



## Szorstkość pokrycia terenu jako źródło błędu metody SfM zastosowanej do rekonstrukcji zasięgu pokrywy śnieżnej

### *Terrain roughness as a source of error with the SfM method applied to the reconstruction of snow cover extent*

Damian Szafert<sup>1</sup>  Bartłomiej Miziński<sup>1,2</sup>  Tomasz Niedzielski<sup>1,2</sup> 

<sup>1</sup>Uniwersytet Wrocławski

Wydział Nauk o Ziemi i Kształtowania Środowiska

pl. Uniwersytecki 1, 50-137 Wrocław

<sup>2</sup>SARUAV sp. z o.o.

pl. Uniwersytecki 1, 50-137 Wrocław

[damian.szafert@uwr.edu.pl](mailto:damian.szafert@uwr.edu.pl) • [bartlomiej.mizinski@saruav.pl](mailto:bartlomiej.mizinski@saruav.pl) • [tomasz.niedzielski@uwr.edu.pl](mailto:tomasz.niedzielski@uwr.edu.pl)

**Zarys treści.** Artykuł ma na celu zbadanie związku pomiędzy błędami rekonstrukcji zasięgu pokrywy śnieżnej wyznaczanego na podstawie grubości pokrywy śnieżnej estymowanej metodą *Structure-from-Motion* (SfM) a szorstkością pokrycia terenu. Jako miarę szorstkości wykorzystano *Terrain Roughness Index* (TRI). Prace kameralne przeprowadzono z wykorzystaniem rastrowych map grubości pokrywy śnieżnej, opracowanych autorską metodą estymacji, bazującą na przetwarzaniu zdjęć lotniczych wykonanych przez bezzałogowy statek powietrzny metodą SfM oraz na georeferencji do drzew. Mapy pochodzą z trzech pól badawczych zlokalizowanych na obszarze Gór Izerskich oraz Pogórza Izerskiego, dla których dostępne są niskopułapowe zobrażenia lotnicze wykonane niskobudżetową kamerą w zakresie światła widzialnego (380–750 nm) zamontowaną na bezzałogowym statku powietrznym. Zaobserwowano, że w badanym obszarze skuteczność estymacji grubości pokrywy śnieżnej z wykorzystaniem metody SfM na terenach o wyższej szorstkości jest mniejsza niż na obszarach bez przeszkód terenowych.

**Słowa kluczowe:** zasięg pokrywy śnieżnej, Góry Izerskie, *Structure-from-Motion*, szorstkość pokrycia terenu, bezzałogowy statek powietrzny, geoinformatyka.

**Keywords:** *extent of snow cover, Izerskie Mountains, Structure-from-Motion, roughness of land cover, unmanned aerial vehicle, geoinformatics.*

## Wstęp

Postępująca cyfryzacja i automatyzacja procesów przetwarzania danych przestrzennych pozwala na uzyskanie informacji o terenie w sposób szybki i przy stosunkowo niskich nakładach pieniężnych. Obecnie coraz szerzej dostępne są bezzałogowe statki powietrzne, umożliwiające wykonywanie zobrażeń lotniczych z niskiego pułapu, które standardowo są opracowywane z wykorzystaniem metod fotogrametrycznych, takich jak *Structure-from-Motion* (SfM). Metoda ta ma szerokie zastosowania w badaniach środowiska przyrodniczego, czego przykładem są: pomiary osuwisk (Lucieer i inni, 2014), monitoring wybrzeża morskiego (Maguire, 2014; Warrick i inni, 2016), obserwacje erozyjnej i aku-

mulacyjnej działalności rzek (Langhammer i inni, 2015; Miřijovský i inni, 2015; Woodget i inni, 2015), analizy hydrometryczne i hydrologiczne (Langhammer i inni, 2017; Niedzielski i inni, 2016) czy ocena skutków działalności lodowców (Baltšavias i inni, 2001; Keuttling i Thomas, 2006).

W ostatnim czasie powstaje coraz więcej prac poświęconych użyciu metody SfM w badaniach pokrywy śnieżnej (De Michele i inni, 2015; Nolan i inni, 2015; Vander Jagt i inni, 2015; Bühler i inni, 2016; Miziński i Niedzielski, 2017; Adams i inni, 2018; Niedzielski i inni, 2018). Polega ona na przetwarzaniu zdjęć lotniczych wykonanych przez bezzałogowe statki powietrzne (UAV – *unmanned aerial vehicles*) kilkoma algorytmami analizy obrazu (Westoby i inni, 2012), czego efektem jest gęsta chmura punktów, a w dalszej kolejności numeryczny model pokrycia terenu i ortofotomapa. Grubość pokrywy śnieżnej otrzymywana jest jako różnica tak przygotowanego numerycznego modelu pokrycia terenu z uwzględnieniem pokrywy śnieżnej i modelu tego samego obszaru bez śniegu.

