

ZASTOSOWANIE FOTOGRAMTRYCZNYCH MODELI CYFROWYCH TERENU I ZDJĘĆ LOTNICZYCH W BADANIU DYNAMIKI OSUWISKA ŚLIWNICA (POGÓRZE DYNOWSKIE)

APPLICATION OF PHOTOGRAMMETRIC DIGITAL ELEVATION MODELS AND AERIAL PHOTOGRAPHS IN THE RESEARCH ON THE DYNAMICS OF THE ŚLIWNICA LANDSLIDE (DYNÓW UPLAND)

MIROSLAW KAMIŃSKI¹

Abstrakt. W artykule przedstawiono zastosowanie zdjęć lotniczych i fotogrametrycznych cyfrowych modeli terenu w badaniu osuwiska Śliwnica. Opierając się na archiwalnych zdjęciach lotniczych, pochodzących z różnych okresów, pokazano kolejne etapy rozwoju osuwiska. Na podstawie zdjęć lotniczych wygenerowano dwa fotogrametryczne modele cyfrowe terenu (Dem), które następnie porównano. W ten sposób określono dynamikę osuwiska. Różnica pomiędzy siatkami modeli cyfrowych została wykorzystana do określenia przesunięć poziomych na obszarze osuwiska. Różnice zwizualizowano na modelu cyfrowym cieniowanym, kolor czerwony oznacza (erozję), a niebieski (akumulacja) i to nałożono na ortofotomapę z października 2002 r. Dodatkowo wykonano pięć przekrojów geomorfologicznych.

Słowa kluczowe: osuwisko, fotogrametria, zdjęcia lotnicze, Pogórze Dynowskie.

Abstract. This article shows the application of aerial photography and photogrammetric digital elevation models in the research on the Śliwnica landslide. The consecutive stages of the development of the Śliwnica landslide have been presented on the basis of archival aerial photographs, originating from different time periods. Two photogrammetric high-resolution digital elevation models (DEMs) were generated and compared. This way, the dynamics of the surface of the landslide was analyzed. The differences between the grids of digital elevation models were used for determination of vertical movements of the grid points within the landslide area. The differences were visualized as a shaded relief map, with a red colour for positive elevations (erosion), and a blue one for negative ones (accumulation). The map was superimposed on digital orthophotomap dated on the October 2002. Additionally, five geomorphological cross-sections were made.

Key words: landslide, photogrammetry, aerial photography, Dynów Upland.

WSTĘP

Rekonstrukcja fotogrametryczna rzeźby terenu na podstawie archiwalnych zdjęć lotniczych jest niezwykle użyteczną metodą w analizie geomorfologicznej osuwisk. Metoda ta dostarcza szybkiej, dokładnej i taniej informacji przestrzennej na temat dynamiki osuwisk oraz ich wielkości. Porównując w systemie GIS rzeźbę modeli cyfrowych terenu, wygenerowaną fotogrametrycznie ze stereopar zdjęć lotniczych pochodzących z różnych lat, uzyskuje się informację przestrzenną w postaci mapy gridowej. Mapa ta obrazuje

wielkość przemieszczeń mas skalnych, jakie dokonały się w określonym czasie w obrębie osuwiska.

Dokładność modeli cyfrowych terenu zależy od skali użytych do badań zdjęć lotniczych oraz ich czytelności. Rozdzielczość piksela terenowego może wynosić od kilkunastu centymetrów do 2 m. Jest to wystarczająca dokładność do prześledzenia dynamiki wielu osuwisk w Karpatach. Ponadto do niewątpliwych zalet tej metody należy dostęp do tanich, archiwalnych wysokorozdzielczych zdjęć lotniczych, które moż-

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

na zakupić w ośrodkach dokumentacji geodezyjnej i kartograficznej oraz w ośrodkach geodezji i kartografii wojskowej.

Jednakże dla obszarów pokrytych gęstą roślinnością mają one ograniczone zastosowanie. Szczegóły geomorfologiczne rzeźby terenu są skutecznie maskowane przez bujną roślinność. Dla takich obszarów wykonuje się obecnie lotniczy skaniny laserowy (Derron, Jaboyedoff, 2010) oraz naziemny skaniny laserowy (Hsio i in., 2003). Obie metody są technologicznie bardziej zaawansowane i o wiele droższe. Efektem takiego laserowego skanowania jest dokładny model cyfrowy terenu LIDAR (*Light Detection and Ranging*).

Mając na uwadze maskujące działanie roślinności, do dalszych analiz i przekształceń fotogrametrycznych wybrano osuwisko, które jest słabo pokryte roślinnością. Jedyne jego stopa jest porośnięta przez krzewy i drzewa.

Badania terenów zagrożonych przez osuwiska z wykorzystaniem technik fotogrametrycznych i teledetekcyjnych były wykonywane między innymi przez Ostaficzuka (1962, 1965), Schustera i Križeka (1978), Grevego (1996), Genieliego i in. (2002), Mora i in. (2003), Baldiego i in. (2005).

Rozmieszczenie osuwisk na Pogórzu Dynowskim było analizowane przez Wdowiarza (1948), Bobera (1984), Wójcika i Zimna (1996) oraz Kamińskiego (2006).

Uaktywnienie osuwisk na tym obszarze Karpat nastąpiło w wyniku katastrofalnych opadów deszczu w lipcu 1997, wiosną 2000, w lipcu 2001, w lipcu i sierpniu 2004 oraz w maju i czerwcu 2010 r. Spowodowało to liczne zagrożenia dla budynków mieszkalnych, częste uszkodzenia dróg, linii telefonicznych, energetycznych i kolejowych.

