Detekcja głównych skarp osuwiskowych oraz zróżnicowanie ich występowania w polskich Karpatach zewnętrznych na podstawie danych LiDAR

Anna Mitura¹, Dominik Łukasiak²

Detection of landslide main scarps and the diversity of their occurrence in the Polish Outer Carpathians based on LiDAR data. Prz. Geol., 72: 805–815: doi: 10.7306/2024.70

A b s t r a c t. Landslide processes due to their dynamics, destructive effects and economic losses which they cause, have been the subject of research and descriptions since the 19th century. A facilitation in the study of landslides – not only mountain ones – was the use of high-resolution digital terrain models (DTM) generated on the basis of point clouds from airborne laser scanning. The use of LiDAR ALS data enabled the detection of over 115,000 main scarps of the landslides in the Polish Outer Carpathians, the development of a landslide main scarps density map per unit area in particular mesoregions, and the analysis of the causes of differences in the landslide main scarp density.

Keywords: Airborne laser scaning, digital terrain model, landslides density, main scarp, geohazards

Procesy osuwiskowe poprzez swoją dynamikę i niszczycielskie działania mogą prowadzić do śmierci ludzi i zwierzat, a także do ogromnych strat gospodarczych. Związane jest to ze zniszczeniami infrastruktury drogowej, kolejowej, obiektów budowlanych oraz występujących wokół zbiorników wodnych (Oszczypko i in., 2002; Petley, 2012; Wójcik i in., 2017; Zumpano i in., 2018; Perski i in., 2019). Klasyczne metody badań osuwisk obejmujące prace terenowe, analizę zdjęć lotniczych i satelitarnych, analizę rysunku poziomicowego oraz układu sieci hydrograficznej na mapie topograficznej (Tyszkowski, 2008; Ozimkowski i in., 2010; Kamiński, 2011; Karwacki, 2016, 2019; Wójcik i in., 2020) nie do końca sprawdzają się w obszarach górskich porośniętych lasem, dlatego też w tych rejonach kompleksowa analiza procesów osuwiskowych jest utrudniona. Rozpoznanie powierzchni terenu pod pokrywą roślinną jest możliwe przy wykorzystaniu numerycznych modeli terenu (NMT) o wysokiej rozdzielczości, wygenerowanych na podstawie chmury punktów z lotniczego skanowania laserowego (LiDAR - light detection and ranging). Analiza danych LiDAR często umożliwia wykrywanie, identyfikację i klasyfikację osuwisk na zalesionych zboczach (Van Den Eeckhaut i in., 2013; Pirasteh, Li, 2018; Pawłuszek i in., 2019), a także monitorowanie aktywności osuwisk na podstawie modeli różnicowych (Palenzuela i in., 2015; Perski, Wojciechowski, 2015; Pellicani i in., 2019; Wódka, 2022).

Celem artykułu jest:

- detekcja głównych skarp osuwiskowych na podstawie danych LiDAR w polskich Karpatach zewnętrznych,
- określenie zróżnicowania rozmieszczenia przestrzennego głównych skarp osuwiskowych w poszczególnych jednostkach fizycznogeograficznych polskich Karpat zewnętrznych,
- rozpoznanie wpływu budowy geologicznej i ukształtowania terenu na rozmieszczenie głównych skarp osuwiskowych.

Karpaty zewnętrzne są częścią łuku Karpat, który rozciąga się na długości 1300 km od okolic Wiednia na zachodzie po Żelazną Bramę na Dunaju w Rumunii. Polska część Karpat zewnętrznych jest zbudowana głównie z łupków ilastych, mułowców, piaskowców i zlepieńców, wieku górna jura-dolny miocen. Jedynie lokalnie występują skały węglanowe. Utwory te zostały odkłute od podłoża i przesunięte na północ na mioceńskie osady zapadliska przedkarpackiego w trakcie ruchów alpejskich i utworzyły ponasuwane na siebie jednostki (Oszczypko, 2006; Oszczypko i in., 2008). Analizowany obszar jest położony w obrębie dwóch karpackich podprowincji - Zewnętrznych Karpat Zachodnich oraz Zewnętrznych Karpat Wschodnich, które są podzielone na 30 mezoregionów (ryc. 1) zaliczanych do trzech typów rzeźby: 1) góry średnie, 2) pogórza i góry niskie 3) kotliny (Kondracki, 2009; Solon i in., 2018). Przy czym geologiczna granica Karpat nie wszędzie pokrywa się z granicą fizycznogeograficzną wyznaczoną przez Solona i in. (2018).

OBSZAR ANALIZ

Rzeźba Karpat zewnętrznych jest bardzo zróżnicowana, a jej ewolucja złożona. Na jej obecny kształt wpływ miało wiele czynników, m.in. zróżnicowanie litologiczne i tektoniczne poszczególnych masywów, występowanie współczesnych ruchów tektonicznych (Starkel, 1972; Baumgart-Kotarba, 1974; Henkiel, 1977-1978; Zuchiewicz, 2010), a także sposób nasuwania się poszczególnych jednostek tektonicznych (Jankowski, Margielewski, 2014; Jankowski, 2015). Charakterystyczne spłaszczenia grzbietów są efektem występowania odpornych na niszczenie i połogo zalegających formacji skalnych (Zuchiewicz, 2011; Jankowski, Margielewski, 2014). Zachodnia cześć polskich Karpat zewnętrznych obejmuje zarówno zwarte grupy górskie np. Beskid Śląski, jak i izolowane grzbiety Beskidu Wyspowego (Święchowicz i in., 2021), część wschodnia wyraźnie odróżnia się rzeźbą terenu od części zachodniej grzbiety i rozcinające je doliny rzeczne mają układ linearny (ryc. 2).

¹ Szkoła Doktorska Nauk Ścisłych i Przyrodniczych, Uniwersytet Warszawski, ul. Stefana Banacha 2C, 02-097 Warszawa; a.mitura@uw.edu.pl; ORCID ID: 0000-0002-6274-9119.

² Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa; dominik.lukasiak@uw.edu.pl; ORCID ID: 0000-0002-0782-7145.



ZEWNĘTRZNE KARPATY ZACHODNIE: 1 - Beskid Sląski, 2 - Międzygórze Jabłonkowsko-Koniakowskie, 3 - Beskid Zywiecko-Kysucki, 4 - Beskid Mały, 5 - Pasma Pewelsko-Krzeczowskie, 6 - Beskic Żywiecko-Orawski, 7 - Beskid Makowski, 8 - Beskid Wyspowy, 9 - Gorce, 10 - Beskid Sądecki, 11 - Beskid Niski, 12 - Pogórze Śląskie, 13 - Pogórze Wielickie, 14 - Pogórze Wiśnickie, 15 - Pogórze Rożnowskie, 16 - Pogórze Ciężkowickie, 17 - Pogórze Strzyżowskie, 18 - Pogórze Dynowskie, 19 - Pogórze Przemyskie, 20 - Pogórze Bukowskie, 21 - Pogórze Jasielskie, 22 - Działy Orawskie, 23 - Pogórze Orawsko-Jordanowskie, 24 - Pogórze Popradzkie, 25 - Kotlina Żywiecka, 26 - Kotlina Sądecka, 27 - Obniżenie Gorlickie, 28 - Kotlina Jasieńsko-Krośnieńska.

ZEWNĘTRZNE KARPATY WSCHODNIE: 29 - Góry Sanocko-Turczańskie, 30 - Bieszczady Zachodnie.

OUTER WESTERN CARPATHIANS: 1 - Śląski Beskid Mts, 2 - Jabłonkowsko-Koniakowskie Intermontane Region, 3 - Żywiecko-Kysucki Beskid Mts, 4 - Mały Beskid Mts, 5 - Pewelsko-Krzeczowskie Ranges, 6 - Żywiecko-Orawski Beskid Mts, 7 - Makowski Beskid Mts, 8 - Wyspowy Beskid Mts, 9 - Gorce Mts, 10 - Sądecki Beskid Mts, 11 - Niski Beskid Mts, 12 - Śląskie Foothills, 13 - Wielickie Foothills, 14 - Wiśnickie Foothills, 15 - Rożnowskie Foothills, 16 - Ciężkowickie Foothills, 17 - Strzyżowskie Foothills, 18 - Dynowskie Foothills, 19 - Przemyskie Foothills, 20 - Bukowskie Foothills, 21 - Jasielskie Foothills, 22 - Orawskie Interfluve, 23 - Orawsko-Jordanowskie Foothills, 24 - Popradzkie Foothills, 25 - Żywiecka Basin, 26 - Sądecka Basin, 27 - Gorlickie Basin, 28 - Jasieńsko-Krośnieńska Basin.

OUTER EASTERN CARPATHIANS: 29 - Sanocko-Turczańskie Mts, 30 - Bieszczady Zachodnie Mts.



Ryc. 1. Podział fizycznogeograficzny polskich Karpat zewnętrznych (Kondracki, 2009 w modyfikacji Solona i in., 2018) **Fig. 1.** Physico-geographical regions of the Polish Outer Carpathians (after Kondracki, 2009 modified by Solon et al., 2018)

Ryc. 2. Wysokościowy model terenu polskich Karpat (Ostaficzuk, 2019) **Fig. 2.** Elevation terrain model of the Polish Carpathians (Ostaficzuk, 2019)

Szczegółowe wyniki analiz zaprezentowano na przykładzie czterech mozoregionów wybranych jako obszary testowe:

- Beskid Śląski (1 na ryc. 1) położony w górach średnich, w zachodniej części Karpat,
- Góry Sanocko-Turczańskie (29 na ryc. 1) położone w górach średnich, we wschodniej części Karpat,
- Kotlina Sądecka (26 na ryc. 1).
- Pogórze Strzyżowskie (17 na ryc. 1) wchodzące w skład pasma pogórzy i gór niskich,

Mezoregiony te wybrano ze względu na odmienną rzeźbę terenu, która wywiera wpływ na rozmieszczenie głównych skarp osuwiskowych.

Beskid Śląski

Położony po zachodniej części polskich Karpat Beskid Śląski (1 na ryc. 1) od południa sąsiaduje z Międzygórzem Jabłonkowsko-Koniakowskim (2 na ryc. 1), od wschodu z Beskidem Żywiecko-Orawskim (6 na ryc. 1) i Kotlina Żywiecką (25 na ryc. 1), a od północy z Pogórzem Śląskim (12 na ryc. 1), tworząc wyraźnie zaznaczający się w rzeźbie próg morfologiczny. Powierzchnia jednostki wynosi ok. 480 km², a najwyższy szczyt Skrzyczne ma wysokość 1257 m m.p.m. Mezoregion niemal w całości jest położony w zasięgu jednostki śląskiej, jedynie na południowym skraju odsłaniają się warstwy jednostki przedmagurskiej. Budują go głównie górnokredowe, masywne piaskowce godulskie (Burtan i in., 2001, 2016; Nescieruk, Wójcik, 2001, 2012; Marks i in., 2022). Beskid Śląski tworzy zwartą grupę górską rozciętą na trzy części przez Wisłę i jej dopływy: Brennicę, Wapienicę i Białą. Grzbiety mają układ widlasty (Klimaszewski, 1946), w miejscach zachodzenia intensywnych procesów denudacyjnych są wąskie i zaokrąglone, natomiast tam gdzie procesy niszczące mają przebieg powolny występują grzbiety szerokie i zaokrąglone, miejscami z załomem oddzielającym wierzchowiną od bardziej stromych stoków (Nescieruk, Wójcik, 2012).