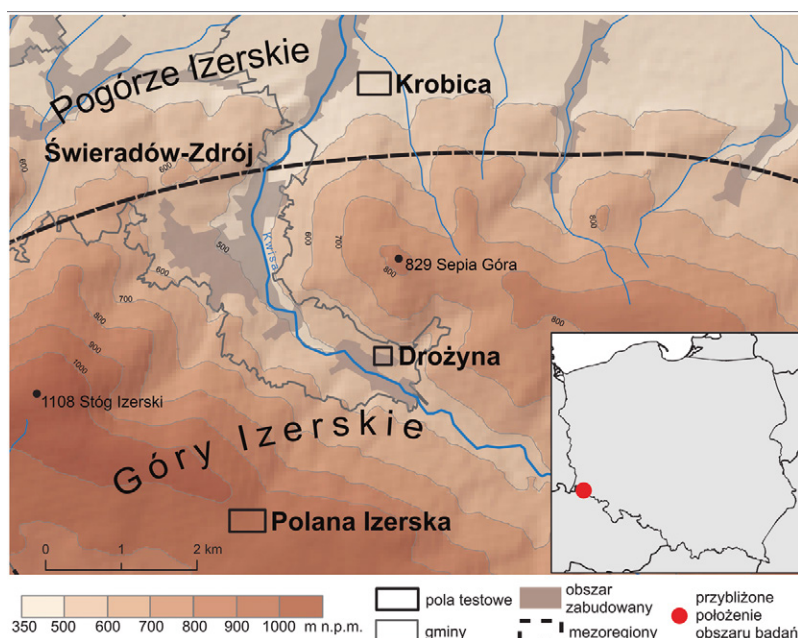
Są to metody nowe i często niedoskonałe, które generują ciągle znaczące błędy estymacji przestrzennych charakterystyk opisujących pokrywę śnieżną. Mimo iż użycie metod fotogrametrycznych do rekonstrukcji obiektów 3D ma już ugruntowaną pozycję, to pomiar grubości pokrywy śnieżnej ma na tyle złożoną specyfikę, że powoduje występowanie szeregu problemów i błędów. Zniekształcenia obrazu powstają głównie za sprawą trudnych warunków orograficznych i atmosferycznych oraz fizycznych cech śniegu. Problemy te związane są głównie z niskim kontrastem powierzchni pokrywy śnieżnej i jej niejednorodnością (Harder i inni, 2016), co jest trudne do wyeliminowania ze względu na charakter pokrywy śnieżnej. Pewną poprawę i częściowe rozwiązanie problemu uzyskuje się poprzez wcześniejsze zaplanowanie lotów na obszarze niepokrytym roślinnością, przy słońcu znajdującym się wysoko nad horyzontem (skrócenie cieni), oraz przy braku zachmurzenia i prędkości wiatru nieprzekraczającej 10 m/s, co zapewnia stabilność lotu UAV. Zaobserwowano też niekorzystny wpływ obecności topniejącego śniegu o miąższości 10–30 cm na rekonstrukcję grubości pokrywy śnieżnej z wykorzystaniem UAV i metody SfM (Harder i inni, 2016). Niska dokładność pomiarów pokrywy śnieżnej metodą SfM wynika również z mało precyzyjnej rejestracji obrazów (Miziński i Niedzielski, 2017). Rozwiązanie tego problemu polega na użyciu fotopunktów (Harder i inni, 2016), dokładnych systemów pozycjonowania w czasie lotu wykorzystujących metodę RTK (*real-time kinematic*) (Vander Jagt i inni, 2015), czy georeferencji do drzew (Miziński i Niedzielski, 2017). Dodatkowo zwraca się uwagę na konieczność wykonania korekcji soczewki kamery rejestrującej obraz (James i Robson, 2014).

Pomimo stosowania powyższych zaleceń błędy w rekonstrukcji grubości pokrywy śnieżnej z użyciem metody SfM występują nadal i nie są małe. Możliwą poprawę wyników upatruje się w zrozumieniu wpływu ukształtowania terenu na skuteczność rekonstrukcji grubości pokrywy śnieżnej. Temat ten nie był dotychczas podejmowany w pracach raportujących zastosowania UAV i SfM do wyznaczania charakterystyk pokrywy śnieżnej. Celem tej pracy jest zbadanie związku pomiędzy błędami rekonstrukcji zasięgu pokrywy śnieżnej wyznaczonego na podstawie grubości pokrywy śnieżnej (zasięg pokrywy śnieżnej wyznaczany jako obszar, dla którego jej grubość bazująca na zastosowaniu SfM na zobrazowaniach z UAV jest większa od zera) a szorstkością pokrycia terenu. Weryfikowana będzie hipoteza badawcza, która zakłada, że rekonstrukcja wysokości pokrywy śnieżnej z użyciem metody SfM na obszarach otwartych Gór Izerskich i Pogórza Izerskiego daje lepsze rezultaty niż na powierzchniach z licznymi przeszkodami terenowymi w postaci drzew i zabudowy.

## Obszar badań i dane

Obszar badań obejmował trzy pola badawcze: Drożyna, Krobica i Polana Izerska. Pod względem administracyjnym znajdowały się one na obszarze województwa dolnośląskiego. Drożyna zlokalizowana jest w powiecie lubańskim, w gminie miejskiej Świeradów-Zdrój, natomiast dwa pozostałe w powiecie lwóweckim, w gminie Mirsk (ryc. 1). Biorąc pod uwagę położenie fizycznogeograficzne, Drożyna i Polana Izerska znajdują się w Górach Izerskich, które są mezoregionem należącym do Sudetów Zachodnich z najwyższym punktem na Wysokiej Kopie (1126 m n.p.m.). Krobica zaliczana jest natomiast do obszaru Pogórza Izerskiego (Kondracki, 2000). Najwyższym polem badawczym jest Polana Izerska, ze średnią wysokością 967 m n.p.m., natomiast Krobica i Drożyna położone są odpowiednio na wysokościach około 443 m n.p.m. i 523 m n.p.m. Deniwelacja w obrębie wyżej wymienionych stanowisk waha się w przedziale 30–40 m. Pod względem pokrycia terenu Krobica (ryc. 2A) jest w głównej mierze obszarem zagospodarowanym rolniczo, dodatkowo pokrytym kępami drzew. Drożyna (ryc. 2B) jest najbardziej przekształconym antropogenicznie obszarem spośród wszystkich badanych pól testowych. Polana Izerska (ryc. 2C) jest łąką śródgórską otoczoną lasem, powstała w XVIII w. w efekcie wykarczowania lasu na potrzeby założenia niewielkiej osady.