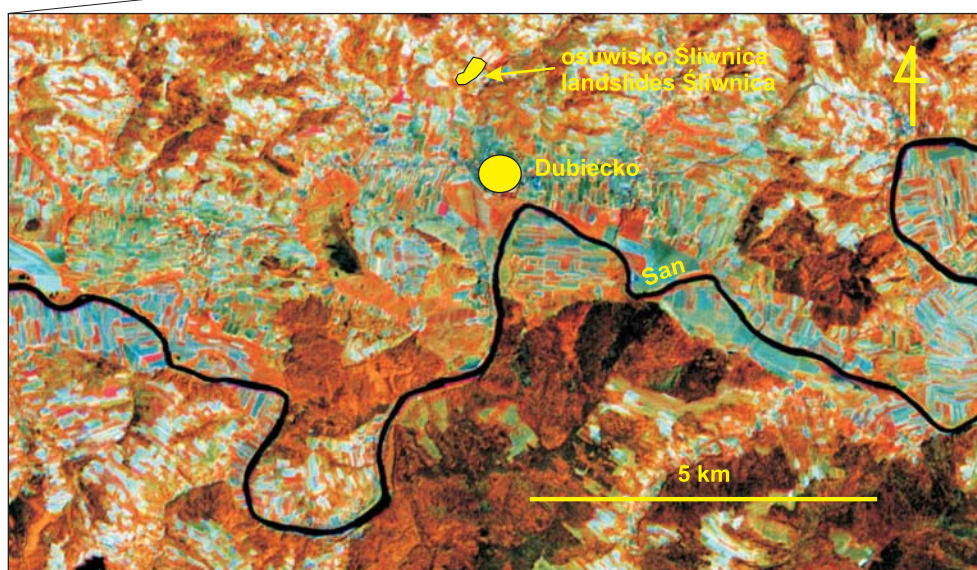
RZEŻBA I BUDOWA GEOLOGICZNA OSUWISKA

Osuwisko Śliwnica jest położone w okolicy miejscowości Dubiecko na Pogórzu Dynowskim (fig.1). Jest to osuwisko rotacyjne, które całe uaktywniło się wiosną 2001 r., zagrożając lokalnym budynkiem mieszkalnym, drodze i linią energetyczną. Według klasyfikacji Bobera (1984) należy do

osuwisk złożonych. Powstało w wyniku wieloetapowego procesu osuwania się mas skalnych. W strefie osuwiskowej można wyróżnić kilka generacji osuwisk, łączących się i schodzących do potoku.

Fig. 1. Lokalizacja osuwiska Śliwnica na tle zdjęcia satelitarne Landsat 7 Etm+ RGB453

Location of the Śliwnica landslide on the satellite images Landsat 7Etm+ RGB 45



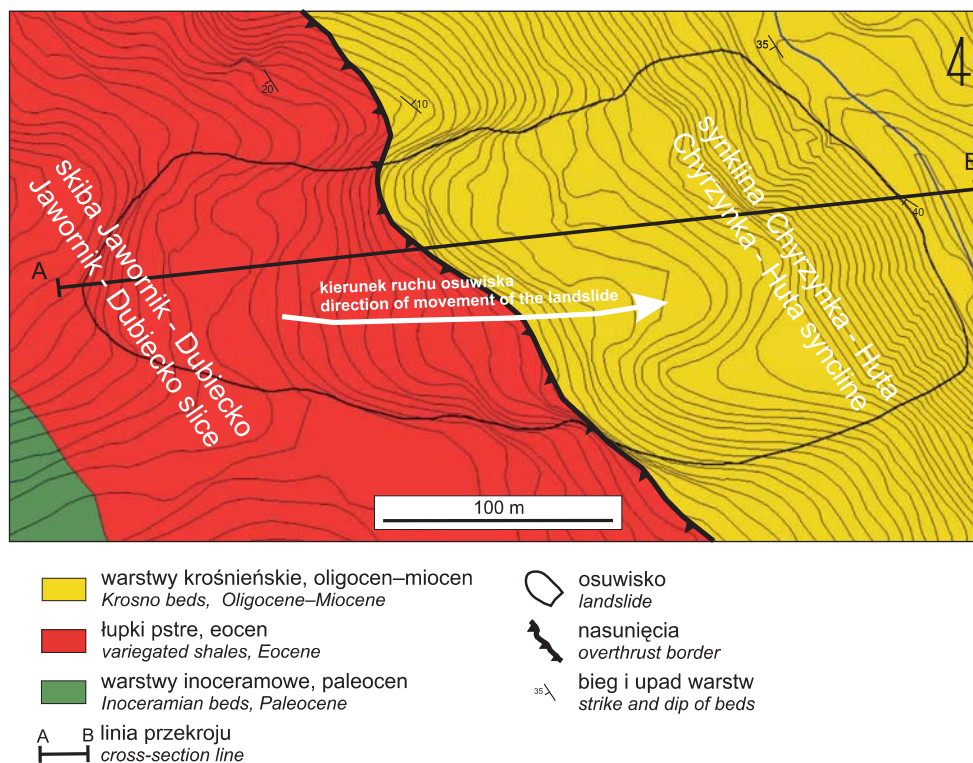


Fig. 2. Szkic geologiczny odkryty osuwiska Śliwnica (Kamiński, Piotrowska, 2003)