Góry Sanocko-Turczańskie

Położone we wschodniej części polskich Karpat Góry Sanocko-Turczańskie (29 na ryc. 1) rozciągają się na terenie Polski i Ukrainy. Od południa sąsiadują z mezoregionem Bieszczady Zachodnie (30 na ryc. 1), od wschodu z Pogórzem Bukowskim (20 na ryc. 1) i Dynowskim (18 na ryc. 1), a ku północy przechodzą w Pogórze Przemyskie (19 na ryc. 1). Powierzchnia mezoregionu wynosi 1066 km², a najwyższy szczyt - Jaworniki, osiąga 908 m n.p.m. W Górach Sanocko-Turczańskich znajduje się granica tektoniczna pomiędzy jednostkami skolską i śląską o przebiegu NW-SE. Wychodnie skał wieku kreda dolna-miocen są równoległe do granicy nasunięcia. Charakterystyczne dla tego regionu jest naprzemienne występowanie długich, równoległych grzbietów i dolin, które są wynikiem procesów tektonicznych oraz denudacji skał o różnej odporności na niszczenie (Żytko i in., 1995; Żytko, Zimnal, 1997; Malata i in., 1997, 2006, 2014a, b; Marks i in., 2022).

Kotlina Sądecka

Kotlina Sądecka (26 na ryc. 1) jest otoczona od zachodu i północy przez Beskid Wyspowy (8 na ryc. 1), od południa przez Beskid Sądecki (10 na ryc. 1), od wschodu przez Beskid Niski (11 na ryc. 1), a od północnego wschodu sąsiaduje z Pogórzem Rożnowskim (15 na ryc. 1). Powierzchnia mezoregionu wynosi 323,5 km², a jej dno jest położone na wysokości 280–300 m n.p.m. Dominują tu utwory jednostki magurskiej, nasunięte na odsłaniające się w północnej części regionu jednostki dukielską i grybowską. Występuje tu także osobny element tektoniczny – zapadlisko Kotliny Sądeckiej (Oszczypko, Wójcik, 1989, 1993). Na powierzchni odsłaniają się głównie piaskowce, łupki, wapienie i zlepieńce eocenu, miejscami występują warstwy utworzone w późnej kredzie i w oligocenie (Marks i in., 2022). Utwory starsze są pokryte osadami czwartorzędowymi wykształconymi głównie w postaci osadów rzecznych, które budują tarasy rzeczne Dunajca, Popradu, Kamienicy Nawojowskiej i ich dopływów.

Pogórze Strzyżowskie

Pogórze Strzyżowskie (17 na ryc. 1) jest położone w pasie pogórzy, a jego północna granica jest morfologiczną granicą Karpat. Od zachodu sąsiaduje z Pogórzem Ciężkowickim (16 na ryc. 1), od wschodu z Pogórzem Dynowskim (18 na ryc. 1), a od południa z Kotliną Jasielsko--Krośnieńską (28 na ryc. 1). Powierzchnia mezoregionu wynosi 1112 km², a najwyższym wzniesieniem jest Bardo - 534 m n.p.m. Jest to jedyny z opisywanych mezoregionów, który jest w całości położony w zasięgu zlodowacenia Sanu 1. Ma to swoje odbicie w morfologii i wykształceniu osadów czwartorzędowych. Osady polodowcowe występują na niewielkim obszarze przy północnej granicy regionu. Zdecydowanie więcej jest osadów, które powstały na przedpolu lądolodu, przede wszystkim lessów tworzących pokrywy na starszym podłożu. Podłoże jest zbudowane głównie ze skał jednostki skolskiej, na którą są nasunięte odsłaniające się na południu jednostki śląska i podśląska, a miejscami osadziły się transgresywne utwory miocenu. Na północy w podłożu dominują piaskowce z łupkami kredy górnej, w części środkowej piaskowce i łupki miocenu a na południu piaskowce i łupki oligocenu (Birkenmajer-Szymakowska i in., 2009, 2012; Malata, Zimnal, 2009, 2016; Marks i in., 2022).

PROCESY OSUWISKOWE W KARPATACH ZEWNĘTRZNYCH

Budowa geologiczna Karpat zewnętrznych wybitnie sprzyja rozwojowi osuwisk i innych powierzchniowych ruchów masowych. Najbardziej podatne na osuwanie są miejsca wychodni warstw łupkowych i piaskowcowo--łupkowych oraz obszary, w których grube kompleksy spękanych lub pociętych uskokami piaskowców są podścielone warstwami łupków (Bober, 1984; Długosz, 2011). Ze względu na typ podłoża, w którym rozwija się powierzchnia poślizgu, można wydzielić osuwiska: zwietrzelinowe, skalne i skalno-zwietrzelinowe. Osuwiska zwietrzelinowe są to płytkie osuwiska rotacyjne, o wklęsłocylindrycznej powierzchni poślizgu, oraz osuwiska translacyjne, w których przemieszczenie pokryw stokowych zachodzi po nachylonej płaszczyźnie poślizgu utworzonej na granicy litej skały i zwietrzeliny (Jakubowski, 1965; Bober, 1984; Gorczyca, 2004; Margielewski, 2004). Innym typem są osuwiska, które obejmują materiał skalny lub skalno-zwietrzelinowy. Mogą to być osuwiska strukturalne, w których przemieszczenie zachodzi wzdłuż naturalnych powierzchni

