

## ZASTOSOWANIE MODELI FOTOGRAMETRYCZNYCH W BADANIU OSUWISKA W LACHOWICACH (KARPATY ZACHODNIE, BESKID MAKOWSKI)

### USE OF AERIAL IMAGES IN RESEARCH OF MASS MOVEMENTS – A CASE STUDY OF THE LACHOWICE LANDSLIDE (WESTERN CARPATHIANS, BESKID MAKOWSKI MTS)

KRZYSZTOF KARWACKI<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Artykuł przedstawia wykorzystanie fotogrametrycznych modeli wysokościowych w badaniu osuwiska w Lachowicach. Do tego celu użyto zdjęcia lotnicze wykonane w latach 1977, 2003 i 2009. Cyfrowe modele terenu stworzono z chmury punktów wygenerowanej na podstawie zdjęć lotniczych metodą automatycznego dopasowania obrazów, co pozwoliło obliczyć objętości przemieszczonych mas skalnych z wykorzystaniem modeli różnicowych. Wyznaczono również strefy z ubytkiem i przyrostem mas skalnych. Obecność punktów identyfikowalnych na wszystkich zdjęciach umożliwiła wyznaczenie wartości i kierunków poziomych wektorów przemieszczeń.

**Słowa kluczowe:** osuwiska, dynamika, zdjęcia lotnicze, NMT, fotogrametria.

**Abstract.** The article presents the application of photogrammetric digital elevation models in the study of the Lachowice landslide. For this purpose, aerial photos taken in 1977, 2003, 2009 have been used. Digital terrain models (DTM) have been produced from the point cloud generated on the aerial images, using images matching. Generated models allowed calculating the volume of displaced rock masses. Zones of loss and accumulation of rock masses have also been identified. The presence of identifiable points on all images enabled the determination of the values and directions of horizontal displacement vectors.

**Key words:** landslides, dynamics, aerial images, DTM, photogrammetry.

## WSTĘP

Osuwiska należą do najgroźniejszych zjawisk geodynamicznych w Polsce (Poprawa, Rączkowski, 2003). Podczas badań osuwisk nie można zapominać o określaniu ich dynamiki, która pozwala dokładniej poznać mechanizmy uruchamiające ten niebezpieczny proces. Zagadnienie to może być realizowane za pomocą pomiarów instrumentalnych lub metod zdalnych takich jak fotogrametria lotnicza, skaning laserowy czy analiza interferometrycznych danych satelitarnych (In-SAR) (Ostaficzuk, 1965; Ozimkowski, 1974; Perski i in., 2011; Wojciechowski i in., 2012; Wójcik i in., 2013). Wczesną informację o terenie dostarcza fotogrametria lotnicza stosowana na szeroką skalę już od przełomu lat 20.

i 30. ubiegłego stulecia (Ostaficzuk, 1962, 1978; Ziętała i in., 1989). Lotnicze zdjęcia stereoskopowe pozwalają na precyzyjne wyznaczenie struktur geologicznych, w tym również zasięgu przestrzennego osuwisk. Wprowadzenie cyfrowych stacji fotogrametrycznych spowodowało automatyzację wielu czynności związanych z opracowaniem materiału fotograficznego, co przyczyniło się do wykorzystania zdjęć lotniczych w badaniach nad dynamiką osuwisk. Ruch osuwiska w czasie za pomocą technik fotogrametrycznych skutecznie badali Dewitte i in. (2006), Zanutta i in. (2006), Prokesova i in. (2010) oraz Abolmasov i in. (2012). W Polsce również prowadzono tego typu badania z uwzględnieniem

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa, e-mail: krzysztof.karwacki@pgi.gov.pl.

objętości przemieszczonych mas skalnych w czasie. Jednak wykorzystywane modele fotogrametryczne były zbudowane metodą półautomatyczną (Kamiński 2011; Kamiński, Nitychoruk, 2015). Wcześniej badano tylko zmiany zasięgu osuwisk odwzorowane na zdjęciach wykonanych w różnym czasie (Tyszkowski, 2008).

Ze względu na spektakularne uaktywnienie się osuwiska w Lachowicach w 2001 r. oraz kontynuację ruchów grawitacyjnych w kolejnych latach postanowiono określić jego dynamikę wykorzystując metody fotogrametryczne. Zastosowano modele wysokościowe wygenerowane z archiwalnych zdjęć lotniczych pochodzących z lat 1977, 2003 i 2009.

## POŁOŻENIE OBSZARU BADAŃ

Osuwisko w Lachowicach znajduje się na obszarze Beskidu Makowskiego (Kondracki, 1997) w Zachodnich Karpatach Zewnętrznych na południowo-wschodnim stoku Góry Pierchałowej w granicach administracyjnych gminy Stryszawa (fig. 1). Według podziału geomorfologicznego Starkla (1972) obszar badań jest położony w obrębie mikroregionu Grzbietu Lasku, należącego do regionu Pasma Bramy Krzeszowickiej. Do katastrofalnego w skutkach uruchomienia osuwiska doszło 21 lipca 2001 r., w wyniku czego zniszczeniu uległo 12 budynków, a kilkanaście innych zostało uszkodzonych (Oszczytko i in., 2002; Rączkowski, Nescieruk, 2005). Zniszczone zostały również drogi lokalne i linie przesyłowe. Masy skalne przemieściły się na tyle daleko, że doszło do zatamowania biegu rzeki Lachówka i utworzenia okresowego jeziora zaporowego. Najbardziej prawdopodobną przyczyną uruchomienia mas skalnych była infiltracja wód opadowych w spękany górotwór (Rączkowski, Nescieruk, 2005). W początkowej fazie rozwoju, w lipcu 2001 r., osuwisko miało długość ok. 380 m i szerokość ok. 450 m. Maksymalna wysokość

