

Lotnicze skanowanie laserowe (ALS) w modelowaniu rzeźby terenu – nowe możliwości i pułapki

Airborne laser scanning (ALS) in terrain modelling
– new opportunities and pitfalls

Andrzej Affek

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. Stanisława Leszczyckiego PAN
ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa
e-mail: a.affek@twarda.pan.pl

Abstract: Digital elevation models (DTM) generated using data from airborne laser scanning (ALS) systematically displace models made on the basis of aerial photographs and topographic maps. Their greatest advantage is the detail and accuracy of mapping the terrain, especially under vegetation cover. Terrain models derived from laser scanning, presenting detailed microtopographic relief in 3D are only available in Poland for few years, so the researchers dealing with forms of relief (including geomorphologists, archaeologists) are just becoming familiar with them. A new representation of reality requires new methods and interpretive skills, but it allows to solve some of the known research problems and opens the door for further questions about the nature of reality.

This article aims at presenting the specifics of this kind of models and methods of data interpretation and verification. Limitations and pitfalls arising from the applied technique are also identified. Discussion will be carried out on the example of materials acquired during flight mission over deserted villages in Polish Eastern Carpathians.

Słowa kluczowe: numeryczny model terenu (NMT), antropogeniczne formy terenu, LiDAR, Pogórze Przemyskie

Key words: digital terrain model (DTM), man-made forms of relief, LiDAR, Przemyskie Foothills

Wprowadzenie

Modele powierzchni terenu generowane na bazie danych z lotniczego skanowania laserowego (ang. Airborne Laser Scanning – ALS)¹ systematycznie wypierają modele wykonane na podstawie zdjęć lotniczych i map topograficznych. Największą ich zaletą jest szczegółowość i dokładność odwzorowania rzeźby terenu, zwłaszcza pod zwartą i wysoką

¹ Szczegółowy opis lotniczego skanowania laserowego można znaleźć w artykule Ackermanna (1999), w literaturze polskiej natomiast w podręczniku pod redakcją Wężyka (2014).

pokrywą roślinną. Modele terenu, pochodzące ze skanowania laserowego, przedstawiające detale mikroform rzeźby w 3D są w Polsce dostępne dopiero od kilku lat, więc badacze form rzeźby (m.in. geomorfolodzy, archeolodzy) dopiero się z nimi zapoznają. Nowa forma reprezentacji rzeczywistości wymaga nowych metod i umiejętności interpretacyjnych, ale pozwala na rozwiązanie niektórych znanych problemów badawczych i otwiera pole dla kolejnych pytań o naturę rzeczywistości.

Niniejszy artykuł ma na celu przybliżenie specyfiki tego rodzaju modeli oraz metod interpretacji i weryfikacji danych. Wskazane zostaną także ograniczenia i pułapki, wynikające z zastosowanych technik. Omówienie zostanie przeprowadzone na przykładzie materiałów pozyskanych w ramach projektu Narodowego Centrum Nauki nr 2012/05/N/ST10/03520 „Ukryte dziedzictwo kulturowe w krajobrazie opuszczonym przez ludność – identyfikacja i interpretacja z zastosowaniem lotniczego skanowania laserowego”.

Porównanie modeli terenu

Aby wykazać wartość dodaną modelu terenu uzyskanego na bazie chmury punktów ALS, porównano go z popularnymi i ogólnie dostępnymi modelami opartymi na znanych od dawna technologiach: fotogrametrycznej, digitalizacji poziomic i radarowej (tab. 1, ryc. 1). Model terenu (dawniej komponent NMT Bazy Danych Topograficznych TBD) opracowano metodą fotogrametryczną na podstawie zdjęć lotniczych z uwzględnieniem linii strukturalnych. Charakteryzuje się on dość wysoką precyzją na terenach otwartych, natomiast na obszarach leśnych jest znacznie bardziej zgeneralizowany. Bywa też i tak, że na obszarach o urozmaiconej rzeźbie terenu przedstawiona sekwencja grzbietów i dolin zupełnie rozmija się z danymi z ALS. Model terenu DTED poziomu 2 (Digital Terrain Elevation Data Level 2) opracowany na podstawie digitalizacji poziomic z topograficznych map wojskowych w skali 1:50 000 już zdecydowanie odbiega pod względem dokładności odwzorowania rzeźby od LiDARu i modelu fotogrametrycznego. Natomiast model terenu wykonany na bazie danych uzyskanych z pasma X podczas misji radarowej SRTM (Shuttle Radar Topography Mission X-band Synthetic Aperture Radar), mimo nominalnej dokładności pionowej równej 16 m, jest najmniej dokładny, gdyż w rzeczywistości przedstawia model pokrycia terenu, nie niwelując go do powierzchni gruntu (Keydel i in. 2000).

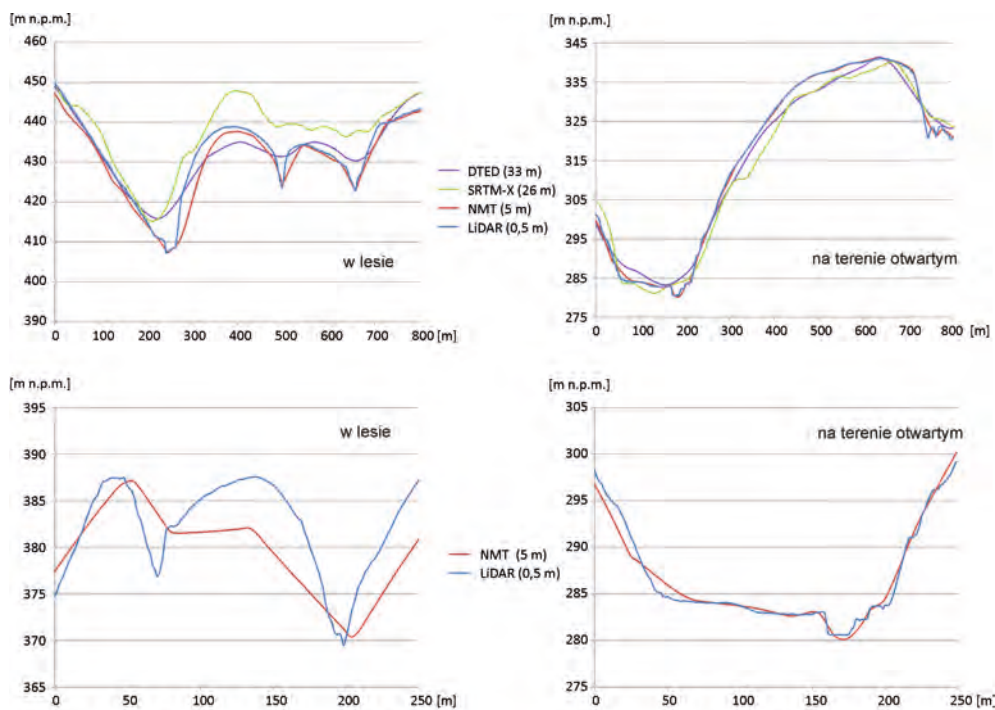
Badania na Pogórze Przemyskim

Głównym celem ww. projektu była rekonstrukcja przedwojennego krajobrazu wsi karpackiej poprzez identyfikację elementów dziedzictwa kulturowego, zapisanego w rzeźbie terenu, na obszarze wysiedlonym w latach 40. XX wieku i zalesionym wkrótce po wysiedleniach. Spodziewano się, co zresztą zostało potwierdzone w trakcie badań, że dzięki niemalże całkowitemu zaprzestaniu działalności człowieka na obszarach zalesionych wiele antropogenicznych form terenowych z metryką co najmniej przedwojenną

Tabela 1. Charakterystyka porównywanych modeli terenu.
Table 1. Characteristics of the compared terrain models.

Model terenu	Technologia pozyskania	Nominalna dokładność pionowa	Rozdzielczość rastra	Data wykonania	Dysponent
LiDAR	Lotnicze skanowanie laserowe	0,15 m	0,5 m	2013	Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN (IGiPZ PAN)
NMT	Fotogrametryczna obróbka zdjęć lotniczych w skali 1:27 777	1 m	5 m	2009	Centralny Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (CODGiK)
SRTM X-SAR	Interferometria radarowa	16 m	26 m	2000	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)
DTED Poziom 2	Digitalizacja poziomic z map topograficznych 1:50 000	20 m	1999	Zarząd Geografii Wojskowej (ZGW)	

Źródło: metryki dołączone do danych; Keydel i in. (2000), Gotlib, Olszewski (2006).
Source: metadata, Keydel et al. (2000), Gotlib, Olszewski (2006).