Geological sketch without Quaternary deposits of the Śliwnica landslide (Kamiński, Piotrowska, 2003)

Obszar strefy osuwiskowej zajmuje powierzchnię 4,1 ha i ma długość 350 m. Strefa poślizgu, oszacowana na podstawie wierceń sondami mechanicznymi (wh) oraz tomografii elektrooporowej, wynosi od 5 m w górnych partiach osuwiska do ponad 20 m w jego czole. W trakcie badań terenowych (kwiecień 2009) stwierdzono występowanie wód podziemnych na głębokości około 4 m w studni gospodarczej w pobliżu skarpy głównej. Ponadto osuwisko częściowo jest położone na granicy dużej jednostki hydrogeologicznej, której zasięg pokrywa się z występowaniem fliszowych kompleksów litologicznych piaskowcowo-łupkowych warstw krośnieńskich górnych. Przepływ wód podziemnych w osadach fliszowych odbywa się w strefie spękanej i zeszcelinowanej zgodnie z morfologią terenu, tzn. w kierunku dolin rzecznych.

W obrębie osuwiska występują przejawy wód powierzchniowych w postaci wysięków i podmokłości.

Osuwisko powstało w strefie tektonicznej nasunięcia skiby Jawornik–Dubiecko na synklinę Chyrzynka–Huta (fig. 2).

Według Bobera (1984) powierzchniowe ruchy masowe, takie jak: spływy, sływy i osuwiska, zachodzą na wielką skalę na wielu obszarach Karpat, gdzie gruboławicowe piaskowce są podścielone kompleksami łupkowymi, szczególnie zaś łupkami pstrymi.

Osuwisko Śliwnica jest rozwinięte na dwóch kompleksach fliszowych (łupkach pstrych i warstwach krośnieńskich górnych) oraz utworach czwartorzędowych.

Łupki pstre są wykształcone w postaci ilastych czerwonych, zielonych, szarych, beżowych oraz plamistych kom-

pleksów litologicznych, rzadko z wkładkami piaskowców drobnoziarnistych, kwarcowych (niekiedy glaukonitowych). Ich miąższość jest zmienna i osiąga kilkadziesiąt metrów. Według Rajchela (1989) reprezentują późny paleocen – wczesny eocen. Łupki pstre są predysponowane do tworzenia w ich obrębie stref poślizgu ze względu na swoje właściwości fizyczne (łupliwość, plastyczność, nieprzepuszczalność).

Warstwy krośnieńskie górne, których wiek określa się na oligoceńsko-mioceni, są wykształcone w postaci piaskowców drobno- i średnioziarnistych, miejscami gruboławicowych, twardych, wapnistych oraz popielatych łupków marglistych. Łupki te ze względu na swoje właściwości plastyczne są predysponowane do powstania powierzchni poślizgu. Ponadto piaskowce gruboławicowe są kruche i rozsypliwie. Ich miąższość nie przekracza kilku metrów.

Zalegające na podłożu fliszowym miąższe utwory czwartorzędowe występują w postaci pokryw stokowych pylasto-piaszczystych o miąższości od 3 do 5 m (Gerlach, 1991). W dół stoku przechodzą w deluwia, czyli utwory podatne do tworzenia się osuwisk.

Inicjacja ruchu nastąpiła na granicy łupków z piaskowcami, w obrębie warstw krośnieńskich. Czynnikiem powodującym osunięcia była erozja boczna potoku Śliwnica, nawalne letnie opady deszczu oraz długie zalegiwanie mokrego śniegu na stoku w zimie 2001 r., powodującego przeciążenie mas skalnych i zwieterzlinowych wodą.

METODY BADAŃ

W postaci wektorowej wykorzystano modele wykonane fotogrametrycznie ze stereopar zdjęć lotniczych. Wygenerowano cztery wektorowe modele cyfrowe terenu zapisane w formacie wektorowym DxF. Zostały one zaimportowane do programu ArcGis i w module 3D Analyst przekształcone w triangulacyjne modele cyfrowe terenu TIN. Wykonanie opracowania fotogrametrycznego zlecono firmie geodezyjnej Eurosense. Dla osuwiska Śliwnica wygenerowano ze stereopar zdjęć lotniczych z lat 2002 i 1965 dwa modele cyfrowe terenu. Aby wyrównać aerotriangulację naltów, dokonano pomiaru współrzędnych fotopunktów (punktów charakterystycznych w terenie). Aerotriangulacja naltów dla wszystkich modeli została wykonana w systemie Socet Set na stacji fotogrametrycznej DELL, metodą półautomatyczną. Pomiar terenowy fotopunktów został przeprowadzony techniką GPS.

Dla osuwiska Śliwnica uzyskano następujące dokładności:

- nalt z 1965 r. w skali 1:17 000; średni błąd wpasowania bloku na osnowę wyniósł: RMS x 0,453 m, RMS y 0,381 m, RMS z 0,348 m, całkowity RMS 0,625 m;
- nalt z 2002 r. w skali 1:13 000; średni błąd wpasowania bloku na osnowę wyniósł: RMS x 0,341 m, RMS y 0,354 m, RMS z 0,040 m, całkowity RMS 0,494 m.

Rysunek poziomicowy modeli cyfrowych terenu wykonało dwóch niezależnych operatorów na stacji fotogrametrycznej Softplotter oraz stacji Socet Set. Dla obu naltów zastosowano cięcie warstwiczne 0,1 m.