Analizy przeprowadzone zostały na zdjęciach lotniczych wykonanych kamerą Canon S110 RGB, która pozwoliła na rejestrację obrazów w zakresie światła widzialnego

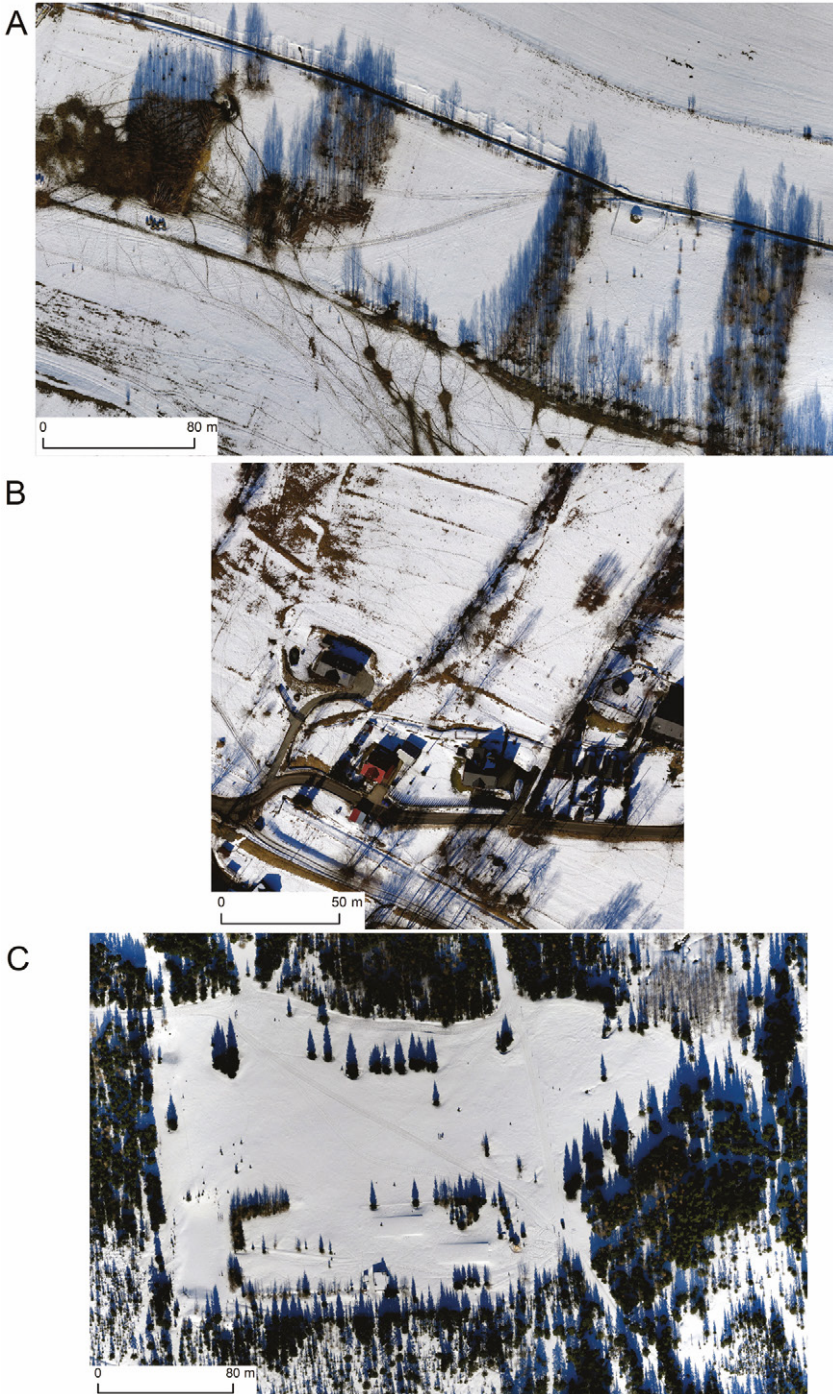


**Ryc. 1.** Położenie obszaru badań

*Location of the study area*

Opracowanie własne na podstawie baz danych OSM i SRTM.

*Authors' own elaboration based on the SRTM and OSM databases.*



**Ryc. 2.** Ortofotomapy: A – Krobica, B – Drożyna, C – Polana Izerska  
*Orthophoto: A – Krobica, B – Drożyna, C – Polana Izerska*

(380–750 nm) z rozdzielczością 5,3 cm/px. Naloty wykonano z użyciem bezzałogowego statku powietrznego (UAV) eBee, którego producentem jest firma SenseFly. Zdjęcia wykonano 15.02.2017 r. dla Drożyny i Polany Izerskiej, natomiast dla Krobicy zobrazowanie pozyskano 16.02.2017 r. Na podstawie zgromadzonych zdjęć lotniczych oraz stosując metodę B. Mizińskiego i T. Niedzielskiego (2017), bazującą na przetwarzaniu gęstych chmur punktów algorytmami SfM i ICP (*iterative closest point*), zrekonstruowano trójwymiarowy model terenu pokrytego zalegającym śniegiem (Niedzielski i inni, 2019). Uprzednio tę samą procedurę dla tych samych obszarów wykonano w okresie, gdy teren ten nie był pokryty śniegiem. Warstwa grubości pokrywy śnieżnej była różnicą dwóch numerycznych modeli pokrycia terenu. Zasięg pokrywy śnieżnej wyznaczony został na podstawie ortofotomap, które powstały ze zbioru zdjęć lotniczych wykonanych 15–16.02.2017. Pozyskane warstwy grubości pokrywy śnieżnej posiadały rozdzielczość 1 m, co dało odpowiednio: Krobica – 426x240 px, Drożyna – 201x201 px, Polana Izerska – 425x276 px.