skarpy głównej wynosiła 12 m, natomiast czoła – 17 m. Kilka miesięcy później, w styczniu 2002 r., doszło do ponownego uaktywnienia się osuwiska (Poprawa, Rączkowski, 2003) i powstania nowej skarpy, zwiększając jego długość do ok. 420 m. Tym razem przyczyną tego zjawiska były wody roztopowe infiltrujące w głąb stoku, który utracił podparcie podczas poprzedniej aktywności osuwiska. W kolejnych latach powiększał się jego zasięg w górę stoku, aż osiągnął ponad 460 m długości i zajął powierzchnię 13 ha. Jest to osuwisko z ruchem translacyjnym, rozwinięte na zboczu o konsekwentnym układzie warstw. Jego cechą charakterystyczną jest wyraźny wał zbudowany z mas koluwalnych w dolnej części stoku. Obecnie osuwisko nie wykazuje wyraźnej aktywności na powierzchni, ale niewielkie przemieszczenia rzędu milimetrów są rejestrowane w kolumnach inklinometrycznych (Nescieruk i in., 2014).

Osuwisko jest zlokalizowane w obrębie szerokopromiennej, połogiej synkliny zbudowanej z warstw magurskich podścielonych łupkami i marglami warstw podmagurskich (Książkiewicz, 1966), zapadających zgodnie z nachyleniem

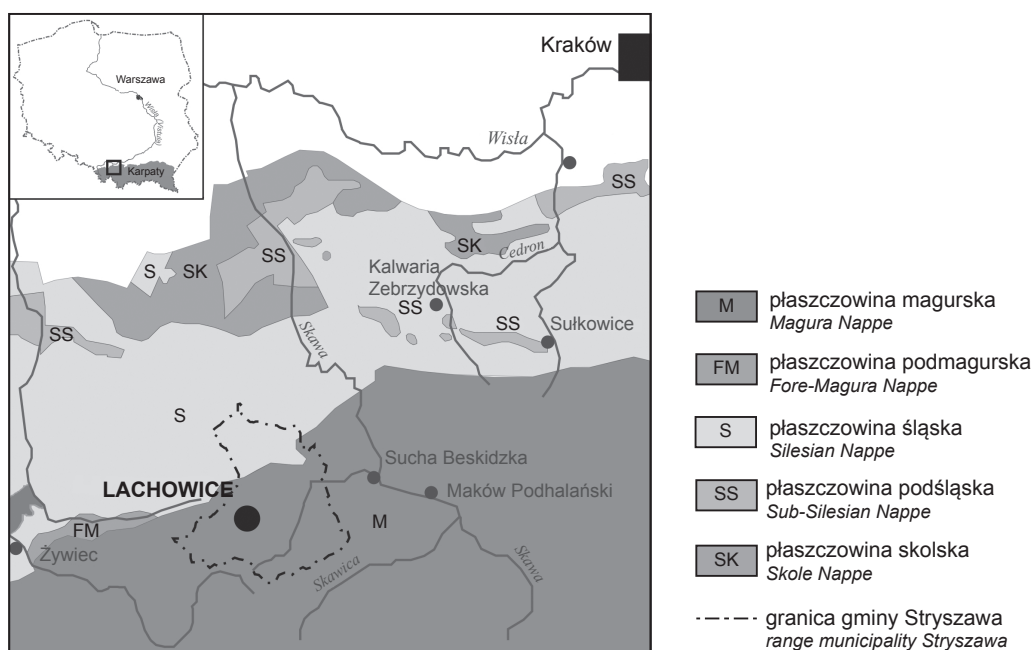


Fig. 1 Położenie osuwiska w Lachowicach (Żytko i in., 1989)

Location of the Lachowice landslide (Żytko *et al.*, 1989)

stoku ok. 20° na południowy wschód (Oszczypko i in., 2002). Jest to układ strukturalny sprzyjający procesowi osuwania mas skalnych, których ruch odbywa się po powierzchni ła-

wicenia. W północno-zachodniej części osuwiska występuje uskok przesuwczy, wzdłuż którego rozwinęła się skarpa boczna (Rączkowski, Nescieruk, 2005).

## METODA BADAŃ

Do badania dynamiki osuwiska wykorzystano zdjęcia lotnicze reprezentujące różne przedziały czasowe (tab. 1). Najstarsze zdjęcia lotnicze pochodzą z nalotu przeprowadzonego w okresie wegetacyjnym w lipcu 1977 r. Są to zobrażenia wykonane analogowo na kliszy fotograficznej kamerą lotniczą RC5 ukazujące powierzchnię przed uaktywnieniem osuwiska. Kolejnym zestawem danych są zdjęcia pochodzące z 2003 r. również wykonane analogowo kamerą typu LC 10-50. Naloty przeprowadzone w kwietniu i maju, czyli w początkowym stadium wegetacji, realizowane były w ramach projektu LPIS (*Land Parcel Identification System*), który ze względu na swój szeroki zasięg i powtarzalność nalołów stanowi dobre źródło danych do analizy. Materiał ten pokazuje sytuację na stoku dwa lata po pierw-

szym uaktywnieniu osuwiska. Ostatnim zestawem danych są zobrażenia pochodzące z nalołów w sierpniu 2009 r., zrealizowane również w ramach projektu LPIS. Zdjęcia wykonane za pomocą kamery cyfrowej Vexcel-UltraCam XP, której produktem jest zdjęcie w formie rastrowej.

