



## Cyfrowa analiza fotogrametryczna tempa i charakteru ruchów masowych skarpy rzecznej doliny Bugu w rejonie Drohiczyzna (południowe Podlasie)

Mirosław Kamiński<sup>1</sup>, Jerzy Nitychoruk<sup>2</sup>



M. Kamiński



J. Nitychoruk

**Digital photogrammetric analysis of the rate and nature of mass movements of the Bug river valley escarpment in the Drohiczyzna area (southern Podlasie).** Prz. Geol., 63: 1461–1471.

*Abstract.* The traditional approach in photogrammetric studies relies mainly on the analysis of topographic maps, supported by geological and geomorphological field mapping. This paper presents an application of the modern method of three-dimensional earth imaging – Airborne Laser Scanning. The major advantage of this method is the filtering procedure, which allows to removing vegetation and other objects from the analysed surface, resulting in more precise terrain model. We used aerial photographs for preparation of two photogrammetric digital terrain models (DTMs), which were subsequently compared to evaluate dynamic properties of landslide areas. The difference between gratings within digital models was used to determine horizontal shifts in the area of landslide. The discrepancy presented

observed in the shaded relief image characterises positive elevations (erosion) shown in reddish colour, and negative ones (accumulation) displayed in bluish. The maximum scarp retreat driven by landsliding processes reached 17 m during the last 53 years, with ca. 562 m<sup>3</sup> of accumulated colluvium.

**Keywords:** Airborne Laser Scanning, digital photogrammetry, aerial photographs, mass movements, natural hazard, Drohiczyzna

Dolina Bugu w rejonie Drohiczyzna jest jednym z miejsc, gdzie rzeka bezpośrednio dociera do zbocza Wysoczyzny Drohiczyńskiej (ryc. 1). Takie położenie jest naturalną przyczyną uruchamiania szeregu procesów geodynamicznych. Erozyjne podcinanie stoków przez rzekę powoduje predysponowanie tego rejonu do występowania ruchów masowych, a szczególnie osuwisk.

Tradycyjna metoda inwentaryzacji osuwisk polega głównie na analizie geomorfologicznej map topograficznych i zdjęć lotniczych oraz kartowaniu geologicznym i geomorfologicznym (Banach, 1977; Mantovani i in., 1996; Grabowski i in., 2008). Jest to metoda czasochłonna i uciążliwa. Zasadniczą jej wadą jest subiektywne określanie zasięgu osuwiska na podstawie oceny wzrokowej. Jest to bardzo trudne zwłaszcza w terenie zurbanizowanym oraz bujnie pokrytym roślinnością. W ostatnich latach stosuje się do badania ruchów masowych dwie nowoczesne metody fotogrametryczne, takie jak: lotniczy skanowanie laserowe (ALS – Airborne Laser Scanning) oraz cyfrowe przetwarzanie stereopar zdjęć lotniczych pod kątem generowania wysokościowych cyfrowych modeli terenu.

Odtwarzanie fotogrametryczne rzeźby terenu na podstawie archiwalnych zdjęć lotniczych jest przydatną metodą w analizie geomorfologicznej ruchów masowych (Mora i in., 2003; Kamiński, 2011). Metoda ta dostarcza szybkiej, dokładnej i o względnie niskich kosztach informacji przestrzennej na temat zasięgu i dynamiki ruchów masowych. Do niewątpliwych zalet metody fotogrametrycznej należy dostęp do tanich archiwalnych zdjęć lotni-

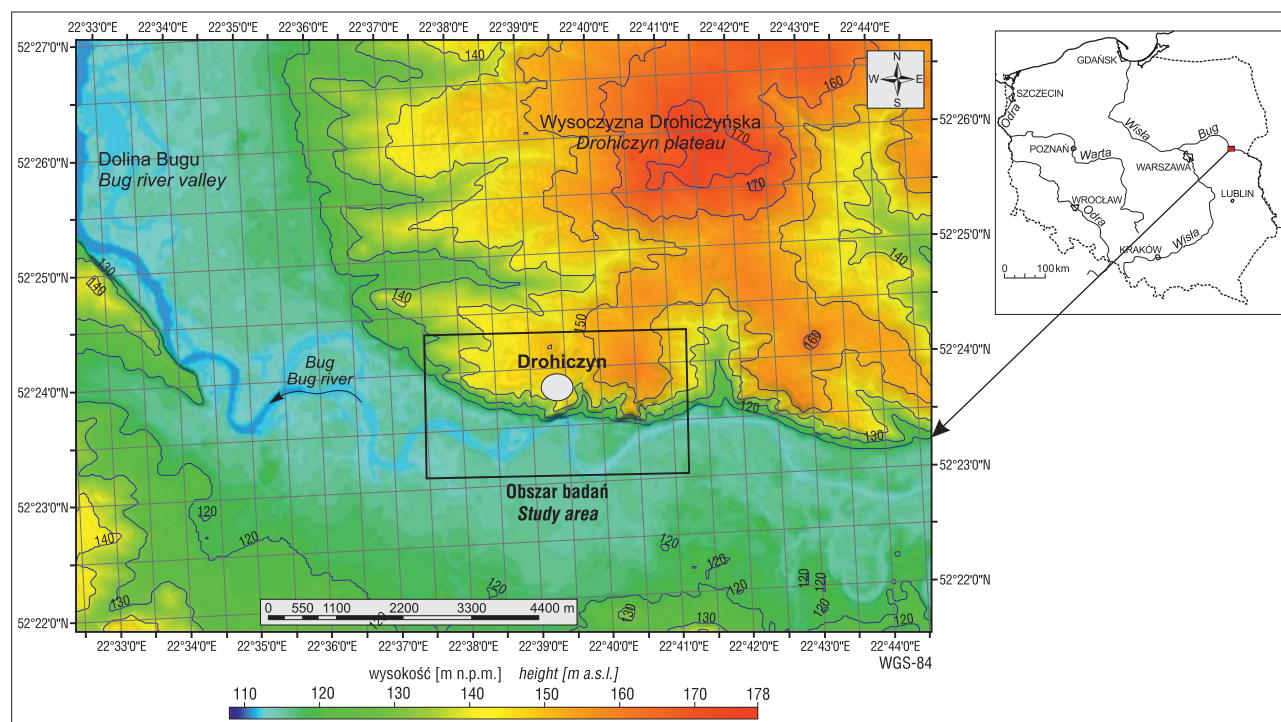
czych, które można zakupić w ośrodkach dokumentacji geodezyjnej i kartograficznej oraz w ośrodkach geodezji i kartografii wojskowej. Jednakże dla obszarów pokrytych gęstą roślinnością mają one ograniczone zastosowanie, głównie ze względu na skuteczne zakrywanie rzeźby terenu np. przez zarośla i korony drzew. Dla takich obszarów stosuje się z dużym powodzeniem lotniczy skanowanie laserowe. W efekcie laserowego skanowania przestrzeni otrzymujemy chmurę punktów, która wiernie odzwierciedla kontury skanowanych obiektów. Przeprowadzając proces filtracji i klasyfikacji chmury punktów, w końcowym rezultacie otrzymujemy punkty, które reprezentują np. powierzchnię terenu.

Badania terenów zagrożonych przez ruchy masowe z wykorzystaniem technik fotogrametrycznych były prowadzone m.in. przez Ostaficzuka (1962, 1965); Schustera & Križeka (1978); Grevego (1996); Geneliiego i in. (2002); Baldiego i in. (2005) oraz Kamińskiego (2005, 2011). Dane ALS są też z powodzeniem stosowane w szerszym zakresie w badaniach geologicznych zarówno za granicą (Hsio i in., 2003; Sekiguchi & Sato, 2004; Stackebrandt, 2005; Glenn i in., 2006; Schultz, 2007; Derron & Jaboyedoff, 2010), jak i w Polsce (por. m.in. Borkowski, 2005; Borkowski i in., 2011; Kasprzak & Traczyk, 2011; Kasprzak, 2012; Graniczny i in., 2012; Wojciechowski i in., 2012; Kamiński, 2014).

Z dotychczasowych badań ruchów masowych na omawianym terenie należy wymienić rejestrację osuwisk na obszarze całego kraju, w tym również w rejonie Drohiczyzna, którą w latach 1968–1970 prowadził Państwowy Instytut Geologiczny (Kühn i in., 1971). Opracowany wówczas

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; mirosław.kaminski@pgi.gov.pl.

<sup>2</sup> Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska; jerzy.nitychoruk@pswbp.pl.



**Ryc. 1.** Lokalizacja terenu badań na tle cieniowanego modelu cyfrowego terenu DTED (*Digital Terrain Elevation Data*)  
**Fig. 1.** Location of the study area on the background of shaded relief DTED digital model

katalog zawierał w skrótovej formie cały materiał rejestracyjny dla województwa podlaskiego (w ówczesnych granicach) przedstawiony w postaci tabelarycznej mapy występowania osuwisk w skali 1 : 100 000 oraz krótkiego opisu tekstowego. Obszar krawędzi Doliny Bugu w rejonie Drohiczyń został wówczas zaliczony do terenów predysponowanych do powstania ruchów masowych.

