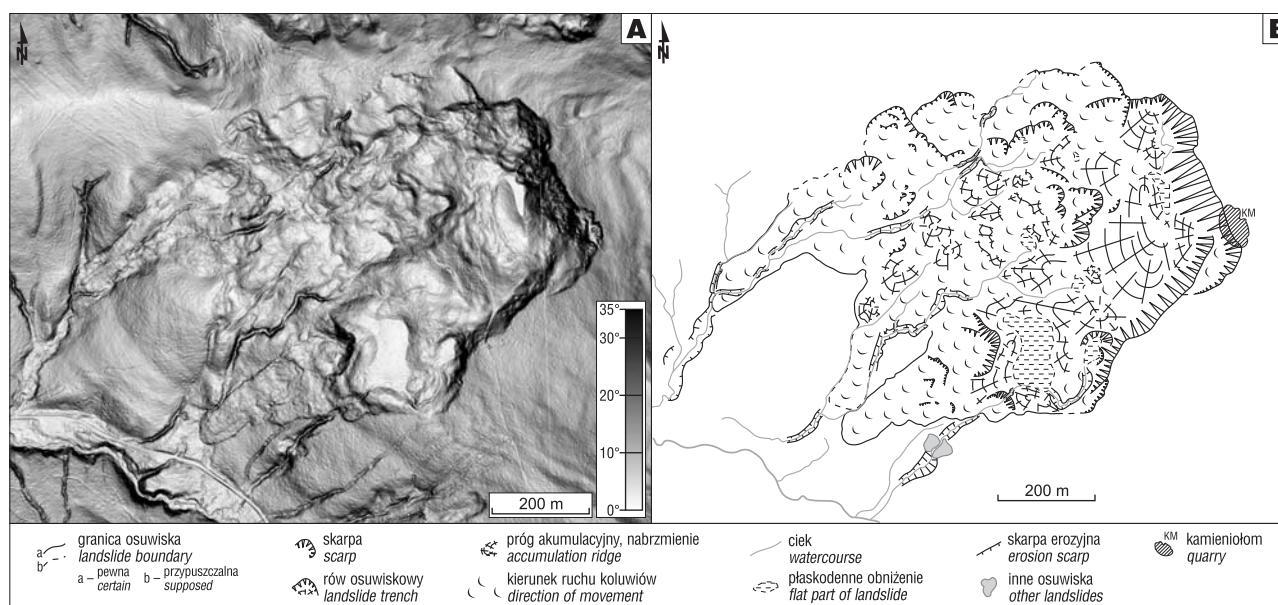
Przy rozpoznawaniu osuwisk z wykorzystaniem NMT najbardziej istotne jest odróżnienie odmiennej rzeźby obszaru objętego procesem osuwania od niezaburzonego obszaru otaczającego. Teren niezaburzony charakteryzuje się łagodną morfologią, związaną głównie z odpornością skał budujących podłoże, zaznaczającą się na rozległych obszarach obejmujących niekiedy całe stoki oraz grzbiety (ryc. 4–8). Na numerycznym modelu terenu jest to wyrażone w postaci gładkich przejść nachyleń powierzchni terenu. Wyraźnie kontrastująca z niezaburzonym obszarem jest górna granica osuwiska. Najczęściej jest to skarpa o stosunkowo ostrej górnej krawędzi i nachyleniu większym od stoku powyżej. Krawędź ta jest wyraźnie widoczna na modelu przedstawionym w postaci mapy nachyleń (ryc. 4–8). Granice boczne, jeśli nie są wykształcone w postaci skarp, są znacznie mniej wyraźne, ale ich przebieg można wyznaczyć dzięki kontrastowi zróżnicowanej rzeźby w obrębie osuwiska i łagodnym stokiem w obszarach nieobjętych procesem osuwania (ryc. 6, 8). Dolną granicę stanowi

czoło osuwiska. Jego nachylenie jest nieznacznie większe od otaczającego stoku, a dolna granica z obszarem niezaburzonym zwykle ma ostry charakter (ryc. 4–8). Na wysokorozdzielczych NMT formy stanowiące zewnętrzne granice osuwiska są na ogół dobrze czytelne i w sposób jednoznaczny pomagają wyznaczyć jego zasięg. Formy rzeźby wewnątrzosuwiskowej zobrazowane na NMT, podobnie jak granice zewnętrzne, przeważnie są wyraźne. Skarpy wtórne mają ostre granice zaznaczające się jako nagle zmiany kąta nachylenia stoku. Formy pozytywne (nabrzemia, wały itp.) mają postać obszarów wyniesionych względem otoczenia i charakteryzują się płynnymi przejściami nachyleń stoku (ryc. 4, 7, 8). Podmokłości oraz zbiorniki wodne widoczne są jako obszary płaskie (ryc. 4).