Cały etap fotogrametrycznego dostosowania zdjęć przeprowadzono na cyfrowej stacji fotogrametrycznej firmy INPHO, która umożliwia automatyzację procesu aerotriangulacji dla całego bloku zdjęć. Podczas opracowania fotogrametrycznego zeskanowanych z pikselem 14  $\mu\text{m}$  analogowych zdjęć lotniczych, pochodzących z nalołów z lat 1977 i 2003, wykorzystano osnowę pomierzoną na zdjęciach lotniczych z 2009 r. Zbliżone dokładności przeprowadzonych aerotriangulacji uzyskane dla stereogramów z lat 1977

Tabela 1

Parametry wykorzystanych zdjęć lotniczych

Parameters of used aerial photographs

Rodzaj zdjęcia	analogowe	analogowe	cyfrowe
Rok wykonania	1977	2003	2009
Skala zdjęć	1:23 000	1:17 000	–
Format zdjęć	23×23 cm	23×23 cm	17 310×11 310 pikseli
Terenowy zasięg zdjęcia (L)	5 290 m	3 876 m	2 950 × 2 600 m
Pokrycie terenu zdjęciem (P)	28 km <sup>2</sup>	15 km <sup>2</sup>	7 km <sup>2</sup>
Odległość obrazowa (ck)	152,160 mm	152,291 mm	100,500 mm
Pokrycie podłużne (p)	65%	70%	65%
Rozdzielczość skanowania	14 $\mu\text{m}$	14 $\mu\text{m}$	6 $\mu\text{m}$
Piksel terenowy	–	–	0,17–0,23 m

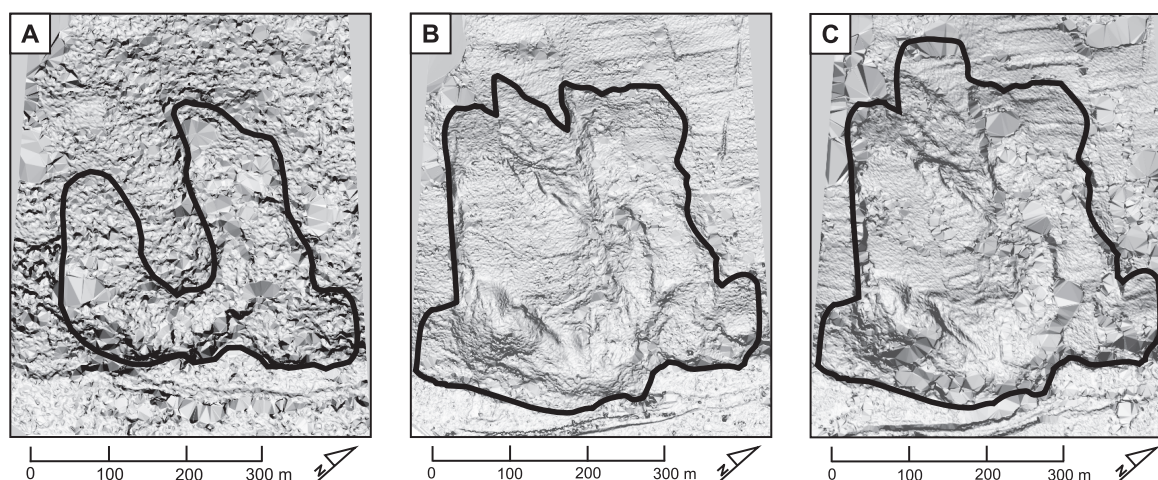


Fig. 2. Zasięg osuwiska na tle NMT w latach 1977 (A), 2003 (B) i 2009 (C)

Landslide range against DTM in year 1977 (A), 2003 (B) and 2009 (C)

Tabela 2

## Dokładności uzyskane podczas aerotriangulacji

Aerotriangulations accuracy

	RMSE 1977 [m]	RMSE 2003 [m]	RMSE 2009 [m]
X [m]	0,372	0,257	0,189
Y [m]	0,389	0,548	0,178
Z [m]	0,479	0,463	0,197

i 2003 są charakteryzowane przez błąd średni kwadratów pokazujący rozbieżności wpasowania na punktach kontrolnych (*Root Mean Square Error (RMSE)*) (tab. 2).

Na podstawie stereogramów o różnej aktualności dla obszaru objętego osuwiskiem wygenerowano chmurę punktów za pomocą procesu automatycznego dopasowania obrazów (*image matching*). Jest to metoda pozwalająca na identyfikację punktów homologicznych na różnych obrazach bez ingerencji obserwatora. Przy dobrej jakości zdjęć jest możliwa do uzyskania dokładność położenia punktu rzędu 0,1 piksela (Kurczyński, 2014). Dla osuwiska w Lachowicach *image matching* wykonano wykorzystując dopasowania powierzchni ABM (*area based matching*). W celu ograni-

czenia wynikowej liczby punktów utworzono poligon, który swoim zasięgiem obejmował obszar badanego osuwiska.