Kolejną pozycją w spisie literatury badań jest wykonana w ramach pierwszej części projektu SOPO (System Osłony Przeciwosuwiwkowej) Mapa obszarów predysponowanych do występowania ruchów masowych ziemi w województwie podlaskim (Grabowski i in., 2008). Rejon skarpy Bugu w Drohiczyń również został zaliczony do obszarów sprzyjających powstawaniu osuwisk. Jest to zatem obszar nierozpoznany pod kątem występowania ruchów masowych, a szczególnie osuwisk. Celem przeprowadzonych badań było przetestowanie nowoczesnych metod fotogrametrycznych, które zastosowano do analizy tempa i rozpoznania rodzajów ruchów masowych.

## RZEŻBA I BUDOWA GEOLOGICZNA

Okolice Drohiczyń cechuje dosyć urozmaicony charakter rzeźby. Wpływ na to ma wcięta na ponad 30 m w okalającą wysoczyznę dolina Bugu, stanowiąca lokalną bazę erozyjną dla procesów, które zachodziły tu od schyłku zlodowacenia warty. Maksymalne wysokości bezwzględne na północ od Drohiczyń dochodzą do 170 m n.p.m., a minimalne osiągają 115 m n.p.m. w dolinie Bugu (ryc.1). Charakterystycznym elementem rzeźby okolic Drohiczyń są pagórki, których geneza jest związana z postojem i recesją lądolodu warty (Nitychoruk i in., 2009). Deniwelacje powierzchni wysoczyzny połodowcowej i równiny wodnolodowcowej sięgają do ok. 20 m. Dolina Bugu przed Drohiczyńem ma przebieg wschód–zachód, a zaraz za nim

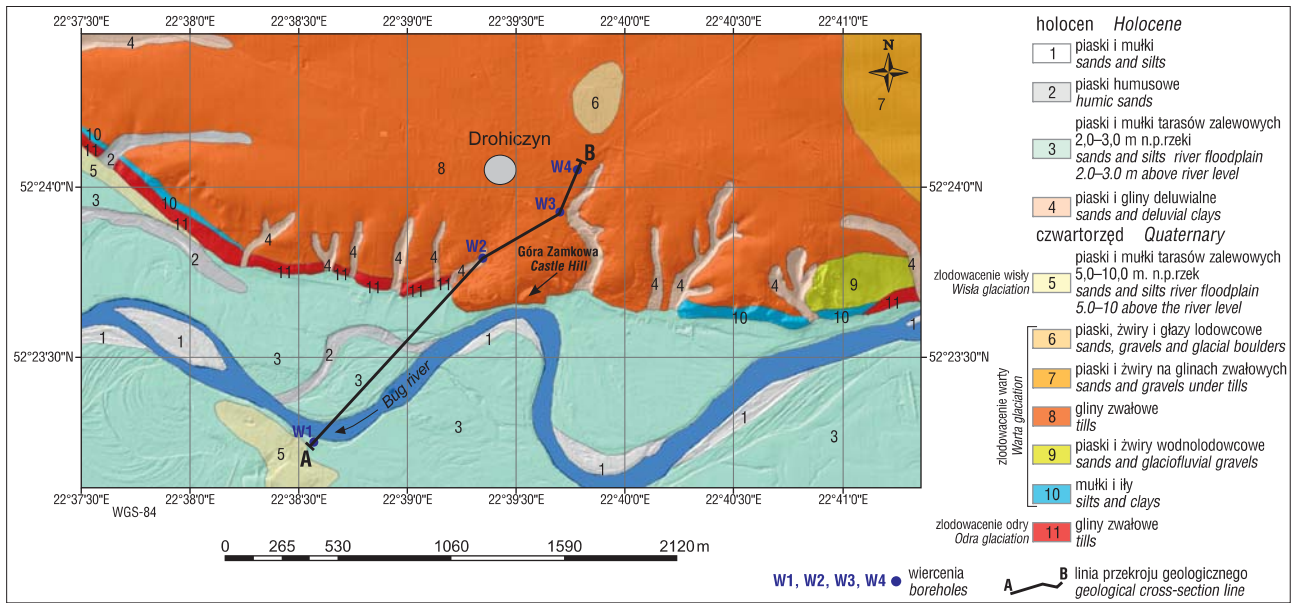
dosyć gwałtownie zmienia bieg na północny zachód, co jest prawdopodobnie uwarunkowane założeniami tektonicznymi głębokiego podłoża (Nitychoruk i in., 2009).

Występującą w okolicach Drohiczyń wysoczyznę morenową cechują strome krawędzie w kontakcie z doliną Bugu. Krawędź wysoczyń w samym mieście osiąga 32 m wysokości. Równiny wodnolodowcowe zajmują niewielkie powierzchnie na N i NE od Drohiczyń. W większości mają one równoleżnikowe rozprzestrzenienie, wskazując na odpływ wód również równoległe do czoła lądolodu. Taras nadzalewowy akumulacyjny, wyróżniony w dolinie Bugu, jest położony od 5 do 10 m n.p.rz. Równina tarasu zalewowego w rejonie Drohiczyń ma ok. 3 km szerokości. Taras zalewowy jest ograniczony krawędzią o wysokości 1–2 m. Taras nadzalewowy ma krawędź do 3 m wysokości. Starorzecza występujące w dolinie Bugu osiągają 1 km długości. Starorzecza suche tworzą widoczne w morfologii obniżenia o łukowatym kształcie.

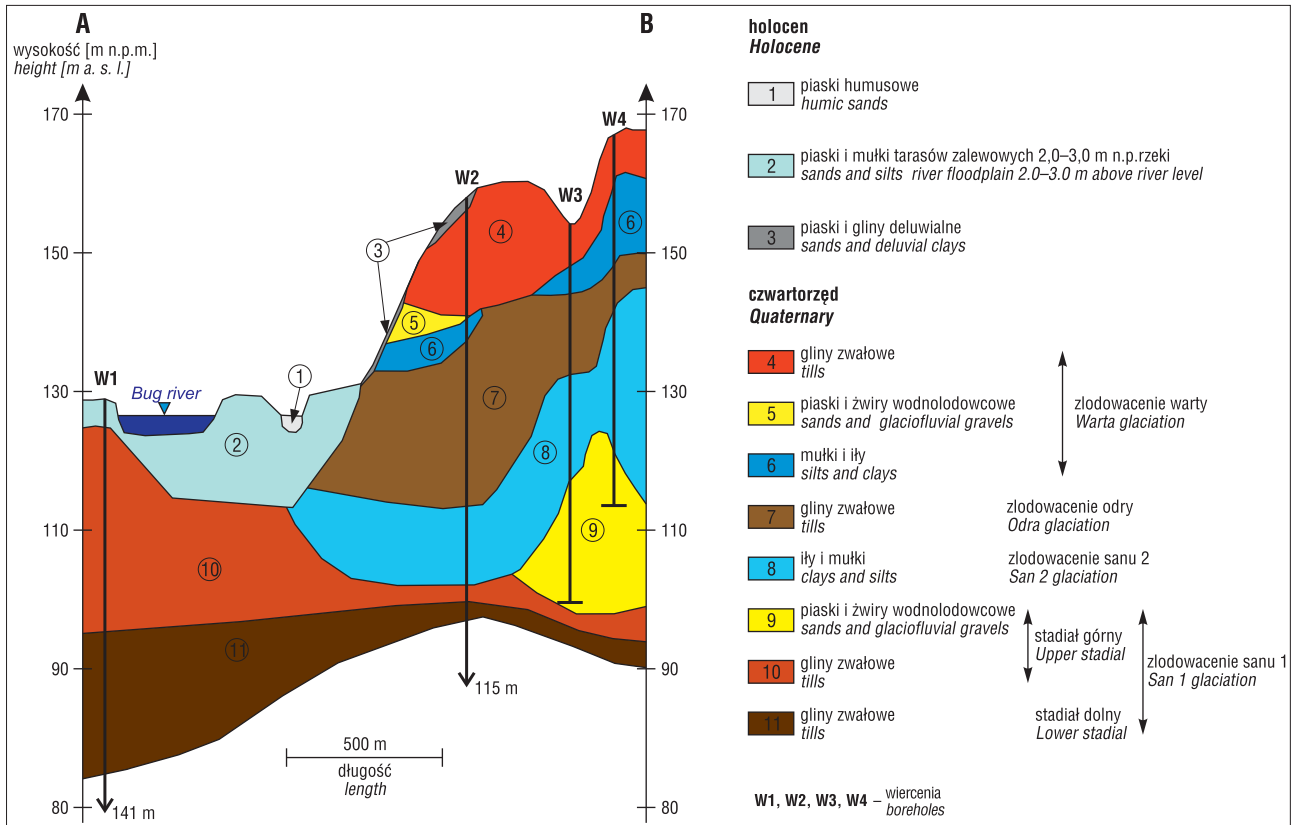
Urozmaicającą rzeźbę wysoczyń morenowej rozciągają erozyjne, odwadniane przez stałe i okresowe ciekę, mają średnio 10 m głębokości i nawiązują do doliny Bugu, stanowiąc charakterystyczny element krajobrazu.

Budowa geologiczna omawianego terenu jest prezentowana na arkuszu Drohiczyń Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000 (Nitychoruk i in., 2009).