Bazując na archiwalnych zdjęciach lotniczych, pochodzących z trzech różnych okresów, opracowano szkic fotointerpretacyjny rozwoju osuwiska. Do fotointerpretacji użyto stereopar zdjęć czarno-białych z lat: 1965 w skali 1:17 000, 1994 w skali 1:21 000, 2002 w skali 1:13 000. Zdjęcia zeskanowano z rozdzielczością 1200 dpi i zaimportowano do programu ER Mapper. Następnie skalibrowano w układzie geodezyjnym 1992 i poprawiono kontrasty zdjęć poprzez rozciągnięcie histogramów oraz zastosowanie filtrów górn-

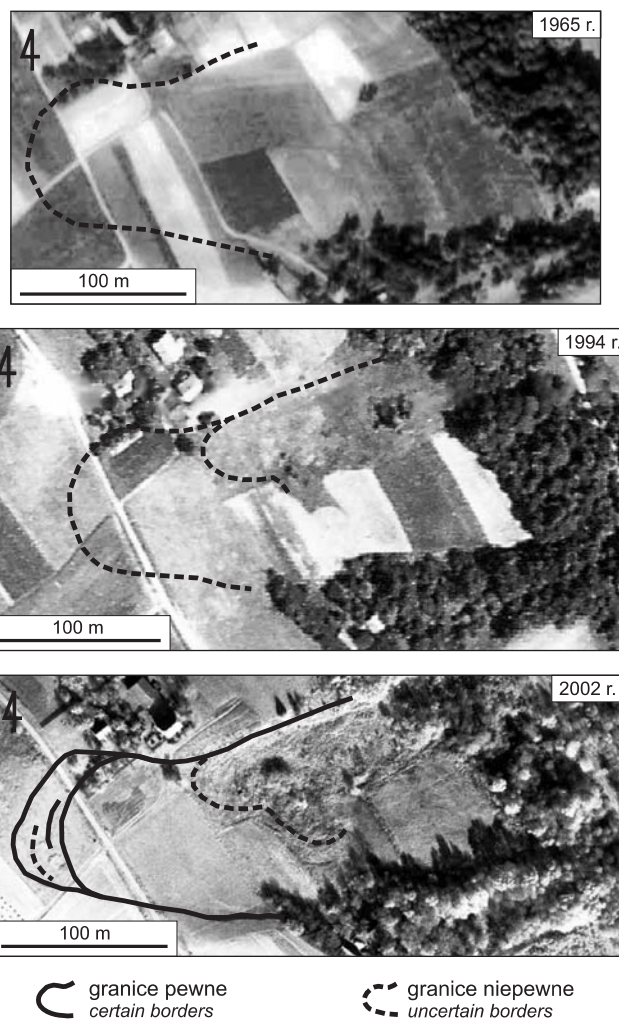


Fig. 3. Szkic fotointerpretacyjny rozwoju niszy osuwiska Śliwnica między 1965 a 2002 r.

Photointerpretation sketch of the niche of the Śliwnica landslide between 1965 and 2002