Przygotowane chmury punktów posłużyły do wytworzenia numerycznych modeli terenu (NMT). Etap ten wykonano przy użyciu oprogramowania Global Mapper v.16, generując modele w nieregularnej siatce trójkątów (TIN). Pod względem wartości interpretacyjnej istnieje zauważalna różnica między modelami, które wynikają z odmiennych parametrów chmury punktów. Te z kolei są uzależnione od skali wykonanego zdjęcia, a w przypadku zdjęć analogowych dodatkowo od stopnia zużycia kliszy lub wywołanej fotografii. Można zaobserwować, że model z 1977 r. jest bardziej szorstki i w mniejszym stopniu ukazuje formy na powierzchni terenu. Widoczne są również artefakty wynikające z braku punktów reprezentujących grunt. Model z 2003 r. cechuje się względnie gładką powierzchnią, na której wyraźnie zaznaczają się skarpy rolnicze oraz linie nieciągłości pochodzenia naturalnego w postaci progów i uskóków. Z kolei na modelu terenu z 2009 r. wyraźnie zaznacza się kolejna skarpa główna. Na jakość tego ostatniego modelu ma wpływ ekspansja roślin krzewiastych postępująca od 2001 r., uniemożliwiająca pomiar punktów na powierzchni osuwiska (fig. 2).

## WYNIKI ANALIZY FOTOGRAMETRYCZNEJ

ANALIZA PRZEMIESZCZEŃ POZIOMYCH  
W OKRESACH 1977–2003 I 2003–2009

Opracowany stereogram zdjęć lotniczych z 1977 r. pozwolił na interpretację struktur geologicznych w obrębie stoku osuwiskowego, a także umożliwił określenie zasięgu przestrzennego osuwiska w momencie wykonania zdjęcia. Podczas analizy powierzchni terenu oraz układu pól uprawnych określono typ stoku, który w miejscu dzisiejszej skarpy głównej ma charakter niezaburzonego, wypukłego stoku.

W podobny sposób zinterpretowano zdjęcia z 2003 r. Ich dobra jakość i brak roślinności umożliwiły w jednoznaczny sposób wyznaczenie zasięgu osuwiska aktywnego od 2001 r. W procesie stereodigitalizacji wyznaczono położenie zniszczonych i uszkodzonych budynków oraz przemieszczonych odcinków dróg. Obserwacje dotyczyły również koryta rzeki Lachówki.

Różnica współrzędnych tych samych obiektów na stereogramach zdjęć z różnych okresów pozwoliła wyznaczyć poziome wektory przemieszczeń (fig. 3). Na ich podstawie można stwierdzić, że budynki przemieściły się na odległość od 32 m w centralnej części osuwiska do ok. 50 m w części południowo-zachodniej. Droga lokalna w granicach osuwiska przemieściła się na odległość od 51 do 60 m, natomiast koryto rzeki Lachówki zostało przesunięte o ok. 75 m. Wektory przemieszczeń w południowo-zachodniej części wykazują wartości wyższe niż w części wschodniej, co jest związane z większą dynamiką osuwiska oraz dużą

dezintegracją materiału skalnego, spowodowaną występującym tam uskokiem. W części wschodniej, mimo niewielkich przemieszczeń, nie zauważono zmiany położenia budynków. Wszystkie obiekty w południowo-zachodniej części osuwiska wykazują lewoskrętną rotację o kąt od 10 do 20°.

Pomiar przemieszczeń poziomych między 2003 i 2009 r. nie był możliwy ze względu na brak charakterystycznych obiektów (budynków i dróg) na zdjęciach.

## ANALIZA PRZEMIESZCZEŃ PIONOWYCH

Otrzymane numeryczne modele terenu pozwoliły na wygenerowanie modeli różnicowych, przedstawiających różnicę ilościową między składową Z na obu modelach. W przypadku osuwiska Lachowice od NMT z 2003 r. odjęto NMT z 1977 r. otrzymując obraz przedstawiający zmianę wysokościową wywołaną ruchami masowymi (fig. 4A). Wizualizacja modelu różnicowego pozwoliła na analizę stref odkucia i akumulacji w obrębie osuwiska. W strefie poniżej jego skarpy głównej z 2003 r. teren obniżył się o blisko 12 m, natomiast w dolnej części osuwiska powstał wał akumulacyjny o wysokości prawie 17 m. Występują również obszary na osuwisku, w których zmiany w profilu pionowym nie miały miejsca (fig. 4). Na terenie nieobjętym tym procesem obserwujemy także miejsca wskazujące na ubytek materiału. Prawdopodobnie nie są one pochodzenia naturalnego, a ich występowanie można tłumaczyć błędną filtracją chmury punktów. Poniżej czoła jest widoczny również prostoliniowy obszar wskazujący na ubytek materiału. Strefa ta