## Metody

Numeryczne mapy grubości pokrywy śnieżnej zostały opracowane z użyciem metody SfM. Jest to stosunkowo nowa metoda, należąca do grupy metod fotogrametrycznych. Powstała w latach dziewięćdziesiątych XX w. Przez SfM rozumie się zbiór połączonych ze sobą algorytmów, których celem jest utworzenie trójwymiarowego numerycznego modelu powierzchni terenu, na podstawie zbioru zdjęć danego obiektu lub grupy obiektów, wykonanych pod różnym kątem. Metoda ta w pierwszym kroku opiera się na automatycznej detekcji punktów charakterystycznych oraz na tworzeniu ich deskryptorów na poszczególnych zdjęciach lotniczych. Algorytm analizuje zdjęcia pod kątem wyznaczania punktów znajdujących się na więcej niż jednym zdjęciu i lokalizuje je w przestrzeni trójwymiarowej, tworząc tzw. rzadką chmurę punktów. W kolejnym kroku realizowane jest zagęszczenie tej chmury, która jest niezbędna do wygenerowania numerycznego modelu pokrycia terenu (Westoby i inni, 2012). Rastrowe mapy grubości pokrywy śnieżnej otrzymano bez użycia fotopunktów i techniki RTK, wykorzystując metodę B. Mizińskiego i T. Niedzielskiego (2017), która bazuje na SfM i ICP, realizując referencję przestrzenną poprzez dowiązanie do automatycznie wykrytych drzew. Przestrzenny rozkład punktów służących do walidacji wraz z pomiarami wysokości pokrywy śnieżnej na tle wartości rekonstruowanych został przedstawiony w pracy T. Niedzielskiego i innych (2019). Zasięg pokrywy śnieżnej wyznaczono na bazie jej grubości jako obszar, w którym estymowana grubość zalegania śniegu przekraczała wartość 0. Po wykonaniu reklasyfikacji wartość 1 przypisano obszarom pokrytym śniegiem i 0 pikselom bez pokrywy śnieżnej.

Za dane referencyjne przyjęta została warstwa zasięgu pokrywy śnieżnej wygenerowana na podstawie tych samych obrazów, co w przypadku warstw grubości pokrywy śnieżnej. Są to dane o charakterze binarnym. Wygenerowane zostały za pomocą nienadzorowanej klasyfikacji ISO, która jest zaimplementowana w oprogramowaniu ArcGIS firmy ESRI (2012). Składowymi powyższej metody jest klasyfikacja ISODATA oraz metoda największego prawdopodobieństwa. Metoda ISODATA jest algorytmem iteracyjnym. Polega na przypisywaniu w każdej iteracji punktów do najbliższych centrów klas, po czym wyznaczane jest nowe centrum. Klastry o bardzo małej liczbie punktów są usuwane, duże klastry są dzielone na mniejsze, natomiast małe łączone w większe (Memarsadeghi

i inni, 2005). Drugim rodzajem algorytmu stosowanym w klasyfikacji ISO jest metoda największego prawdopodobieństwa. Polega ona na wyznaczeniu dla każdej komórki rastra prawdopodobieństwa przynależenia do danej klasy, zgodnie z rozkładem normalnym. Dla każdego wyznaczonego przedziału wyliczany jest średni wektor oraz macierz wariancyjno-kowariancyjna. Względem wyznaczonych statystyk piksele są klasyfikowane zgodnie z prawdopodobieństwem przynależności do klasy (Bolstad i Lillesand, 1991).

Zasięgi pokrywy śnieżnej wyznaczono dwoma niezależnymi metodami: (1) na bazie map wysokości pokrywy śnieżnej opartych na SfM, (2) na bazie metody ISO. W pierwszym etapie przetwarzania danych należało obliczyć błąd szacowania zasięgu pokrywy śnieżnej metodą SfM. Zarówno warstwa zasięgu wyznaczanego metodą ISO, jak i warstwa zasięgu pokrywy śnieżnej bazująca na jej grubości obliczonej algorytmem SfM, poddane zostały dodatkowemu przetworzeniu wstępnemu, polegającemu na usunięciu pojedynczych pikseli, które w swoim sąsiedztwie otoczone były przez co najmniej 5 pikseli o innej wartości niż one same. Powyższy proces miał na celu usunięcie szumu, będącego błędnie zaklasyfikowanymi pikselami lub posiadającymi zbyt małą powierzchnię. Ujednolicone rastry zostały porównane, stosując różnicę zasięgu pokrywy śnieżnej (dane referencyjne bazujące na metodzie ISO) i zasięgu otrzymanego poprzez reklasyfikację warstwy grubości śniegu (w oparciu o SfM). Możliwe kombinacje wartości pikseli w nowo utworzonej warstwie oraz ich interpretację przedstawiono w tabeli 1. W kolejnym kroku warstwę różnicy podzielono na równe bloki o wymiarach 20 x 20 m, co dawało blok rastra o wymiarach 21x21 pikseli (441 pikseli w bloku). Pozwoliło to na obliczenie udziału błędnie zrekonstruowanych pikseli względem ogólnej liczby pikseli. Ustalenie wielkości bloku na 20 m było uzależnione od wielkości pól badawczych (należało zebrać odpowiednio dużą liczbę obserwacji). Bloki nie mogły być zbyt duże, aby statystyki dla każdego z nich były reprezentatywne.

Odsetek błędnych pikseli został porównany z szorstkością terenu. Większa wartość szorstkości terenu jest utożsamiana z większą liczbą przeszkód terenowych w danym bloku. Spośród dostępnych metod wyznaczania szorstkości terenu wybrano TRI (*terrain ruggedness index*) według formuły S.J. Rileya. Jest to różnica pomiędzy maksymalną a minimalną wysokością terenu z 8 sąsiednich komórek otaczających aktualnie rozpatrywany piksel (Riley i inni, 1999). Indeks szorstkości obliczony został na podstawie numerycznego modelu pokrycia terenu o rozdzielczości 1 m. Analizowane pola badawcze w większości były płaskie, jednak występowały na nich obszary, które według klasyfikacji zaproponowanej przez S.J. Rileya i innych (1999) można zaklasyfikować jako średnio szorstkie (117–161 m). Były to głównie drzewa i skupiska drzew oraz obiekty pochodzenia antropogenicznego, takie

**Tabela 1.** Możliwe kombinacje wartości dla warstwy oraz ich interpretacja (SE – zasięg pokrywy śnieżnej warstwy referencyjnej, SE-SD – modelowany zasięg pokrywy śnieżnej otrzymany przez reklasyfikację warstwy grubości pokrywy śnieżnej)  
Possible combinations of values for a difference layer and their interpretation (SE – extent of snow cover in the reference layer, SE-SD – modelled extent of snow cover determined through the reclassification of thickness of the layer of snow)