Przy rozpoznawaniu osuwisk wykorzystano metodę wizualno-manualną polegającą na ręcznym wyznaczeniu granic i form wewnętrznych osuwisk za pomocą wizualnej analizy morfologii powierzchni



**Ryc. 3.** Wykorzystywane sposoby wizualizacji NMT; **A** – mapa nachyleń stoków, **B** – mapa hipsometryczna, **C** – wizualizacja 2,5D (pseudo-3D), **D** – profil morfologiczny  
**Fig. 3.** Applied types of DTM visualizations; **A** – slope map, **B** – hypsometric map, **C** – 2,5D (pseudo-3D) visualization, **D** – morphological profile



**Ryc. 4.** Zsuw rotacyjny na południowo zachodnim stoku góry Kamiień; **A** – obraz osuwiska na NMT, **B** – szkic morfologiczny osuwiska  
**Fig. 4.** Rotational slide on the southwestern slope of Kamiień Mt.; **A** – DTM landslide view, **B** – morphological sketch of landslide

terenu zobrazowanej na NMT. W celu określenia typu ruchu koluwiów w obrębie osuwiska porównano rozpoznane na badanym obszarze formy z osuwiskami przedstawionymi i szczegółowo opisanymi w literaturze (Cruden & Varnes, 1996; Margilewski, 2004; Grabowski i in., 2008). Na tej podstawie wytypowano pięć osuwisk, reprezentujących cztery najczęściej występujące typy ze względu na charakter ruchu koluwiów (zsuw rotacyjny, zsuw translacyjny, spływ oraz osuwisko o złożonym charakterze ruchu). Wybór został uwarunkowany występowaniem jak najszerszej gamy form rzeźby terenu charakterystycznych dla poszczególnych typów osuwisk.

## WYBRANE OSUWISKA BESKIDU NISKIEGO W OBRAZIE NMT

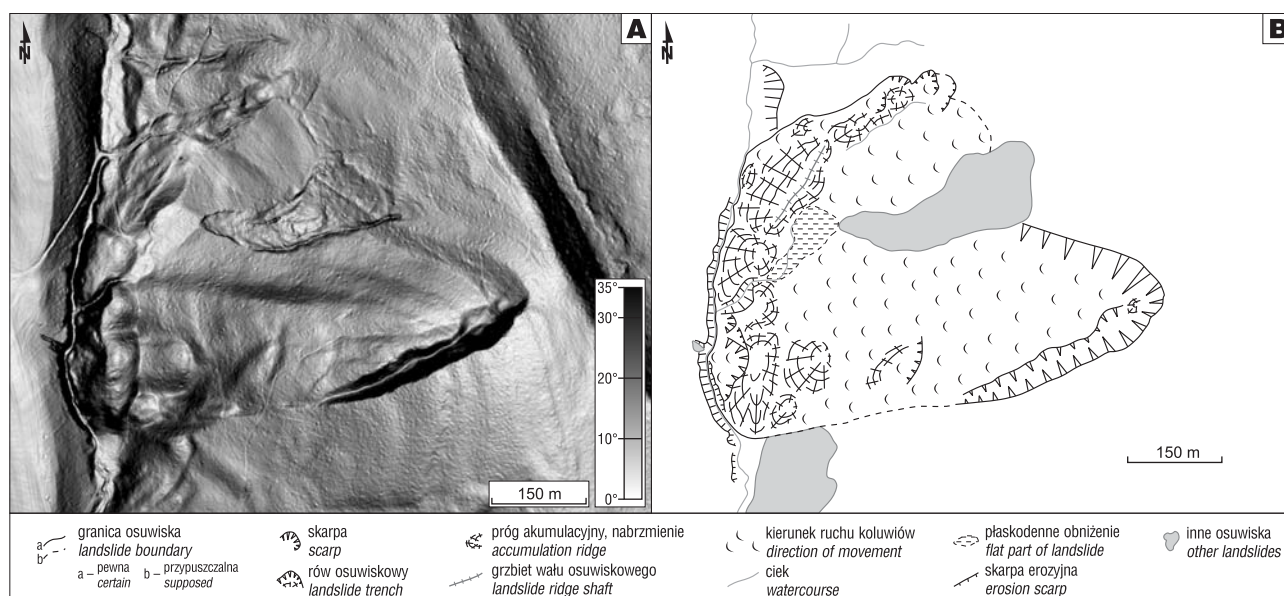
### Zsuw rotacyjny

Zsuw rotacyjny jest osuwiskiem powstałym w wyniku przemieszczenia skał w dół stoku po cylindrycznej lub cykloidalnej powierzchni poślizgu z jednoczesną rotacją wokół poziomej osi prostopadłej (lub zbliżonej do prostopadłej) do kierunku zsuwu (Cruden & Varnes, 1996; Zabuski i in., 1999; Grabowski i in., 2008). Powstanie tego typu osuwiska jest związane ze ścięciem istniejących powierzchni, takich jak powierzchnie uławicenia, uskoków, czy granice między zwietrzeliną a podłożem. Zsuwy rotacyjne można rozpoznać po wyraźnie wykształconej skarpie głównej charakteryzującej się półkolistym kształtem oraz dobrze zaznaczających się skarpach bocznych i wyraźnym czole. Na numerycznym modelu terenu formy te są doskonale widoczne i zaznaczają się w postaci struktur o ostrych granicach (ryc. 4). Ze względu na rodzaj przemieszczonego materiału (m.in. występowanie zwartych pakietów skał podłoża w koluwiach) oraz wklęsły kształt powierzchni poślizgu, częste jest występowanie u podnóża skarpy głównej rowu osuwiskowego. Powstaje on w wyniku obniżenia górnej części osuwiska na skutek rotacji pakietu skał podłoża (ryc. 4), rzadziej w wyniku rozwinięcia się skarpy wtórnej u podnóża skarpy głównej. Rów osuwisk-