Osady glacialne widoczne na powierzchni terenu w okolicach Drohiczyń pochodzą ze zlodowaceń środkowopolskich. Lądolód ze zlodowacenia odry pozostawił po sobie kompleks glin zwałowych (wydzielenie nr 11 – ryc. 2 i nr 7 – ryc. 3) maksymalnie o miąższości 30 m, które wychodzą na powierzchnię w krawędzi doliny Bugu. Gliny są ilasto-piaszczyste z pojedynczym brukiem barwy ciemnoszarej. W glinach występują ły z nielicznymi glazkami barwy brązowszarej. Nie jest wykluczone, że sedymentacja łów następowała pod lodem, z którego wytapiał



Ryc. 2. Mapa geologiczna okolic Drohiczyń na tle cieniowanego modelu LiDAR (wg Nitychoruka i in., 2009)  
Fig. 2. Geological map of the Drohiczyń environs on the background of shaded LiDAR model (after Nitychoruk et al., 2009)



Ryc. 3. Przekrój geologiczny przez dolinę Buga i skarpe rzeczną (wg Nitychoruka i in., 2009)  
Fig. 3. Geological cross-section through the Bug river valley and the valley slope (after Nitychoruk et al., 2009)

się materiał grubszy i opadał do zbiornika (Nitychoruk i in., 2009).

Analiza petrograficzna tych glin w wierceniu Kolonia Drohiczyń wykazała, że w składzie frakcji żwirowej zdecydowanie przeważają wapienie paleozoiczne nad skałami krystalicznymi, średnio ok. 40%.

Podczas złodowacenia warty okolice Drohiczyń były przykryte łądłodem, którego wkroczenie poprzedzała aku-

mulacja zastoiskowa mułków i mułków ilastych (wydzielenie nr 10 – ryc. 2 i nr 6 – ryc. 3) o miąższości do 10 m, częściowo odsłaniających się w krawędzi doliny Buga na poziomie 120–122 m n.p.m. Osady te są miejscami przykryte przez piaski wodnolodowcowe (wydzielenie nr 9 – ryc. 2 i nr 5 – ryc. 3), które były osadzone przed czołem łądłodu. Ich zasięg i miąższość jest niewielka, co prawdopodobnie wynika z krótkich okresów postoju łądłodu (Nitychoruk

i in., 2009). Gliny zwałowe zlodowacenia warty (wydzielenie nr 8 – ryc. 2 i nr 4 – ryc. 3) są ilasto-piaszczyste, brązowe lub brązowoszare i występują powszechnie, budując wysoczyznę polodowcową. Miąższość glin zwałowych dochodzi do 26 m. Deglacjacja arealna łańdolu warty sprzyjała powstawaniu odizolowanych brył martwego lodu, z którymi jest związanych wiele późniejszych form akumulacji wytopiskowej i wodnolodowcowej, zbudowanych z piasków, żwirów i głazów lodowcowych (wydzielenia nr 6 i 7 – ryc. 2).

Osady ze zlodowacenia wisły zachowały się głównie w dolinie Bugu (Nitychoruk i in., 2009), gdzie tworzą taras nadzalewowy, zbudowany z piasków i mułków rzecznych (wydzielenie nr 5 – ryc. 2). Należy przyjąć, że główne założenia morfologii tej doliny w obecnej formie powstały w trakcie zlodowacenia wisły i w holocenie. Początki przepływów rzecznych w jej strefie należy datować na schyłek zlodowacenia warty i interglacjału eemskiego, kiedy to połączenie powstałych po wycofującym się łańdolu zagłębień końcowych przyczyniło się do wykorzystania tych stref przez główne odpływy rzeczne (Nitychoruk i in., 2009).

Holocen to okres akumulacji w dolinach rzek i suchych dolinkach erozyjnych osadów mineralnych i organogenicznych (wydzielenia nr 1–4 – ryc. 2 i 1–3 – ryc. 3).

## METODYKA BADAŃ

### Lotniczy skaning laserowy (ALS)

Do badania rzeźby terenu wykorzystano dane wysokościowe pochodzące z projektu przeciwpowodziowego ISOK (Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami). Projekt ten prowadzi Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej, jako lider konsorcjum we współpracy z Instytutem Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Głównym Urzędem Geodezji i Kartografii, Rządowym Centrum Bezpieczeństwa i Instytutem Łączności. Wyniki uzyskane z tego projektu są udostępniane przez Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Warszawie. Dane uzyskiwane podczas skaningu laserowego są zapisywane w postaci plików ASPRS LAS częściej nazywanych po prostu LAS (*Laser File Format*). Skrót ASPRS pochodzi od nazwy Amerykańskiego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji.

Dane wysokościowe ALS dostarczono w postaci zbiorczych danych pomiarowych w formacie LAS, jako chmura punktów LiDAR o gęstości skanowania 4 punkty/m<sup>2</sup>. Dalszy proces obróbki chmury punktów był przeprowadzony w dedykowanym programowaniu LP 360 firmy Q Coherent GeoCue Group.

Podstawowymi procesami przetwarzania chmury punktów, otrzymanej w wyniku ALS, jest ich klasyfikacja i filtracja (Hejmanowska i in., 2008; Kurczyński, 2014). W oprogramowaniu LP 360 procesy te można wykonać automatycznie. Automatyczna klasyfikacja chmury punktów jest procesem umożliwiającym szybkie pogrupowanie danych wysokościowych ALS. Proces ten polega na przypisaniu każdemu punktowi z chmury ALS właściwej wartości odbicia wiązki laserowej charakterystycznej dla danego obiektu. W ten sposób dla badanego obszaru doliny Bugu wydzielono z chmury ALS punkty, które reprezentowały: powierzchnię, roślinność, wodę i budynki. Podstawowym procesem przed klasyfikacją chmury punktów jest

filtracja punktów położonych poniżej powierzchni terenu, tzw. punktów błędnych (ang. *low point*). Ich wyszukiwanie polega na analizie punktów nieposiadających najbliższego sąsiedztwa. Po wykonaniu tej czynności przystąpiono do zasadniczego etapu klasyfikacji mającego na celu wydzielenie z chmury tych punktów, które reprezentują powierzchnię. Stosując automatyczne algorytmy do klasyfikacji, dostępne w oprogramowaniu LP 360, wyodrębniono również punkty reprezentujące wodę (ang. *water*), roślinność (ang. *vegetation*) i budynki (ang. *buildings*) (ryc. 4). Przy czym warto zaznaczyć, że woda całkowicie pochłania promieniowanie lasera w zakresie bliskiej podczerwieni, jednak są rejestrowane nieliczne punkty odbicia wiązki lasera od pływających w wodzie przedmiotów i roślinności wodnej. Do penetracji wody stosuje się specjalne skanery batymetryczne, które wykorzystują światło laserowe zielone (Kurczyński, 2014).

Produktami będącymi wynikami przetwarzania chmury punktów są modele wysokościowe: numeryczny model pokrycia terenu – NMPT (ang. *Digital Surface Model – DSM*) oraz numeryczny model terenu – NMT (ang. *Digital Terrain Model – DTM*). W celu uwypuklenia różnych elementów pokrycia terenu, chmurę punktów NMPT można wyświetlać w różnych trybach, np. ze względu na wysokość punktów oraz w modelu barw zbliżonych do naturalnych RGB (*Red, Green, Blue*) (ryc. 5A i B). Z punktu widzenia zastosowania do badań geomorfologicznych rzeźby terenu najważniejszym produktem pochodzącym z lotniczego skaningu laserowego jest numeryczny model terenu. Z punktów reprezentujących numeryczną powierzchnię terenu możemy także automatycznie generować warstwicę terenu (ryc. 5C).