Warstwa SE	Warstwa SE-SD	Różnica	Interpretacja
0	0	0	klasyfikacja poprawna
0	1	-1	klasyfikacja niepoprawna (błąd dodatni)
1	0	1	klasyfikacja niepoprawna (błąd ujemny)
1	1	0	klasyfikacja poprawna

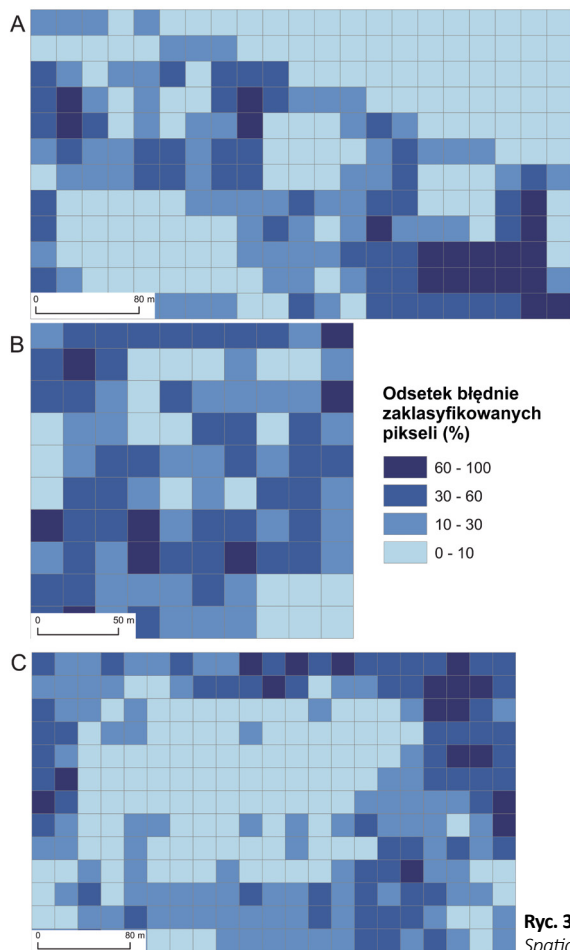
jak zabudowa. Mimo że według klasyfikacji nieanalizowane pola badawcze nie charakteryzowały się wysoką szerstkością, to biorąc pod uwagę ich wymiary, występujące na nich obiekty są istotnymi przeszkodami terenowymi.

## Wyniki

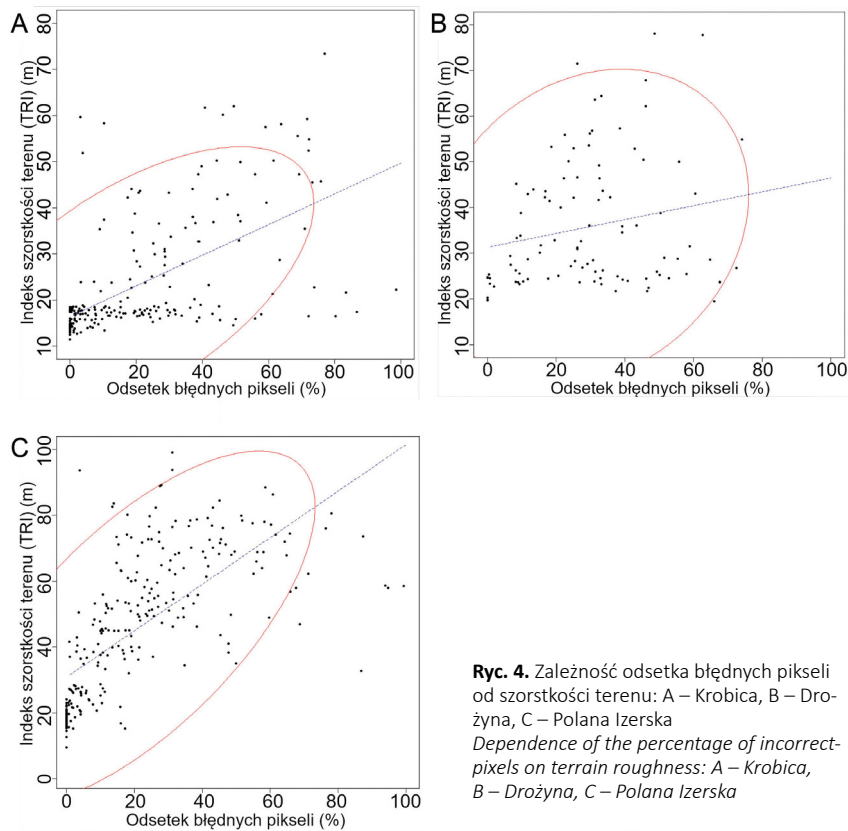
Analizując rozkład przestrzenny procentowego udziału liczby błędnie zaklasyfikowanych pikseli przez metodę SfM (grubość pokrywy śnieżnej równa bądź mniejsza 0) (ryc. 3) zauważono, że pola o wysokich wartościach i niskich błędach tworzą zbiorowiska. Porównując mapy rozkładu błędów oraz ortofotomapy stwierdzono silną zależność. Bloki o wysokich wartościach pokrywały się z występowaniem przeszkód terenowych, natomiast odwrotna sytuacja miała miejsce w przypadku niskich wartości błędów – w tym przypadku były to obszary otwarte np. pól lub łąk.