geologicznych - ławic, spękań lub uskoków, lub osuwiska ścięciowe (Kleczkowski, 1955; Bober, 1984; Margielewski, 2009). Podczas ulewnych deszczy dochodzi do spływów błotnych lub gruzowo-błotnych, które są skutkiem przesycenia wodą pokryw stokowych i częściowego upłynnienia osadów (Gorczyca, 2004; Gębica i in., 2019), a w obrębie utworów pokrywowych może dojść do spełzywania pokrywy zwietrzelinowej, głównie tej która porośnięta jest trawą i zalega na nieprzepuszczalnym podłożu (Jakubowski, 1966; Starkel, 1972). Ruchy masowe odgrywają istotną rolę w przekształcaniu stoków i transformacji rzeźby górskiej. W wyniku ich działalności stoki przybieraja charakterystyczny wklęsły lub wypukły kształt, a formy rzeźby osuwiskowej m.in. skarpy (główne i wtórne), akumulacyjne wały koluwialne (pręgi, struktury zmarszczkowe i muldy), jeziora osuwiskowe czy rowy rozpadlinowe na grzbietach są bardzo liczne i wyraźnie widoczne w krajobrazie (Starkel, 1960; Kotarba, 1986; Wódka, 2019; Święchowicz i in., 2021). Duża zmienność budowy geologicznej Karpat zewnętrznych oraz zróżnicowana rzeźba powodują, że występowanie ruchów masowych jest nierównomierne. Zjawisko to jest dobrze widoczne na modelach opracowanych na podstawie danych z lotniczego skanowania laserowego.

METODYKA

Na obszarze Karpat zewnętrznych o powierzchni 18,7 tys. km² wykonano detekcję głównych skarp osuwiskowych przy użyciu narzędzia Geographic Information System (GIS) w programie ArcGIS 10.8. oraz Relief Visualization Toolbox 2.2.1. Opracowanie zrealizowano na danych pozyskanych z Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii (GUGiK), a zgromadzonych w trakcie lotniczego skanowania laserowego przeprowadzonego w dwóch okresach: w latach 2011-2014 w ramach projektu ISOK (Informatyczny System Osłony Kraju) oraz w latach 2019-2023 w ramach projektu CAPAP (Centrum Analiz Przestrzennych Administracji Publicznej). Na podstawie pozyskanej chmury punktów o gęstości 4-12 pkt/m² dla wybranych obszarów utworzono numeryczne modele terenu o rozdziel- czości przestrzennej 0.5×0.5 m, 1×1 m, 5×5 m i 10×10 m. Następnie na podstawie wygenerowanych

rastrów do dalszej analizy całego obszaru polskich Karpat zewnętrznych wybrano raster o rozdzielczości 1 × 1 m, gdyż jest to optymalna rozdzielczość do rozpoznania osuwisk i ich elementów w obszarach górskich o dużych deniwelacjach i zróżnicowanej rzeźbie. Na podstawie NMT wygenerowano modele pochodne: cieniowany z oświetleniem jednokierunkowym (hillshade) i wielokierunkowym (hillshade from multiple directions), nachylenia stoków (slope gradient) a także otwartości pozytywnej i negatywnej (positive i negative openness) oraz SVF (sky-view factor) (Zakšek i in., 2011; Kokalj, Hesse, 2017; Kokalj, Somrak, 2019). Wygenerowane modele posłużyły do wykonania analizy rozmieszczenia głównych skarp osuwiskowych. Detekcja została przeprowadzona manualnie, a każde z osuwisk poddano interpretacji autorskiej – określenia granic osuwiska i jego elementów, w tym skarpy głównej i koluwiów. Pozwoliło to na odróżnienie skarp wtórnych, progów odpornościowych oraz innych naturalnych badź antropogenicznych krawędzi występujących na stokach od głównych skarp osuwiskowych. W przypadku strefy osuwiskowej, w której występuje kilka osuwisk połączonymi koluwiami, każda skarpa główna była oznaczana jako oddzielna forma (ryc. 3). Do przedstawienia lokalizacji wyznaczonych głównych skarp osuwiskowych wykorzystano model cieniowany z oświetleniem jednokierunkowym. Pozyskane dane zestawiono w podziale na mezoregiony wg Solona i in. (2018), a dla obszarów testowych wykonano odniesienie do ukształtowania terenu odczytanego z NMT i modelu cieniowanego oraz do budowy geologicznej, o której informacje pozyskano ze Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski (SMGP) w skali 1:50 000 (Oszczypko, Wójcik, 1989; Żytko i in., 1995; Malata i in., 1997, 2006; Burtan i in., 2001; Nescieruk, Wójcik, 2001; Birkenmajer-Szymakowska i in., 2009; Malata, Zimnal, 2009) oraz Mapy geologicznej Polski (MGP) w skali 1:500 000 (Marks i in., 2022).

WYNIKI

W polskich Karpatach zewnętrznych na podstawie danych LiDAR ALS zlokalizowano ponad 115 000 głównych skarp osuwiskowych, co świadczy o ogromnej skali zjawiska. Nawet na modelu wykonanym w małej skali jest widoczne wyraźnie zróżnicowanie w ich rozmieszczeniu (ryc. 4). W zwartych grupach górskich Beskidów Zachodnich rozmieszczenie głównych skarp osuwiskowych jest równomierne. W Beskidzie Śląskim (ryc. 5) bardzo często odzwierciedlają one przebieg grzbietów górskich. Na zboczach tarasów rzecznych występują pojedyncze osuwiska, a położony na południu obszar wychodni piaskowców i łupków paleocenu jest ich pozbawiony. W północnej części Gór Sanocko-Turczańskich (ryc. 6) w morfologii najbardziej zaznaczają się warstwy piaskowców, iłowców i iłów mioceńskich charakteryzujących się różną odpornością na wietrzenie. Budują one wyraźnie odznaczające się podłużne grzbiety. Linearny układ grzbietów i rozcinających je dolin przekłada się na rozmieszczenie głównych skarp osuwiskowych. Występują tu podłużne, rozciągnięte w kierunku NW-SE i pokrywające się z przebiegiem nasunięć tektonicznych i głównych grzbietów strefy zagęszcze-



Ryc. 3. Przykład lokalizacji skarp głównych w obrębie osuwiska na modelu cieniowanym

Fig. 3. Example of the location of main scarps within the landslide on a hillshade



