

Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 30, s. 27-41
ISSN 2083-2214, eISSN 2391-9477
DOI: 10.14681/afkit.2018.002

WYKORZYSTANIE CHMUR PUNKTÓW LIDAR W OCHRONIE CZYNNEJ BORÓW CHROBOTKOWYCH W PARKU NARODOWYM "BORY TUCHOLSKIE"

USING LIDAR POINT CLOUDS IN ACTIVE PROTECTION OF FOREST LICHEN COMMUNITIES IN "BORY TUCHOLSKIE" NATIONAL PARK

Piotr Wężyk¹, Paweł Hawryło¹, Karolina Zięba-Kulawik¹, Marta Szostak¹,
Jadwiga Kuzera¹, Agnieszka Turowska², Marta Bura³, Paulina Wietrzyk⁴,
Joanna Kolodziejczyk⁴, Patrycja Fałowska⁴, Michał Hubert Węgrzyn⁴

¹ Zakład Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa, Instytut Zarządzania
Zasobami Leśnymi, Wydział Leśny, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

² Park Narodowy Bory Tucholskie

³ 3D Scanners LAB

⁴ Zakład Badań i Dokumentacji Polarnej, Instytut Botaniki, Uniwersytet Jagielloński

SŁOWA KLUCZOWE: chmury punktów, lotnicze skanowanie laserowe, naziemne skanowanie laserowe, modelowanie 3D, Park Narodowy Bory Tucholskie

STRESZCZENIE: Zespół boru chrobotkowego (*Cladonio-Pinetum*) jest zbiorowiskiem wykształcającym się na suchych i ubogich w biogeny obszarach piaszczystych. Najlepiej zachowane płaty tego zbiorowiska roślinnego w Europie występują w Polsce północnej, w tym na terenie Parku Narodowego "Bory Tucholskie" (PNBT). Celem badań było określenie struktury przestrzennej wybranych drzewostanów sosnowych PNBT, w których zainicjowany został program ochronny czynnej borów chrobotkowych. Obszar badań obejmował część dwóch oddziałów leśnych PNBT z wydzieleniami: 18c, 19d, 19g, 19h, 19i, 19j i 19k. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem lotniczego (ALS) i naziemnego (TLS) skanowania laserowego (LiDAR). Dzięki zastosowaniu technologii LiDAR możliwe było wykonanie bardzo precyzyjnego opisu struktury drzewostanów w przestrzeni 2D i 3D. W wyniku przeprowadzonych analiz określono szereg cech taksacyjnych i parametrów drzewostanów, takich jak: liczba i zagęszczenie drzew w drzewostanie, średnia odległość pomiędzy drzewami żywymi, liczba drzew martwych, pierśnicowe pole przekroju drzew żywych, zwarcie poziome koron, wskaźnik penetracji koron, wysokość górna drzew w wydzieleniu, wysokość podstawy korony drzewa, długość korony drzewa, objętość warstwy koron, powierzchnia 2D i 3D koron drzew, średni promień korony, współczynnik morfometryczny koron oraz zasięg pionowy martwych gałęzi. Opracowano także mapę występowania luk w wydzieleniach o powierzchni większej niż 2 m². Badania rozpoczęte w 2017 roku są kontynuowane w 2018 roku z wykorzystaniem skanowania z platformy BSP (UAS) oraz TLS, które posłużą precyzyjnej ocenie zmian struktury przestrzennej drzewostanów, w których przeprowadzono cięcia prześwietleniowe.

1. WPROWADZENIE

Sosnowy bór chrobotkowy jest zbiorowiskiem wykształcającym się na suchych i ubogich w biogeny obszarach piaszczystych. W ujęciu fitosocjologicznym odpowiada zespołowi boru chrobotkowego (*Cladonio-Pinetum*), którego runo jest nadzwyczaj skąpe, a warstwa mszysta charakteryzuje się wysokim udziałem naziemnych porostów krzaczkowatych, reprezentowanych głównie przez gatunki z rodzaju *Cladonia* (chrobotki) oraz niewielkim udziałem mszaków (Węgrzyn, Masłowska 2010; Węgrzyn, Wietrzyk 2017; Dingová Košuthová et al., 2013).

Ze względu na ograniczony zasięg występowania borów chrobotkowych oraz dużą wrażliwość porostów naziemnych na zmiany warunków siedliskowych, zbiorowisko to objęte jest unijną ochroną prawną jako jedno z siedlisk przyrodniczych programu Natura 2000 (91T0 – Środkowoeuropejskie lasy sosny zwyczajnej z porostami) w ramach Dyrektywy Rady 92/43/EWG o ochronie siedlisk naturalnych dzięki fauny i flory.

Rozmieszczenie borów chrobotkowych ogranicza się w głównej mierze do terenów Europy Środkowej: Czech, Słowacji, Niemiec i Polski, niemniej jednak centrum występowania tego siedliska przyrodniczego pokrywa się z obszarami Natura 2000 zlokalizowanymi w Polsce, w tym na terenie Parku Narodowego "Bory Tucholskie" (Ermakov, Morozova 2011; Dingová Košuthová et al. 2013; Lipnicki, 2003; Matuszkiewicz, 1973).