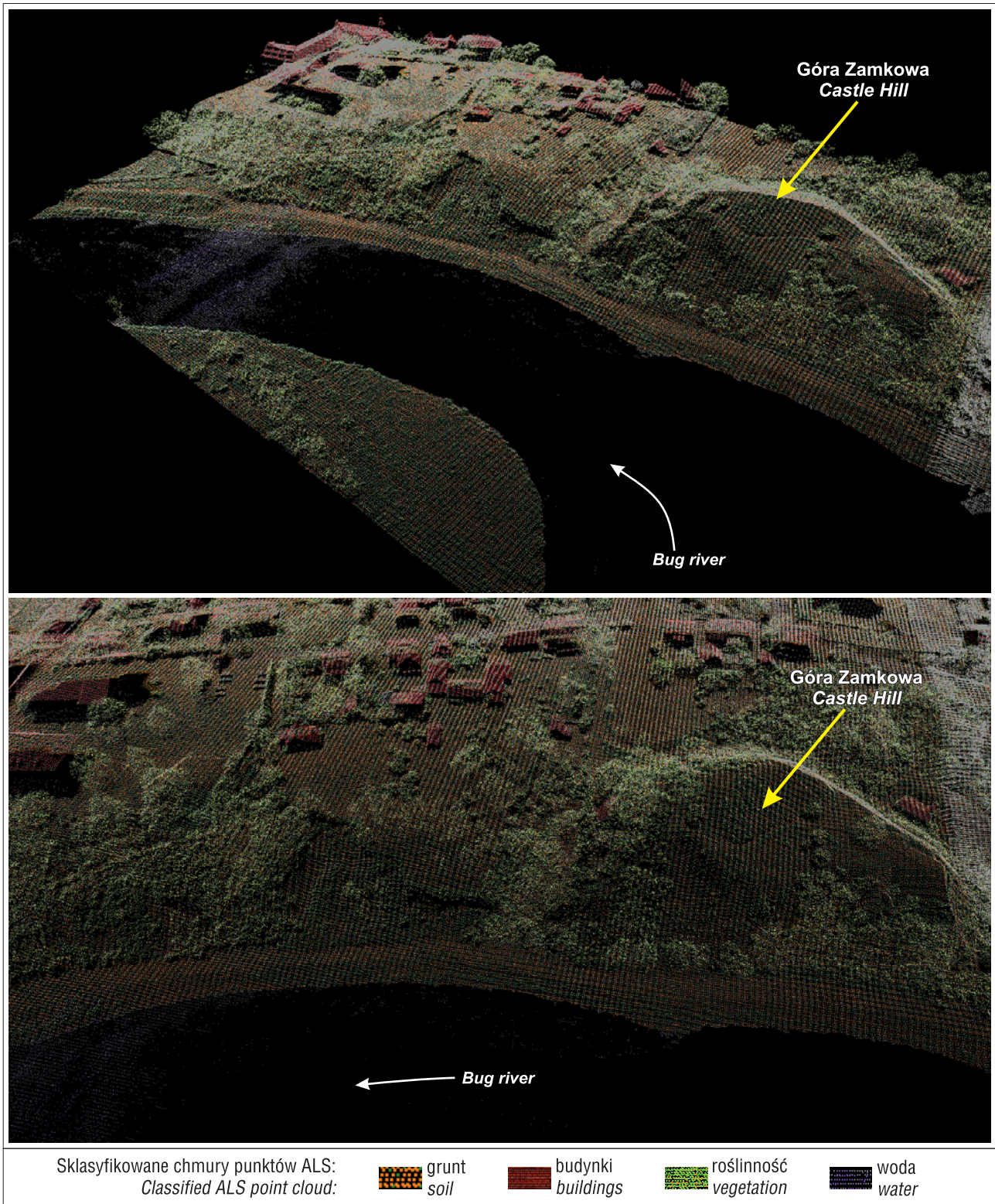
Do dalszych analiz przestrzennych wygenerowano cyfrowy model terenu w strukturze GRID o oczku siatki 1 m. Do interpolacji punktów wysokościowych reprezentujących powierzchnię terenu użyto algorytmu deterministycznego IDW (*Inverse Distance Weighting*) (Davis, 2002). Wybór metody interpolacji został wykonany metodą testu, która polegała na ocenie dokładności wykonanych modeli za pomocą różnych metod. Do testu użyto oprócz algorytmu IDW również algorytm najbliższego sąsiada (ang. *nearest neighbour*) i krigingu prostego (Urbański, 2012).

### Zdjęcia lotnicze

W celu określenia tempa zmian zasięgu krawędzi skarpy doliny Bugu wykorzystano archiwalne stereopary zdjęć lotniczych zakupione w Centralnym Ośrodku Dokumentacji Kartograficznej i Geodezyjnej w Warszawie. Do opracowania wykorzystano po dwie archiwalne stereopary czarno-białych zdjęć lotniczych w skali 1 : 10 000 wykonanych w 1957 i 2010 r. Następnie na skanerze fotogrametrycznym LH Systems DSW 500 zdjęcia zeskanowano rozdzielczością wynoszącą 21 µm.

Do opracowania cyfrowych modeli terenu wykorzystano fotogrametryczną stację cyfrową wraz z dedykowanym jej oprogramowaniem Dephos 4.13. Jest to oprogramowanie wielomodułowe zawierające m.in. narzędzia do orientacji wewnętrznej wzajemnej i bezwzględnej zdjęć lotniczych. Opracowanie stereogramu zdjęć lotniczych przebiegało w kilku etapach:

- stworzenie projektu fotogrametrycznego,

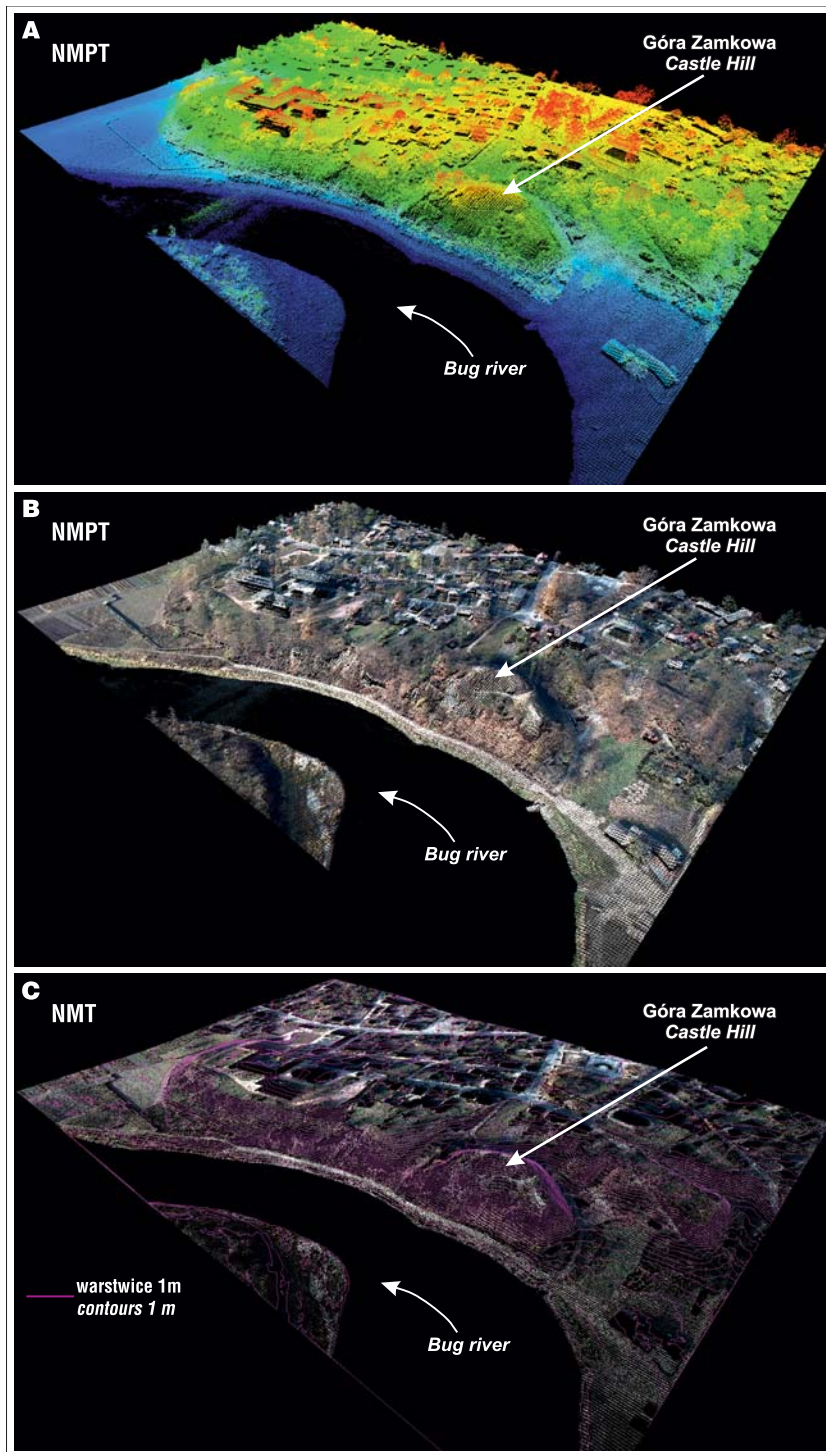


**Ryc. 4.** Widok przestrzenny sklasyfikowanej chmury punktów ALS  
**Fig. 4.** Spatial view of classified ALS point cloud

- orientacja wewnętrzna zdjęć,
- orientacja wzajemna zdjęć (budowa modelu),
- orientacja bezwzględna,
- opracowywanie cyfrowego modelu terenu (pomiar).

W skład projektu fotogrametrycznego wchodzi m.in. informacje ogólne o projekcie, dane dotyczące specyfikacji kamery oraz informacje dotyczące zdjęć lotniczych. W celu stworzenia projektów fotogrametrycznych wykorzy-

stano dane z aerotriangulacji obu nalotów (1957, 2010 r.). Dla wyrównania ich aerotriangulacji pomierzono współrzędne 20 fotopunktów (punktów charakterystycznych w terenie). Pomiar terenowy fotopunktów został przeprowadzony statycznymi pomiarami GPS. Użyto odbiornika GNSS (GRS 1 z anteną PG-A1) z wbudowanym modemem GSM pozwalającym na pracę w trybie RTK dzięki wykorzystaniu sieci stacji referencyjnych ASG-EUPOS. Dokładność



**Ryc. 5.** Chmura punktów przedstawiająca NMPT wyświetlona ze względu na: **A** – wysokość punktów, **B** – tryb barw RGB. **C** – chmura punktów przedstawiających powierzchnię NMT wyświetlona w trybie barw RGB

**Fig. 5.** The cloud of points representing the DSM displayed with respect to: **A** – the height of points, **B** – in the RGB color mode. **C** – the cloud of points of the DTM surface, displayed in RGB

**Tab. 1.** Zestawienie wyników aerotriangulacji  
**Table 1.** Summary of the results of aerial triangulation

RMS x [m]	RMS y [m]	RMS z [m]	RMS całkowity RMS total [m]	Liczba zdjęć lotniczych The number of aerial photographs	Rok nalotu Raid year
0,353	0,341	0,148	0,325	2	1957
0,311	0,263	0,04	0,314	2	2010

pomiarową zestawu GNSS pracującego w trybie RTK oceniono na  $\pm 1,5$  cm w płaszczyźnie horyzontalnej oraz  $\pm 2$  cm w płaszczyźnie pionowej. Aerotriangulacje dla obu bloków zdjęć lotniczych przeprowadzono w oprogramowaniu Dephos, wykonując ich orientację wewnętrzną, wzajemną i bezwzględną (tab. 1).