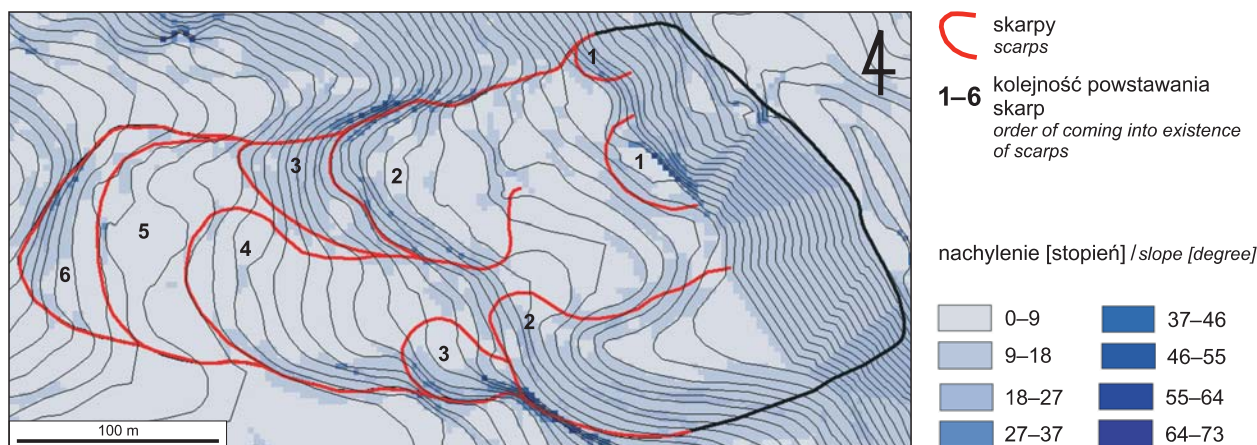


Fig. 4. Etapy rozwoju osuwiska Śliwnica

Stages of the development of the Śliwnica landslide

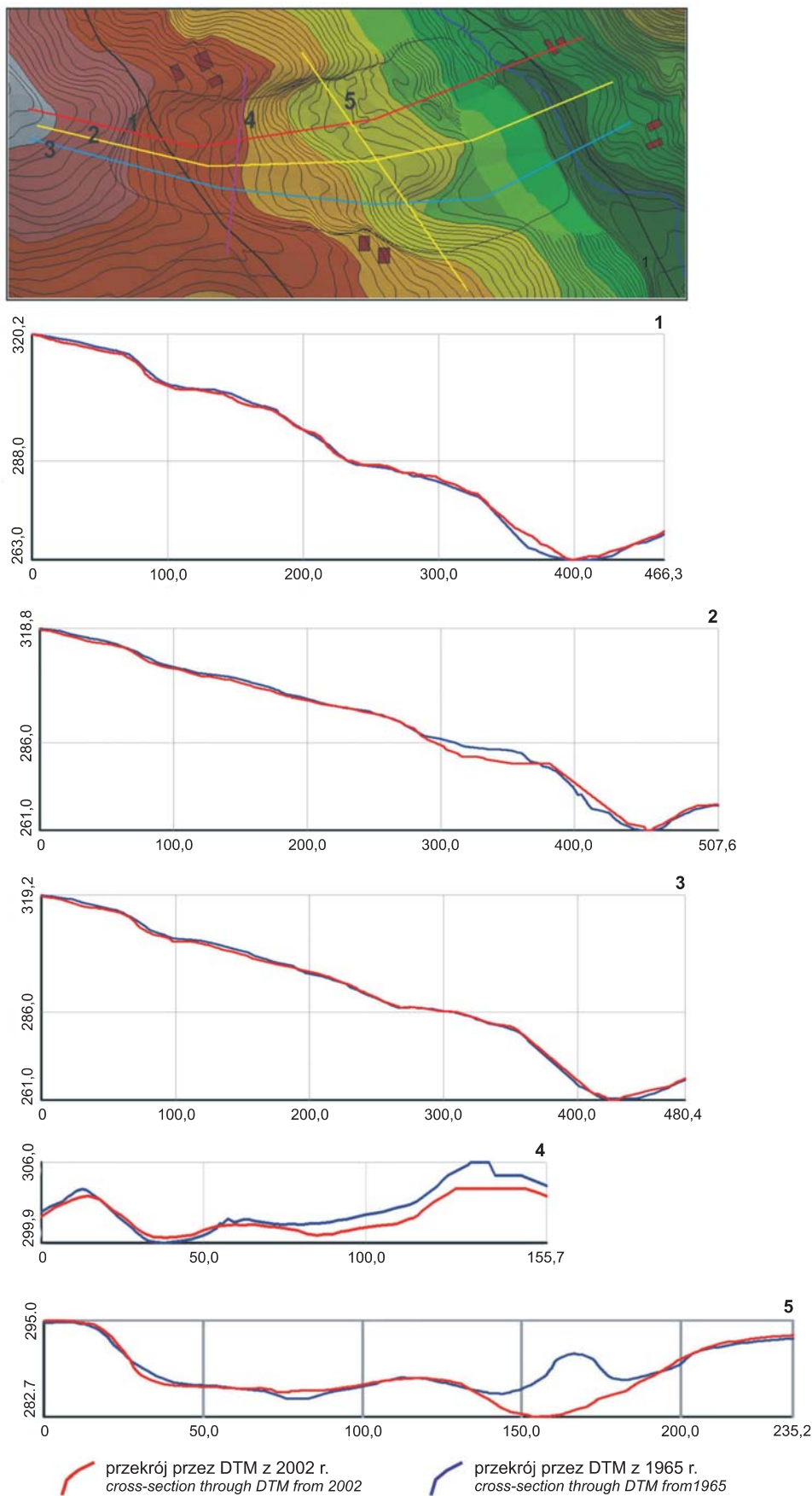


Fig. 5. Przekroje podłużne (1–3) i poprzeczne (4, 5) przez osuwisko Śliwnica
 Longitudinal (1–3) and transverse (4, 5) cross-sections through the Śliwnica landslide