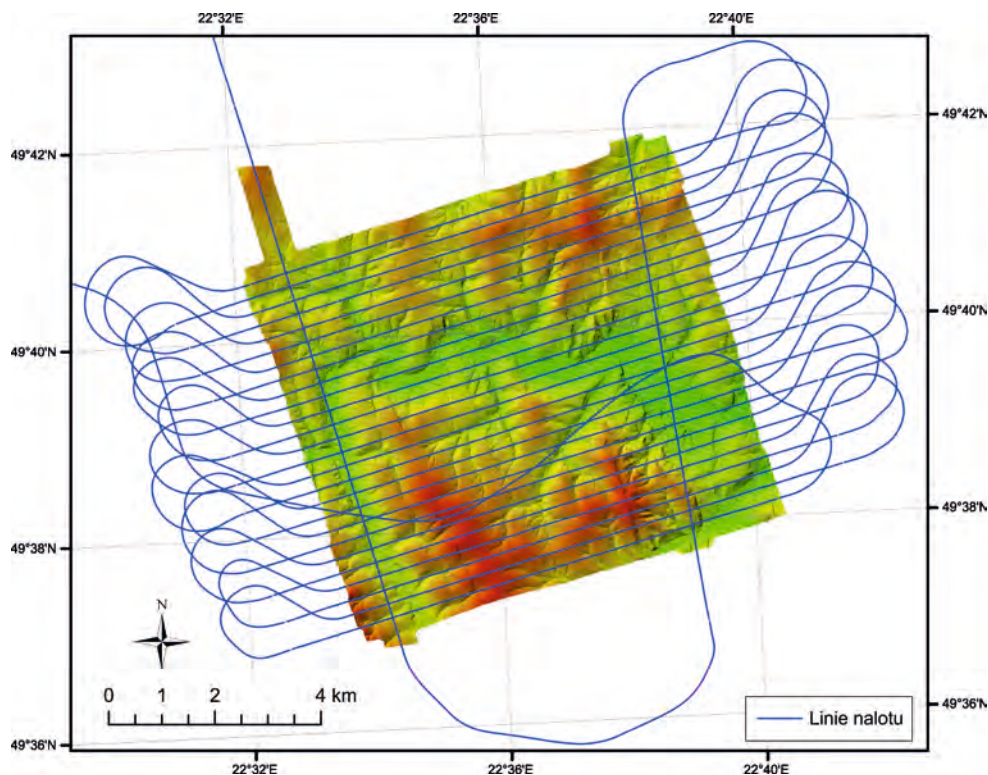


Ryc. 1. Przekroje rastrowych modeli terenu w lesie i terenie otwartym.
Fig. 1. Cross-sections through raster terrain models in the forest and in the open space.

zostało zachowanych do czasów współczesnych. Podstawową metodą detekcji antropogenicznych mikroform rzeźby pod koronami drzew miało być z założenia lotnicze skanowanie laserowe. Zachęcały do takiego rozwiązania bardzo entuzjastyczne doniesienia z literatury światowej (m.in. Lasaponara, Masini 2009, Chase i in. 2011).

W wyniku nalotu przeprowadzonego wiosną 2013 roku zeskanowano obszar o powierzchni 63,5 km² na pograniczu Pogórza Przemyskiego i Gór Sanocko-Turczańskich (ryc. 2). Skanowanie wykonała firma MGGP Aero z zastosowaniem skanera lotniczego dalekiego zasięgu LMS-Q680i firmy Riegl, wówczas jednego z najbardziej zaawansowanych narzędzi tego typu na świecie. Urządzenie umożliwia rejestrację teoretycznie nieskończonej liczby ech (konwertowanych na punkty w przestrzeni) z jednego wyemitowanego impulsu dzięki zastosowanej tzw. analizie pełnej fali (ang. Full Waveform Analysis – FWA) (Riegl 2012). Nominalna dokładność dalmierza laserowego wynosi 20 mm.

Wszelkie parametry skanowania i dalszego przetwarzania danych były dobrane tak, aby uzyskać możliwie najwierniejszy obraz powierzchni ziemi (tab. 2). Czas nalotu ustalono tak, aby maksymalna liczba wyemitowanych impulsów dotarła do względnie suchego gruntu (po zejściu śniegu, przed rozpoczęciem wegetacji, w okresie bezdeszczowym). Im grubsza i dłużej



Ryc. 2. Teren badań z zaznaczonymi liniami nalotu skanowania laserowego.

Fig. 2. Study area with the marked airborne laser scanning flight lines.

zalegająca warstwa śniegu występowała w zimie poprzedzającej naloł, tym lepiej ubita jest niska roślinność. W praktyce w ciągu roku jest jedynie kilka, kilkanaście dni z idealnymi warunkami do skanowania powierzchni gruntu. Maksymalny kąt odchylenia lasera od pionu wynosił 25°, a pasy skanowania pokrywały się w co najmniej 60%. Dzięki temu impulsy docierały także pod zwarte korony drzew iglastych. Jednocześnie z tego samego statku powietrznego wykonano zdjęcia lotnicze RGB, mające wspomóc interpretację danych ze skanowania.

Tabela 2 Metadane lotniczego skanowania laserowego.

Table 2. Airborne laser scanning metadata.

Charakterystyka skanera laserowego	
Model	Riegl LMS-Q680i
Długość fali lasera	1550 nm
Energia impulsu	8 μ J
Rozbieżność wiązki lasera	< 0,5 mrad (wzrost średnicy wiązki o 50 cm na 1000 m)
Długość impulsu	4 ns
Digitizer (próbkowanie cyfrowe)	1 ns
Dokładność dalmierza	2 cm
Parametry lotu i pracy systemu ALS	
Data nalołu	19 IV 2013 r.
Powierzchnia skanowania	63,5 km ²
Prędkość lotu	100 kn (51,5 m/s)
Wysokość lotu	ok. 700 m nad pow. terenu
Częstotliwość emisji impulsów (ang. Pulse Repetition Rate PRR)	300 kHz
Liczba linii skanowania na sekundę	114
Kąt poprzeczny skanowania	$\pm 25^\circ$
Pokrywanie się pasów skanowania	> 60%
Średnica plamki promienia laserowego na powierzchni terenu (ang. footprint)	0,2 m
Gęstość skanowania	> 5 pkt/m ²
Efektywna gęstość punktów klasy grunt	12/m ²
Efektywna gęstość chmury punktów	25/m ²

Źródło: obliczenia własne, operatowykonawczy MGGPAero, Riegl (2012), Wężyk (2014).
 Source: own calculations, MGGPAero post-completion report, Riegl (2012), Wężyk (2014).

W wyniku przeprowadzonego nalogu uzyskano następujące dane teledetekcyjne dla wyznaczonego obszaru badań:

- sklasyfikowaną chmurę 1,57 mld punktów (25 punktów/m²) w formacie LAS1.2 z następującymi atrybutami: współrzędne x, y, z, intensywność odbicia, kąt skanowania, klasa, liczba ech z wysłanego impulsu oraz numer echa, czas UTC,
- numeryczny model terenu (NMT) o rozdzielczości rastra 0,5 m,
- numeryczny model pokrycia terenu (NMPT) o rozdzielczości rastra 0,5 m,
- 1352 zdjęć lotniczych RGB o wielkości piksela 9 cm,
- ortofotomapę RGB o wielkości piksela 10 cm,
- linie nalogu.

Dodatkowo w trakcie nalogu gromadzone były podstawowe dane meteorologiczne (temperatura i wilgotność powietrza) 2 m nad powierzchnią gruntu z interwałem równym 1 min.

Analiza danych

Analiza danych uzyskanych ze skanowania laserowego, mająca na celu detekcję antropogenicznych form rzeźby, opiera się przede wszystkim na wizualnej interpretacji modelu terenu. Jednak sama informacja o wysokości poszczególnych komórek rastra, wyświetlona na ekranie komputera, nie daje wielu możliwości interpretacyjnych. Dopiero odpowiednie przetworzenie danych wysokościowych pozwala na uchwycenie interesujących badacza form terenowych.

Podstawową i od dawna stosowaną techniką wizualizacji modelu terenu było cieniowanie. Metoda ta, a szczególnie jej wariant w połączeniu z wyróżnianiem poszczególnych przedziałów wysokości za pomocą barw (ang. elevation differentiation, color shading), jest obecnie najbardziej popularną techniką wizualizacji modeli terenu, przede wszystkim ze względu na jej intuicyjny charakter i wynikającą z tego łatwość percepcji także dla niespecjalisty.