Ryc. 4. A – lokalizacja głównych skarp osuwiskowych w polskich Karpatach zewnętrznych wykonana na podstawie danych LiDAR; B – ukształtowanie terenu polskich Karpat zewnętrznych na modelu cieniowanym

Fig. 4. A – location of landslide main scarps in the Polish Outer Carpathians based on LiDAR data; B – landforms of the Polish Outer Carpathians on the hillshade model

nia głównych skarp osuwiskowych oraz równoległe do nich strefy małego zagęszczenia głównych skarp osuwiskowych odpowiadające dnom rozdzielających grzbiety dolin. Południowo-zachodnia część Gór Sanocko-Turczańskich (ryc. 6), zbudowana w całości z piaskowców, łupków, margli i rogowców oligocenu, zdecydowanie różni się od części północnej. Występowanie tylko jednego wydzielenia spowodowało, że przebieg grzbietów nie jest linearny, a lokalizacja głównych skarp osuwiskowych jest mniej uporządkowana i przypomina tą z zachodniej części Karpat.

Najmniejsze nagromadzenie głównych skarp osuwiskowych występuje w obrębie kotlin, które mają stosunkowo mało urozmaiconą rzeźbę i płaskie dna wykształcone w postaci tarasów rzecznych. Osuwiska występują tu na zboczach tarasów w ograniczonej liczbie. W morfologii Kotliny Sądeckiej (ryc. 7) zarysowują się grzbiety obniżające się w kierunku Dunajca i odcinające się wyraźnie progiem morfologicznym od tarasów rzecznych. Zróżnicowanie budowy geologicznej i rzeźby terenu wpływa na rozmieszczenie głównych skarp osuwiskowych. Skarpy te są rozmieszczone na całym obszarze wychodni przedczwartorzędowych, ale ich największe nagromadzenie jest w pasie położonym wzdłuż krawędzi doliny Dunajca. W dolinach rzecznych osuwiska powstały jedynie na zboczach tarasów, natomiast same ich powierzchnie są osuwisk pozbawione. W paśmie pogórzy rozmieszczenie głównych skarp osuwiskowych jest bardzo zróżnicowane. Na Pogórzu Strzyżowskim (ryc. 8) na ich rozkład wpływa nie tylko rzeźba terenu, ale również wykształcenie osadów czwartorzędowych. W morfologii zaznaczają się grzbiety o roz-



Ryc. 5. A – *Mapa geologiczna Beskidu Śląskiego w skali 1 : 500 000* (Marks i in., 2022); B – rzeźba terenu Beskidu Śląskiego na modelu cieniowanym; C – lokalizacja głównych skarp osuwiskowych w Beskidzie Śląskim wykonana na podstawie danych LiDAR **Fig. 5.** A – *Geological map of the Śląski Beskid Mountains on a scale of 1 : 500,000* (Marks et al., 2022); B – landforms of the Śląski Beskid Mountains on the hillshade model; C – location of landslide main scarps in the Śląski Beskid Mountains based on LiDAR data

ciągłości równoleżnikowej, zgodnej z przebiegiem nasunięć, które od południowego wschodu sąsiadują z doliną rzeczną Wisłoka. Największe nagromadzenie głównych skarp osuwiskowych jest w części północnej, w wychodniach piaskowców i łupków kredy, oraz w części południowej – na stokach dwóch wyraźnych wzniesień, których obecność można wiązać z przebiegiem nasunięcia oraz występowaniem wychodni piaskowców i łupów eocenu. Na północnym wschodzie mezoregionu występują tereny niżej położone, o mniej urozmaiconej rzeźbie terenu. Są to obszary z pokrywą lessową, w której utworzyło się niewiele osuwisk, a jedyne nagromadzenie głównych skarp osuwiskowych jest na stokach grzbietu,wyraźnie widocznego w morfologii. W dolinach rzek, podobnie jak w innych regionach, osuwiska występują pojedynczo.

Inne spojrzenie na zróżnicowanie rozmieszczenia głównych skarp osuwiskowych w Karpatach zewnętrznych daje zestawienie ich gęstości w przeliczeniu na jednostkę powierzchni poszczególnych mezoregionów (ryc. 9). Gęstość ta jest niższa w mezoregionach położonych w zachodniej części Polski i rośnie na wschód, niezależnie czy mamy do czynienia z pogórzami czy górami średnimi.



Ryc. 6. A – Mapa geologiczna Gór Sanocko-Turczańskich w skali 1 : 500 000 (Marks i in., 2022); B – rzeźba terenu Gór Sanocko-Turczańskich na modelu cieniowanym; C – lokalizacja głównych skarp osuwiskowych w Górach Sanocko-Turczańskich wykonana na podstawie danych LiDAR

Fig. 6. A – Geological map of the Sanocko-Turczańskie Mountains on a scale of 1 : 500,000 (Marks et al., 2022); B – landforms of the Sanocko-Turczańskie Mountains on the hillshade model; C – location of landslide main scarps in the Sanocko-Turczańskie Mountains based on LiDAR data

Najwyższe wartości – powyżej 10 skarp osuwiskowych na km² występują na Pogórzu Dynowskim (18 na ryc. 1), czyli w jednostce, która jest najdalej wysunięta na północny wschód i znajduje się w miejscu maksymalnego wygięcia łuku Karpat na terenie Polski. Drugi pod względem gęstości form osuwiskowych jest obszar Pogórza Popradzkiego (24 na ryc. 1), ale w granicach Polski jest położony jedynie niewielki fragment tej jednostki sąsiadujący z Beskidem Sądeckim (10 na ryc. 1), dlatego też osiągnięta wartość może być niemiarodajna. Najniższe wartości, poniżej

1 skarpy osuwiskowej na km², występują w trzech jednostkach: dwóch kotlinach – Żywieckiej (25 na ryc. 1) i Jasieńsko-Krośnieńskiej (28 na ryc. 1), oraz w Działach Orawskich (22 na ryc. 1) zbudowanych z łagodnie nachylonych wzgórz rozdzielonych szerokimi dolinami potoków. Pogórze Śląskie (12 na ryc. 1) jako jedyne z pogórzy położonych wzdłuż północnej granicy Karpat ma niższą gęstość form osuwiskowych od sąsiadujących z nim pasm Beskidów, pozostałe pogórza mają większą lub zbliżoną gęstość skarp osuwiskowych względem sąsiednich pasm gór.