kowy na NMT zaznacza się w postaci równoległego do skarpy głównej zagłębienia o asymetrycznym kształcie. Rzeźba wewnętrzna dużych zsuwów rotacyjnych charakteryzuje się występowaniem licznych półkolistych skarpy wtórnych o zróżnicowanej wielkości oraz różnego typu progów (nabrmień) (ryc. 4). Geneza form wypukłych jest związana z występowaniem w przemieszczonych masach zwartych pakietów skał podłoża (zwłaszcza w górnej części osuwiska) oraz akumulacji przemieszczonego, zdeintegrowanego materiału (zwykle w środkowej i dolnej części osuwiska). Występowanie licznych nabrmień w obrębie zsuwu rotacyjnego często powoduje powstawanie zagłębień, w których okresowo lub w sposób ciągły gromadzi się woda, powodująca powstawanie podmokłości oraz jeziorzek osuwiskowych. W obrazie NMT są one widoczne jako obszary płaskie (zagłębienia wypełnione wodą) lub prawie płaskie (obniżenia suche, bądź podmokłe) (ryc. 4). Przykład tego typu osuwiska występuje na południowo-zachodnich stokach góry Kamiień (ryc. 4). Osuwisko to rozwinęło się w obrębie skał eocenskich należących do płaszczowiny dukielskiej (Cieszkowski i in., 1988). W górnej części stoku są to piaskowce gruboławicowe i łupki (piaskowce przybyszowskie), natomiast w dolnej oraz środkowej części odsłaniają się piaskowce średnio- i cienkoławicowe warstw hieroglifowych (Cieszkowski i in., 1988). Położenie warstw ma tu zmienny charakter (Cieszkowski i in., 1988), są one zorientowane skośnie lub prostopadle do nachylenia stoku.

### Zsuw translacyjny

Zsuw translacyjny jest osuwiskiem powstałym w wyniku przemieszczenia skał w dół stoku po jednej lub większej liczbie płaskich powierzchni (Cruden & Varnes, 1996; Grabowski i in., 2008). Cechą charakterystyczną tego typu form jest wykorzystanie istniejących płaszczyn w skałach podłoża. Może to być powierzchnia uławicenia, granica zwietrzliny ze skałami podłoża czy wcześniej istniejąca powierzchnia nieciągłości, np. uskok, powierzchnia spekań



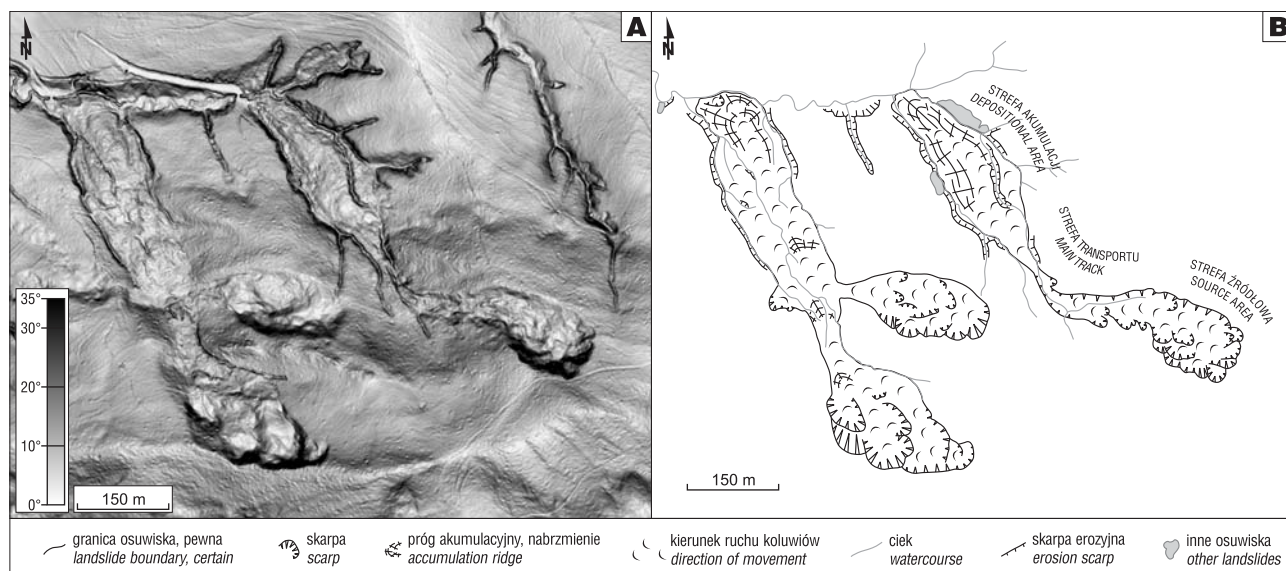
**Ryc. 5.** Zsuw translacyjny na zachodnim stoku góry Czerteż; **A** – obraz osuwiska na NMT, **B** – szkic morfologiczny osuwiska  
**Fig. 5.** Translational slide on the western slope of Czerteż Mt.; **A** – DTM landslide view, **B** – morphological sketch of landslide