Po wykonaniu wyżej wymienionych etapów orientacji stereogramów zdjęć lotniczych przystąpiono do opracowania fotogrametrycznego cyfrowych modeli terenu. Interpretację stereogramów i dygitalizację 3D elementów rzeźby terenu wykonano w module Dephos Mapper. W celu dokonania pomiarów fotogrametrycznych wygenerowano automatycznie siatkę punktów wysokościowych o oczku 1 m. Siatka ta została poddana stereoskopowej edycji polegającej na określeniu wartości punktów siatki (tzw. pikiet). Wartości pomiaru wysokości pikiet siatki zostały wzbogacone w wyniku digitalizacji o tzw. linie nieciągłości powierzchni terenu (ang. *break lines*), np. krawędzie skarp oraz linie grzbietów. W efekcie otrzymano zbiór danych wysokościowych punktowych i liniowych. Za pomocą dostępnych narzędzi zawartych w module Dephos Mapper wygenerowano automatycznie rysunki wektorowe (warstwico-we), które przedstawiały rzeźbę krawędzi wysoczyzny w 1957 i 2010 r. Otrzymane warstwice posłużyły do wygenerowania modeli cyfrowych terenu w strukturze TIN (model trójkątowy, ang. *Triangulated Irregular Network*) oraz GRID.

## WYNIKI

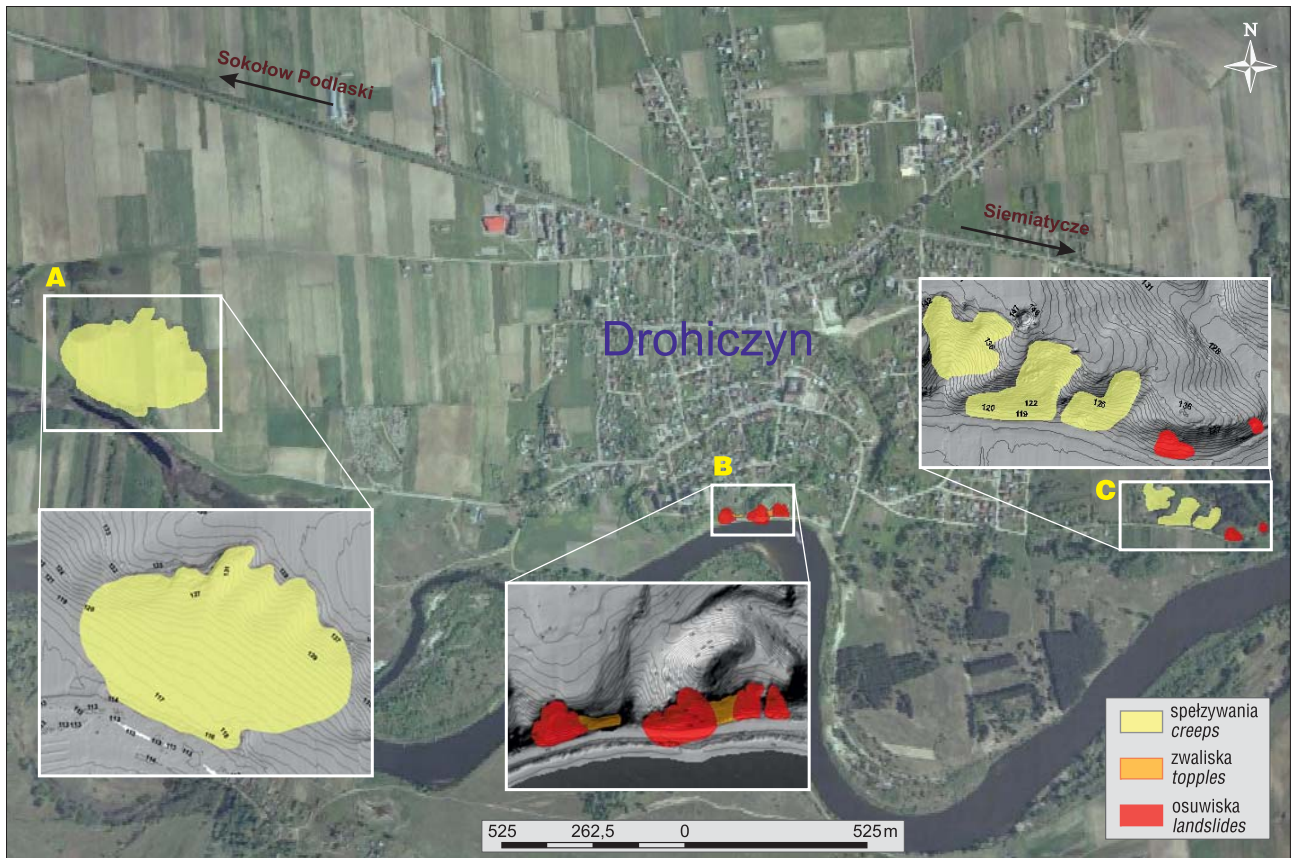
### Inwentaryzacja ruchów masowych

W badanym obszarze doliny Bugu ruchy masowe stwierdzono w trzech rejonach (ryc. 6).

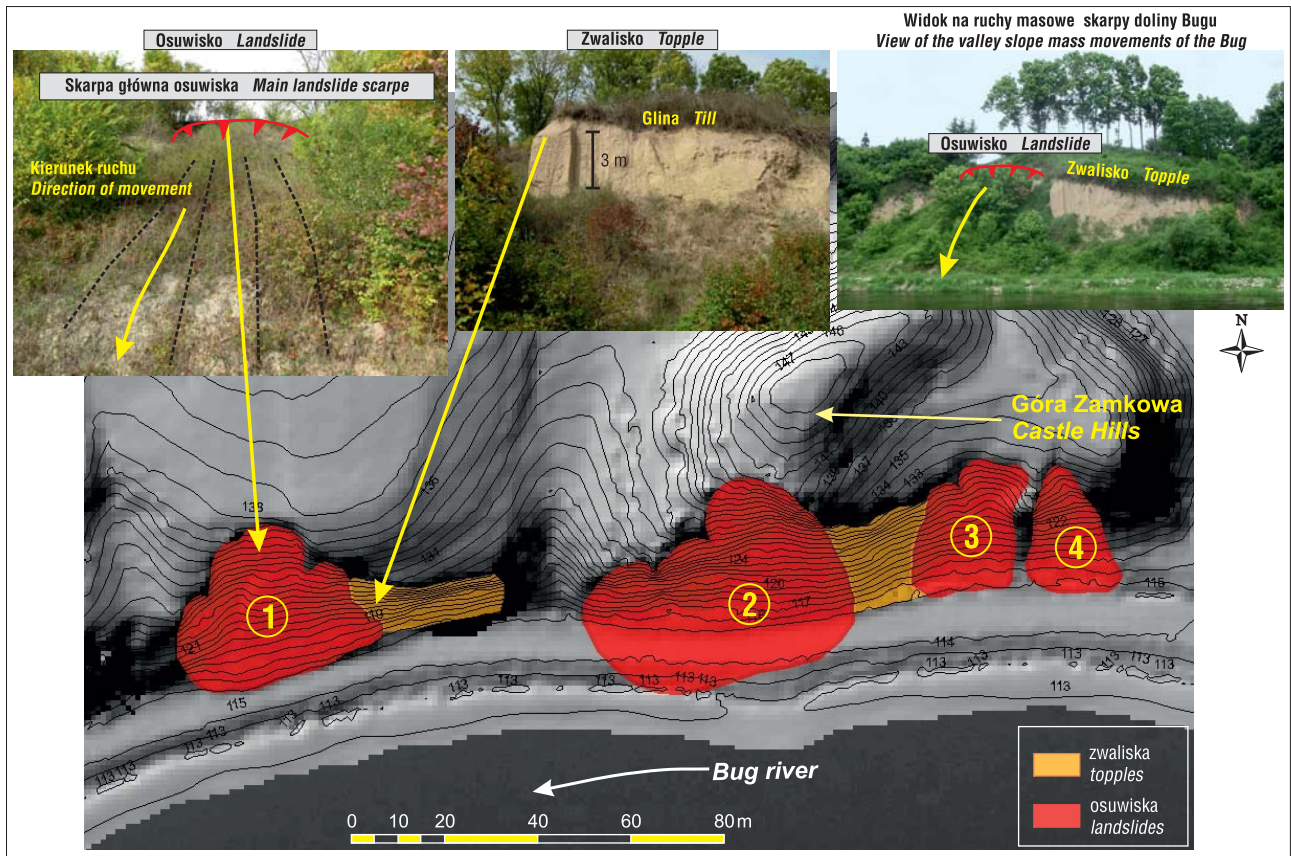
**Rejon A** charakteryzuje się występowaniem spęływania gruntu. Obszar zagrożony przez ten proces zajmuje powierzchnię ok. 8 ha. Czynnikiem powodującym uruchomienie tego zjawiska jest sprzyjająca budowa geologiczna (obecność w podłożu iłów) oraz nachylenia terenu. Pełzanie nie daje wyraźnych efektów geomorfologicznych. O jego występowaniu w badanym obszarze świadczy

m.in. pofalowana powierzchnia terenu, która wskazuje na ciągle powolne ruchy gruntu. Efekty tego procesu są zacierane przez intensywną działalność rolniczą człowieka.