Ryc. 7. A – *Mapa geologiczna Kotliny Sądeckiej w skali 1 : 500 000* (Marks i in., 2022); **B** – rzeźba terenu Kotliny Sądeckiej na modelu cieniowanym; **C** – lokalizacja głównych skarp osuwiskowych w Kotlinie Sądeckiej wykonana na podstawie danych LiDAR **Fig. 7.** A – *Geological map of the Sądecka Basin on a scale of 1 : 500,000* (Marks et al., 2022); **B** – landforms of the Sądecka Basin on the hillshade model; **C** – location of landslide main scarps in the Sądecka Basin based on LiDAR data

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Detekcja osuwisk może być realizowana z wykorzystaniem licznych metod obejmujących m.in. prace terenowe, teledetekcję czy analizę materiałów kartograficznych. Jednak rozwój metod wykorzystujących lotniczy skaning laserowy umożliwił szczegółową analizę dużych obszarów, w tym pokrytych wysoką roślinnością, często maskującą powierzchnię terenu. W dotychczasowych opracowaniach podnoszono zależność występowania osuwisk od budowy geologicznej poszczególnych jednostek tektonicznych czy uskoków, pomijając ujęcie regionalne czy sposób rozwinięcia grzbietów górskich. Na obszarze polskich Karpat zewnętrznych na podstawie danych z lotniczego skanowania laserowego zlokalizowano ponad 115 tys. głównych skarp osuwiskowych. Z pewnością nie jest to wynik ostateczny, gdyż procesy stokowe są aktywne i cały czas powstają nowe osuwiska. Dodatkowo przyjęta metodyka detekcji ma swoje ograniczenia, pomimo użycia różnych modeli może się zdarzyć, że niektóre osuwiska, np. stare i zapełźnięte, nie zostaną właściwie rozpoznane. Rozmieszczenie głównych skarp osuwiskowych jest zróżnicowane, a wykonana analiza wskazuje na niedocenianie roli wpływu ukształtowania terenu na ich rozwój. Największa gęstość skarp w przeliczeniu na jednostkę powierzchni mezoregionu występuje na Pogórzu



Ryc. 8. A – *Mapa geologiczna Pogórza Strzyżowskiego w skali 1 : 500 000* (Marks i in., 2022); B – rzeźba terenu Pogórza Strzyżowskiego na modelu cieniowanym; C – lokalizacja głównych skarp osuwiskowych na Pogórzu Strzyżowskim wykonana na podstawie danych LiDAR

Fig. 8. A – *Geological map of the Strzyżowskie Foothills on a scale of 1 : 500,000* (Marks et al., 2022); B – landforms of the Strzyżowskie Foothills on the hillshade model; C – location of landslide main scarps in the Strzyżowskie Foothills based on LiDAR data

Dynowskim – ponad 10 głównych skarp osuwiskowych na km² powierzchni, natomiast najniższa gęstość poniżej 1 skarpy na km², występuje w trzech mezoregionach: Kotlinie Żywieckiej, Kotlinie Jasieńsko-Krośnieńskiej i Działach Orawskich. Gęstość głównych skarp osuwiskowych w mezoregionach położonych w zachodniej części Polski jest niższa – wynosi od 1 do 5 skarp głównych na km² i rośnie w stronę wschodnią do 11 skarp głównych na km², co związane jest z innym rozwinięciem grzbietów górskich. W miejscach występowania grzbietów o układzie linearnym (Góry Sanocko-Turczańskie) zagęszczenie osuwisk jest większe niż na obszarach grzbietów rozwiniętych widlasto (Beskid Śląski) lub występowania grzbietów izolowanych (Beskid Wyspowy).

Autorzy składają podziękowania Recenzentom za cenne wskazówki, które przyczyniły się do lepszego opracowania artykułu.



Ryc. 9. Mapa gęstości głównych skarp osuwiskowych w polskich Karpatach zewnętrznych w przeliczeniu na jednostkę powierzchni poszczególnych mezoregionów

Fig. 9. Map of landslide main scarps density in the Polish Outer Carpathians per unit area of particular mesoregions

LITERATURA

BAUMGARD-KOTARBA M. 1974 – Rozwój grzbietów górskich w Karpatach fliszowych. Pr. Geogr. Inst. Geogr. PAN, 106: 1–136.

BIRKENMAJER-SZYMAKOWSKA F., JASIONOWICZ J., WÓJCIK A. 2009 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Frysztak (1003). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

BIRKENMAJER-SZYMAKOWSKA F., JASIONOWICZ J., WÓJCIK A. 2012 – Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Frysztak (1003). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

BURTAN J., NESCIERUK P., WÓJCIK A. 2001 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, arkusz Wisła (1028). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

BURTAN J., NESCIERUK P., WÓJCIK A. 2016 – Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Wisła (1028). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

BOBER L. 1984 – Rejony osuwiskowe w polskich Karpatach fliszowych i ich związek z budową geologiczną regionu. Biul. Inst.Geol., 340: 115–158.

DŁUGOSZ M. 2011 – Landslide susceptibility assessment in the different regions of the Polish Carpathians. Studia Geomorph. Carpatho-Balcan., 45: 25–46.

GĘBICA P., STARKEL L., CEBULAK E., LIMANÓWKA D., PYRC R., HAJDER M., KOLBUSZ J. 2019 – Ulewy i powodzie opadowe w województwie podkarpackim. Studium przebiegu i przeciwdziałania. Wydaw. UR, Rzeszów.