ciosowych lub kombinacja tych płaszczyzn (Kleczkowski, 1955; Bober, 1984; Margielewski, 2009). Zsuwy translacyjne charakteryzują się występowaniem skarp głównych złożonych z jednej bądź wielu płaszczyzn, których przecięcie z powierzchnią terenu tworzy proste lub zbliżone do prostych odcinki (ryc. 5). Często kąt nachylenia skarpy jest niewiele większy od kąta nachylenia stoku położonego wyżej, co sprawia duże trudności z jej rozpoznaniem w terenie, jednak na modelu granica ta jest dobrze widoczna (ryc. 5, 7). Górna lub boczna granica zsuwu translacyjnego może być również wykształcona w postaci rowu o stromych krawędziach, powstałego w wyniku oderwania pakietu skał od podłoża (ryc. 5). Formy wewnątrzsuwiskowe są słabo rozwinięte lub mają charakter wyraźnych wydłużonych wałów o rozciągłości prostopadłej lub rzadziej skośnej do kierunku przemieszczania się koluwiów. W przypadku zsuwu translacyjnego, gdzie formy wewnętrzne nie wykształciły się, charakter powierzchni osuwiska w środkowej jego części może być zbliżony do obszaru otaczającego, nie objętego ruchami masowymi (ryc. 5). Jest to cecha utrudniająca interpretację zasięgu tego rodzaju zsuwu w terenie. Jednak, dzięki możliwości całościowego spojrzenia w obrazie NMT, jest możliwe nawet w takim przypadku dokładne wyznaczenie granic osuwiska. W dolnej części zsuwu translacyjnego zwykle następuje spiętrzenie osuniętego materiału w postaci wału o rozciągłości prostopadłej do kierunku ruchu koluwiów i powstanie wyraźnego czoła osuwiska. Wał ten jest widoczny na NMT jako wyniesienie terenu o łagodnych nachyleniach (ryc. 5, 7). Jako przykład przedstawiono osuwisko znajdujące się na zachodnim stoku góry Czerteż (ryc. 5). Podłoże tego stoku jest zbudowane z oligoceńskich skał płaszczowiny dukielskiej (Kopciowski, 2009). Na powierzchni odśłaniają się piaskowce z Mszanki (warstwy menilitowe), budujące górną oraz środkową część stoku, oraz leżące na nich margle podcergowskie i łupki menilitowe mające wychodnie w dolnej części (Kopciowski, 2009). Warstwy są położone normalnie, ich bieg i upad wynosi ok. 120/25S (Kopciowski,

2009). Skały podłoża są ułożone zgodnie z orientacją stoku, co jest warunkiem sprzyjającym powstaniu zsuwu translacyjnego.

### Splyw

Splyw jest osuwiskiem powstałym na skutek przemieszczenia mas skalnych w dół stoku, w trakcie którego następuje całkowita zmiana pierwotnej struktury podłoża w wyniku jego upłynnienia. W obrębie tej formy wyróżnić można 3 strefy: źródłową (z wyraźną niszą spływu), transportu oraz akumulacji, wyrażoną w postaci stożka zbudowanego z przemieszczonego materiału (Cruden & Varnes, 1996, Grabowski i in., 2008) (ryc. 6). Na badanym obszarze spływy są doskonale widoczne w obrazie NMT. W strefie spływów można rozpoznać wyraźną niszę spływu (ryc. 6). Zazwyczaj jest to forma ograniczona stromą skarpą o ostrej granicy górnej i zróżnicowanej wysokości, złożoną z wielu mniejszych półkolistych skarp. W obrębie spływów zazwyczaj można także wydzielić wyraźną strefę transportu materiału, w której koluwia nie zachowały się bądź ich miąższość jest niewielka. Strefa ta, w postaci zwężenia w środkowej części osuwiska (ryc. 6), niekiedy jest zbliżona kształtem do rozcięcia erozyjnego, co powoduje, że trudno ją zidentyfikować podczas badań terenowych, jednak w obrazie NMT jest doskonale czytelna. Dolna część spływu jest wykształcona w postaci wydłużonego stożka lub jezora o niewielkim nachyleniu (ryc. 6). Na jego powierzchni zaznaczają się, dobrze odwzorowane w obrazie NMT, drobne formy akumulacyjne – niewielkie zmarszczki o rozciągłości prostopadłej do kierunku ruchu materiału (ryc. 6). Cechą charakterystyczną spływów jest upłynnienie materiału w trakcie ruchu, co powoduje dostosowanie się kształtu przemieszczonego materiału do wcześniej istniejących form rzeźby stoku, takich jak np. wcięcia erozyjne. Może to spowodować zmianę kierunku ruchu koluwiów o znaczny kąt (nawet 90°). Jako przykład tego typu osuwisk przedstawiono dwa sąsiadujące ze sobą, położone na wschód od Darowa



**Ryc. 6.** Spływy w okolicy Darowa; **A** – obraz osuwiska na NMT, **B** – szkic morfologiczny osuwiska  
**Fig. 6.** Flows near the village of Darów; **A** – DTM landslide view, **B** – morphological sketch of landslide