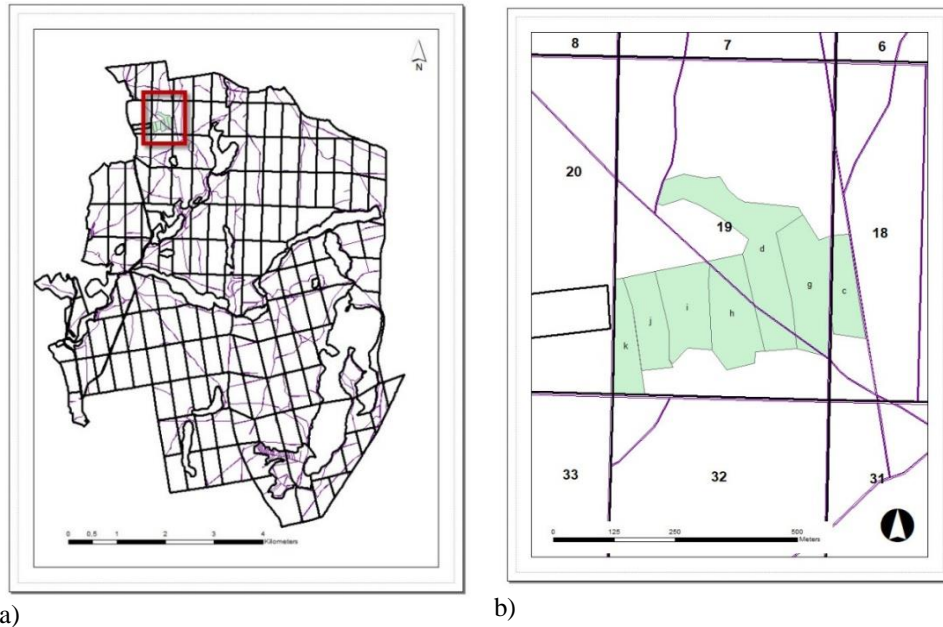
Obecnie obserwowany jest proces powolnej degeneracji borów chrobotkowych (Danielewicz, Pawlaczyk 2004) zarówno w przypadku zbiorowisk wykształconych w obrębie dawnych lasów gospodarczych na terenie Parku Narodowego „Bory Tucholskie” (PNBT) jak i na terenie innych nadleśnictw mezoregionu Borów Tucholskich.

Celem projektu było określenie struktury przestrzennej (pionowej i poziomej) drzewostanów sosnowych (*Pinus sylvestris* L.) oraz jej wpływu na kształtowanie podkopowych warunków mikroklimatycznych (w tym świetlnych), a także tworzenie i osłonę wierzchnich warstw gleby (ściółki; warstwa nadkładowa). Wybrane parametry i cechy biometryczne drzew i drzewostanów określono na podstawie analiz chmur punktów LiDAR (*Light Detection And Ranging*): lotniczego (*Airborne Laser Scanning*; ALS) oraz naziemnego (*Terrestrial Laser Scanning*; TLS) skanowania laserowego.

2. TEREN BADAŃ

Priorytetowym zadaniem Parku Narodowego Bory Tucholskie (PNBT) jest zachowanie naturalnej specyfiki biocenotycznej jezior, zwłaszcza lobeliowych, torfowisk i borów sosnowych. Ochrona ścisła wyznaczona w PNBT obejmuje obszary charakteryzujące się największą stabilnością i odpornością na degradację siedlisk. Obszary te stanowią łącznie 324.30 ha, tj. zaledwie 7 % powierzchni Parku. Zbiorowiska leśne zajmują aż 79 % powierzchni PNBT, z czego aż 98 % stanowią siedliska borowe z sosną zwyczajną (Banaszak, Tobolski, 2002).

Obszar badań obejmował część dwóch oddziałów leśnych PNBT o numerach: 18 i 19. Analizom poddane zostały wydzielienia 18c, 19d, 19g, 19h, 19i, 19j i 19k (Rys.1.).



Rys. 1. Obszar badań: a) - na tle Parku Narodowego „Bory Tucholskie”; b) - wydzielenia wytypowane do ochrony czynnej borów chrobotkowych w oddziałach 18 oraz 19.

3. METODYKA PRAC

Projekt zakładał wykorzystanie technologii lotniczego i naziemnego skanowania laserowego w celu określenia wybranych elementów struktury przestrzennej 3D drzewostanów i określenia statystyk chmur punktów LiDAR mających wpływ na kształtowanie warunków rozwoju sosnowego boru chrobotkowego.