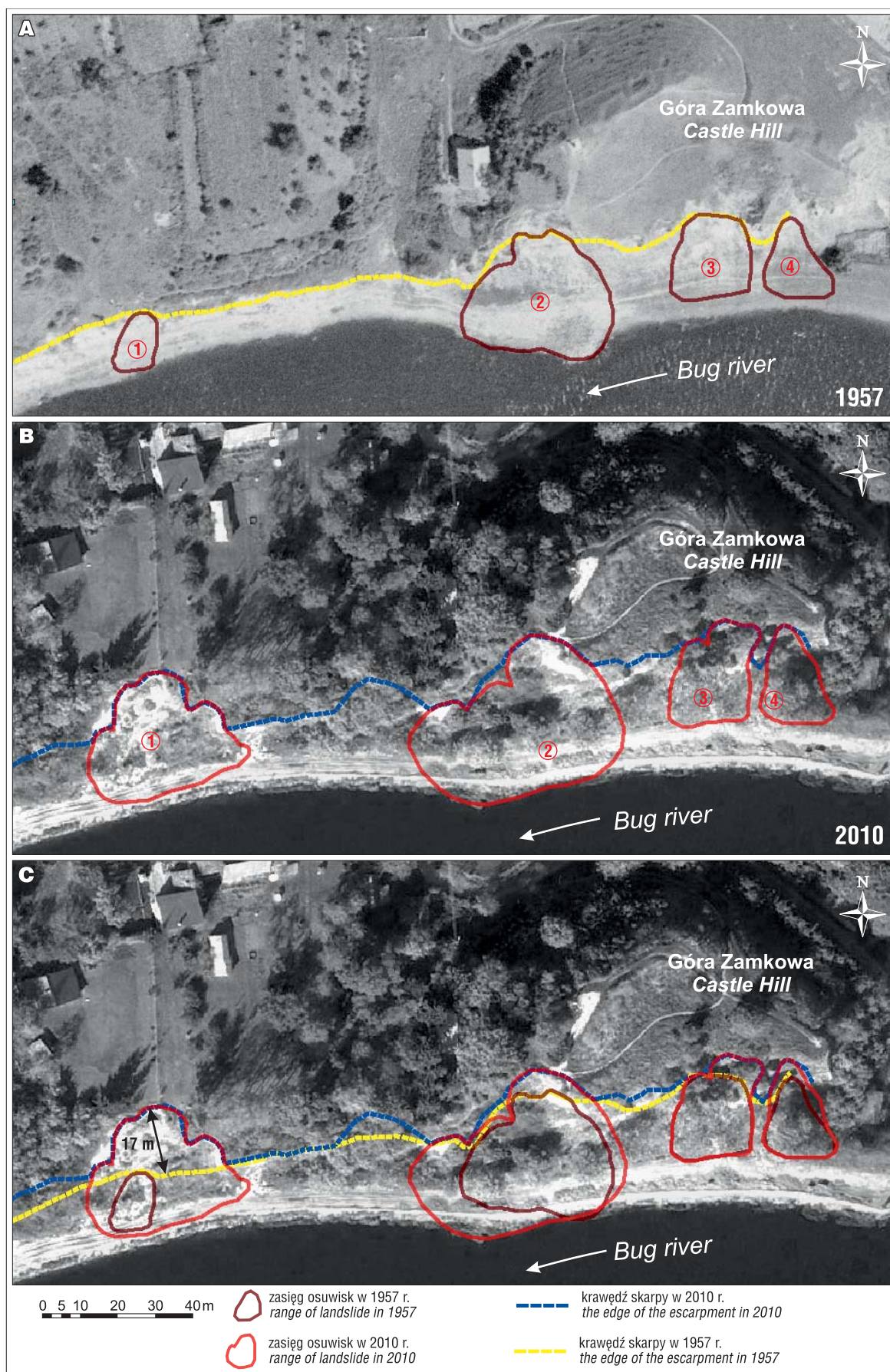
**Rejon B** jest położony w okolicy krawędzi skarpy doliny Bugu w Drohiczyńcu. Skarpa jest niszczona tutaj przez cztery osuwiska oraz procesy grawitacyjne prowadzące do wystąpienia zwalisk i drobnych obrywów materiału luźnego (ryc. 6) (Dikau i in., 1996).



Ryc. 6. Obszary występowania ruchów masowych na tle ortofotomapy i cyfrowego modelu terenu ALS – A, B, C  
 Fig. 6. Areas of occurrence of mass movements on the background of orthophotomap and digital elevation model ALS – A, B, C



Ryc. 7. Rozmieszczenie ruchów masowych na prawym brzegu doliny Bugu koło Drohiczyń  
 Fig. 7. Mass movement distribution on the right bank of the Bug valley near Drohiczyń



**Ryc. 8.** Zasięg osuwisk i krawędzi skarpy w 1957 r. (A), oraz w 2010 r. (B). C – porównanie zasięgów osuwisk i krawędzi skarpy między latami 1957 a 2010

**Fig. 8.** Range of landslides and edges of the escarpment in 1957 (A), in 2010 (B). C – comparison ranges of landslides and edges of the escarpment between 1957 and 2010



Osuwiska (nr 2, 3 i 4), które występują na Górze Zamkowej, nie zagrażają lokalnej infrastrukturze (ryc. 7). Koluwia osuwisk nr 3 i 4 są starymi formami o niewyraźnych granicach, których rzeźba wewnątrz osuwiskowa została zatarta przez procesy spłukiwania, a także przekształcenia antropogeniczne. Obecnie obie formy osuwiskowe nie przejawiają żadnych oznak aktywności. Największe z badanych osuwisk (nr 2), o powierzchni wynoszącej ok. 1,4 ha, charakteryzuje się rozległym czołem, które nasunęło się na północny brzeg koryta Bugu (ryc. 7). Wysokość jego skarpy głównej wynosi ok. 2 m, a długość 45 m.

Osuwisko nr 1 położone na zachód od Góry Zamkowej znajduje się w sąsiedztwie kompleksu klasztorowego franciszkanów. Skarpa główna ma ok. 2 m, a rozciągłość koluwiów ok. 32 m. Osuwisko to zajmuje powierzchnię ok. 0,8 ha.

Czoła osuwisk nr 1, 3 i 4 są słabo widoczne w rzeźbie terenu, co jest wynikiem usuwania materiału koluwalnego przez rzekę Bug oraz działalności człowieka. Materiał koluwalny składa się głównie z glin, ilów, piasków i żwirów. Strefy poślizgu, przy kluczowym udziale wód podziemnych, tworzą się najprawdopodobniej na granicy stropu ilów zastoiowych i powstały w wyniku ruchu rotacyjnego koluwiów osuwiskowych.

Zwaliska i drobne obrywy gliny, które występują między osuwiskami, przyczyniają się również do niszczenia skarpy doliny Bugu w rejonie Góry Zamkowej. Zwaliska tworzą się w glinie zwałowej, gdy ściana skalna jest stroma i jednocześnie pocięta szczelinami, w których może migrować woda opadowa. Wówczas tworzą się pakiety skalne o chwiejnej równowadze, które zwałają się w kierunku podcia.

**Rejon C** znajduje się na wschód od Góry Zamkowej, gdzie krawędź doliny Bugu ma łagodniejsze nachylenia terenu niż w rejonie Drohiczyzna. Zarejestrowano tu dwa osuwiska i trzy miejsca spłyzywania gruntu (ryc. 6). Osuwiska są niewielkich rozmiarów. Największe z nich ma długość ok. 20 m. Wysokość skarpy głównej wynosi ok. 1,5 m. Nie stanowią one zagrożenia dla lokalnych dróg i budynków.

### Tempo zmian krawędzi skarpy

Na podstawie archiwalnych zdjęć lotniczych pochodzących z lat 1957 i 2010, opracowano szkic fotointerpretacyjny tempa zmian zasięgów granic osuwisk oraz krawędzi skarpy doliny Bugu w rejonie Drohiczyzna (ryc. 8). Stereogramy z 2010 r. przedstawiają krawędź skarpy, która zasadniczo zmieniła swój kształt i zasięg w stosunku do jej przebiegu z 1957 r. Jest również mniej widoczna z powodu gęstego pokrycia roślinnością. Porównanie wyinterpretowanych linii krawędzi skarpy z lat 1957 i 2010 wskazuje na większe tempo przemieszczeń i aktywność obszarów położonych na zachód od Góry Zamkowej. Największą wartość przemieszczeń, wynoszącą ok. 17 m, odnotowano w obrębie osuwiska nr 1 (ryc. 8C). Jest ono położone na zachód od Góry Zamkowej i zaznaczyło się na zdjęciu lotniczym niewyraźnymi granicami. Dopiero studiując jego zasięg w obrazie stereoskopowym, dostrzeżono skarpe główną. Jego długość wyniosła około 14 m. Porównując wyinterpretowane granice osuwiska ze zdjęć lotniczych z 1957 i 2010 r., należy stwierdzić, że jego granice uległy znacznemu powiększeniu (ryc. 8C), a długość w 2010 r.

wynosiła około 32 m. Jest to więc przykład osuwiska delapsywnego, czyli takiego, którego rozwój nastąpił od dołu w górę stoku.