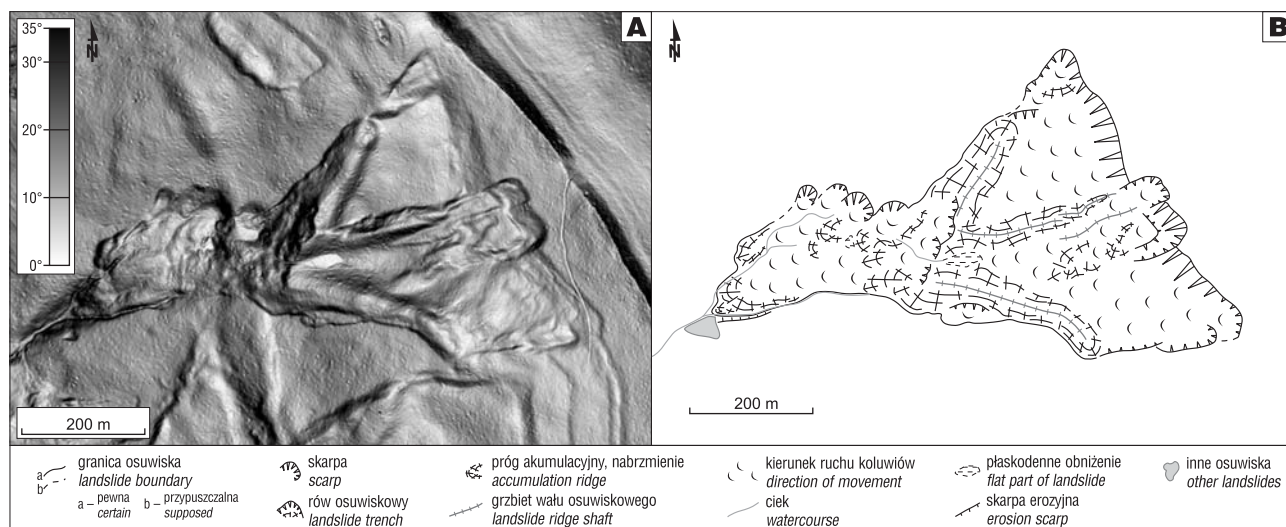
(ryc. 6). Rozwinęły się one na stoku, w podłożu którego eoceńskie skały budujące płaszczynę dukielską nasuwają się na oligoceńskie skały płaszczyny śląskiej (Cieszkowski i in., 1988). W górnej części stoku odsłaniają się piaskowce gruboławicowe (piaskowce przybyszowskie) i piaskowce średnio- i cienkoławicowe oraz łupki (warstwy hieroglifowe) budujące płaszczynę dukielską. Dolna część stoku jest zbudowana z piaskowców cienko- i średnioławicowych oraz łupków warstw krośnieńskich (op. cit.). Położenia warstw mają zmienny charakter (op. cit.), co jest związane z obecnością nasunięcia oraz uskokuw silnie zaburzających strukturę podłoża.

### Osuwisko złożone

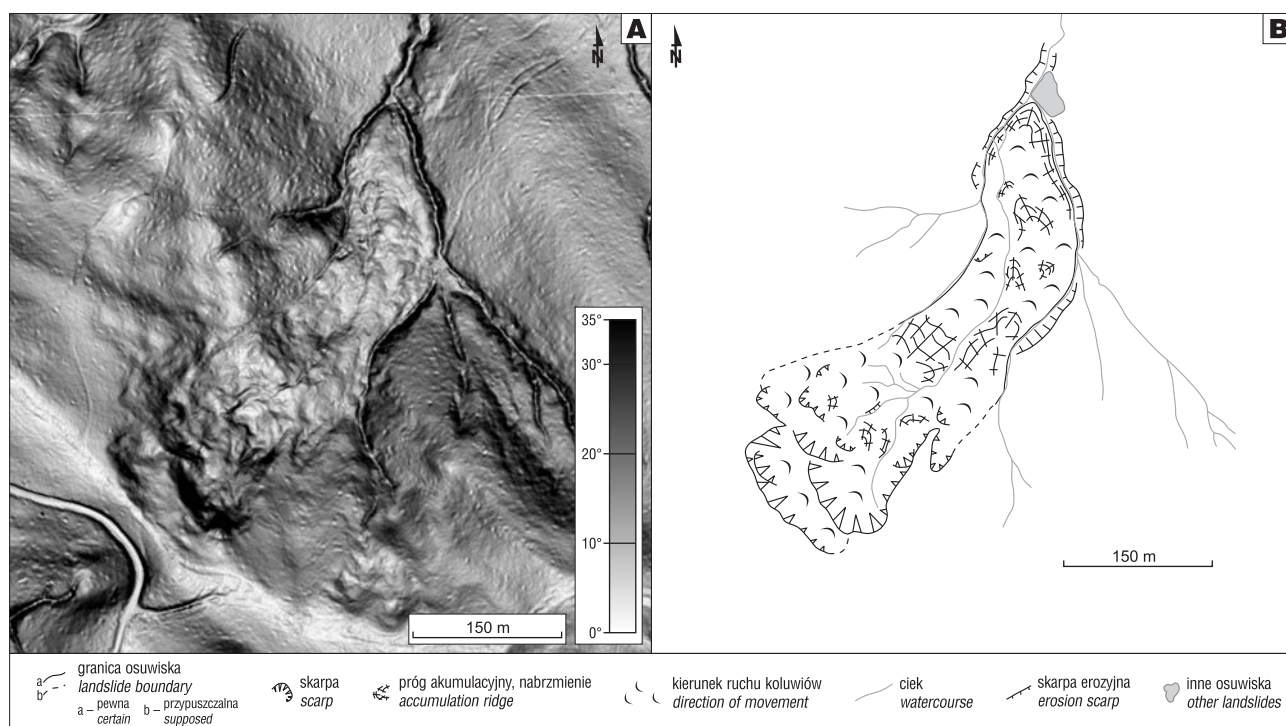
Osobną grupę stanowią osuwiska będące formami o złożonym typie ruchu, w których nie jest możliwe wskazanie dominującego sposobu przemieszczania się mas skalnych w dół stoku (Cruden & Varnes, 1996; Grabowski i in., 2008). Rzeźba tego typu osuwisk na ogół jest bardzo skompliko-