Przyjęto następujące poziomy szczegółowości dla realizowanych badań:

- Poziom L1 - analiza okapu drzewostanu na podstawie danych fotolotniczych. Pozyskanie gęstej (min. 40 pkt/m²) chmury punktów lotniczego skanowania laserowego (ALS) z pułapu wiatrakowca.
- Poziom L2 - analiza podokapowej części drzewostanów metodą naziemnego skanowania laserowego (TLS).
Wykonanie naziemnego skanowania laserowego na powierzchniach kołowych i większych transektach badawczych oraz przeprowadzenie integracji danych TLS z ALS (układ współrzędnych PL-1992), przy wykorzystaniu sieci założonych reperów i innych punktów dostosowania (*ang.* GCP; *Ground Control Points*).
- Poziom L3 - wykorzystanie skanera światła strukturalnego LED (firma Smarttech; model ScanBright Mini) i technologii dopasowania zdjęć (*ang.* SfM; *Structure from Motion*) w celu wymodelowania oraz wydruku (3D) pojedynczych chrobotków.

Cechy taksacyjne i parametry/wskaźniki dla wydzielen drzewostanowych, jakie należało opracować w ramach projektu, to: liczba drzew, zagęszczenie drzew w drzewostanie (szt./ha), liczba drzew żywych, średnia odległość pomiędzy drzewami żywymi, liczba drzew martwych, pierścicowe pole przekroju (g) drzew żywych, zwarcie poziome koron (%), wskaźnik penetracji (%) koron, mapa luk w warstwie koron o powierzchni powyżej 2 m², średnia wysokość górna drzew w wydzieleniu (percentyle: p95, p99 oraz H_{max}), wysokość podstawy korony drzewa, długość korony drzewa, objętość warstwy koron m³/ha, powierzchnia 2D koron drzew, średni promień korony, powierzchnia 3D koron, współczynnik morfometryczny koron (CRR) liczony według poniższego wzoru; oraz zasięg pionowy martwych gałęzi.

$$\text{canopy relief ratio} = (\text{mean} - \text{min}) / (\text{max} - \text{min})$$

3.1. Lotnicze skanowanie laserowe (ALS)

W toku realizacji projektu poza wykorzystaniem referencyjnego modelu NMT (Numeryczny Model Terenu) i chmur punktów LiDAR z projektu ISOK (GUGIK; Kurczyński, Bakula 2013), pozyskano także dane ALS z pułapu wiatrakowca (ZUI APEKS Sp. z o. o.) o parametrach podanych poniżej (tabela 1.) Chmura ALS charakteryzowała się średnią gęstością ok. 70 pkt/m² (maksymalnie 208 pkt/m²). Jednocześnie pozyskano zdjęcia lotnicze średnioformatową kamerą cyfrową Digi-CAM-60 (c_k = 50 mm; matryca: 8956 x 6708 pikseli; GSD 3.0 cm; pokrycie podłużne 70% i poprzeczne 30%).

Tabela 1. Parametry nalotu ALS z platformy wiatrakowca.

Skaner laserowy	Wysokość lotu [m n.p.m.] [ASL]	Wysokość lotu nad terenem [AGL]	Średnia prędkość przelotu [m/s]	Liczba szeregów nalotu	Pokrycie poprzeczne szeregów [%]
VQ-580 (Riegl)	400	250	28	8	30

Chmury punktów ALS sklasyfikowano w oparciu o algorytmy zaimplementowane w oprogramowaniu Terrasolid Ltd. W pakiecie programów TerraScan (Terrasolid) dokonano inicjalnej klasyfikacji tzw. *low points* oraz wykorzystano algorytm wykrywania gruntu wyszukujący najniższe położone odbicia promienia lasera spełniające określone warunki dla powstania iteracyjnego trójkąta. Po sklasyfikowaniu gruntu (klasa nr 2; *ground*) wykonano klasyfikację chmury punktów nad terenem do klas: 3- roślinność niska (*ang. low vegetation* < 0.4 m); 4 - roślinność średnia (*ang. medium vegetation*; 0.4 m - 2.0 m); 5 - roślinność wysoka (*ang. high vegetation*; > 2.0 m). Chmura punktów ALS ograniczona została do zakresu opracowywanych wydzielen - liczyła ok. 18 milionów punktów. Po przeprowadzeniu końcowej klasyfikacji w klasie grunt (2) znajdowało się około 1.0 mln punktów oraz w klasie niskiej roślinności (3) 4.5 mln. Odpowiednio w klasach średniej roślinności (4) - 287 tys. oraz wysokiej roślinności (5) - 12 mln punktów. W obszarze badawczym nie występowały budynki.

Na podstawie chmury punktów ALS wygenerowano NMT oraz NMPT (Numeryczny Model Pokrycia Terenu) w dwóch wariantach rozdzielczości przestrzennej (GSD), tj.: oczko siatki 0.5 m oraz 1.0 m. Modele wysokościowe generowano odpowiednio przy użyciu algorytmów: *GridSurfaceCreate*, oraz *CanopyModel* z pakietu oprogramowania FUSION

(USDA Forest Service; McGaughey, 2015). Przygotowano także modele koron drzew (MDK; ang. *Canopy Height Model*; CHM), reprezentujące wysokość względną drzew nad gruntem, także w dwóch wariantach rozdzielczości przestrzennej (0.5 oraz 1.0 m).