Niemniej szybko okazało się, że wobec bogactwa i szczegółowości form terenowych, odzwierciedlonych na modelach terenu wygenerowanych z chmur punktów ALS, technika ta do celów badawczych okazała się niewystarczająca. Zasadniczym mankamentem tradycyjnego cieniowania było pominięcie w wizualizacji liniowych obiektów równoległych do umownego kierunku padania promieni słońca oraz trudność w odczytaniu detali w cieniu lub pełnym oświetleniu (Devereux i in. 2008). Automatycznym nasuwającym się rozwiązaniem było wygenerowanie 8 lub 16 warstw cieniowania z różnymi kierunkami padania światła i ich równoległa analiza. Takie podejście jest akceptowalne dla bardzo niewielkich powierzchni objętych skanowaniem, jednak już dla nieco większych obszarów analiza z wykorzystaniem wielu obrazów równoległe staje się uciążliwa. Dążono więc do opracowania nowych technik wizualizacji, które w czytelny i intuicyjny sposób ukazywałyby formy terenu, najlepiej na jednej warstwie. W tej dziedzinie pionierami okazali się archeolodzy. Opracowano takie techniki

wizualizacji jak Sky-View Factor (SVF) (Zakšek i in. 2011), Local Relief Model (LRM) (Hesse 2010), dodatnia i ujemna otwartość (ang. openness) (Doneus 2013) czy analiza głównych składowych (PCA) cieniowania z wielu kierunków (Devereux i in. 2008). Zwięzły i przystępny przegląd współczesnych technik wizualizacji szczegółowych modeli terenu zamieścili w swojej pracy Kokalj i in. (2013). Trudno wśród nich wskazać jednoznacznie najlepszą, wybór należałoby uzależnić od charakterystyki badanego terenu i celów badawczych. Doświadczenie autora niniejszego artykułu wskazuje, że najbardziej efektywną techniką przetworzenia modelu terenu w celu detekcji większych form antropogenicznych jest SVF, mniejszych – LRM, natomiast do samej wizualizacji i prezentacji kartograficznej – tradycyjne cieniowanie z wyróżnieniem przedziałów wysokości za pomocą barw. Ponadto do szczegółowego oglądu poszczególnych obiektów bardzo wygodne są różnego rodzaju dwu- i trójwymiarowe wizualizacje samej chmury punktów, w tym np. profile poprzeczne, animacje sieci trójkątów (ang. Triangulated Irregular Network – TIN) i wiele innych.

Mimo tak wielu możliwości kameralnej obróbki i wizualizacji badanych obiektów, ich ostatecznego rozpoznania i weryfikacji można dokonać jedynie bezpośrednio podczas wizji terenowej. Należałoby w tym miejscu jednak podkreślić, że z kolei bez możliwości spojrzenia z perspektywy na niektóre badane obiekty czy wzory przestrzenne (np. ślady orki) ich detekcja jedynie podczas wizji terenowej nie byłaby możliwa.

Nowe możliwości

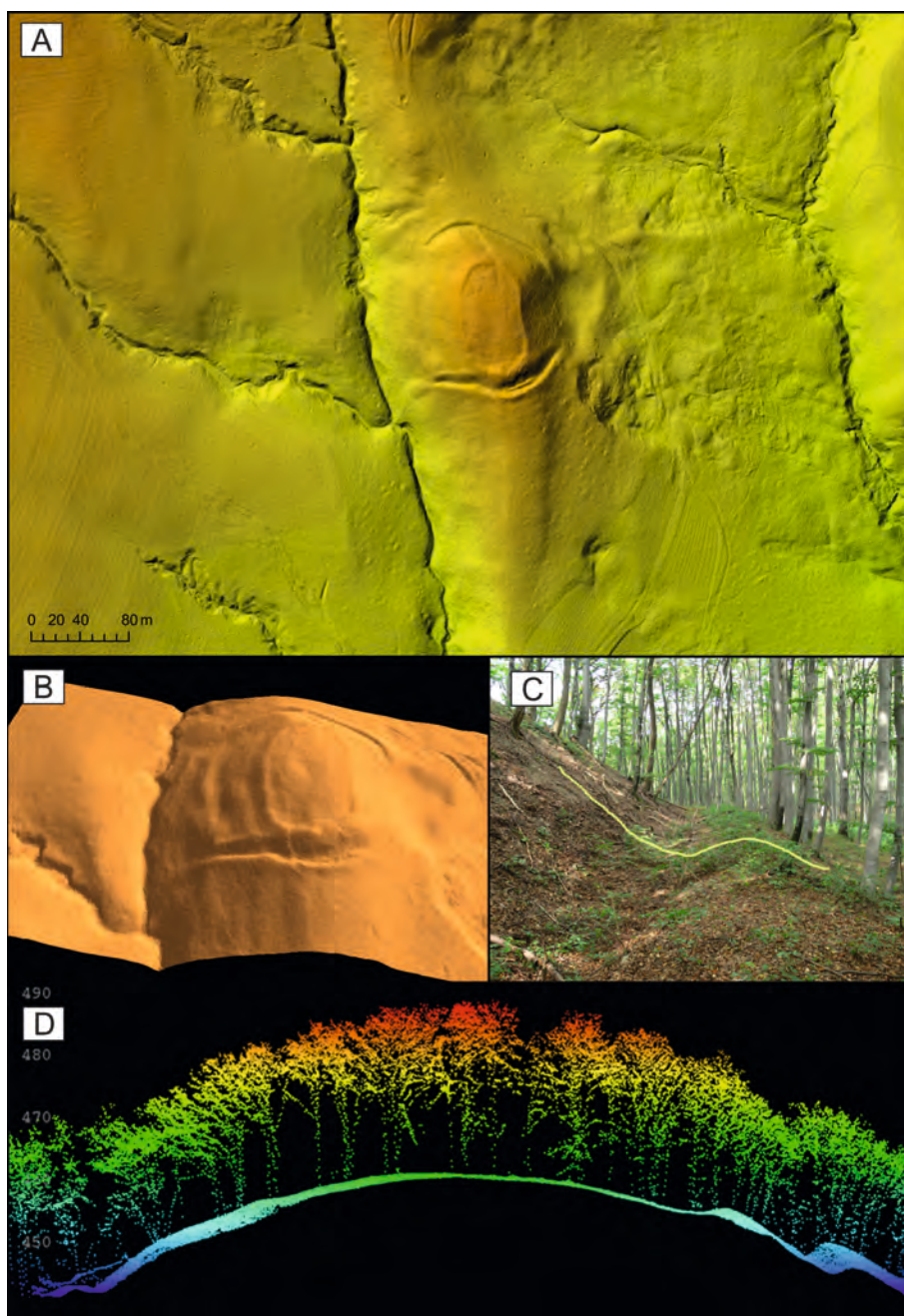
Skanowanie laserowe na Pogórze Przemyskim ujawniło niezwykle złożony i do tej pory nierozpoznany obraz powierzchni ziemi, w której zapisane są setki lat działalności człowieka i natury. Pod względem różnorodności i wyrazistości form szczególnie wyróżniał się obszar leśny. Zwizualizowana została szczegółowa rzeźba terenu wraz z detalami mikrotopograficznymi, zarówno o pochodzeniu naturalnym, jak i antropogenicznym. Pierwszy raz odzwierciedlona została w sposób tak precyzyjny budowa geomorfologiczna fragmentu Karpat Wschodnich. Doskonale widoczna jest sieć erozyjna potoków, debr i wąwozów, liczne osuwiska, stożki deluwialne, powierzchnie zrównania czy zmiany koryta głównej rzeki regionu – Wiaru. Formy te jednak nie były obiektem szczegółowej analizy.

Z uwagi na postawione cele badawcze skoncentrowano się na identyfikacji form terenu związanych bezpośrednio z działalnością człowieka. O licznych ich występowaniu na obszarze Karpat Zewnętrznych i istotnym wpływie na funkcjonowanie środowiska (m.in. obiegu wody i materii) pisali liczni autorzy reprezentujący nauki przyrodnicze, m.in. Lach (1984, 1985), Drużkowski (1998), Wolski (2007) czy Krocak (2010). Wzmianka na ten temat pojawiła się także w komentarzu do arkusza szczegółowej mapy geologicznej Polski (SMGP) pokrywającego obszar badań (Gucik i in. 1991). Ich identyfikacja i analiza jednak do tej pory możliwa była jedynie w trakcie żmudnych prac terenowych i siłą rzeczy obejmowała niewielkie, głównie bezleśne obszary. Podobny charakter miały także prace prowadzone w Karpatach

przez archeologów. Ponadto stanowiska zewidencjonowane w ramach Archeologicznego Zdjęcia Polski (AZP) były zlokalizowane niemalże wyłącznie na obszarach bezleśnych (Banaszek, Rączkowski 2010; Zapłata i in 2014). Do wyjątków należą średniowieczne grodziska, które, ze względu na swoje rozmiary i czytelność formy, były rozpoznawane także na terenach zalesionych. Jedno z takich grodzisk (w lesie Grabnik na południowych stokach Kopystańki) znalazło się na obszarze objętym skanowaniem laserowym (Zollówna 1958) (ryc. 3). Obecnie jest ono w całości pokryte lasem. Szczegółowy, trójwymiarowy model grodziska uzyskany z chmury punktów pozwala na jego pełny ogląd i dokonanie precyzyjnych pomiarów. Także umiejscowienie grodziska w szerszym kontekście przestrzennym (krajobrazowym) może wiele powiedzieć o przyczynach jego powstania i pełnionej funkcji. Informacje o grodzisku, uzyskane w wyniku wirtualnego usunięcia roślinności w powiązaniu z wysoką rozdzielczością modelu terenu, z całą pewnością stanowią cenne uzupełnienie dotychczasowej wiedzy, płynącej z tradycyjnej archeologicznej prospekcji terenowej.