Występowanie przeszkód terenowych zostało wyrażone liczbowo poprzez zastosowanie indeksu szerstkości terenu TRI. Na podstawie wykresów rozrzutu (ryc. 4) można zauważyć liniowy związek pomiędzy indeksem szerstkości a błędem wykrycia zasięgu pokrywy śnieżnej. Najsilniejsza zależność dodatnia miała miejsce dla pola testowego na Polanie Izerskiej, natomiast najslabiej zaznaczona była na obszarze pola testowego Drożyna. Współczynnik korelacji wskazywał na istotną statystycznie ( $\alpha=0,05$ ) i umiarkowaną korelację w przypadku Polany Izerskiej i Krobicy, odpowiednio 0,68 i 0,60. O ile w przypadku Polany Izerskiej i Krobicy zależność błędów od szerstkości terenu była zauważalna, tak w przypadku Drożyny współczynnik korelacji odnotowany został na poziomie 0,20 z zachowaniem istotności statystycznej. Zauważono obserwacje odbiegające od ogólnej zależności dodatniej. Były to punkty znajdujące się w przedziale: (1) dla Krobicy powyżej 40% błędów i poniżej 30 m indeksu szerstkości oraz (2) dla Drożyny powyżej 30% błędów i poniżej 30 m szerstkości terenu. Pomimo niskiej szerstkości terenu odnotowano wysoki błąd. Część z tych punktów była obserwacjami odstającymi, których położenie na wykresie związane jest z kumulacją wpływu różnych czynników na wynik rekonstrukcji zasięgu pokrywy śnieżnej na bazie jej grubości, takich jak błąd rejestracji obrazu przez kamerę czy oświetlenie utrudniające interpretację obrazu przez metodę SfM. Jednak patrząc na ich przestrzenne rozmieszczenie (ryc. 5), zauważyć można pewne zależności. W przypadku pola testowego Drożyna część odstających bloków znajdowała się na obszarze odśnieżonej drogi oraz na terenie silnie urozmaiconym (wykazującym dużą zmienność) pod względem pokrycia śniegiem (topniejący śnieg). Dodatkowo był to obszar o niskiej grubości pokrywy śnieżnej, co znacznie utrudnia poprawne przeprowadzenie rekonstrukcji metodą SfM (Harder i inni, 2016). Zaobserwowano również odstępstwa od normy na polach zacienionych, co najlepiej widoczne jest na polu Krobica. Wysoki odsetek błędów występuje zdecydowanie rzadziej na terenie o niskiej szerstkości, natomiast większe prawdopodobieństwo wystąpienia błędów odnotowuje się na obszarze o wysokiej szerstkości, o czym świadczą odstające bloki na obszarze Polany Izerskiej. Algorytm B. Mizińskiego i T. Niedzielskiego (2017) nie pozwolił na poprawną rekonstrukcję grubości pokrywy śnieżnej na obszarze drogi, co wpływa na spadek korelacji pomiędzy uzyskanym błędem a szerstkością terenu.

Po zastosowaniu elipsy obszaru ufności, o założonym progu ufności na poziomie 95%, odrzucono obserwacje odstające. W przypadku dwóch pól testowych dało to zauważalną poprawę wyników. Dla Polany Izerskiej współczynnik korelacji wzrósł do 0,8, natomiast

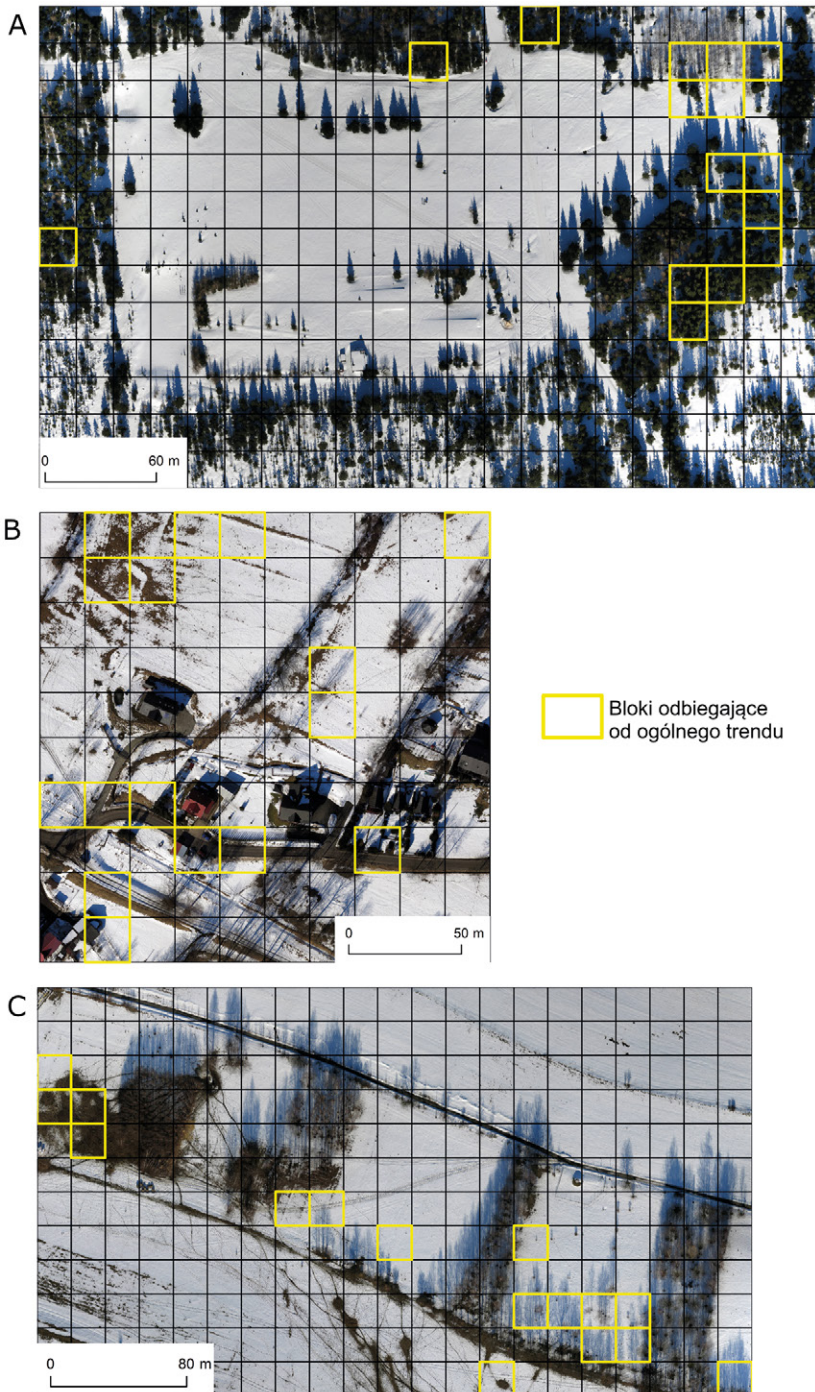


**Ryc. 3.** Rozkład przestrzenny odsetka błędnie zaklasyfikowanych pikseli: A – Krobica, B – Drożyna, C – Polana Izerska  
*Spatial distribution of the percentage of incorrectly classified pixels: A – Krobica, B – Drożyna, C – Polana Izerska*