W oprogramowaniu TerraPhoto (Terrasolid) wygenerowano lotniczą ortofotomapę cyfrową RGB, bazując na zdjęciach lotniczych (GSD ok. 3.0 cm), pozyskanych z pułapu około 140 m nad gruntem. Pojedyncze ortofotografie poddano mozaikowaniu, wykorzystując w tym celu możliwości oprogramowania TerraPhoto (Terrasolid Ltd).

Dla każdego analizowanego wydzielenia (drzewostanu), na podstawie znormalizowanej chmury punktów ALS, obliczono szereg statystyk (metryk) opisowych, charakteryzujących strukturę przestrzenną 3D roślinności (Hyypä *et al.*, 2004; Maier, 2008; Maltamo *et al.*, 2014; McGaughey *et al.*, 2014; Naesset, 2002; Wężyk *et al.*, 2006; Wężyk *et al.*, 2008; Wężyk *et al.*, 2010; Zhen *et al.*, 2016). W tym celu wykorzystano algorytm *CloudMetrics* z pakietu FUSION (USDA Forest Service; McGaughey, 2015). Na podstawie chmury punktów ALS utworzono także warstwy rastrowe (GSD 2.0 m), reprezentujące wybrane statystyki tj.: *Elev.p95* (wysokość odpowiadająca 95 percentylowi – p95), *Elev.stddev* (odchylenie standardowe wysokości), *CRR* (ang. *canopy relief ratio*, relief okapu d-stanu będący wskaźnikiem $(\text{mean} - \text{min}) / (\text{max} - \text{min})$); *Cover* (zwarcie poziome koron; przyjmując różne poziomy wysokości odcięcia dla impulsów lasera nad gruntem - ograniczenie wpływu podszytu i podrostu roślinności zielnej w określeniu zwarcia dla części podokapowej) oraz *Penetration* (ażurowość/współczynnik penetracji). Wykorzystując Model Koron Drzew (MKD) wykonano analizę objętości koron drzew oraz objętości przestrzeni podokapowej. Wygenerowano także histogramy dla wydzieleni, reprezentujące rozkład liczby punktów w jedno metrowych przedziałach wysokościowych.

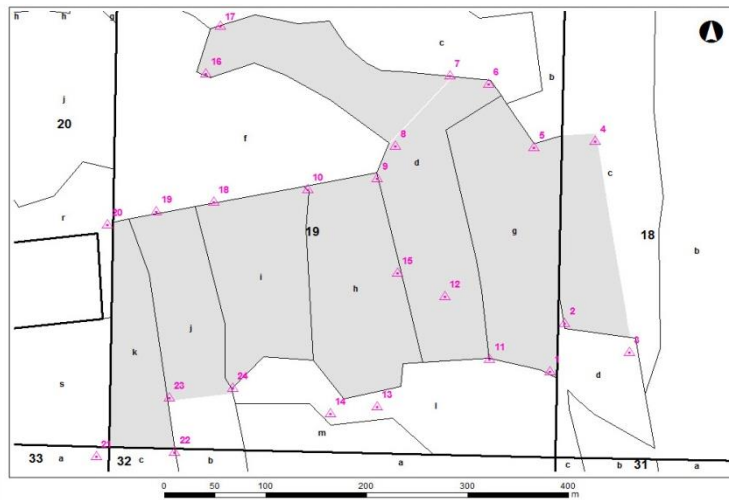
3.2. Nazemne skanowanie laserowe (TLS)

Równolegle w czasie terenowej kampanii pomiarowej pozyskano chmury punktów 3D metodą naziemnego skanowania laserowego (TLS), posługując się skanerem FARO FOCUS 3D o nominalnym zasięgu do 130.0 m. Przyjęto następujące ustawienia dla skanera: rozdzielczość: $\frac{1}{4}$ pełnej możliwości, jakość: 4x oraz zapis z kolorem (zdjęcia RGB) na wybranych 35 stanowiskach. Chmury punktów TLS wykonywano w transektach przechodzących przez analizowane wydzielenia, rozpoczynając i kończąc na skanowaniu punktów lokalnej osnowy wysokościowej. Łącznie wykonano skanowanie TLS ze 192 stanowisk i poddano je klasyfikacji, analogicznie jak w przypadku danych ALS, przy czym zainicjalizowanie klasyfikacji gruntu nastąpiło poprzez manualne jego wskazanie. W procesie klasyfikacji chmur punktów wyszczególniono klasy: grunt (2); posłużyła do wygenerowania NMT z TLS - dane ograniczono do obszaru koła o promieniu 15.0 m od środka stanowiska, pierśnica (DBH; 1.3 m od gruntu), szумы (*low points*) oraz pozostałe punkty (przypisane do klasy *default*; 0). Chmury TLS znormalizowano w oprogramowaniu FUSION (USDA Forest Service; McGaughey, 2015). Dane zapisano w oryginalnych wartościach współrzędnej wysokościowej (Kronsztadt-86) oraz po normalizacji w oparciu o NMT (ALS).