wana i łączy w sobie cechy charakterystyczne dla form o prostszej budowie. Powstają w wyniku zmiany sposobu przemieszczania się skał (np. zsuw rotacyjny przechodzi w spływ) lub w wyniku wieloetapowej aktywności (np. początkowo rozwinął się zsuw translacyjny, w obrębie którego w późniejszym czasie powstał zsuw rotacyjny lub spływ). Ponadto osuwiska tego typu rozwijają się na więcej niż jednym typie podłoża (Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996). Dla zobrazowania takich form wybrane zostały dwa osuwiska łączące różne typy ruchu: na zachodnich stokach góry Piotruś (ryc. 7) oraz znajdujące się na północnym stoku góry Smokowiska (ryc. 8).

Osuwisko na górze Piotruś składa się w górnej części z zsuwu translacyjnego, dla którego jest charakterystyczna zbliżona przebiegiem do linii prostej skarpa główna oraz wyraźny V-kształtny wał w dolnej części oraz zsuwu rotacyjnego, powstałego w późniejszym etapie rozwoju, z wypukłym czołem i wyraźną półkolistą skarpią ścinającą dolną część zsuwu translacyjnego, poniżej której znajduje się obniżenie (ryc. 7). Stok, na którym rozwinęło się to osuwisko,



**Ryc. 7.** Osuwisko typu złożonego na zachodnim stoku góry Piotruś; **A** – obraz osuwiska na NMT, **B** – szkic morfologiczny osuwiska  
**Fig. 7.** Complex landslide on the western slope of Piotruś Mt.; **A** – DTM landslide view, **B** – morphological sketch of landslide



**Ryc. 8.** Osuwisko typu złożonego na północnym stoku góry Smokowiska; **A** – obraz osuwiska na NMT, **B** – szkic morfologiczny osuwiska

**Fig. 8.** Complex landslide on the northern slope of Smokowiska Mt.; **A** – DTM landslide view, **B** – morphological sketch of landslide

jest zbudowany z oligoceńskich skał płaszczowiny dukiel-skiej (Kopciowski, 2009) – piaskowców z Mszanki (warstwy menilitowe) w górnej części stoku oraz leżących na nich margli podcergowskich i łupków menilitowych odsłaniających się w dolnej części stoku (*op. cit.*). Położenie warstw jest zbliżone do 160/20–30S (Cieszkowski i in., 1988; Kopciowski, 2009) i pokrywa się z orientacją stoku.

Osuwisko na górze Smokowiska (ryc. 8) w górnej części jest wykształcone w postaci zsuwu rotacyjnego z wyraźną półkolistą skarpią oraz spływem w dolnej części z jeżorem dostosowanym swym kształtem do wcięcia erozyjnego. Geologicznie osuwisko rozwinęło się w należących do płaszczowiny śląskiej piaskowcach cienkoławicowych i łupkach warstw hieroglifyowych (eocen) oraz łupkach menilitowych (oligocen) budujących szczytową część pasma, a także leżących niżej, oddzielonych płaszczyzną nasunięcia, piaskowców cienko- i średnioławicowych oraz łupków warstw krośnieńskich (oligocen) (Cieszkowski i in., 1988). Położenie warstw skał podłoża jest zmienne, co jest spowodowane zaburzeniami tektonicznymi związanymi z nasunięciem (*op. cit.*).

## WNIOSKI

Dzięki zastosowaniu wysokorozdzielczych numerycznych modeli terenu wygenerowanych z danych ALS, pozytywnych w ramach projektu ISOK, identyfikacja oraz interpretacja osuwisk na szeroką skalę stała się łatwiejsza niż dotychczas i pozwala na dużo większą precyzję w odczytywaniu form rzeźby terenu powstałych w procesie osuwania. Na podstawie charakterystycznych zespołów tych form związanej z osuwiskami jest możliwe określenie rodzaju ruchu przemieszczonego materiału. Wśród osuwisk występujących we wschodniej części Beskidu Niskie-