**Ryc. 4.** Zależność odsetka błędnych pikseli od szorstkości terenu: A – Krobica, B – Drożyna, C – Polana Izerska  
*Dependence of the percentage of incorrect pixels on terrain roughness: A – Krobica, B – Drożyna, C – Polana Izerska*





**Ryc. 5.** Rozkład bloków odbiegających od głównego trendu: A – Polana Izerska, B – Drożyna, C – Krobica  
*Distribution of blocks deviating from the general trend: A – Polana Izerska, B – Drożyna, C – Krobica*

dla Krobicy do 0,66. W przypadku Drożyny odnotowano nieduży spadek do 0,16, jednak w tym przypadku jest to wynik nieistotny statystycznie dla poziomu istotności  $\alpha=0,05$  ( $p$ -wartość = 0,12), prawdopodobnie z powodu dużego rozproszenia wartości.

## Podsumowanie

Badania dowiodły, że wysokości pokrywy śnieżnej na wybranych obszarach otwartych Gór Izerskich i Pogórza Izerskiego, wyestymowane metodą SfM bazującą na niskopułapowych zobrazowaniach lotniczych, są dokładniejsze niż na powierzchniach terenu zawierających przeszkody terenowe (drzewa i zabudowa). Na podstawie przeprowadzonego porównania błędu rekonstrukcji zasięgu pokrywy śnieżnej wyznaczanego przy zastosowaniu grubości pokrywy śnieżnej (utożsamianej z dokładnością wykrywania obszarów niepokrytych śniegiem) ze średnią szorstkością terenu wynika, że zmienne te są zależne od siebie. Wyższe wartości korelacji odnotowano na obszarze Polany Izerskiej oraz Krobicy niż w przypadku Drożyny. Wzajemna zależność obu cech jest dobrze zauważalna po nałożeniu siatki wartości błędów dla poszczególnych bloków na ortofotomapę. Pola o wysokich wartościach błędu pokrywały się z obszarami o wysokiej szorstkości, takimi jak pojedyncze drzewa, kępy drzew lub zabudowa. Niejednoznaczne wyniki uzyskano na polu badawczym Drożyna, dla którego odnotowano zależność o słabej sile. Za obniżenie współczynnika korelacji odpowiedzialne były obserwacje, dla których pomimo niskiego współczynnika szorstkości pokrycia terenu, uzyskane błędy były wysokie. Przyczynę tego zjawiska upatruje się w specyfice rekonstruowanego obszaru. Jest on silnie przekształcony antropogenicznie. Odśnieżona nawierzchnia drogi nie została poprawnie zrekonstruowana pod względem występowania na niej śniegu, podobnie jak w przypadku obszaru, na którym pokrywa śnieżna częściowo uległa stopieniu, a więc miała niską miąższość. Podobną zależność zaobserwowano w pracy P. Hardera i innych (2016). Mimo istnienia obszernej literatury na temat estymacji wysokości pokrywy śnieżnej z użyciem metody SfM bazującej na niskopułapowych zobrazowaniach lotniczych (np. Vander Jagt i inni, 2015; Bühler i inni, 2016; Adams i inni, 2018), mało jest badań nad związkami skuteczności i dokładności tej estymacji z charakterystykami terenu, na którym zalega pokrywa śnieżna. Również najnowsze badania T. Niedzielskiego i innych (2019) wykazały niestabilność metody SfM w sąsiedztwie drzew.

---

Ryciny i tabele, pod którymi nie zamieszczono źródła, są opracowaniami własnymi autorów artykułu.

Badania były realizowane w ramach projektu nr LIDER/012/223/L-5/13/NCBR/2014 w programie Lider Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Autorzy składają podziękowania operatorom bezzałogowego statku powietrznego: Joannie Remisz, Jackowi Ślōpkowi i Waldemarowi Spallkowi.