Ważnym etapem prac było wykonanie integracji danych TLS (zakodowanie atrybutu *flightline* = 1) z ALS (*flightline* = 2) poprzez połączenie chmur w układzie odniesienia PL-1992 (XY) oraz Kronsztadt 86 (Z). Średni błąd RMSE integracji chmur punktów ALS i TLS wyniósł około 10.0 cm.

W tym celu przed przeprowadzeniem skanowania TLS trwale zastabilizowano osnowę wysokościową, tj. betonowe słupki (24 punkty; Rys. 2) w celu odtworzenia lokalnego poziomu odniesień wysokościowych w przyszłych badaniach planowanych na 2018 rok. Przy pomiarze lokalnej osnowy wykorzystano obserwacje RTK GNSS w warunkach maksymalnie odsłoniętego horyzontu (duże luki) oraz pomiar tachimetryczny. Prace te zlecono specjalistycznej firmie ZUI APEKS.

Na podstawie zintegrowanych chmur punktów ALS oraz TLS wygenerowano NMT w dwóch wariantach rozdzielczości przestrzennej: 0.5 m oraz 1.0 m.



Rys. 2. Mapa 24 punktów założonej osnowy geodezyjnej.

Analizy cech biometrycznych i innych parametrów drzewostanu na podstawie chmur punktów TLS (Bienert *et al.*, 2006; Hopkinson *et al.*, 2004; Maas *et al.*, 2008; Thies *et al.*, 2004; Watt i Donoghue, 2005; Wężyk i Tompalski, 2010; Wężyk *et al.*, 2007) przeprowadzono w celu pozyskania informacji o: pierśnicy drzewa (DBH), wysokości wierzchołka drzewa, wysokości podstawy korony, długości korony drzewa, szerokości korony, powierzchni pierśnicowego przekroju (g) oraz średniej liczbie pni szt./ha.

Dla całego obszaru badań założono łącznie 92 pola testowe o powierzchni 100 m² (r=5.64m). Miejsca założenia pól testowych wybrano losowo, a jedynym kryterium była odpowiednio duża ilość punktów 3D pochodzących ze skanowania TLS.

Analizy cech taksacyjnych drzewostanów na polach testowych rozpoczęto od wektoryzacji przekroju pierśnicowego na wysokości 1.30 m (klasa DBH; 1.28-1.32 m od gruntu). W oprogramowaniu TerraScan (Terrasolid) na 25 z 92 pól testowych dokonano pełnych pomiarów 10 najwyższych drzew. Pomiarom podlegały cechy: H_w [m] – wysokość wierzchołka drzewa, H_{pk} [m] – wysokość podstawy korony, L_k [m] – długość korony oraz X [m] – szerokość korony drzewa. Dla każdego analizowanego pola testowego w wydzieleniu obliczono: N – liczbę pni na powierzchni; N/ha – średnią liczbę pni na hektar (zagęszczenie drzew), DBH [cm] – średnią pierśnicę drzewa na wysokości 1.3 m od gruntu;

g [m^2] – sumę przekroju średnicowego na powierzchni kołowej (g) oraz G – pierścicowe pole przekroju drzewostanu na $1ha$ (m^2/ha).

3.3. Skanowanie i modelowanie 3D porostów

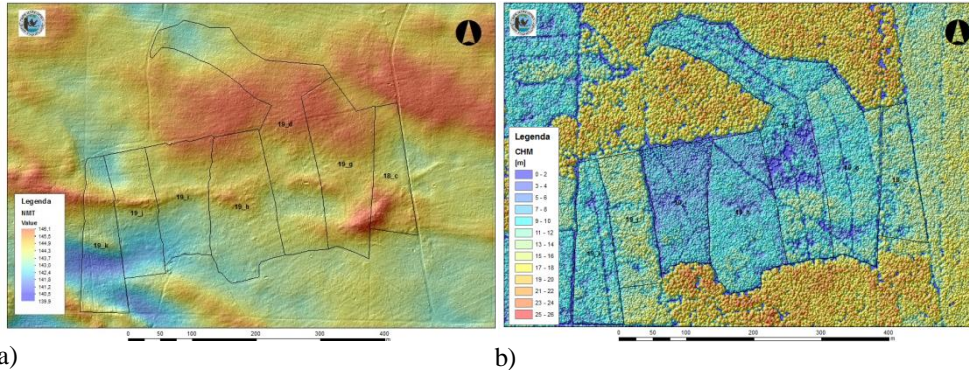
Plechki 10 wybranych gatunków porostów (plechki o wymiarach ok. $1.5 \div 2.0$ cm na $3.0 \div 4.0$ cm) zostały przetworzone do postaci 3D, przy wykorzystaniu skanera światła strukturalnego (Smarttech Mini) poprzez ich umieszczenie w uchwycie i 18-krotne skanowanie przy obrocie stolika w skoku 20 stopni. Chmura punktów 3D poza współrzędnymi XYZ posiadała informacje RGB z kamery (matryca 5 Mpix). Rozdzielczość uzyskanej chmury punktów wynosiła 290 pkt./ mm^2 przy średniej liczby punktów dla jednego skanowanego fragmentu plechki na poziomie 7.5 mln punktów. Filtracja chmury i pasowanie pojedynczych 18 skanów odbywały się w oprogramowaniu Smarttech3DMeasure. Uzyskane wyniki zapisano do formatuplików *.ply. W kolejnym kroku prac chmura punktów 3D została zaimportowana do oprogramowania Geomagic Control (3D System), w którym modelowano poszczególne fragmenty porostów i wyeksportowano je do końcowego formatu *.stl.