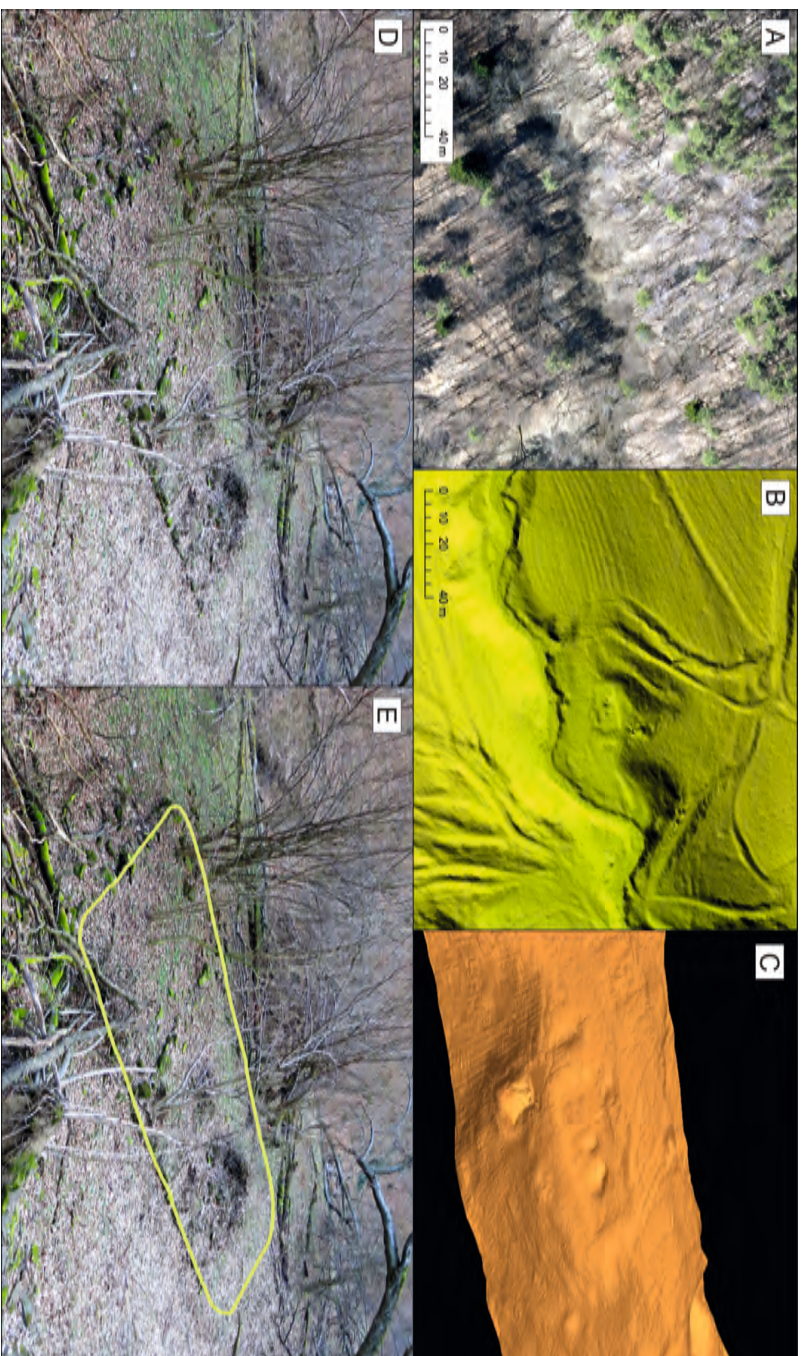
Najważniejsze jednak z punktu widzenia celów projektu było wyodrębnienie z całej masy form terenowych tych, które zostały utworzone przez dawnych mieszkańców wysiedlonych wsi i pośrednio mogły posłużyć do odtworzenia przedwojennego krajobrazu wiejskiego tej części Karpat. Bardzo pomocne przy datowaniu i interpretacji form terenowych były austriackie mapy katastralne w skali 1:2880 z połowy XIX wieku. Szczególnie dobrze przedwojenne formy terenowe zachowały się na terenach zalesionych bezpośrednio po wysiedleniach i wyłączonych z dalszego użytkowania rolniczego. Na obszarach o zachowanej ciągłości osadnictwa pojawiło się tak dużo nowych form, że trudno wiarygodnie oddzielić dawne formy od współczesnych. Również na obszarach wysiedlonych, ale choć przez pewien czas użytkowanych rolniczo większość przedwojennych śladów osadnictwa została zamazana. Często bowiem zdarzało się tak, że w celach „rekultywacji” gruntów nie tylko zaorywano drogi polne i skarpy miedz, likwidując w ten sposób wielowiekową mozaikę drobnych pól, ale także plantowano gospodarstwa, sady, stawy i wszelkie inne zbędne z punktu widzenia agronoma PGR pozostałości po dawnych mieszkańcach.

Obszar skanowania laserowego na Pogórzu Przemyskim był tak dobrany, aby swym zasięgiem objął wieś Borysławkę, jedną z nielicznych wysiedlonych w latach 40. XX wieku miejscowości, które wkrótce po wysiedleniach niemalże w całości zostały zalesione (Affek 2011). Analiza modelu terenu byłej wsi Borysławka wykazała, że wzór przestrzenny krajobrazu sprzed 70 lat został doskonale zakonserwowany w rzeźbie terenu pod koronami drzew. Z pomocą lotniczego skanowania laserowego można z łatwością wskazać dokładne lokalizacje przedwojennych, obecnie nieistniejących zabudowań (ryc. 4). Kamienne podmurówki stanowiące obrysy budynków, piwnice, kopce z cegieł po kominach, mimo że w rzeczywistości ukryte w gęstej roślinności i w terenie trudne do lokalizacji, na ekranie komputera wyraźnie odróżniają się od otoczenia. Jeszcze lepiej zachowana została tradycyjna struktura agrarna, z czytelnym podziałem łąnowym, terasami rolnymi, miedzami, a nawet kierunkiem i charakterem orki (ryc. 5).



Ryc. 3. Średniowieczne grodzisko położone w lesie Grabnik na południowych stokach Kopystańki: A – barwne cieniowanie rastrowego modelu terenu z ALS, B – widok 3D modelu TIN wygenerowanego z punktów ALS klasy grunt, C – fotografia fosy otaczającej grodzisko, D – przekrój przez chmurę punktów z ALS, koloryzowanych według wysokości.