## Piśmiennictwo

- Adams M.S., Bühler Y., Fromm R., 2018, *Multitemporal Accuracy and Precision Assessment of Unmanned Aerial System Photogrammetry for Slope-Scale Snow Depth Maps in Alpine Terrain*, *Pure and Applied Geophysics*, 175, 9, s. 3303–3324. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1748-y>.
- Baltsavias E.P., Favey E., Bauder A., Bosch H., Pateraki M., 2001, *Digital surface modelling by airborne laser scanning and digital photogrammetry for glacier monitoring*, *The Photogrammetric Record*, 17, 98, s. 243–273. <https://doi.org/10.1111/0031-868X.00182>.
- Bolstad P., Lillesand T.M., 1991, *Rapid maximum likelihood classification*, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57, 1, s. 67–74.
- Bühler Y., Adams M.S., Bösch R., Stoffel A., 2016, *Mapping snow depth in alpine terrain with unmanned aerial systems (UASs): potential and limitations*, *The Cryosphere*, 10, 3, s. 1075–1088. <https://doi.org/10.5194/tc-10-1075-2016>.
- De Michele C., Avanzi F., Passoni D., Barzaghi R., Pinto L., Dosso P., Ghezzi A., Gianatti R., Della Vedova G., 2015, *Microscale variability of snow depth using UAS technology*, *Cryosphere*, 9, 1, s. 1047–1075. <https://doi.org/10.5194/tcd-9-1047-2015>.
- ESRI, 2012, *ArcGIS: Desktop. Release 10.0*, Environmental System Research Institute, Redlands.
- Harder P., Schirmer M., Pomeroy J., Helgason W., 2016, *Accuracy of snow depth estimation in mountain and prairie environments by an unmanned aerial vehicle*, *The Cryosphere*, 10, 6, s. 2559–2571. <https://doi.org/10.5194/tc-10-2559-2016>.
- James M.R., Robson S., 2014, *Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks*, *Earth Surface Processes and Landforms*, 39, 10, s. 1413–1420. <https://doi.org/10.1002/esp.3609>.
- Keutterling A., Thomas A., 2006, *Monitoring glacier elevation and volume changes with digital photogrammetry and GIS at Gepatschferner glacier, Austria*, *International Journal of Remote Sensing*, 27, 19, s. 4371–4380. <https://doi.org/10.1080/01431160600851819>.
- Kondracki J., 2000, *Geografia regionalna Polski*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- Langhammer J., Bernsteinová J., Miřijovský J., 2017, *Building a High-Precision 2D Hydrodynamic Flood Model Using UAV Photogrammetry and Sensor Network Monitoring*, *Water*, 9, 11, 861. <https://doi.org/10.3390/w9110861>.
- Langhammer J., Hartvich F., Kliment Z., Jeníček M., Bernsteinová (Kaiglová) J., Vlček L., Su Y., Štych P., Miřijovský J., 2015, *The impact of disturbance on the dynamics of fluvial processes in mountain landscapes*, *Silva Gabreta*, 21, s. 105–116.
- Lucieer A., de Jong S.M., Turner D., 2014, *Mapping landslide displacements using Structure from Motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography*, *Progress in Physical Geography*, 38, 1, s. 97–116. <https://doi.org/10.1177/0309133313515293>.
- Maguire C., 2014, *Using Unmanned Aerial Vehicles and “Structure from Motion” Software to Monitor Coastal Erosion in Southeast Florida*, University of Miami, Miami.
- Memarasadeghi N., Mount D.M., Netanyahu N.S., Le Moigne J., 2005, *A fast implementation of the ISODATA clustering algorithm*, *International Journal of Computational Geometry & Applications*, 17, 1, s. 71–103. <https://doi.org/10.1142/S0218195907002252>.
- Miřijovský J., Šulc Michalková M., Petyniak O., Máčka Z., Trizna M., 2015, *Spatiotemporal evolution of a unique preserved meandering system in Central Europe – The Morava River near Litovel*, *Catena*, 127, s. 300–311. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.12.006>.

- Miziński B., Niedzielski T., 2017, *Fully-automated estimation of snow depth in near real time with the use of unmanned aerial vehicles without utilizing ground control points*, Cold Regions Science and Technology, 138, s. 63–72. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.03.006>.
- Niedzielski T., Spallek W., Witek-Kasprzak M., 2018, *Automated Snow Extent Mapping Based on Orthophoto Images from Unmanned Aerial Vehicles*, Pure and Applied Geophysics, 175, s. 3285–3302. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-1843-8>.
- Niedzielski T., Szymanowski M., Miziński B., Spallek W., Witek-Kasprzak M., Ślopek J., Kasprzak M., Błaś M., Sobik M., Jancewicz K., Borowicz D., Remisz J., Modzel P., Męcina K., Leszczyński L., 2019, *Estimating snow water equivalent using unmanned aerial vehicles for determining snow-melt runoff*, Journal of Hydrology, 578, 124046. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124046>.
- Niedzielski T., Witek M., Spallek W., 2016, *Observing river stages using unmanned aerial vehicles*, Hydrology and Earth System Sciences, 20, s. 3193–3205. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3193-2016>.
- Nolan M., Larsen C.F., Sturm M., 2015, *Mapping snow-depth from manned-aircraft on landscape scales at centimeter resolution using Structure-from-Motion photogrammetry*, Cryosphere Discussions, 9, s. 1445–1463. <https://doi.org/10.5194/tc-9-1445-2015>.
- Riley S.J., DeGloria S.D., Elliot R., 1999, *Index that quantifies topographic heterogeneity*, Intermountain Journal of Sciences, 5, 1–4, s. 23–27.
- Vander Jagt B., Lucieer A., Wallace L., Turner D., Durand M., 2015, *Snow depth retrieval with UAS using photogrammetric techniques*, Geosciences, 5, 3, s. 264–285. <https://doi.org/10.3390/geosciences5030264>.
- Warrick J.A., Ritchie A.C., Adelman G., Adelman K., Limber P.W., 2016, *New techniques to measure cliff change from historical oblique aerial photographs and structure-from-motion photogrammetry*, Journal of Coastal Research, 33, 1, s. 39–55. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-16-00095.1>
- Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M., 2012, *'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications*, Geomorphology, 179, s. 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.
- Woodget A.S., Carbonneau P.E., Visser F., Maddock I.P., 2015, *Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution UAS imagery and structure from motion photogrammetry*, Earth Surface Processes and Landforms, 40, s. 47–64. <https://doi.org/10.1002/esp.3613>.

## Summary

A comparison between errors associated with snow-cover reconstruction performed by processing aerial imagery acquired by a visible-light camera mounted on board unmanned aerial vehicles, on the one hand; and average terrain roughness, on the other, revealed a dependent relationship between these variables. A stronger correlation is noted for two of the studied test areas (Polana Izerska and Krobica, both located in SW Poland), as opposed to the remaining site (Drożyna, SW Poland). In particular, correlations are noticeable where the analysis is performed in moving windows. It is typical for terrain where depth of snow cover is reconstructed with severe errors to reveal a high degree of roughness caused by single trees, clumps of trees or buildings. Ambiguous results are obtained for the Drożyna research field. While the character of the dependent relationship there seems consistent with results for the remaining sites, the strength is low. The lower values for the correlation coefficient were driven by observations for which errors were found

to be high while values for the Topographic Ruggedness Index were at the same time low. This effect can be explained by reference to the specific nature of the area reconstructed, which is much transformed by human activity. It proves difficult to reconstruct the depth of snow cover on roads properly, as these are either partially cleared or snow or characterised by its loss in the course of melting. Low thickness of snow cover is thus found to be a constrained when it comes to the generation of accurate reconstructions of the depth of snow cover. This is in fact a finding in agreement with what has been reported by other authors.