Osuwisko nr 2 położone na Górze Zamkowej zwiększyło zasięg i powierzchnię w stosunku do swoich granic wyinterpretowanych na zdjęciu lotniczym z 1957 r. (ryc. 8C). Długość osuwiska w 1957 r. wyniosła ok. 31 m, a w 2010 r. już ok. 36 m. Skarpa główna osuwiska przesunęła się w górę stoku o ok. 6 m. Widoczne są również zmiany w zasięgu czoła osuwiska.

Na podstawie archiwalnych stereopar zdjęć lotniczych dla osuwiska nr 1 wykonano dwa wysokościowe cyfrowe modele terenu na stacji fotogrametrycznej. Efektem opracowania pomiarów fotogrametrycznych był rysunek poziomicowy zrobiony zarówno dla zdjęć z 1957 r., jak i z 2010 r. Z rysunków warstwicznych obu modeli ostatecznie wygenerowano cyfrowe modele terenu w strukturze TIN. W celu prześledzenia zmian w rzeźbie terenu między otrzymanymi modelami, wykonano podłużny morfologiczny przekrój C–D przez fragment strefy krawędziowej skarpy (ryc. 9). Z analizy przekroju wynika, że w 1957 r. skarpa w badanym regionie nie była jeszcze niszczone przez osuwisko. Dopiero na profilu z 2010 r, przedstawiającym rzeźbę terenu, widać skarpe główną osuwiska oraz powierzchnię pofalowaną koluwium. Oszacowana geometrycznie przypuszczalna strefa poślizgu wyniosła 3 m.

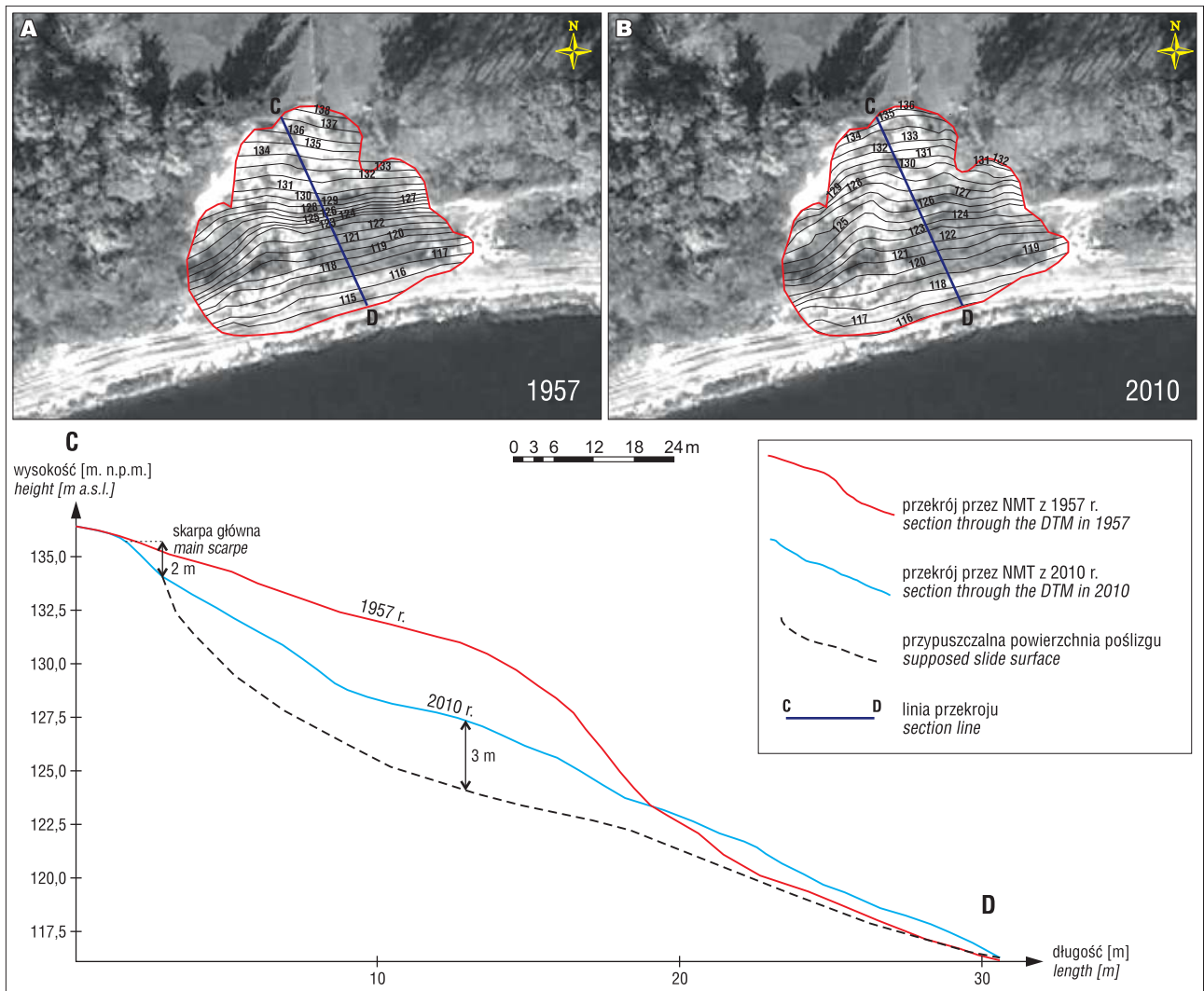
Wykorzystując narzędzia analityczne dostępne w oprogramowaniu ArcGis, obliczono przestrzenne przemieszczenia i objętości osuniętych mas skalnych, które wystąpiły w osuwisku przez 53 lata (ryc. 10). Objętość mas skalnych, które uległy przemieszczeniu w strefie skarpy głównej wyniosła ok. 883 m<sup>3</sup>, a objętość materiału zakumulowanego w rejonie czoła osuwiska ok. 562 m<sup>3</sup>. Brakująca objętość 321 m<sup>3</sup> przemieszczonych mas skalnych została usunięta erozyjnie przez Bug.

### PODSUMOWANIE

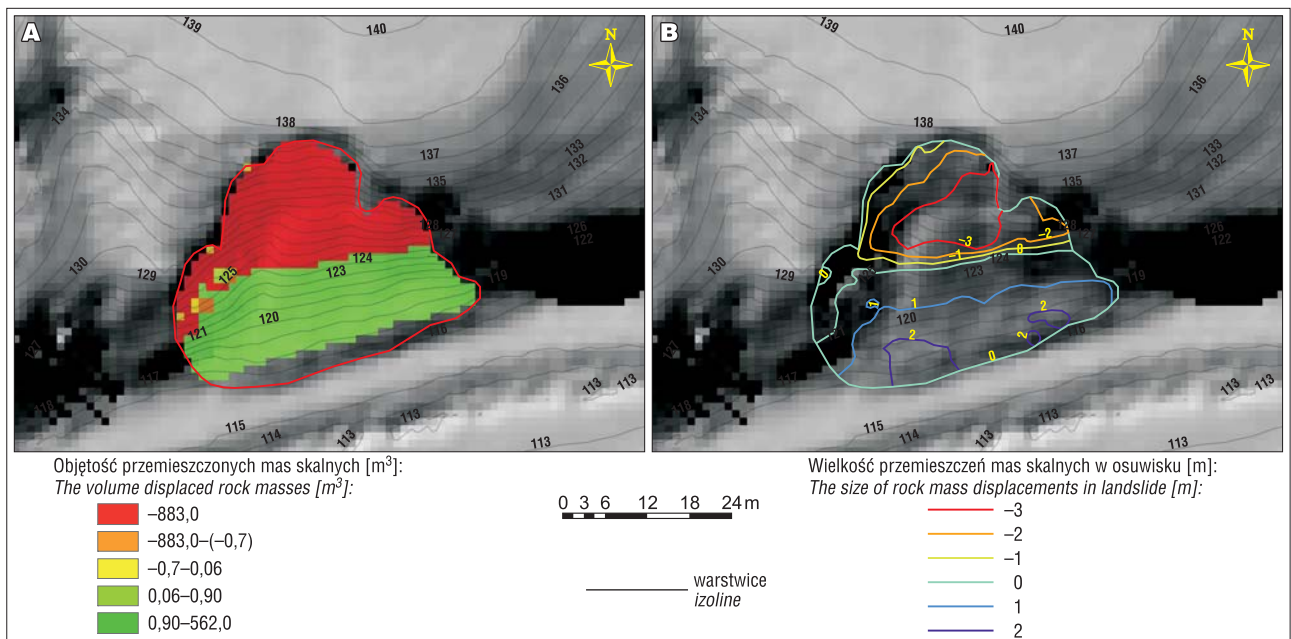
Zdjęcia lotnicze pozwalają obserwować zmiany w powierzchni terenu na przestrzeni wielu lat. Na ich podstawie można opracowywać fotogrametryczne modele cyfrowe terenu. Niedoskonałość tej metody wynika głównie z ograniczonych możliwości jej zastosowania dla obszarów pokrytych roślinnością. Natomiast dużym atutem jest fakt, że zarówno Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej, jak i Wojskowy Ośrodek Geodezji i Teledetekcji posiadają w swoich zasobach liczne zdjęcia lotnicze pochodzące z różnych lat.