go dominują cztery typy wyróżnione ze względu na rodzaj ruchu koluwiów: zsuw rotacyjny i translacyjny, spływ oraz osuwiska typu złożonego, łączące w sobie więcej niż jeden typ ruchu. Każdy typ można rozpoznać na podstawie charakterystycznych zespołów form rzeźby terenu związanych z osuwiskiem. Formy te, niejednokrotnie trudne do wyznaczenia podczas prac terenowych czy w rysunku poziomym na mapach topograficznych, zwykle są doskonale czytelne w obrazie NMT, zwłaszcza w przypadku osuwisk typu zsuwu translacyjnego czy spływów. Informacja dotycząca sposobu przemieszczenia skał w obrębie osuwiska pozwala na określenie kształtu powierzchni poślizgu (np. cylindryczna – dla zsuwu rotacyjnego, płaska – dla zsuwu translacyjnego), a co za tym idzie dokładniej oszacować miąższość koluwiów. Te dane mogą zostać wykorzystane zarówno przy modelowaniu dalszego ruchu koluwiów, jak i projektowaniu wierceń rozpoznawczych czy zabezpieczeń związanych ze stabilizacją osuwiska. Jednak należy pamiętać, że powierzchnia terenu zobrazowana na podstawie danych zebranych w ramach projektu ISOK może nie odzwierciedlać aktualnej rzeźby badanego obszaru, z powodu procesów zachodzących po wykonaniu nalotu (np. powstanie nowych osuwisk lub uaktywnienie się już istniejących). Innym problemem interpretacji osuwisk przy użyciu NMT jest fakt, że nie każde osuwisko ma wykształcony lub zachowany zespół form rzeźby wewnętrznej, pozwalający na identyfikację rodzaju ruchu przemieszczonego materiału. Może to być związane ze skomplikowaną budową geologiczną lub zatarciem form rzeźby osuwiskowej na skutek naturalnych procesów erozyjnych i akumulacyjnych, prowadzących do zmiany morfologii stoku, oraz działalności człowieka. Z tych powodów analizę NMT należy traktować jako obowiązkowy element każdego opracowania dotyczącego osuwisk, o ile obszar badań został objęty



lotniczym skanowaniem laserowym. Należy jednak pamiętać o aktualności analizowanych danych, a w przypadku konieczności analizy stanu aktualnego traktować je jako doskonały materiał pomocniczy do terenowych badań kartograficznych.

Autor pragnie podziękować Recenzentom za poświęcony czas oraz cenne krytyczne uwagi i sugestie, które przyczyniły się do powstania ostatecznej wersji artykułu.