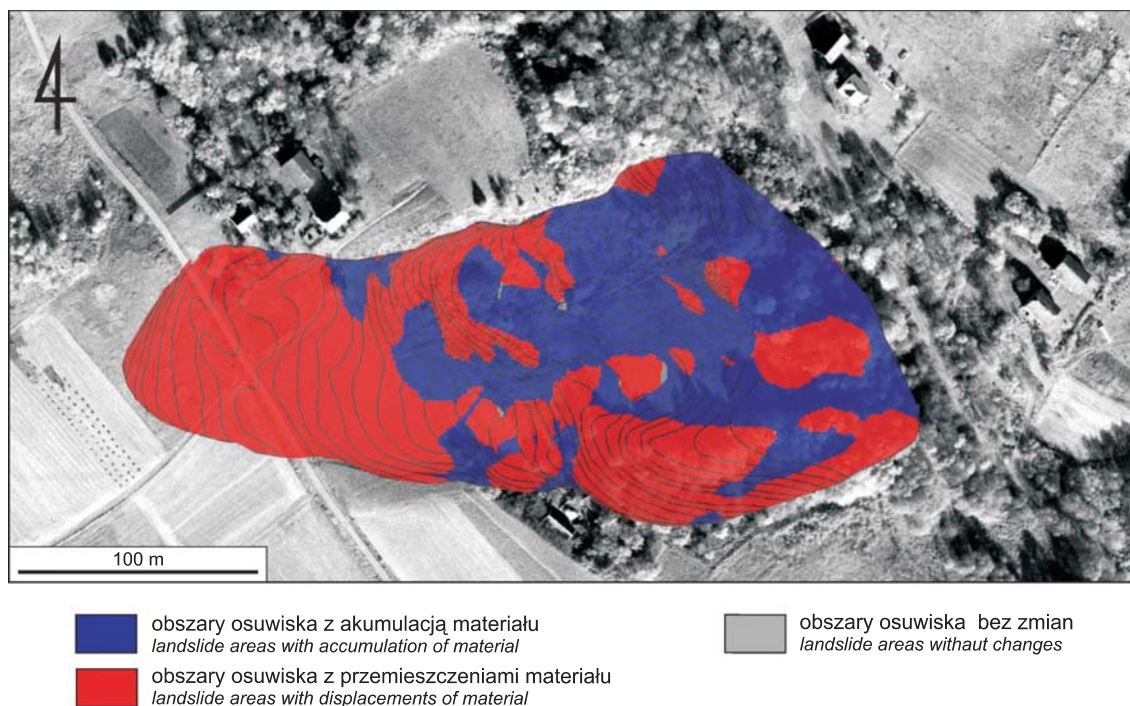


Fig. 6. Wizualizacja przemieszczeń mas skalnych w obrębie osuwiska Śliwnica

Visualization of rock masses displacement in the Śliwnica landslide

przepustowych sharpen 11 ker. Stereopary zdjęć lotniczych przeanalizowano również na stacji fotogrametrycznej Dell, dzięki uprzejmości firmy Eurosense.

Najwięcej szczegółów morfologicznych osuwiska można dostrzec na zdjęciu z 2002 r. (fig. 3). Wynika to faktu, że zdjęcie z tego okresu jest wykonane w większej skali niż zdjęcia z lat 1965 i 1994. Na zdjęciu z 1965 r. skarpa główna osuwiska jest słabo widoczna. Osuwisko rozpoznajemy po nagłej zmianie fototonu. Na osuwisku jest prowadzona intensywna działalność rolnicza, która dodatkowo utrudnia dokładne prześledzenie przebiegu zasięgu osuwiska. W górnej części zdjęcia lotniczego z 1994 r. widoczna jest wyraźna zmiana fotofonu, świadcząca o istnieniu osuwiska w tej części skarpy. Zniszczenia gruntu, jakie nastąpiły w tej części, utrudniły prace rolnicze (zmiany w użytkowaniu terenu w stosunku do zdjęcia z 1965 r.). Na zdjęciu z 2002 r. widać już wyraźnie dobrze wykształconą skarpe główną osuwiska. Stanowi ona duże zagrożenie dla lokalnej drogi oraz budynków mieszkalnych.

Wykorzystując fotogrametryczny model cyfrowy terenu (wygenerowany ze zdjęć lotniczych z 2002 r.), w ArcGis Spatial Analyst wymodelowano nachylenia powierzchni osuwiska i rysunek izoliniowy. Model cyfrowy powierzchni podświetlano z różnych kierunków, uzyskując w ten sposób szybką informację na temat głównych kierunków strukturalnych podłoża fliszowego oraz szczegóły dotyczące geomorfologii osuwiska. Następnie analizując wartości nachyleń terenu, mapę izoliniową, szkic geologiczny odkryty, zdjęcia lotnicze oraz wykorzystując obserwacje terenowe określono etapy rozwoju osuwiska (fig. 4).

W celu zbadania zmian w rzeźbie powierzchni osuwisk w czasie przeprowadzono analizę dwóch wektorowych mo-

deli cyfrowych terenu. Z wykonanych fotogrametrycznie rysunków wektorowych obu modeli wygenerowano w ArcGis 3D Analyst modele cyfrowe terenu w formacie wektorowym TIN. Stały się one podstawą do wykonania pięciu przekrojów morfologicznych, trzech podłużnych i dwóch poprzecznych do dłuższej osi osuwiska (fig. 5).

Z analizy przekrojów poprzecznych do dłuższej osi osuwiska wynika, że większą dynamikę zmian w rzeźbie osuwiska wykazywała jego strona północno-zachodnia na przekroju. Z analizy zaś przekrojów podłużnych można wywnioskować, że część strefy osuwiskowej (północna), przez którą poprowadzono przekrój nr 1, wykazuje większą dynamikę zmian w rzeźbie niż część osuwiska, przez którą biegnie przekrój nr 3.

Aby obliczyć ilość przemieszczonych mas skalnych i przedstawić ich przestrzenne rozmieszczenie w osuwisku, użyto funkcji *cut fill*, która jest dostępna w module ArcGis 3D Analyst. Funkcja ta umożliwiła nałożenie na siebie obu modeli cyfrowych terenu w formacie TIN i wygenerowanie z nich mapy różnicowej w postaci gridowej, obrazującej przemieszczenia przestrzenne mas skalnych w osuwisku (fig. 6). Obliczono, że przez 37 lat objętość mas skalnych i zwietrzelinowych, które uległy przemieszczeniu w obrębie strefy osuwiskowej, wynosi około 36 000 m³, a objętość akumulacji materiału około 27 000 m³. Brakująca objętość 9000 m³ przemieszczonych mas skalnych została odprowadzona erozyjnie w dnie doliny przez przepływający potok. Masa skalna, która podlegała przemieszczeniom mniejszym niż 1 m, jest bardzo mała i zajmuje 77 m² całkowitej powierzchni osuwiska (4,1 ha).