Dane pozyskane z lotniczego skaningu laserowego (ALS) umożliwiły dokładne wyznaczenie zasięgów osuwisk, zwalisk i spłyzywań terenu. Wykorzystując narzędzia dostępne w oprogramowaniu ArcGis, można określić większość parametrów morfometrycznych osuwisk, takich jak: wysokości skarpy głównych, długość i szerokość oraz zajmowaną powierzchnię. Wszystkie badane osuwiska powstały w wyniku ruchu rotacyjnego, o czym świadczą kształty koluwiów osuwiskowych. Przyczyny powstania lub uaktywnienia się ruchów osuwiskowych należy wiązać z podcinaniem erozyjnym skarpy wysoczyzny przez Bug oraz z wysokimi poziomami wód gruntowych.

Analiza wysokościowych cyfrowych modeli terenu ułatwia szybkie i precyzyjne wyznaczenie granicy i okreś-



Ryc. 9. Przekrój podłużny poprzez modele cyfrowe terenu pomiędzy latami 1957 i 2010; NMT – numeryczny model terenu  
 Fig. 9. Longitudinal section through the digital terrain models between 1957 and 2010; DTM – Digital Terrain Model



Ryc. 10. Przestrzenna dynamika osuwiska pomiędzy rokiem 1957 a 2010; wartości dodatnie oznaczają akumulację mas skalnych, a wartości ujemne ich erozję  
 Fig. 10. Spatial dynamics of the landslide between the years 1957 and 2010; positive values indicate accumulation of rock masses, and negative values their erosion

lania tempa aktywnego osuwiska. Porównując modele cyfrowe terenu, które zostały wykonane dla osuwiska nr 1, obliczono wielkość przestrzenną przemieszczeń i objętość mas skalnych przemieszczonych między rokiem 1957 a 2010. Oszacowano również maksymalną głębokość występowania strefy poślizgu. Na archiwalnych stereoparach zdjęć lotniczych wyinterpretowano zmiany przebiegu linii krawędzi skarpy i obliczono jej maksymalne przesunięcie w kierunku ładu.

Otrzymane wyniki należy uszczegółowić i zweryfikować na zestawach archiwalnych zdjęć lotniczych pochodzących z innych lat. Dałoby to odpowiedni materiał porównawczy i analityczny. Ponadto w celu rozpoznania struktury osuwisk i budowy geologicznej skarpy należałoby wykonać wiercenia oraz badania geofizyczne, np. metodą tomografii elektrooporowej ERT (*Electrical Resistivity Tomography*).

Autorzy pragną serdecznie podziękować anonimowym Recenzentom za krytyczne uwagi dotyczące treści artykułu.

## LITERATURA

- BALDI P., FABRIS M., MARSELLA A. & MONTICELLI R. 2005 – Monitoring the morphological evolution of the Sciara del Fuoco during the 2002–2003 Stromboli eruption using multi-temporal photogrammetry. *J. Photogram. Remote Sens.*, 59: 199–211.
- BANACH M. 1977 – Rozwój osuwisk na prawym zboczu doliny Wisły między Dobrzyniem a Włocławkiem. *Pr. Geogr.*, 124: 7–98.
- BORKOWSKI A. 2005 – Lotniczy skaningu laserowy, jako metoda pozyskiwania danych dla potrzeb modelowania hydrodynamicznego, [W:] Aktualne problemy rolnictwa, gospodarki żywnościowej i ochrony środowiska. AR Wrocław: 129–36.
- 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.
- DAVIS J.C. (red.) 2002 – Statistics and data analysis in geology. John Wiley & Sons. New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore.
- DERRON M.H. & JABOYEDOFF M. 2010 – LIDAR and DEM technique for landslides monitoring and characterization. *Nat. Hazard Earth Syst. Sci.*, 10 (9): 1877–1879.
- DIKAU r., BRUNDSSEN D., SCHROTT L. & IBSEN M. (red.) 1996 – Landslide Recognition. John Wiley & Sons. Springer.
- GENELII G., GIUSTI E. & PIZZAFERII G. 2002 – Photogrammetric technique for the investigation of the Corniglio landslide. *Applied Geomorphology, Theory and practice*. John Wiley & Sons: 39–48.
- GLENN N., STREUTKER D., CHADWICK J., THACKRAY G. & DORSCH S. 2006 – Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*, 73 (1/2): 131–148
- 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. Ministerstwo Środowiska.
- GRABOWSKI D. (red.), KUCHARSKA M. & NOWACKI Ł. 2007 – Mapa osuwisk i obszarów predysponowanych do występowania ruchów masowych w województwie podlaskim. Nar. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- GRANICZNY M., KAMIŃSKI M., PIĄTKOWSKA A. & SURALA 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.
- GREVE C. 1996 – Digital Photogrammetry an addendum to the manual of Photogrammetry. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland.
- HEJMANOWSKA B., BOROWIEC N. & BADURSKA M. 2008 – Przetwarzanie lotniczych danych lidarowych dla potrzeb generowania NMT i NMPT. *Arch. Fotogr., Karto i Teledet.*, 18a: 151–162.
- HSHIO K.H., Yu M.F. & STENG Y.H. 2003 – Change Detection of Landslide Terrains Using Grodnu – based LIDAR data: Proc. of the Soc. Chinese Assoc. Geogr. Infor.: 36–54.
- KAMIŃSKI M. 2005 – Analiza numeryczno-geologiczna osuwisk na Pogórze Dynowskim. Praca doktorska. Nar. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa: 1–127.
- KAMIŃSKI M. 2011 – Zastosowanie fotogrametrycznych modeli cyfrowych terenu i zdjęć lotniczych w badaniu dynamiki osuwiska Śliwnica (Pogórze Dynowskie). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 446: 85–94.
- KAMIŃSKI M. 2014 – Zagrożenia geodynamiczne wybranego obszaru Podlasia i Lubelszczyzny w świetle cyfrowej analizy zdjęć lotniczych i danych z lotniczego skaningu laserowego ALS. LXXXIII Zjazd Nauk. Pol. Tow. Geol., Biała Podlaska, 29–31.05: 21.
- KASPRZAK M. 2012 – Relief of the Stołowe Mountains – a test area for studies in geomorphometry. [W:] Kasprzak M. & Migoń P. (red.), Góry Stołowe. Geology, Landforms, Vegetation Patterns and Human Impact. Inst. Geogr. i Rozwoju Region. Univ. Wrocław, Wrocław: 55–73.
- KASPRZAK M. & TRACZYK A. 2011 – Rzeźba i rozwój doliny Izery w Sudetach Zachodnich. *Opera Corcontica*, 48: 7–34.
- KURCZYŃSKI Z. 2014 – Fotogrametria. PWN Warszawa.
- KÜHN A., BAŻYŃSKI J. & MALINOWSKI J. (red.) 1971 – Katalog osuwisk województwo podlaskie. Instytut Geologiczny, Zakład Geologii Inżynierskiej. Nar. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- MANTOVANI F., SOETERS R. & VAN WESTEN C.J. 1996 – Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. *Geomorphology*, 15 (1996): 213–225.
- MORA P., BALDI P., CASULA G., FABRIS M., GHIROTTI M., MAZZIONI E. & PESCI A. 2003 – Global Positioning Systems and digital photogrammetry for monitoring of mass movements: application to the Ca' di Malta landslide (northern Apennines, Italy). *Eng. Geol.*, 68: 103–121.
- NITYCHORUK J., DZIERŻEK J. & STAŃCZUK D. 2009 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Drohiczyń wraz z objaśnieniami. Nar. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.
- OSTAFICZUK S. 1962 – Wykorzystanie efektu przestrzennego do rejestracji przypowierzchniowych ruchów masowych i innych. *Prz. Geol.* 10 (6): 123–129.
- OSTAFICZUK S. 1965 – Fotogrametryczne metody badania osuwisk. 32 Konf. Nauk-Tech. Stow. Geodetów Polskich NOT, Katowice: 112–116.
- SCHULZ W.H. 2007 – Landslide susceptibility revealed by LIDAR imagery and historical records, Seattle, Washington. *Eng. Geol.*, 89: 67–87.
- SCHUSTER R.L. & KRŽEK R.J. 1978 – Landslides (Analysis and Control). Special Reports 176, Transport Research Board. National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, DC.
- SEKIGUCHI T. & SATO H.P. 2004 – Mapping of micro topography using airborne laser scanning. *Landslides*, 1: 195–202.
- STACKEBRANDT W. 2005 – Can Geological Surveys have their own standards? Some personal remarks from inside the Geological Survey of Brandenburg, Germany. The current role of geological mapping in geosciences, NATO Science Series: IV, Earth Environm. Sc., 56: 45–50
- URBAŃSKI J. 2012 – GIS w badaniach przyrodniczych. Ebook. [http://ocean.ug.edu.pl/~oceju/CentrumGIS/dane/GIS\\_w\\_badaniach\\_przyrodniczych\\_12\\_2.pdf](http://ocean.ug.edu.pl/~oceju/CentrumGIS/dane/GIS_w_badaniach_przyrodniczych_12_2.pdf)
- 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.

Praca wpłynęła do redakcji 21.10.2014 r.

Akceptowano do druku 17.11.2014 r.