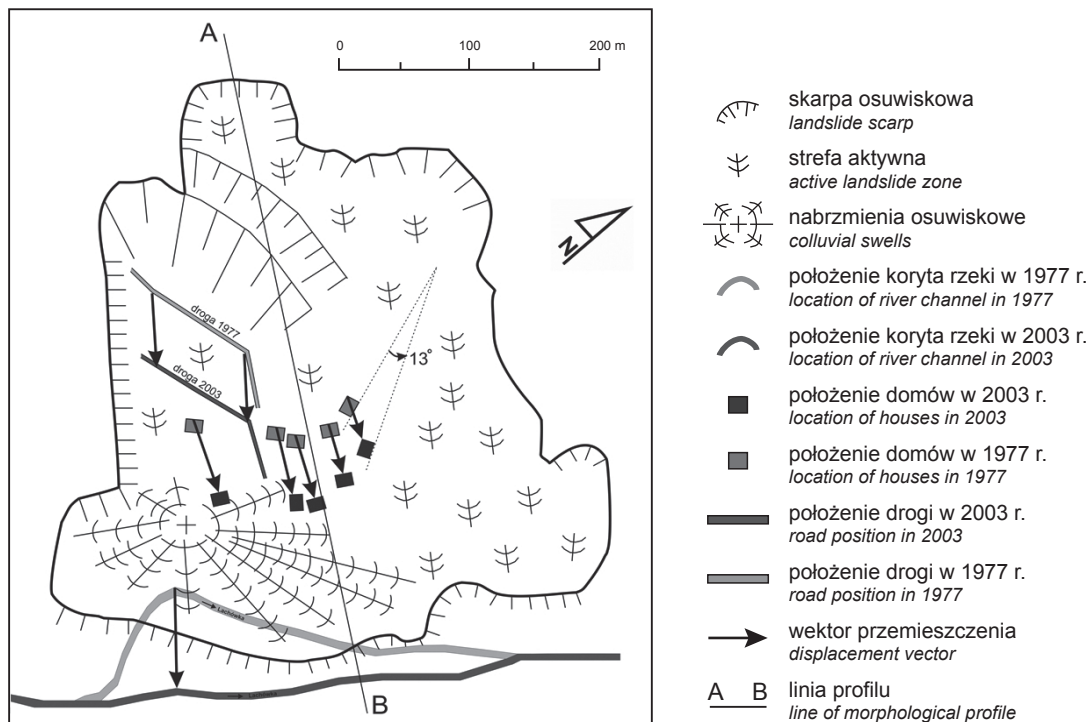


Fig. 3. Szkic osuwiska w Lachowicach

Linia profilu morfologicznego A–B (zob. [figury 5 i 6](#))

Sketch-map of the Lachowice landslide

Line of morphological profiles A–B (see [Figs 5 and 6](#))

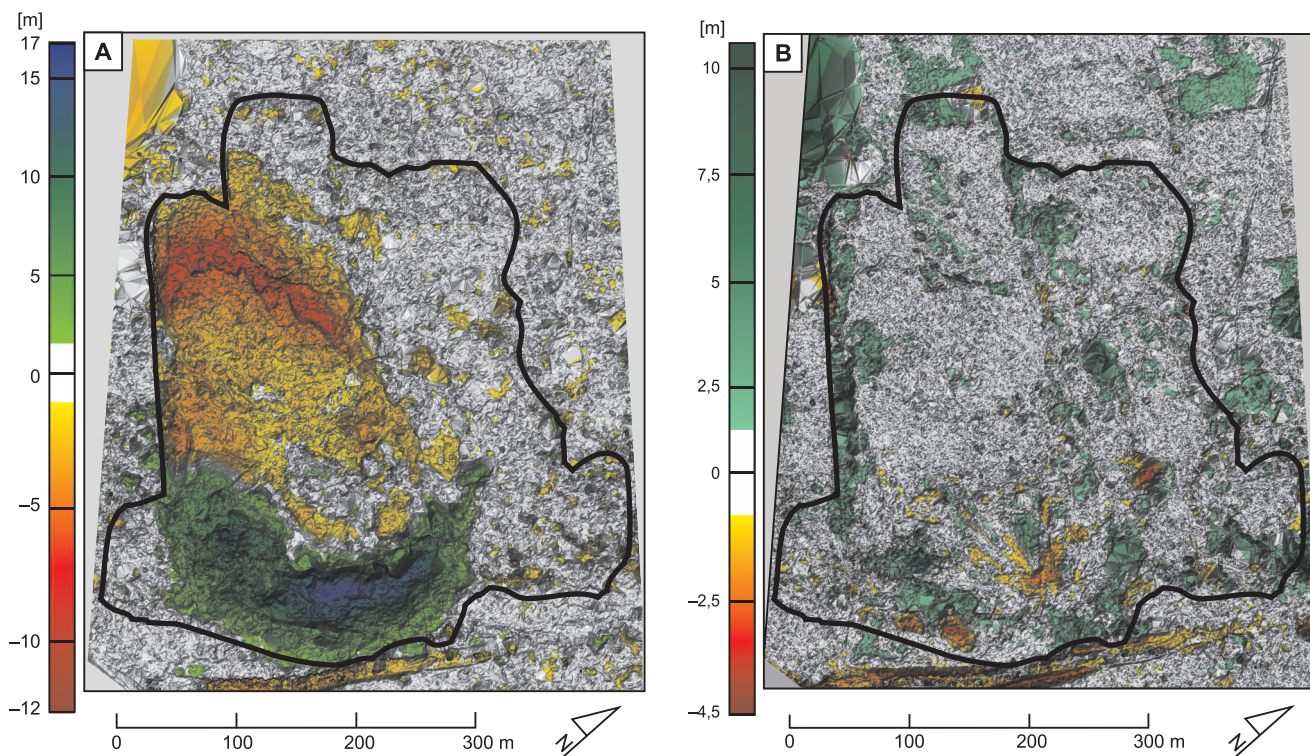


Fig. 4. Model różnicowy osuwiska w Lachowicach w latach 1977–2003 (A) i 2003–2009 (B)