DYSKUSJA I PODSUMOWANIE

Dokładność rysunków poziomicowych modeli cyfrowych terenu otrzymanych ze zdjęć lotniczych z reguły jest pomniejszona przez gęstą roślinność. W osuwisku Śliwnica problemy te dotyczą czoła osuwiska, które jest pokryte gęstą roślinnością, co widać na zdjęciach lotniczych. W efekcie model rzeźby osuwiska jest w tym miejscu nieprecyzyjny. Dodatkowo na zdjęciach z 1965 r. występują obszary słabo czytelne i trudne do interpretacji (słaba jakość zdjęć), co bardzo zaburza efekt stereoskopowy i stwarza możliwość poprowadzenia warstwicy na niewłaściwej wysokości.

Ponadto, mimo że do wyrównania obydwu aerotriangulacji nalotów użyto tych samych fotopunktów, to w wyniku wyrównania rozkład odchylek na fotopunktach był różny, co wpłynęło również na dokładność opracowania. Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Warszawie nie dysponował metryką kalibracji kamery użytej w 1983 r., tak więc orientacja wewnętrzna zdjęcia była robiona na standardowy rozkład znaczków tłowych, co również wpłynęło na obniżenie dokładności. Orientacja wewnętrzna jest jednym z podstawowych i najważniejszych etapów wielu procesów fotogrametrycznych. Jest ona tak ważna, gdyż aby możliwe było dokonywanie na zdjęciach jakichkolwiek pomiarów, mających na celu określenie rzeczywistej wielkości i kształtu obiektów terenowych, konieczna jest znajomość elementów orientacji zdjęcia. Elementy orientacji wewnętrznej to współrzędne punktu głównego w układzie współrzędnych tłowych oraz ogniskowa kamery (tzw. stała kamery), czyli odległość między środkiem rzutu a płaszczyzną obrazu. Parametry te są wyznaczane w procesie kalibracji kamery. Problem orientacji wewnętrznej polega na tym, że położenie punktu głównego jest znane w układzie tłowym, a nie w układzie pikselowym, zatem zadaniem orientacji wewnętrznej jest wyznaczenie geometrycznej zależności między tymi układami.

Pomimo tych niedogodności otrzymane fotogrametryczne z archiwalnych zdjęć lotniczych modele cyfrowe terenu okazały się niezwykle użyteczne w określaniu wielkości, jak i zasięgu przemieszczeń w osuwisku Śliwnica.

Zastosowane do badań zdjęcia lotnicze oraz wygenerowane na ich podstawie fotogrametryczne modele cyfrowe terenu mają niewątpliwe zalety w analizie zasięgu i charakteru przemieszczeń osuwisk (stref osuwiskowych). Jednakże należy zwrócić uwagę na fakt, że metody te bez uwzględnienia istotnych poprawek mogą zawierać wiele błędów, rzutujących w efekcie na poprawność otrzymanych wyników. Ponadto tradycyjna metoda fotointerpretacji stereopar zdjęć lotniczych okazała się przydatna do prześledzenia

dynamiki rozwoju osuwiska oraz określenia zasięgu koluwium. Na zdjęciach widoczny był wyraźny kształt skarpy osuwiskowej (najlepiej na zdjęciu lotniczym z 2002 r.) oraz plamista tekstura o zróżnicowanym fototonie osuwiska. Czas powstania osuwiska trudno ustalić (najprawdopodobniej późny holocen). Natomiast na podstawie analizy archiwalnych zdjęć lotniczych oraz wywiadu środowiskowego można stwierdzić, że osuwisko ulegało odmłodzeniu w tzw. latach mokrych: 1980, 1985, 2001, 2004 i ostatnio w maju 2010 r.

Informacje geomorfologiczne o osuwisku Śliwnica uzyskano bezpośrednio z fotogrametrycznego modelu cyfrowego terenu zapisanego w formacie TIN, analizując w 2D jego pochodne, takie jak: mapy izoliniowe, mapy nachyleń terenu oraz mapy cieniowane podświetlane z różnych kierunków. W ten sposób wyinterpretowano kierunki strukturalne podłoża fliszowego oraz zasięg granicy koluwium osuwiskowego, obszary spłaszczeń wewnątrzsuwiskowych, granice skarp oraz czoło osuwiska. Dodatkowo przeanalizowano przewyższone w 3D widoki osuwiska, stosując technikę podświetlania modeli cyfrowych terenu z różnych kierunków. Analiza ta pozwoliła doprecyzować wcześniejsze obserwacje terenowe oraz wyznaczyć dokładnie granicę niszy głównej.

Stwierdzono, że analiza fotogrametrycznych modeli cyfrowych terenu ułatwia szybkie i precyzyjne wyznaczenie granicy zasięgu koluwiów osuwiskowych. Jest także użyteczna do przestrzennego określania dynamiki osuwisk. Z jej pomocą wychwycono przestrzenny ruch mas skalnych w osuwisku z dokładnością do 1 m. Dodatkowo obliczono objętości mas skalnych przemieszczonych w obrębie koluwium między 1965 a 2002 rokiem. Porównanie morfologii osuwisk na przekrojach geomorfologicznych wykazało zróżnicowanie dynamiki przemieszczeń w obrębie koluwium osuwiskowego przez 37 lat. Kompleksowa analiza fotogrametrycznych modeli cyfrowych terenu, budowy geologicznej, archiwalnych zdjęć lotniczych, analiza danych przestrzennych w systemie GIS oraz badania terenowe pozwoliły ustalić, że badane osuwisko powstało w sześciu etapach.