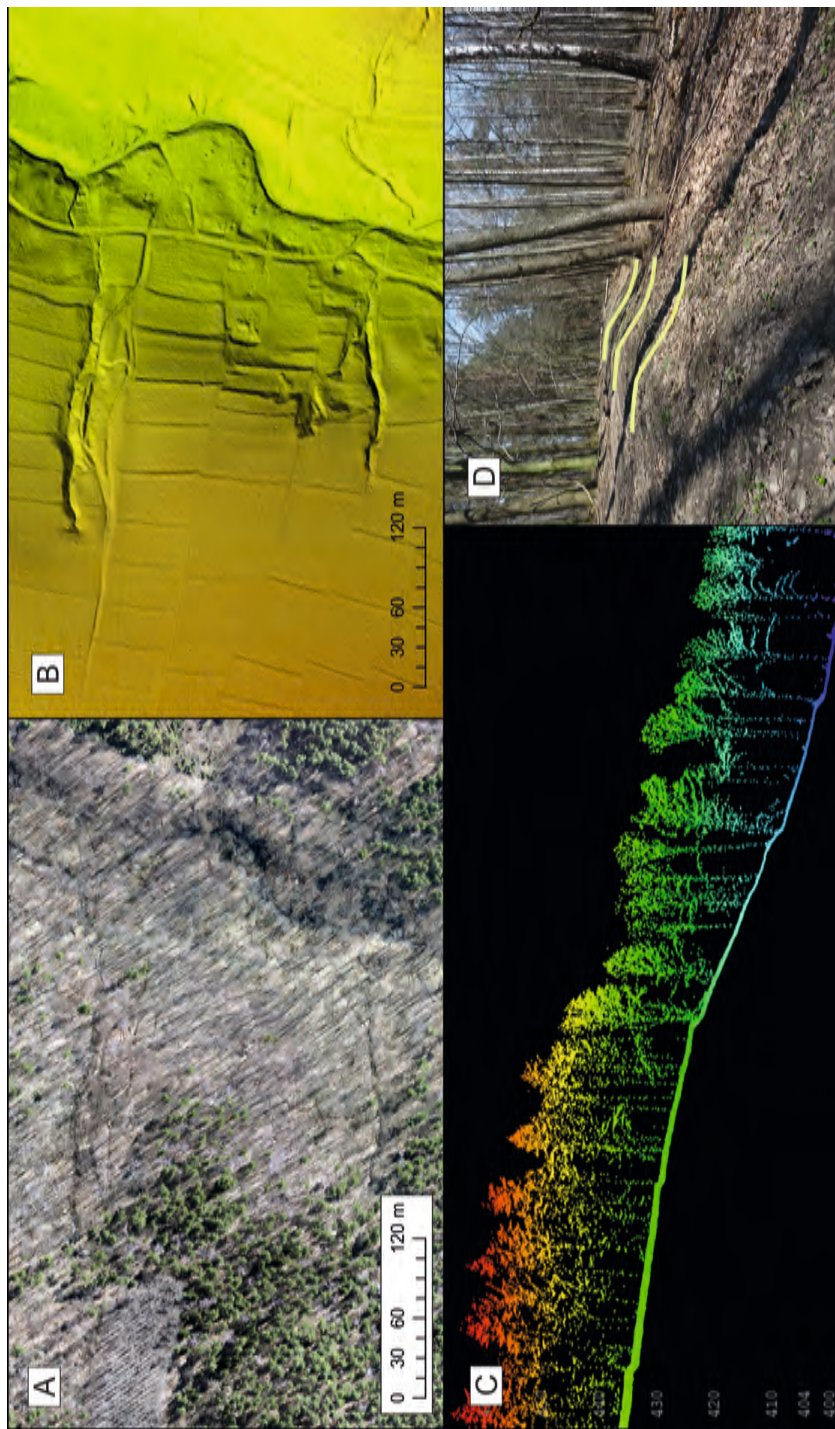
Fig. 3. Medieval stronghold situated in the Grabnik Forest on the southern slopes of Mt. Kopystańki: A – color shading of ALS raster terrain model, B – 3D view of TIN model generated from ALS ground points, C – the moat surrounding the stronghold, D – cross-section through the ALS point cloud colored by elevation.



Ryc. 4. Pozostałości budynku mieszkalnego w byłej wsi Borysławka, spalonego w 1945 r.: A – ortofotomapa RGB ze zdjęć lotnicznych wykonanych równocześnie z ALS, B – barwne cieniowanie rastrowego modelu terenu z ALS, C – widok 3D modelu TIN wygenerowanego z punktów ALS klasy gruntu, D – fotografia, E – fotografia z zaznaczonym obrysem fundamentów.

Fig. 4. Remains of residential building in the former village Borysławka, burned down in 1945: A – RGB orthophoto from aerial images taken simultaneously with ALS, B – color shading of ALS raster terrain model, C – 3D view of TIN model generated from ALS ground points, D – a photograph, E – a photograph with marked contour of the foundations.





Ryc. 5. Przedwojenna struktura agrarna wsi Boryslawka, odzwierciedlona w mikrotopografii terenu: A – ortofotomapa RGB ze zdjęć lotniczych wykonanych równocześnie z ALS, B – barwne cieniowanie rastrowego modelu terenu z ALS, C – przekrój przez chmurę punktów z ALS koloryzowanych według wysokości, D – fotografia z zaznaczoną skarpią terasy rolnej.

Fig. 5. Pre-war agrarian structure in village Boryslawka, as reflected in the microtopographic relief: A – RGB orthophoto from aerial images taken simultaneously with ALS, B – color shading of ALS raster terrain model, C – cross-section through the ALS point cloud colored by elevation, D – a photograph with marked escarpment of agricultural terrace.

Przedwojenny wzór przestrzenny krajobrazu uzupełniają wąwozy dróg wiejskich i traktów, dawne młynówki, stawy oraz nasypy oddzielające były lasy królewskie.

Poza parametrami położenia punkty z ALS mają kilka dodatkowych atrybutów, które można wykorzystać do interpretacji zeskanowanych obiektów. Do najbardziej obiecujących należy współczynnik intensywności odbicia (zob. Challis, Howard 2013), który w skanerach lotniczych Riegla odpowiada amplitudzie sygnału odbitego (echa). W przeciwieństwie do skanerów naziemnych Riegla serii VZ wartość ta nie jest skalibrowana i w związku z tym nie jest stałą cechą obiektów. Ponadto współczynnik intensywności odbicia/amplituda wymiennie charakteryzuje powierzchnię obiektu tylko w sytuacji pojedynczego odbicia/echa, czyli wtedy, gdy impuls nie zostanie rozszczepiony i w całości zatrzyma się na pierwszym napotkanym obiekcie. Kolejnym parametrem modyfikującym wartość amplitudy jest kąt nachylenia skanowanej powierzchni. Ponadto amplituda zależy od wielu innych zmiennych, w tym od odległości od urządzenia emitującego, warunków pogodowych i przejrzystości powietrza. Dlatego też porównywanie bezwzględnych wartości amplitudy między różnymi nalotami mija się z celem. Niemniej w ramach konkretnego nalotu wartości amplitudy w sposób ewidentny różnicują punkty pojedynczego echa (ang. single return) odbite od różnych typów obiektów, np. roślinności, gleby czy dachów budynków. Tym samym wizualizacja punktów cieniowanych względem wartości intensywności odbicia, czyli tzw. obraz intensywności (ang. intensity image) daje efekt podobny do czarno-białego zdjęcia lotniczego, umożliwiając przy braku innych danych teledetekcyjnych rozpoznanie kształtów i typów obiektów (ryc. 6).



Ryc. 6. Obraz intensywności – wizualizacja chmury punktów z ALS koloryzowanych według wartości współczynnika intensywności odbicia.

Fig. 6. Intensity image – visualization of ALS point cloud colored by intensity value.

Pułapki i ograniczenia

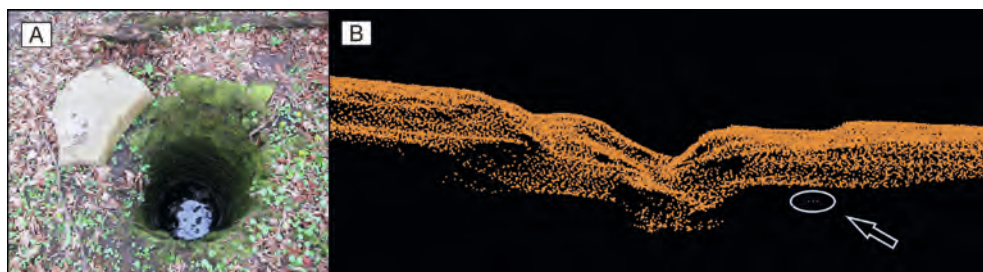
Identyfikacja widocznych na wizualizacji modelu terenu obiektów nie powinna być prowadzona bezrefleksyjnie. Bezkrytyczne zawierzenie temu, co jest wyświetlane na ekranie komputera może prowadzić do wyciągnięcia błędnych wniosków co do natury rzeczywistości. Należy mieć w pamięci, że mamy do czynienia z modelem, czyli jedynie niedoskonałą reprezentacją rzeczywistości.

Mimo zaawansowanych algorytmów klasyfikacyjnych i filtracyjnych w każdej chmurze punktów znajdują się punkty błędnie sklasyfikowane. Skutkuje to niejednokrotnie pominięciem w modelach terenu interesujących badacza obiektów lub wygenerowaniem wirtualnych obiektów, niemających swojego odzwierciedlenia w rzeczywistości. W tym kontekście zaleca się korzystanie nie tylko z gotowych, rastrowych modeli terenu, ale także w celach kontrolnych ze źródłowych danych wysokościowych, czyli chmur punktów. Oczywiście sklasyfikowana chmura punktów, jako taka, jest już produktem w pewnym sensie wtórnym względem odebranej przez rejestrator skanera fali elektromagnetycznej i pierwotnego pliku z zapisem próbkowanej co 1 ns amplitudy fali, gdyż już na etapie generowania chmury punktów są stosowane zależne od użytkownika wartości progowe filtracji szumów. Niemniej większości użytkownikom przegląd jednej chmury punktów z optymalnie dobranymi do określonego problemu badawczego parametrami filtracji powinien w zupełności wystarczyć.

Jednym z pierwszych kroków w procedurze automatycznej klasyfikacji jest wydzielenie tzw. niskich punktów (ang. low points) (Wężyk 2014). Z założenia powstają one w wyniku wadliwej interpretacji sygnału powracającego do rejestratora. Zdarza się jednak, że takie punkty oddają rzeczywiste obiekty znajdujące się poniżej powierzchni gruntu, np. otwory studzienne lub głębokie piwnice. W wyniku nieuwzględnienia ich w klasie grunt obiekty te nie są odzwierciedlone na numerycznych modelach terenu. Liczne otwory studzienne przy byłych gospodarstwach na badanym obszarze udało się zidentyfikować jedynie dzięki analizie chmury punktów (ryc. 7).