Do zaprezentowania w najbardziej wiarygodny sposób modeli 3D, zastosowano fizyczne renderowanie grafiki (*ang. physically based rendering*, PBR), które dokładnie modeluje przepływ światła, imitując tym samym świat rzeczywisty. Ustawiono oświetlenie z cieniowaniem (*shading lit*), wykorzystując intensywności światła na poziomie 0.9 oraz wartość cieni 0.2. Kamera ustawiona była pod kątem 45° .

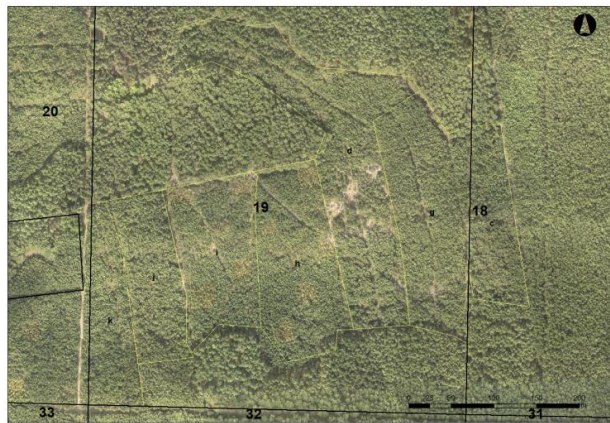
Dodatkowo trójwymiarowe modele zaprezentowano w publicznym serwisie internetowym Sketchfab, umożliwiającym wyświetlanie modeli 3D, ich oglądanie za pomocą aplikacji AR (*Augmented Reality*) i zestawów wirtualnej rzeczywistości - VR (*Virtual Reality*). W kreatorze animacji ustawiono środowisko tła, jasność, orientację oraz pozycję XYZ modelu 3D.

4. WYNIKI

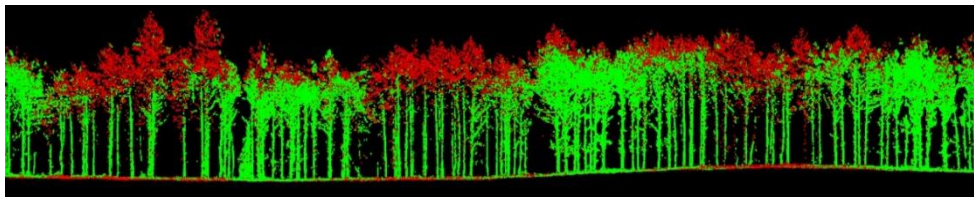
W zakresie wyników przetwarzania danych ALS wygenerowano Numeryczny Model Terenu (Rys. 3a) oraz Model Koron Drzew (Rys. 3b) o rozdzielczości przestrzennej 0.5 m. Finalnie zmozaikowaną i wyrównaną tonalnie ortofotomapę RGB (GSD 0.05 m) zamieszczono na rysunku 4, a efekt integracji chmur punktów ALS z TLS przedstawiono poniżej (Rys. 5). Tak duża gęstość chmur punktów może być pozyskiwana współcześnie ze stosunkowo wolno latających wiatrakowców lub też z platform UAS, wyposażonych w skaner laserowy (Ostrowski *et al.* 2017).



Rys. 3. Cieniowany Numeryczny Model Terenu (a) oraz Model Koron Drzew - MKD (b).



Rys. 4. Cyfrowa ortofotomapa lotnicza RGB (GSD 5cm).