## LITERATURA

- 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. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 7: 637–650.
- BOBER L. 1984 – Rejony osuwiskowe w polskich Karpatach fliszowych i ich związek z budową geologiczną regionu. *Biul. Inst. Geol.*, 340: 115–162.
- BOBER L., THIEL K. & ZABUSKI L. 1997 – Zjawiska osuwiskowe w polskich Karpatach fliszowych. Geologiczno-inżynierskie właściwości wybranych osuwisk. Wyd. IBW PAN, Gdańsk.
- BORKOWSKI A., PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., JÓŻKÓW G. & WÓJCIK A. 2011 – Landslides mapping in Roznow lake vicinity, Poland using airborne laser scanning data. *Acta Geodyn. Geomater.*, 8, 3(163): 325–333.
- CARTER W., SHRESTHA R., TUELL D., BLOOMQUIST D. & SARTORI M. 2001 – Airborne laser swath mapping shines new light on earth's topography. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, 82 (46): 549–555.
- CIESZKOWSKI M., ŚLĄCZKA A. & ZUCHIEWICZ W. 1988 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Jaślicka (1056). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- CRUDEN D.M. & VARNES D.J. 1996 – Landslides types and processes. [W:] *Landslides: investigations and mitigation*. TRB Spec. Reports, 247: 36–75.
- 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. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- GRANICZNY M., KAMIŃSKI M., PIOTROWSKA A. & SURAJA M. 2012 – Wykorzystanie lotniczego skaningu laserowego do inwentaryzacji i monitoringu osuwiska w rejonie Łańcicy (gmina Lanckorona), pogórze Wielickie, Karpaty zewnętrzne. *Prz. Geol.*, 60 (2): 89–94.
- JABOVEDOFF M., OPPIKOFER T., ABELLÁN A., DERRON M.H., LOYE A., METZGER R. & PEDRAZZINI A. 2012 – Use of LiDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*, 61 (1): 5–28.
- JANKOWSKI L., KOPCIOWSKI R. & RYŁKO W. (red.) 2004 – Geological map of the Outer Carpathians: borderland of Poland, Ukraine and Slovakia 1 : 200 000, Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- KAMIŃSKI M. 2012 – Zastosowanie metod fotogrametrycznych do oceny dynamiki ruchów masowych – wybrane przykłady z Polski. *Arch. Fotogram., Kartogr. Teledetekcji*, 24: 111–122.
- KAMIŃSKI M. 2015 – Zastosowanie lotniczego skaningu laserowego i tomografii elektrooporowej w kompleksowych badaniach osuwisk – przykład z Pogórza Dynowskiego (Karpaty zewnętrzne). *Prz. Geol.*, 63 (7): 410–417.
- KAMIŃSKI M. & NITYCHORUK J. 2015 – Cyfrowa analiza fotogrametryczna tempa i charakteru ruchów masowych skarpy rzecznej doliny Bugu w rejonie Drohiczyzna (południowe Podlasie). *Prz. Geol.*, 63 (12/2): 1461–1471.
- KLECZKOWSKI A. 1955 – Osuwiska i zjawiska pokrewne. Wyd. Geol., Warszawa.
- KOPCIOWSKI R. 2006 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Nowy Żmigród (1039). *Narod. Arch. Geol. PIG-PIB*, Warszawa.
- KOPCIOWSKI R. 2009 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Tylawa (1055), *Narod. Arch. Geol. PIG-PIB*, Warszawa.
- MARGIELEWSKI W. 2004 – Typy przemieszczeń grawitacyjnych mas skalnych w obrębie form osuwiskowych polskich Karpat fliszowych. *Prz. Geol.*, 52 (7): 603–614.
- MARGIELEWSKI W. 2009 – Problematyka osuwisk strukturalnych w Karpatach fliszowych w świetle zunifikowanych kryteriów klasyfikacji ruchów masowych – przegląd krytyczny. *Prz. Geol.*, 57 (10): 905–917.
- MASTELLA L. 1975 – Osuwiska konsekwentno-strukturalne na wschodnim Podhalu. *Biul. Geol. UW*, 18: 259–270.
- MCKEAN J. & ROERING J. 2004 – Objective landslide detection and surface morphology mapping using high-resolution airborne laser altimetry. *Geomorphology*, 57: 331–351.
- MIGOŃ P., JANCEWICZ K. & KASPRZAK M. 2014 – Zasięg obszarów objętych osuwiskami w Górach Kamiennych (Sudety Środkowe) – porównanie map geologicznych i cyfrowego modelu wysokości z danych LiDAR. *Prz. Geol.*, 62 (9): 463–471.
- OZIMKOWSKI W., RUBINKIEWICZ J., ŚMIGIELSKI M. & KONON A. 2010 – Metodyka prac analitycznych i kartograficznych w problematyce osuwisk karpaccich w Polsce (w ramach projektu Systemu Osłony Przeciwośuwiskowej SOPO). Wyd. Liber. Warszawa: 1–73.
- POPRAWA D. & RĄCZKOWSKI W. 2003 – Osuwiska Karpat. *Prz. Geol.*, 51 (8): 685–692.
- 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.
- RUBINKIEWICZ J., KACZOROWSKI J. & KARWACKI K. 2015 – Uwarunkowania geologiczne i geomorfologiczne występowania największego w Polsce kompleksu osuwisk w rejonie Bonarówki (Karpaty zewnętrzne, Pogórze Strzyżowskie). Materiały konferencyjne: Ogólnopolska Konferencja O!SUWISKO, Warszawa: 63–66.
- SCHULZ W.H. 2004 – Landslides mapped using LiDAR imagery, Seattle, Washington. U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1396: 1–11.
- SIWICKI M. (red.) 2012 – Beskid Niski od Krynicy-Zdroju po Komańczę, mapa turystyczna w skali 1 : 50 000. CartoMedia, Zielona Góra.
- ŚLĄCZKA A. 1971 – Geologia jednostki dukielskiej. *Pr. Inst. Geol.*, 63: 1–74.
- ŚLĄCZKA A., BOBER L., CHOWIANIEC J., CIESZKOWSKI M., GIERAT-NAWROCKA D. & ZUCHIEWICZ W. 1991 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Jaślicka. Państw. Inst. Geol., Warszawa: 1–97.
- VARNES D.J. 1978 – Slope movement types and processes. [W:] Schuster R. & Krizek R. (red.), *Landslides – Analysis and control*. TRB NRC Washington, D.C., Spec. Reports, 176: 12–33.
- WDOWIARZ S., ZUBRZYCKI A. & FRYSZTAK-WOŁOWSKA A. 1988 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Rymanów (1040). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- WĘŻYK P. (red.) 2014 – Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR. GUGiK, Warszawa: 22–37.
- WOJCIECHOWSKI T., BORKOWSKI A., PERSKI Z. & WÓJCIK A. 2012 – Dane lotniczego skaningu laserowego w badaniu osuwisk – przykład osuwiska w Zbyszycach (Karpaty zewnętrzne). *Prz. Geol.*, 60 (2): 95–102.
- WÓJCIK A. & ZIMNAL Z. 1996 – Osuwiska wzdłuż doliny Sanu między Bachórczem a Rzecpołem (Karpaty, Pogórze Karpackie). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 374: 77–91.
- ZABUSKI L., THIEL K. & BOBER L. 1999 – Osuwiska we fliszu Karpat polskich. Geologia, modelowanie, obliczenia stateczności. Wyd. IBW PAN, Gdańsk: 1–171.
- ZIĘTARA T. 1969 – W sprawie klasyfikacji osuwisk w Karpatach fliszowych. *Stud. Geomorph. Carpatho-Balkanica*, 3: 21–29.
- ZIĘTARA T., BAJGIER M. & LIS J. 1990 – Rola zdjęć lotniczych w badaniach osuwisk w Beskidzie Śląskim. *Fotointerpr. w Geogr. UŚI*, 10 (20): 93–104.
- ZUBER R. & BLAUTH J. 1907 – Katastrofa w Duszatynie. *Czasopismo Techniczne*, 25. Lwów: 218–221.

Praca wpłynęła do redakcji 26.04.2016 r.  
Akceptowano do druku 30.06.2016 r.