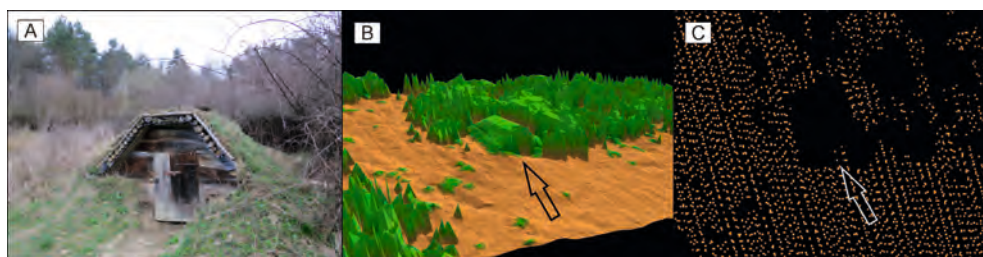
Automatyczna klasyfikacja może także doprowadzić do przeoczenia innych ciekawych obiektów znajdujących się na poziomie gruntu, np. ziemianek. Obiekty takie, mimo że docierają do nich impulsy, są dla badacza niewidoczne w chmurze punktów i na modelu terenu. Dzieje się tak dlatego, że zamiast przypisania do klasy grunt lub obiekt antropogeniczny/budynek klasyfikowane są jako roślinność niska i średnia. Ziemianka na rycinie 8 nie została zaklasyfikowana do klasy grunt, ponieważ zbyt duża była różnica wysokości między punktami zarejestrowanymi w pobliżu prowadzących do niej drzwiczek, na stropie i u progu. Budowlę tę odnaleziono w chmurze punktów tylko dlatego, że najpierw została zlokalizowana w terenie.

Innym typem obiektu antropogenicznego standardowo klasyfikowanym jako roślinność jest ambona myśliwska. Żadna z kilkunastu znajdujących się na terenie badań ambon nie została rozpoznana jako budowla, ponieważ wiązki lasera bez problemu docierały do poziomu gruntu w miejscach, w których stały.



Ryc. 7. Otwór studzienny w byłej wsi Jamna Dolna: A – fotografia, B – przekrój przez chmurę punktów ALS: pokazane jedynie punkty klasy grunt (brązowe) i klasy „low points” (3 fioletowe punkty w elipsie, zarejestrowane w otworze studziennym).

Fig. 7. Well-hole in former village Jamna Dolna: A – a photograph, B – cross-section through the ALS point cloud: shown only ground (brown) and low points (3 violet points in the ellipse, registered in the well-hole).



Ryc. 8. Ziemianka z czasów współczesnych: A – fotografia, B – widok 3D modelu TIN wygenerowanego z punktów ALS klasy grunt oraz niskiej i średniej roślinności, C – chmura punktów ALS klasy grunt (widok z góry).

Fig. 8. Present day dugout: A – a photograph, B – 3D view of TIN model generated from ALS point cloud (classes: ground, low and medium vegetation), C – ALS ground points (top view).

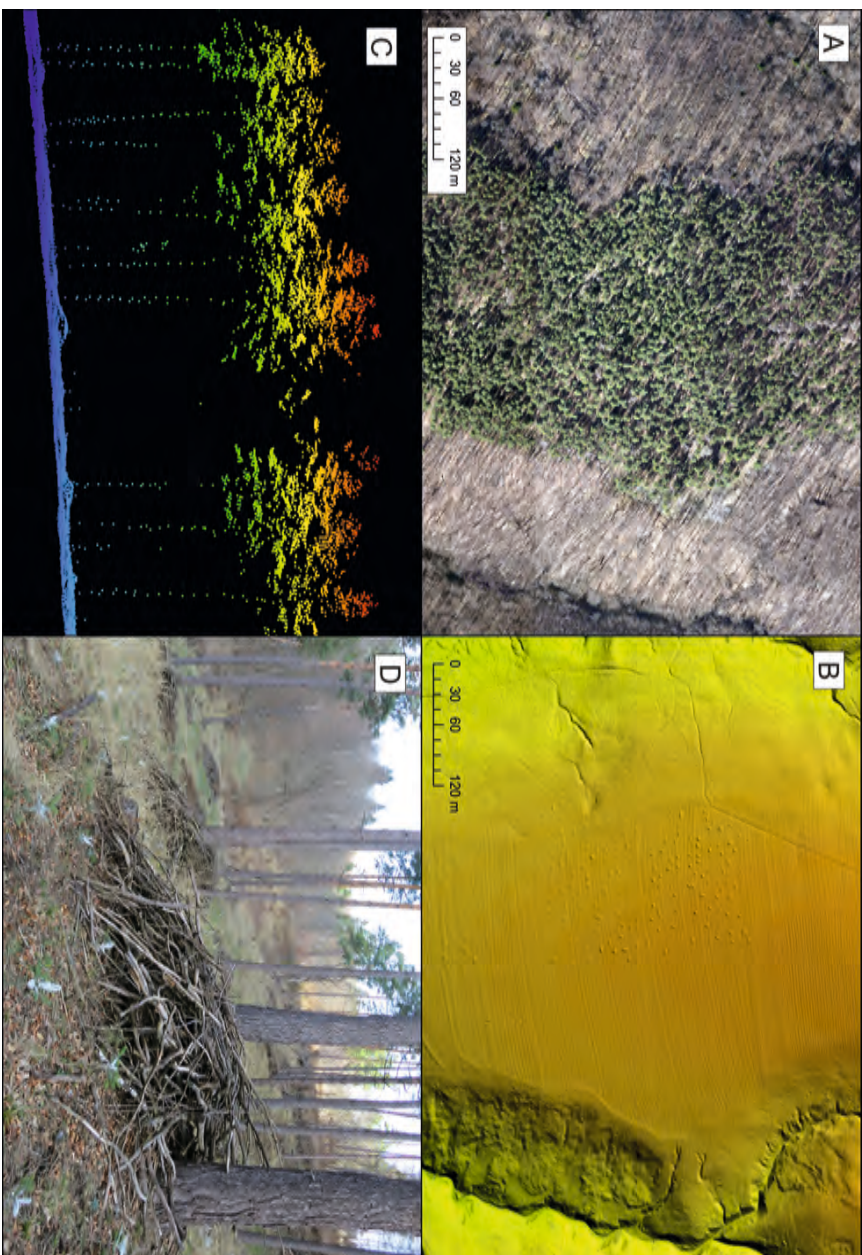
W analizowanej chmurze punktów odnaleziono także grupy punktów w klasie budynek, które w rzeczywistości zarejestrowano w lesie jodłowym. Błędy takie powstały dlatego, że algorytm klasyfikacyjny interpretował rozłożyste, poziome konary gęsto pokryte igłami i nieprzepuszczające promieniowania jako dachy budynków.

Często też bywa tak, że do klasy grunt przypisywane są punkty zarejestrowane na obiektach nietrwałych, np. stogach siana (por. Zapłata i in. 2014). W terenie badań spodziewano się, że mogą zostać odkryte kurhany, zwłaszcza w pobliżu średniowiecznego grodziska. Analiza modelu terenu wykazała, że rzeczywiście w niedalekiej odległości od grodziska w lesie sosnowym znajdują się liczne kopce, które mogą być pozostałością po cmentarzysku kurhanowym. Przekroje przez chmurę punktów i animacje 3D potwierdzały wcześniejsze podejrzenia. Dopiero wizja terenowa rozwiązała wątpliwości – kopce okazały się być stertami gałęzi w wysokim stopniu rozkładu, powstałymi w wyniku leśnych prac pielęgnacyjnych (ryc. 9). Analiza obrazu intensywności i ortofotomapy na niewiele się zdała, bo wartości pikseli obu obrazów charakteryzowały drzewa znajdujące się nad kopcami. Również szerokość echa nie różnicowała punktów na stertach gałęzi od punktów na gruncie, gdyż echo tych drugich było „rozciągnięte” na sadzonkach jodłowych. W takich sytuacjach interpretacja zarejestrowanych obiektów może nastąpić jedynie w wyniku obecności w terenie.