Podsumowując należy stwierdzić, że fotointerpretacja archiwalnych zdjęć lotniczych w połączeniu z analizą GIS wysokorozdzielczych fotogrametrycznych modeli cyfrowych terenu powinna należeć do standardowej metodyki określania dynamiki osuwisk. Może być stosowana z dużym powodzeniem w monitoringu osuwisk, jak również wykorzystana do przyspieszenia szczegółowego kartowania geologiczno-geomorfologicznego osuwisk.

LITERATURA

- BALDI P., FABRIS M., MARSELLA A., MONTICELLI R., 2005 — Monitoring the morphological evolution of the Sciarra del Fuoco during the 2002–2003 Strombolieruption using multi-temporal photogrammetry. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, **59**: 199–211.
- BOBER L., 1984 — Rejony osuwiskowe w polskich Karpatach fliszowych i ich związek z budową geologiczną regionu. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **340**: 115–162.
- DERRON M.H., JABOYEDOFF M., 2010 — LIDAR and DEM technique for landslides monitoring and characterization. *Nat. Hazard Earth Syst. Sci.*, **10**: 1877–1879.
- GENELII G., GIUSTIE., PIZZAFERII G., 2002 — Photogrammetric technique for the investigation of the Corniglio landslide. Applied geomorphology, theory and practice. John Wiley & Sons.
- GERLACH T., 1991 — Model tworzenia lessów w centralnej części polskich Karpat fliszowych w okresie wistulianu. PAN IGiPZ, Conf. Papers 14: 15–21.
- GREVE C., 1996 — Digital photogrammetry an addendum to the manual of photogrammetry. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland.
- HSIO K.H., YU M.F., STENG Y.H., 2003a — Change detection of landslide terrains using Grodnu-based LIDAR data. Proc. of the Society of Chinese Association of Geographic Information.
- KAMIŃSKI M., 2006 — Analiza GIS osuwisk dla wybranego obszaru Pogórza Dynowskiego. *Arch. Fotogrametrii i Teledetekcji*, **16**: 279–287.
- KAMIŃSKI M., PIOTROWSKA K., 2003 — Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1:50 000, ark. Kańczuga wraz z objaśnieniami. CAG Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- 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). *Engineer. Geol.*, **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. 32. Konf. Nauk.-Tech. Stow. Geodetów Polskich NOT, Katowice.
- SCHUSTER R.L., KRIŽEK R.J., 1978 — Landslides (analysis and control). Special Reports 176, Transport Research Board. National Research Council, National Academy of Sciences, Washington, DC.
- RAJCHEL J., 1989 — Budowa geologiczna doliny Sanu w rejonie Dynów–Dubiecko. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **361**: 11–53.
- WDOWIARZ J., 1948 — Budowa geologiczna Karpat w okolicy Dubiecka i Krzywicy. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **10**: 1–24.
- WÓJCİK A., ZIMNAL Z., 1996 — Osuwiska wzdłuż doliny Sanu między Bachórcem a Reczpołem. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **374**: 77–91.

SUMMARY

The article discusses the usage of aerial photography and photogrammetric digital elevation models in the research on the Śliwnica landslide. Photogrammetric reconstruction of the terrain on the basis of archival aerial photographs is an extremely useful method in the analysis of geomorphology of the landslide. This method provides fast, accurate and cost-effective information about the dynamics of landslides and their size. Comparing the GIS, digital terrain models generated from stereo pairs photogrammetric aerial photographs from various years, obtained spatial information in a map grid. This map shows the size of the rock mass displacements that have occurred during certain time within the landslide.

The research on the areas threatened by landslides, by using photogrammetry method and remote sensing techniques was performed by others: Ostaficzuk (1962, 1965), Schuster and Križek (1978); Greve (1996); Genelii *et al.* (2002), Mora *et al.* (2003). Baldie *et al.* (2005). The distribution of landslides in Dynów upland was analyzed by Wdowiarz (1948), Bober (1984), Wójcik and Zimnal (1996) and Kamiński (2006).

The activation of landslides in the area of the Carpathians was a result of catastrophic rainfalls in July 1997, in the spring of 2000, in July 2001, in July and August 2004 and in May and June 2010. This resulted in numerous threats

to residential buildings, frequent damages to roads, telephone lines and power stations.

Landslide Śliwnica is situated near the village Dubiecko in the Dynów Upland. This is a rotational landslide, activated in spring 2001, threatening the local residential buildings, road and a power line. According to the classification of Bober (1984), the considered landslide belongs to the complex one. It was the result of the multistage process of subsidence of rock masses. The landslide area can be divided into several generations, merging together and going down to the stream.

In vector form used models from stereo pairs made photogrammetric aerial photographs. Generated four vector digital terrain models were stored in the DXF vector format. They were imported into ArcGIS 3D Analyst module and converted into digital models of terrain triangulation TIN. Then two high-resolution digital elevation models (DEMs) were compared. This way the dynamics of the surface of the landslide was analyzed. The differences between the grids of digital elevation models were used for determination of vertical movements of the grid points within the landslide area. The differences were shown as a shaded relief map, with a red colour for the positive elevations (erosion), and a blue one for

the negative ones (accumulation). The map was superimposed on digital ortophotomap dated on the October 2002. Additionally, five geomorphological cross-sections were made.

To conclude, it should be stated that the archival interpretation of aerial photographs from different periods and the analysis of photogrammetric digital terrain models in

GIS environment should belong to the standard methodology for determining the dynamics of the landslides. This can be used with a great success for landslides monitoring, as well as for detailed mapping of geology and geomorphology of the landslide.