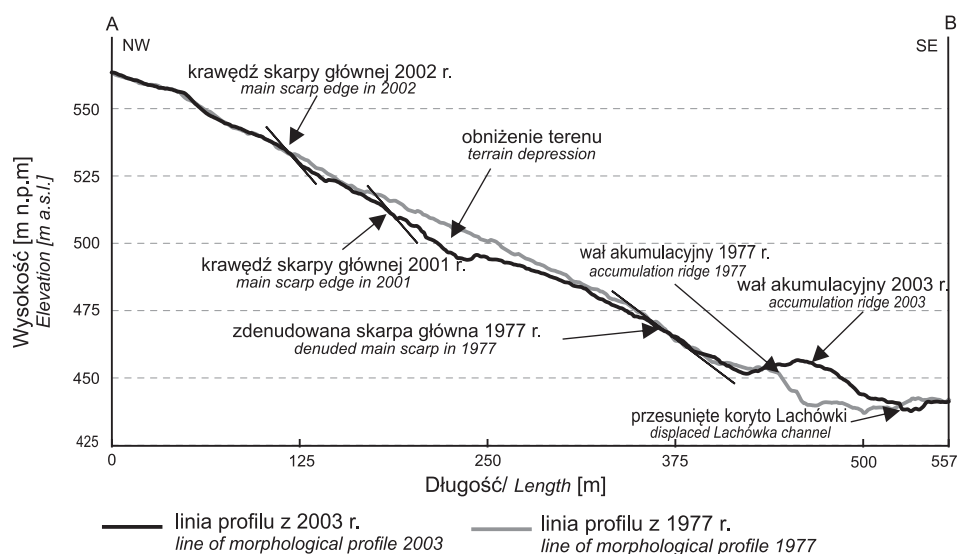
Differential model of the Lachowice landslide 1977–2003 (A) and 2003–2009 (B)

jest związana z nowym przebiegiem koryta rzeki Lachówki, zasypanej masami koluwalnymi w 2001 r.

Model różnicowy obrazujący zmiany w latach 2003–2009 nie wykazuje większych przemieszczeń w granicach osuwiska (fig. 4B). Na uwagę zasługuje niewielki obszar w centralnej części, wskazujący zmianę w profilu pionowym, którą można tłumaczyć ruchami wtórnymi osuwiska lub niwelacją terenu po usunięciu zniszczonych zabudowań. W dolnej części czoła występują również dwa obszary sugerujące ubytek mas koluwalnych, których pochodzenie można wiązać z kompaktacją materiału koluwalnego w obrębie starego koryta Lachówki. Widoczny jest również ubytek materiału w obrębie nowego koryta tej rzeki, co świadczy o zachodzącej erozji bocznej.

Zmiany przestrzenne w osuwisku pokazano również na profilach podłużnych (fig. 5, 6). Profile, na których przedstawiono sytuację na stoku w 1977 i 2003 r. wyraźnie się od siebie różnią (fig. 5). Rozbieżność w ich przebiegu zaczyna się w miejscu występowania skarpy głównej osuwiska odwzorowanej na zdjęciach w 2003 r. Ubytek mas skalnych w górnej części jest kompensowany akumulacją w dole stoku w postaci jezora osuwiska (fig. 5).

Na wykresie korelującym profile z lat 2003 i 2009 nie widać znaczących zmian (fig. 6). Niewielkie różnice w przebiegu profilu terenu występują w dolnej części osuwiska, co potwierdza niezbyt duży przyrost, a następnie ubytek mas skalnych.



**Fig. 5. Profil morfologiczny osuwiska w latach 1977 i 2003**

Morphological profile of the landslide in 1977 and 2003



**Fig. 6. Profil morfologiczny osuwiska w latach 2003 i 2009**

Morphological profile of the landslide in 2003 and 2009

## ANALIZA OBJĘTOŚCIOWA

Na podstawie modeli terenu wykonano również obliczenia objętości mas skalnych, które wykazywały ruch pionowy w obrębie osuwiska (fig. 7). Ze względu na niewielkie przemieszczenia po 2003 r. analizę przeprowadzono opierając się na modelach z 2003 i 1977 r. Brak ruchów pionowych i poziomych w północnej i północno-wschodniej części osuwiska spowodowały, że obliczono objętości dla zachodniej części, gdzie zmiany były największe. Otrzymałe wyniki wskazują na to, że w górnej części osuwiska ubyło 178 tys. m<sup>3</sup> mas skalnych, natomiast w dolnej – przybyło 191 tys. m<sup>3</sup>. Wykluczając błędy związane z niewłaściwą budową NMT można stwierdzić, że nadwyżka mas zakumulowanych w dolnej części stoku jest związana z mniej skonsolidowanym materiałem osuniętych skał w stosunku do materiału pierwotnie znajdującego się w górnej części stoku.