GORCZYCA E. 2004 – Przekształcanie stoków fliszowych przez ruchy masowe podczas katastrofalnych opadów (dorzecze Łososiny). Wydaw. UJ.

HENKIEL A. 1977–1978 – Rzeźba strukturalna Karpat fliszowych. Annales UMCS, Sec. B, 32–33: 37–88.

JAKUBOWSKI K. 1965 – Wpływ pokrycia roślinnego oraz opadów atmosferycznych na powstawanie osuwisk zwietrzelinowych. Prz. Geol., 9: 395–399.

JAKUBOWSKI K. 1966 – Procesy spełzywania zwietrzeliny zboczowej na obszarze wschodniego Podhala. Pr. Muzeum Ziem, 9: 297–314.

JANKOWSKI L. 2015 – Nowe spojrzenie na budowę geologiczną Karpat – ujęcie dyskusyjne. Pr. Nauk. INiG-PIB, 202: 1–154. JANKOWSKI L., MARGIELEWSKI W. 2014 – Strukturalne uwarunkowania rozwoju rzeźby Karpat zewnętrznych – nowe spojrzenie. Prz. Geol., 62 (1): 29–35.

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.

KARWACKI K. 2016 – Zastosowanie modeli fotogrametrycznych w badaniach osuwiska w Lachowicach (Karpaty Zachodnie, Beskid Makowski). Biul. Państw. Inst. Geol., 466: 115–122.

KARWACKI K. 2019 – Zastosowanie bezzałogowego statku latającego (UAV) w monitoringu powierzchniowym ruchów masowych na przykładzie osuwiska w Kasince Małej (Beskid Wyspowy, Zewnętrzne Karpaty Zachodnie). Prz. Geol., 67 (5): 339–350.

KLECZKOWSKI A. 1955 – Osuwiska i zjawiska pokrewne. Wydaw. Geol., Warszawa.

KLIMASZEWSKI M. 1946 – Podział morfologiczny południowej Polski. Czas. Geogr., 17: 133–182.

KOKALJ ž., HESSE R. 2017 – Airborne laser scanning raster data visualization. A Guide to Good Practice. Založba ZRC, Ljubljana.

KOKALJ ž., SOMRAK, M. 2019 – Why Not a Single Image? Combining Visualizations to Facilitate Fieldwork and On-Screen Mapping. Remote Sens., 11: 1–26.

KONDRACKI J. 2009 – Geografia regionalna Polski. Wydaw. Nauk. PWN, Warszawa: 314–371.

KOTARBA A. 1986 – Rola osuwisk w modelowaniu rzeźby beskidzkiej i pogórskiej. Prz. Geogr., 58: 119–129.

MALATA T., JANKOWSKI L., ŻYTKO K. 2006 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Lutowiska (1066). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

MALATA T., JANKOWSKI L., ŻYTKO K. 2014a – Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Lutowiska (1066). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

MALATA T., MARCINIEC P., STARKEL L. 1997 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Lesko (1058). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

MALATA T., MARCINIEC P., STARKEL L. 2014b – Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Lesko (1058). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

MALATA T., ZIMNAL Z. 2009 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Strzyżów (1004). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

MALATA T., ZIMNAL Z. 2016 – Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1:50 000, ark.Strzyżów (1004). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

MARGIELEWSKI W. 2004 – Typy przemieszczeń grawitacyjnych mas skalnych w obrębie form osuwiskowych polskich Karpat fliszowych. Prz. Geol., 52 (7): 503–614.

MARGIELEWSKI W. 2009 – Problematyka osuwisk strukturalnych w Karpatach fliszowych w świetle zunifikowanych kryteriów klasyfikacji ruchów masowych – przegląd krytyczny. Prz. Geol., 57 (10): 905–917.

MARKS L. (red.), GAŁĄZKA D., HABRYN R., KOPCIOWSKI R., KRAMARSKA R., MĄRDY S., POCHOCKA-SZWARC K., PRZY-BYLSKI B., SZARAFIN T., ŻARSKI M. 2022 – Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 500 000, A – mapa powierzchni terenu. MKIŚ, Warszawa.

NESCIERUK P., WÓJCIK A. 2001 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Skoczów (1011). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

NESCIERUK P., WÓJCIK A. 2012 – Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Skoczów (1011). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

OSTAFICZUK S. 2019 – Atlas i klucz interpretacyjny numerycznych obrazów rzeźby terenu Polski dla potrzeb geologii stosowanej i badań podstawowych. Wydaw. IGSMiE PAN, Kraków.

OSZCZYPKO N. 2006 – Late Jurassic-Miocene evolution of the Outer Carpathian fold-and-thrust belt and its foredeep basin (Western Carpathians, Poland). Geol. Quart., 50: 169–194.

OSZCZYPKÓ N., GOLONKA J., ZUCHIEWICZ W. 2002 – Osuwisko w Lachowicach (Beskidy Zachodnie): skutki powodzi z 2001 r. Prz. Geol., 50 (10/1): 893–898.

OSZCZYPKO N., ŚLĄCZKA A., ŻYTKO K. 2008 – Regionalizacja tektoniczna Polski – Karpaty zewnętrzne i zapadlisko przedkarpackie. Prz. Geol., 56 (10): 927–935.

OSZĆZYPKÓ N., WÓJCIK A. 1989 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Nowy Sącz (1035). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

OSZCZYPKO N., WÓJCIK A. 1993 – Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Nowy Sącz (1035). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

OZIMKOWSKI W., RUBINKIEWICZ J., ŚMIGIELSKI M., KONON A. 2010 – Metodyka prac analitycznych i kartograficznych w problematyce osuwiski karpackich w Polsce. MŚ, Warszawa.

PALENZUELA J.A., MARSELLA M., NARDINOCCHI C., PÉREZ J.L., FERNÁNDEZ T., CHACÓN J., IRIGARAY C. 2015 – Landslide detection and inventory by integrating LiDAR data in a GIS environment. Landslides, 12: 1035–1050.