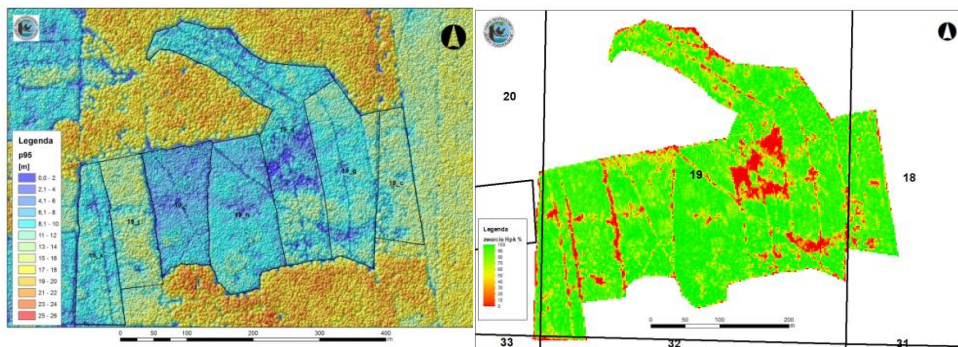
Rys. 5. Zintegrowane chmury punktów ALS (kolor czerwony) i TLS (kolor zielony).

Wybrane statystyki opisowe drzewostanów (na podstawie analiz chmury punktów ALS) zamieszczono w tabeli 2. Wygenerowano szereg pochodnych warstw rastrowych, z których część zaprezentowano poniżej, tj.: wysokość górną d-stanów odpowiadającą 95 percentylowi (Elev.p95, Rys. 6a), zwarcie poziome koron określone przy progu wysokości równej wysokości podstawy korony (H_{pk} ; Rys. 6b). Wyniki obliczeń dla objętości

koron drzew oraz objętość przestrzeni podokapowej zaprezentowano w tabeli 3. Histogramy dla analizowanych wydziałów przedstawiono na rysunku 7.

Tabela 2. Wybrane statystyki opisowe drzewostanów na podstawie analizy ALS.

Wydz.	H _{max} [m]	H _{mean} [m]	Odch. stand. H [m]	p95 [m]	p99 [m]	CRR	Zwarcie 0.5m [%]	Zawarcie H _{pk} [%]	Wsp. penetracji 0.5m [%]
18c	18.61	6.53	4.84	12.74	14.01	0.36	92.4	82.2	7.6
19d	17.80	4.45	3.76	10.29	11.78	0.27	87.1	71.6	12.9
19g	19.18	5.27	4.10	10.85	12.29	0.28	92.5	80.8	7.5
19h	15.37	4.23	3.34	9.10	10.51	0.29	92.7	89.2	7.3
19i	14.82	3.36	2.85	7.69	9.39	0.24	87.7	82.1	12.3
19j	17.89	6.88	4.99	13.29	14.64	0.39	92.7	80.0	7.3
19k	14.74	4.98	3.82	10.28	11.48	0.35	92.7	81.6	7.3



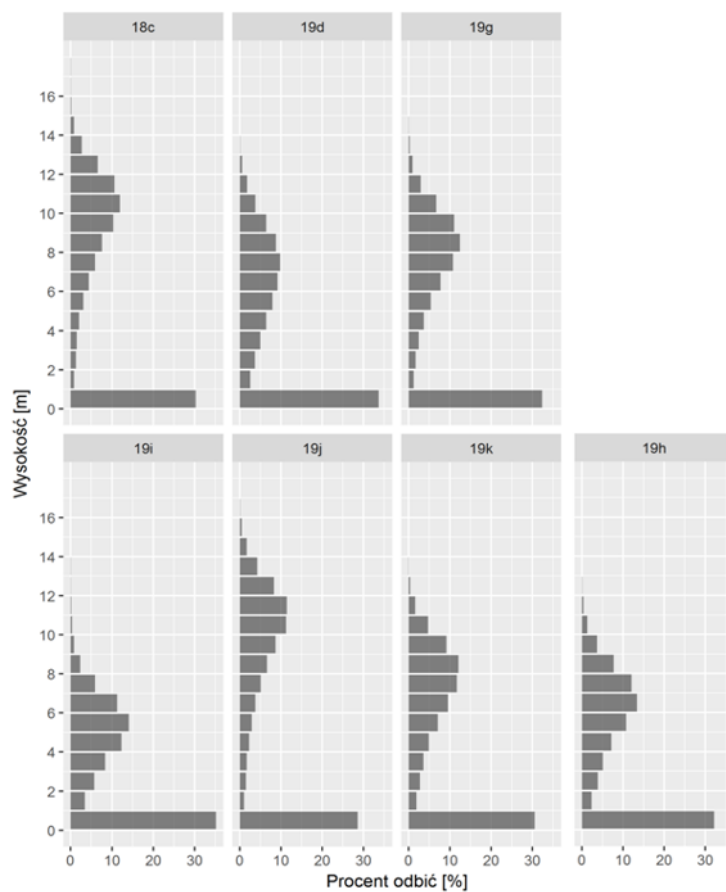
a)

b)

Rys. 6. Mapy: a) - wysokości drzewostanów 95-ty percentyl (Elev.p95). Legenda: gradient kolorów: od niebieskiego (0.0 m) do czerwonego (26.0 m);
 b) - zwarcia poziome koron (próg równy wysokości podstawy korony; H_{pk}). Legenda: gradient kolorów: od czerwonego (0.0%) do zielonego (100.0%).