Użyteczność technologii skanowania laserowego bazuje na założeniu, że od skanowanych obiektów odbije się tyle promieniowania, że zostanie ono zarejestrowane przez skaner. Naturalnie emitowanie impulsów o większej mocy zwiększa szanse na rejestrację odbicia. Względy bezpieczeństwa jednak nie pozwalają na wysyłanie impulsów o zbyt dużej energii i o długościach fali szkodliwych dla organizmów żywych. W wyniku tego kompromisu niektóre przedmioty i substancje są dla skanerów topograficznych o długości fali ok. 1500 nm niewidoczne (m.in. woda i śnieg), bo pochłaniają zbyt dużą część promieniowania. Dlatego też należy zwrócić szczególną uwagę, żeby nie skanować obszarów po opadach deszczu i z zalegającym śniegiem. Nawet niewielka warstwa śniegu powoduje, że teren przez niego pokryty nie będzie odzwierciedlony w chmurze punktów (ryc. 10). Analiza jedynie samego modelu terenu nie przesądzi, czy na skanowanym obszarze leżał śnieg, bo luki po nim zostaną zinterpolowane i wygładzone. Na występowanie śniegu może wskazać analiza modelu TIN i samej chmury punktów, a jednoznaczne potwierdzenie daje przegląd ortofotomapy.

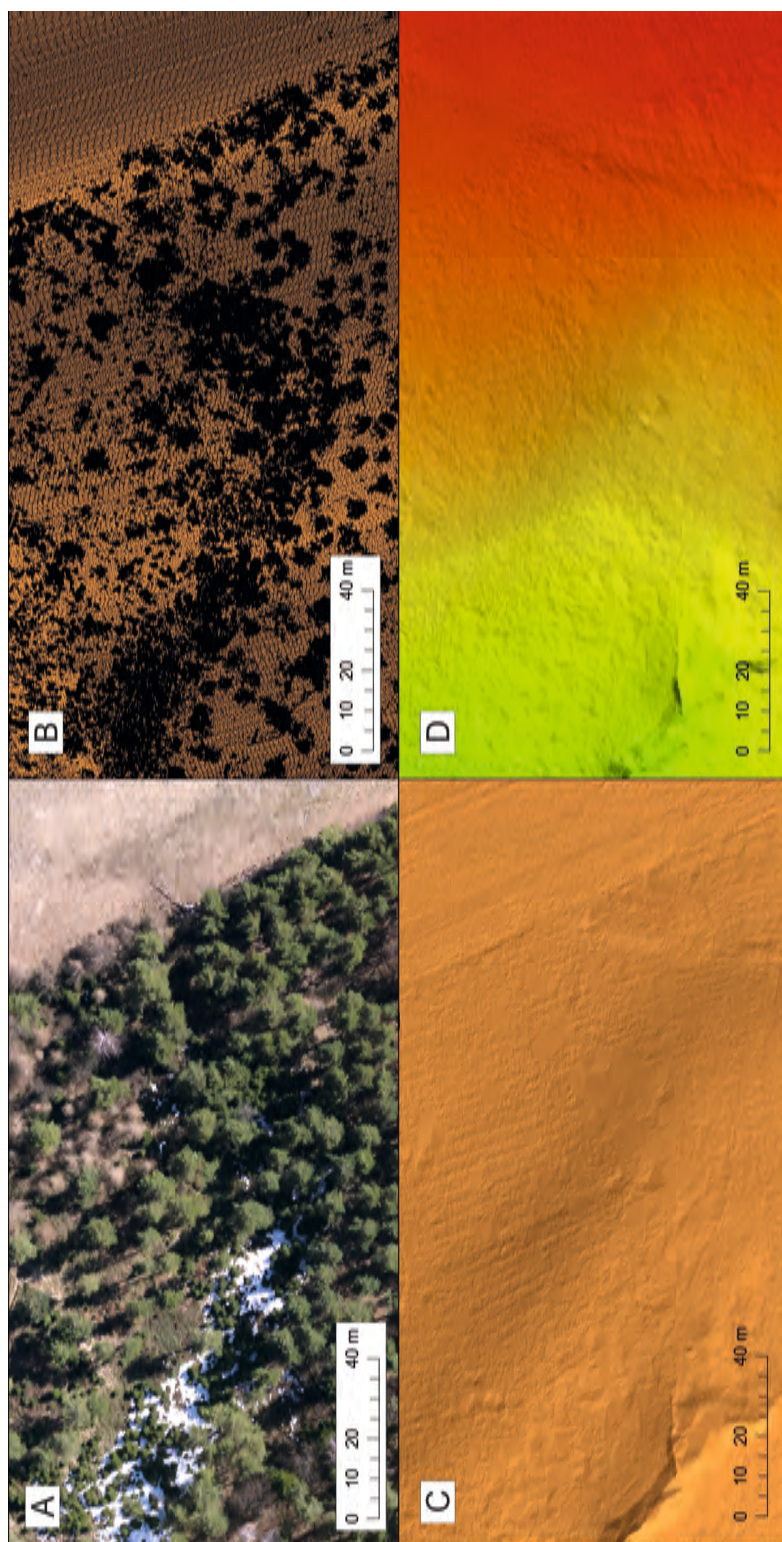
Digitalizacja sygnału analogowego echa przebiega z częstotliwością 1 GHz, co przekłada się na rozdzielczość przestrzenną sygnału równą 0,15 m (uwzględniając prędkość światła i drogę tam i z powrotem równą 0,3 m) (Wagner i in. 2006; Isenburg i in. 2014). Według specyfikacji skanerów lotniczych serii LMS firmy Riegl stosowana do transformacji sygnału cyfrowego na punkt w przestrzeni metoda dekompozycji funkcji z zastosowaniem rozkładów Gaussa (ang. Gaussian decomposition) jest w stanie rozróżnić obiekty znajdujące się co najmniej 0,6 m od siebie (Wagner i in. 2006). Odległość ta, zwana czasami parametrem MTR (ang. multi-target resolution) zależy przede wszystkim od szerokości/czasu emisji pojedynczego impulsu (4 ns w skanerze Riegl LMS-Q680i) i właśnie od częstotliwości digitalizacji (próbki/kwantowania sygnału) (Ullrich, Pfennigbauer 2011). Stosunkowo duża wartość parametru MTR w porównaniu z precyzją lasera skutkuje m.in. tym, że przy gęstej, niskiej roślinności współrzędne punktu z ostatniego odbicia nie będą odpowiadały powierzchni terenu, mimo że część emitowanej energii dotrze do samego gruntu (por. Doneus, Briese 2006). Takie kilkudziesięciocentymetrowe przesunięcia przy interpretacji mikroform rzeźby naturalnie mają znaczenie, dlatego też tak kluczowe jest wykonanie nalotu przed okresem wegetacyjnym i tuż po zejściu śniegu, gdy wszelkie martwe części roślin zielnych są mocno ubite i leżą bezpośrednio na gruncie.

Warto zdawać sobie też sprawę, że zwiększając jedynie gęstość skanowania, bez znaczącego obniżania wysokości lotu, nie uzyskamy modelu terenu o większej rozdzielczości, a jedynie będziemy mnożyć dane, gdyż przekroje padających na powierzchnię wiązek laserowych będą się pokrywać. Wielkość plamki lasera należy traktować, obok gęstości skanowania, jako kluczowy parametr decydujący o rozdzielczości i precyzji modelu terenu.



Ryc. 9. Stery gałęzi błędnie zaklasyfikowane jako kopce ziemne: A – ortofotomapa RGB ze zdjęć lotniczych wykonanych równocześnie z ALS, B – barwne cieniowanie rastrowego modelu terenu z ALS, C – przekrój przez chmurę punktów z ALS kolorzowanych według wysokości, D – fotografia.
 Fig. 9. Piles of branches wrongly classified as mounds: A – RGB orthophoto from aerial images taken simultaneously with ALS, B – color shading of ALS raster terrain model, C – cross-section through the ALS point cloud colored by elevation, D – a photograph.





Ryc. 10. Platy śniegu pochłaniające promieniowanie laserowe: A – ortofotomapa RGB ze zdjęć lotniczych wykonanych równocześnie z ALS, B – chmura punktów ALS klasy grunt (widok z góry), C – cieniowany model TIN wygenerowany z punktów ALS klasy grunt, D – barwne cieniowanie rastrowego modelu terenu z ALS.

Fig. 10. Snow cover absorbing laser radiation: A – RGB orthophoto from aerial images taken simultaneously with ALS, B – ALS ground points (top view), C – shaded TIN model generated from ALS ground points, D – color shading of ALS raster terrain model.

Podsumowanie

W artykule zaprezentowano na przykładzie danych wysokościowych ALS z Pogórza Przemyskiego nowe możliwości, jakie technologia skanowania laserowego otworzyła w dziedzinie modelowania powierzchni terenu. Wskazano także na ograniczenia i potencjalne pułapki, które mogą czyhać na badacza korzystającego z danych ALS.

Od niedawna w państwowym zasobie geodezyjnym i kartograficznym (pzgik) dostępne są precyzyjne dane wysokościowe, pozyskane w technologii lotniczego skanowania laserowego (chmura punktów ALS, NMT oraz NMPT) w ramach projektu informatycznego systemu osłony kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami ISOK. Docelowo (wrzesień 2015) mają obejmować swym zasięgiem 92% powierzchni Polski.