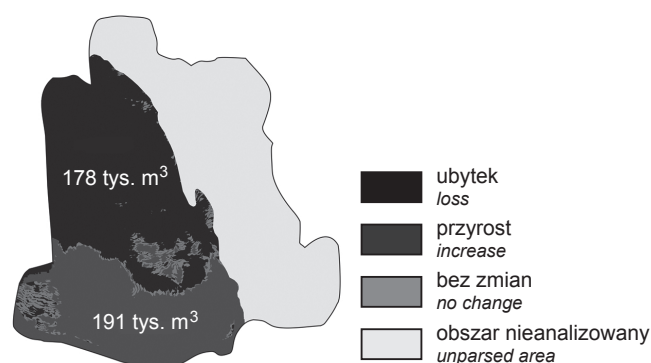


Fig. 7. Rozkład przestrzenny przemieszczonych mas skalnych

The spatial distribution of displaced rock masses

## WNIOSKI

Osuwisko w Lachowicach jest przykładem zsuwu konsekwentnego. Stosunkowo małej miąższości ubytki masy w górnej części i małe przekształcenia w rzeźbie powodują duże zmiany w dolnej części stoku. Efektem tego są wyraźnie wykształcone jęzory osuwiskowe mające wysokie czoła, a miąższość koluwiów osuwiskowych może być trzykrotnie większa niż w strefie oderwania. Zarejestrowane na zdjęciach lotniczych skarpy osuwiskowe pojawiające się po 2001 r. oraz wyniki monitoringu wgłębnego (Nescieruk i in., 2014) dowodzą, że osuwisko nie osiągnęło jeszcze stanu równowagi. Przedstawione etapy jego rozwoju pozwalają sądzić, że w sprzyjających warunkach atmosferycznych w dalszym ciągu będzie ono zwiększać swój zasięg w górę stoku, powodując jego degradację. Analiza fotogrametryczna osuwiska w Lachowicach potwierdziła przydatność zdjęć lotniczych w badaniach ruchów masowych. Nową jakością w badaniu przemieszczeń i nadawaniu im konkretnych wartości liczbowych uzyskano korzystając z cyfrowych stacji fotogrametrycznych (Mora i in., 2003, Walstra i in., 2007). Zastosowanie metody automatycznego dopasowania obrazów pozwala uzyskać informację wysokościową o terenie w postaci chmury punktów. Jest to obecnie bardzo popularny produkt wysokościowy, który

jest pozyskiwany między innymi w technologii skanowania laserowego (Wężyk i in., 2008; Graniczny i in., 2012). Dostępność archiwalnych zdjęć lotniczych umożliwia wytwarzanie numerycznych modeli terenu o aktualności czasowej sięgającej lat 50. ub. w., pozwalając na analizę przemieszczeń w czasie blisko 70 lat, co nadaje wyjątkową wartość zdjęciom lotniczym. Dodatkowym atutem analizy tych zdjęć jest możliwość wyznaczania poziomych wektorów przemieszczeń, uzyskując w ten sposób kierunki zsuwów w obrębie osuwiska. Rozpoczęte prace nad zastosowaniem cyfrowych modeli fotogrametrycznych do badań nad osuwiskami pozwalają wysnuć hipotezę, że będzie to jedna z kluczowych metod wykorzystywanych do badań ich dynamiki oraz określania kierunku dalszego przekształcania stoków przez procesy osuwiskowe.

**Podziękowania.** Autor pragnie podziękować recenzentom za bardzo cenne uwagi i komentarze, które miały istotny wpływ na jakość powyższego tekstu. Podziękowania należą się również pracownikom Zakładu Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej Politechniki Warszawskiej za udzielenie oprogramowania i udzielenie niezbędnych wskazówek.

## LITERATURA

- ABOLMASOV B., DURIC U., PAWLOVIC R., TRIVIC B., 2012 — Tracking of slow moving landslide by photogrammetric data – a case study. *Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding. W: Conference paper: 11<sup>th</sup> International & 2<sup>nd</sup> North American Symposium on Landslides. Canada, 3–8.06.2012: 1359–1363.*
- DEWITTE O., JASSELETTE J.-C., CORNET Y., VAN DEN ECKHAUT M., COLLIGNON A., POESEN J., DEMOULIN A., 2006 — Tracking landslide displacements by multi-temporal DTMs: a combined aerial stereophotogrammetric and LIDAR approach in western Belgium. *Engineering Geology*, **99**: 11–22.
- 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.
- 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., NITYCHORUK J., 2015 — Cyfrowa analiza fotogrametryczna tempa i charakteru ruchów masowych skarpy