PAWŁUSZEK K., MARCZAK S., BORKOWSKI A., TAROLLI P. 2019 – Multi-Aspect Analysis of Object Oriented Landslide Detection Based on an Extended Set of LiDAR-Derived Terrain Features. ISPRS Int. J. Geo-Inf., 8: 321.

PELLICANI R., ARGENTIERO I., MANZARI P., SPILOTRO G., MARZO C., ERMINI R., APOLLONIO C. 2029 – UAV and Airborne LiDAR Data for Interpreting Kinematic Evolution of Landslide Movements: The Case Study of the Montescaglioso Landslide (Southern Italy). Geosciences, 9: 1–18.

PERSKI Z., NESCIERUK P., WOJCIECHOWSKI T. 2019 – Zagrożenia osuwiskowe dla sztucznych zbiorników wodnych w Karpatach. Prz. Geol., 67 (5): 332–338.

PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T. 2015 – Monitorowanie ruchów masowych (osuwiska, spływy, zerwy). [W:] Wężyk P. (red.), Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR. GUGiK, Warszawa: 168–172.

PETLEY D.N. 2012 – Global patterns of loss of life from landslides. Geology, 40: 927–930.

PIRASTEH S., LI J. 2018 – Developing an algorithm for automated geometric analysis and classification of landslides incorporating LiDAR-derived DEM. Environ. Earth Sci., 77: 1–15.

STARKEL L. 1960 – Rozwój rzeźby Karpat fliszowych w holocenie. Pr. Geogr. Inst. Geogr. PAN, 22: 1–239.

STARKEL L. 1972 – Charakterystyka rzeźby polskich Karpat i jej znaczenie dla gospodarki ludzkiej. Probl. Zagosp. Ziem Górskich, 10: 75–150.

SOLON J., BORZYSZKOWSKI J., BIDŁASIK M., RICHLING A., BADORA K., BALON J., BRZEZIŃSKA-WÓJCIK T., CHABUDZIŃ-SKI Ł., DOBROWOLSKI R., GRZEGORCZYK I., JODŁOWSKI M., KISTOWSKI M., KOT R., KRĄŻ P., LECHNIO J., MACIAS A., MAJ-CHROWSKA A., MALINOWSKA E., MIGOŃ P., MYGA-PIĄTEK U., NITA J., PAPIŃSKA E., RODZIK J., STRZYŻ E., TERPIŁOWSKI S., ZIAJA W. 2018 – Physico-geographical mesoregions of Poland: verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data. Geograph. Pol., 91: 143–170.

ŚWIĘCHOWICZ J., MARGIELEWSKI W., STARKEL L., ŁAJCZAK A., PIETRZAK M., KRZEMIEŃ K., GORCZYCA E., BUCAŁA-HRABIA A. 2021 – Współczesna ewolucja rzeźby Karpat Zewnętrznych i Podhala. [W:] Kostrzewski A., Krzemień K., Migoń P., Starkel L., Winowski M., Zwoliński Z. (red..), Współczesne przemiany rzeźby Polski. Bogucki Wydaw. Nauk., Poznań: 97–222.

TYSZKOWSKI S. 2008 – Badania rozwoju osuwisk w rejonie Świecia, na podstawie materiałów fotogrametrycznych. Landform Analys., 9: 385–389.

VAN DEN EECKHAUT M., KERLE M., HERVÁS J., SUPPER R. 2013 – Mapping of landslides under dense vegetation cover using object-oriented analysis and LiDAR derivatives. [W:] Margottini C., Canuti,P., Sassa K. (red.), Landslide Science and Practice. Springer, Berlin, Heidelberg: 103–109.

WÓDKA M. 2019 – Związek morfologii wybranych osuwisk z budową geologiczną Karpat i zapadliska przedkarpackiego w świetle analiz numerycznego modelu terenu. Prz. Geol., 67 (2): 115–122.

WÓDKA M. 2022 – Conditions of landslide development during the last decade in the Rożnów Dam-Lake region (Southern Poland) based on Airborne Laser Scanning (ALS) data analysis. Geol. Quart., 66 (1): 4.

WÓJCIK A., KOS J., JURCZAK S. 2017 – Rozpoznanie i próby zabezpieczenia osuwiska w Kurowie (Pogórze Rożnowskie, Karpaty Zewnętrzne). Prz. Geol., 65 (9): 576–585.

WÓJCÍK A., WOJCIECHÓWSKI T., WÓDKA M., KACZOROWSKI J., KAMIENIARZ S., SIKORA R., KUŁAK M., KARWACKI K., WARMUZ B., PERSKI Z. 2020 – Rozwój badań osuwisk w Państwowym Instytucie Geologicznym. Prz. Geol., 68 (5): 356–363.

ZÁKŠEK K., OŠTIR K., KOKALJ ž. – Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique. Remote Sens., 3: 398–415.

ZUCHIEWICZ W. 2010 – Neotektonika Karpat polskich i zapadliska przedkarpackiego. Wydaw. AGH, Kraków.

ZUCHIEWICZ W. 2011. Planation surfaces in the Polish Carpathians: myth or reality? Geograph. Pol., 84 (2): 155–178.

ZÚMPANO V., PISĂNO L., MALEK ž., MICU M., AUCELLI P.C. ROSSKOPF C.M., BALTEANU D., PARISE M. 2018 – Economic Losses for Rural Land Value Due to Landslides. Front. Earth Sci., 6, 97.

ŻYTKO K., MALATA T., ZIMNAL Z. 1995 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Ustrzyki Dolne (1059). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

ŻYTKO K., ZIMNAL Z. 1997 – Objaśnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000, ark. Ustrzyki Dolne (1059). Państw. Inst. Geol., Warszawa.

Praca wpłynęła do redakcji 23.06.2024 r. Akceptowano do druku 15.12.2024 r.