Dotychczas istotną barierą w prowadzeniu badań naukowych z wykorzystaniem modeli ALS był koszt ich pozyskania. Sytuacja diametralnie zmieniła wraz z wejściem w życie nowelizacji ustawy Prawo geodezyjne i kartograficzne z 5 czerwca 2014 roku (Dz.U. 2014 poz. 897). Zgodnie z jej zapisami wszelkie dane w postaci elektronicznej będące w zasobie pzgik (w tym dane wysokościowe z ALS) są udostępniane bez opłat do celów naukowych i edukacyjnych.

Wizualna atrakcyjność i względna łatwość odczytu końcowego efektu skanowania (cieniowanego modelu terenu) jest istotną jego zaletą, ale także rodzi pokusę bezrefleksyjnego i bezkrytycznego użytkowania. Szczegółowość obrazu może powodować złudzenie, że ma się do czynienia z rzeczywistymi obiektami, a nie jedynie ich reprezentacją uzyskaną na drodze wieloetapowego przetwarzania informacji. Proces konwersji sygnału elektromagnetycznego na chmurę punktów i w dalszej kolejności na model terenu jest złożony i w dużym stopniu zautomatyzowany, a ze względu na ogrom danych trudny do pełnej kontroli i weryfikacji (sygnał świetlny => sygnał elektryczny => chmura punktów => sklasyfikowana chmura punktów => siatka trójkątów => model rastrowy => cieniowanie). Przy postępującej specjalizacji odbiorca produktu końcowego prawdopodobnie nie będzie i nie musi dysponować szeroką wiedzą techniczną z dziedziny optyki laserowej. Niemniej znajomość podstaw działania skanera, zalet i wad zastosowanej techniki oraz umiejętność oceny jakości materiałów z ALS na podstawie metadanych wydaje się być warunkiem koniecznym do świadomego korzystania z tego unikalnego zasobu informacji o przestrzeni i będzie stanowić podstawę do prawidłowej interpretacji danych (por. Wężyk 2104, Zapłata i in. 2014). Tak jak w przypadku każdej potencjalnie użytecznej dla nauki innowacyjnej technologii potrzeba czasu na wypracowanie standardów postępowania badawczego, aby ustrzec się przed wyciąganiem błędnych wniosków, a uzyskane wyniki móc porównać z pracami innych badaczy.

Podziękowania

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2012/05/N/ST10/03520.

Literatura

- Ackermann F., 1999. Airborne laser scanning – present status and future expectations. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54, s. 64-67.
- Affek A., 2011. Wartości krajobrazu opuszczonego przez ludność na przykładzie byłej rusińskiej wsi Borysławka. *Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego PTG*, 15, s. 148-160.
- Banaszek Ł., Rączkowski W. 2010. Archeologia w lesie. O identyfikacji stanowisk archeologicznych w gminie Polanów (i nie tylko). [w:] W. Rączkowski, J. Sroka (red.), *Historia i kultura Ziemi Sławieńskiej 10, Miasto i Gmina Polanów, Sławno-Polanów*.
- Challis K., Howard A.J., 2013. The role of lidar intensity data in interpreting environmental and cultural archaeological landscapes. [w:] R.S. Opitz, D.C. Cowley (red.), *Interpreting Archaeological Topography: Airborne Laser Scanning, 3D Data and Ground Observation*. Oxbow Books, Oxford, s. 161-170.
- Chase A.F., Chase D.Z., Weishampel J.F., Drake J.B., Shrestha R.L. i in., 2011. Airborne LiDAR, archaeology, and the ancient Maya landscape at Caracol, Belize. *Journal of Archaeological Science* 38 (2), s. 387-398.
- Devereux B.J., Amable G.S., Crow P., 2008. Visualisation of LiDAR terrain models for archaeological feature detection. *Antiquity* 82 (316), s. 470-479.
- Doneus M., 2013. Openness as Visualization Technique for Interpretative Mapping of Airborne Lidar Derived Digital Terrain Models. *Remote Sensing* 5 (12), s. 6427-6442.
- Doneus M., Briese C., 2006. Digital terrain modelling for archaeological interpretation within forested areas using full-waveform laserscanning. [w:] M. Ioannides, D. Arnold, F. Niccolucci, K. Mania (red.), *The 7th International Symposium on Virtual Reality, Archaeology and Cultural Heritage VAST*. The Eurographics Association, Cypr, s. 155-162.
- Drużkowski M., 1998. Współczesna dynamika, funkcjonowanie i przemiany krajobrazu Pogórza Karpackiego, Instytut Botaniki Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.
- Gotlib D., Olszewski R., 2006. Co z trzecim wymiarem? O modelowaniu rzeźby terenu w referencyjnych bazach danych. *Geodeta* 4 (131), s. 31-34.
- Gucik S., Jankowski L., Rączkowski W., Żyto K., 1991. Objasnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski 1:50 000. *Arkusz Rybotycze (1043), Dobromil (1044)*. PIG, Warszawa.
- Hesse R., 2010. LIDAR-derived Local Relief Models (LRM) – a new tool for archaeological prospection. *Archaeological Prospection* 17 (2), s. 67-72.
- Isenburg M., Trunzer H., Malmer F., 2014. Digitizing 60 Meters of Full Waveform LIDAR in a Dense Tropical Rainforest. *ACRS Proceedings*. http://www.a-a-r-s.org/acrs/administrator/components/com_jresearch/files/publications/OS-242%20paper_ACRS_2014_full_waveform.pdf (data dostępu: 15.12.2014).
- Keydel W., Hounam D., Pac R., Werner M., 2000. X-SAR/SRTM – Part of a global Earth Mapping Mission. *RTO Meeting Proceedings 61, Space-Based Observation Technology*, RTO MP-61.
- Kokalj Ž., Zakšek K., Oštir K., 2013. Visualizations of Lidar Derived Relief Models. [w:] R.S. Opitz, D.C. Cowley (red.), *Interpreting Archaeological Topography: Airborne Laser Scanning, 3D Data and Ground Observation*. Oxbow Books, Oxford, s. 100-114.
- Krocak R., 2010. Geomorfologiczne i hydrologiczne skutki funkcjonowania dróg polnych na Pogórzu Ciężkowickim. *Prace Geograficzne 225, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN*, Warszawa.
- Lasaponara R., Masini N., 2009. Full-waveform Airborne Laser Scanning for the detection of medieval archaeological microtopographic relief. *Journal of Cultural Heritage* 10 (1), s. 78-82.

- Lach J., 1984. Geomorfologiczne skutki antropopresji rolniczej w wybranych częściach Karpat i ich Przedgórze. Prace Monograficzne Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Krakowie 66, Wydawnictwo Naukowe WSP, Kraków.
- Lach J., 1985. Transformacja rzeźby wywołana gospodarczą działalnością człowieka w dorzeczu Mleczy. Folia Geographica, series Geographica-Physica 17, Komisja Nauk Geograficznych PAN, Kraków, s. 121-139.
- Riegl, 2012. Datasheet LMS-Q680i. Riegl Laser Measurement Systems GmbH. Austria. http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/10_DataSheet_LMS-Q680i_28-09-2012.pdf (data dostępu: 15.12.2014).
- Ullrich A., Pfennigbauer M., 2011. Echo digitization and waveform analysis in airborne and terrestrial laser scanning. [w:] D. Fritsch (red.), Photogrammetric Week 2011, Wichmann, Berlin/Offenbach.
- Ustawa z dnia 5 czerwca 2014 r. o zmianie ustawy Prawo geodezyjne i kartograficzne oraz ustawy o postępowaniu egzekucyjnym w administracji (Dz.U. 2014 poz. 897).
- Wagner W., Ullrich A., Ducic V., Melzer T., Studnicka N., 2006. Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 60 (2), s. 100-112.
- Wężyk P. (red.), 2014. Podręcznik dla uczestników szkoleń z wykorzystania produktów LiDAR. Główny Urząd Geodezji i Kartografii. Warszawa.
- Wolski J., 2007. Przekształcenia krajobrazu wiejskiego Bieszczadów Wysokich w ciągu ostatnich 150 lat. Prace Geograficzne 214, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Warszawa.
- Zakšek K., Oštir K., Kokalj Ž., 2011. Sky-View Factor as a Relief Visualization Technique. Remote Sensing 3 (2), s. 398-415.
- Zapłata R., Szady B., Stereńczak K. (red.), 2014. Laserowi Odkrywczy – nieinwazyjne badanie i dokumentowanie obiektów archeologicznych i historycznych województwa świętokrzyskiego. Fundacja Centrum GeoHistorii, Stare Babice.
- Zollówna H., 1958. Wczesnośredniowieczne grodzisko w dolinie Wiaru (Polska). Acta Archaeologica Carpathica 1, s. 125-128.