- py rzecznej doliny Bugu w rejonie Drohiczyzna (południowe Podlasie). *Prz. Geol.*, **63**, 12/2: 1461–1471.
- KONDRACKI J., 1997 — Geografia Regionalna Polski. PWN, Warszawa.
- KSIĄŻKIEWICZ M., 1966 — Geologia regionu babiogórskiego. *W: Przewodnik 39 Zjazdu Polskiego Towarzystwa Geologicznego. Babia Góra, 2–5.06.1966: 5–59.* Wydaw. Geol., Warszawa.
- KURCZYŃSKI Z., 2014 — Fotogrametria. Wydaw. Nauk. PWN, Warszawa.
- NESCIERUK P., WOJCIECHOWSKI T., RĄCZKOWSKI W., WARMUZ B., 2014 — Dokumentacja geologiczna z prac monitoringowych wykonanych na osuwisku w m. Lachowice. Kraków. Internet: <http://geoportal.pgi.gov.pl/portal/page/portal/SOPO/Wyszukaj3>.
- MORA P., BALDI P., CASULA G., FABRIS M., GHIROTTI M., MAZZINI E., PESCI A., 2003 — Global Positioning Systems and digital photogrammetry for the monitoring of mass movements: application to the Ca' di Malta landslide (northern Apennines, Italy). *Engineering Geology*, **68**: 103–121.
- 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. *W: 32 Konf. Nauk.-Techn. Stow. Geodetów Polskich NOT, Katowice: 112–116.*
- OSTAFICZUK S., 1978 — Fotogeologia, fotointerpretacja i fotogrametria geologiczna. Wydaw. Geol., Warszawa.
- OSZCZYPKO N., GOŁONKA J., ZUCHIEWICZ W., 2002 — Osuwisko w Lachowicach (Beskidy Zachodnie): skutki powodzi z 2001 r. *Prz. Geol.*, **50**, 10/1: 893–898.
- OZIMKOWSKI W., 1974 — Fotointerpretacyjna korelacja utworów fliszu podhalańskiego. *W: Mat. Sesji „Nowoczesne metody kartowania w naukach geologicznych”.* Warszawa: 20–24.
- PERSKI Z., BORKOWSKI A., WOJCIECHOWSKI T., WÓJCIK A., 2011 — Application of persistent scatterers interferometry for landslides monitoring in the vicinity of Roznow Lake in Poland. *Acta Geodyn. Geomater.*, **8**, 3, 163: 319–323.
- POPRAWA D., RĄCZKOWSKI W., 2003 — Osuwiska Karpat. *Prz. Geol.*, **51**, 8: 685–692.
- PROKESOVA R., KARDOS M., MEDVED'OVA A., 2010 — Landslide dynamics from high – resolution aerial photographs: A case study from the Western Carpathians, Slovakia. *Geomorphology*, **115**: 90–101.
- RĄCZKOWSKI W., NESCIERUK P., 2005 — Dokumentacja geologiczna osuwiska w Lachowicach Zawodziu – strona wschodnia – góra Pierchałówka. Kraków. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Kraków.
- TYSZKOWSKI S., 2008 — Badania rozwoju osuwisk w rejonie Świecia, na podstawie materiałów fotogrametrycznych. *Landform Analysis*, **9**: 385–389.
- STARKEL L., 1972 — Charakterystyka rzeźby polskich Karpat i jej znaczenie dla gospodarki ludzkiej. *Probl. Zagosp. Ziemi Górsk.*, **10**: 75–150.
- WALSTRA J., DIXON N., CHANDLER J.H., 2007 — Historical aerial photographs for landslide assessment: two case histories. *Quart. J. Engineering Geol. Hydrogeol.*, **40**: 315–332.
- WĘŻYK P., BOROWIEC N., SZOMBARA S., WAŃCZYK R., 2008 — Generowanie numerycznych modeli powierzchni terenu w Tatrach na podstawie chmury punktów z lotniczego skaningu laserowego (ALS). *AFKiT*, **18**: 651–661.
- WOJCIECHOWSKI T., BORKOWSKI A., PERSKI A., WÓJCIK A., 2012 — Dane lotniczego skaningu laserowego w badaniu osuwisk – przykład osuwiska w Zbyszycach (Karpaty Zewnętrzne). *Prz. Geol.*, **60**, 2: 95–102.
- WÓJCIK A., WĘŻYK P., WOJCIECHOWSKI W., PERSKI Z., MACZUGA S., 2013 — Geologiczna i geomorfologiczna interpretacja danych z lotniczego skaningu laserowego (ALS) rejonu Kasprowego Wierchu (Tatry). *Prz. Geol.*, **61**, 4: 234–242.
- ZANUTTA A., BALDI P., BITELLI G., CARDINALI M., CARARA A., 2006 — Qualitative and quantitative photogrammetric techniques for multi-temporal landslide analysis. *Ann. Geophys.*, **49**, 4/5: 1067–1080.
- ZIĘTARA T., BAJGER M., LIS J., 1989 — Rola zdjęć lotniczych w badaniach osuwisk w Beskidzie Śląskim. *Fotointerpretacja w Geografii*, **10**, 20: 93–104.
- ŻYTKO K., ZAJĄC R., GUCIK S., RYŁKO W., OSZCZYPKO N., GARLICAKA I., NEMČOK J., ELIAŚ M., MENČIOK E., STRANIK Z., 1989 — Geological Map of the Western Outer Carpathians and their Foreland 1:500 000. Narod. Arch. Geol. PIG-PIB, Warszawa.

## SUMMARY

Aerial photography has been used in geological sciences for decades. Interpretation of aerial images allows precise identification of geological structures and determination of the range and distribution of inner landslide forms. Exemplified by the Lachowice landslide in the Makowski Beskid Mts (Western Outer Carpathians), which was activated in 2001, the dynamics of displaced rock masses was analysed using photogrammetric maps. For this purpose, aerial images taken in 1977 were used. They show a situation on the slope from the period before the landslide activation. Another set of aerial images presents the same area in 2003 and 2009. Using analytical methods available on a digital photogrammetric workstations, point clouds have been generated, which show the land cover. They were the basis for the development of numerical terrain models showing the slope surface at different times. With the use of differential models the volume of displaced rock masses has been cal-

culated. Spatial distribution of the loss and accumulation of slipped rock material matches well the consequent nature of the landslide movement characterized by a relatively small mass loss in the upper part, and a considerable thickness of the landslide tongue. Additionally, stereoscopic interpretation of aerial images and digitization of the characteristic objects visible in the images were used to determine the directions and magnitude of horizontal displacement within the landslide. Their different values indicate a varying slide rate of rock mass.

The sequence of aerial images from different dates enables the study of the dynamics of landslides, while the use of analytical tools allows characterizing the spatial changes caused by mass movements using numerical values. The photogrammetric analysis has shown the usefulness of aerial imaging in both determining the range of landslides and interpreting their inner relief forms.