Tabela 3. Objętość koron drzew oraz objętość przestrzeni podokapowej (ALS).

Wydz.	Objętość części koronowej [m ³]	Objętość części podkoronowej [m ³]	Objętość razem [m ³]	Udział części koronowej [%]	Udział części podkoronowej [%]
19g	79610	123781	203391	39.1	60.9
19h	110469	65158	175628	62.9	37.1
19i	62319	44913	107232	58.1	41.9
19k	50970	69993	120963	42.1	57.9
19j	53777	93512	147290	36.5	63.5
19d	114498	142040	256538	44.6	55.4
18c	46820	74905	121726	38.5	61.5



Rys. 7. Histogramy rozkładu przestrzennego punktów LiDAR w 1.0 m przedziałach wysokościowych dla analizowanych wydziałów.

W zakresie przetwarzania chmur punktów TLS, do prezentacji wybrano wyniki określania cech biometrycznych dla drzewostanu w wydzielaniu 18c, tj.: H_w [m] – wysokość wierzchołka; X [m] – szerokość korony; L_k [m] – długość korony; H_{pk} [m] – wysokość podstawy korony (tabela 4) oraz N – liczba pni na pow. kołowej [szt.]; N/ha – średnia liczba pni na 1 ha (zagęszczenie na jednostce powierzchni); DBH – średnia pierśnica [cm]; g [m²] – suma przekrojów pierśnicowych drzew na pow. kołowej [m²]; G – pierśnicowe pole przekroju drzewostanu w przeliczeniu na ha [m²/ha] (tabela 5).

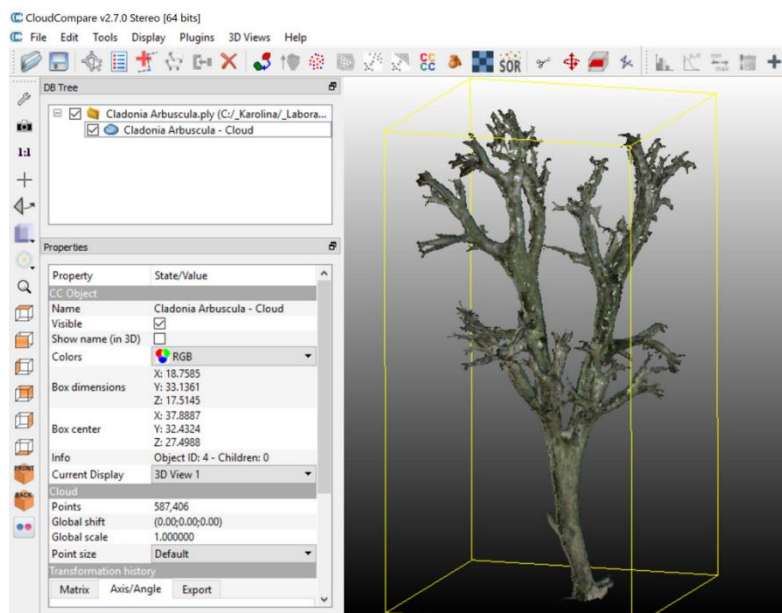
Tabela 4. Uśrednione cechy biometryczne drzew określone na podstawie TLS dla wydzielania 18c: H_w – wysokość wierzchołka; L_k – długość korony; H_{pk} – wysokość podstawy korony; X – szerokość korony.

Pole testowe	H_w [m]	L_k [m]	H_{pk} [m]	X [m]
18c_01	13.4	5.6	7.8	2.2
18c_02	13.4	5.5	7.8	1.9
18c_06	11.7	5.3	6.4	2.0
Średnia	12.8	5.4	7.3	2.0

Tabela 4. Cechy biometryczne określone na podstawie TLS dla wydzielania 18c: N – liczba pni na pow. kołowej [szt.]; N/ha – średnia liczba pni na 1 ha; DBH – średnia pierśnica; g – suma przekrojów pierśnicowych drzew na pow. kołowej; G – pierśnicowe pole przekroju drzewostanu w przeliczeniu na ha.

Pole testowe	N [szt.]	N/ha [szt./ha]	DBH [cm]	g [m ²]	G [m ² /ha]
18c_01	33	3300	12.1	0.4119	41.19
18c_02	30	3000	12.4	0.3932	39.32
18c_03	33	3300	10.3	0.3174	31.74
18c_04	34	3400	9.6	0.2870	28.70
18c_05	27	2700	10.6	0.2736	27.36
18c_06	33	3300	10.9	0.3463	34.63
18c_07	37	3700	10.0	0.3208	32.08
18c_08	28	2800	11.4	0.3150	31.50
ŚREDNIA	32	3188	10.9	0.3332	33.32

W zakresie efektów przetwarzania chrobotków do modeli 3D wybrano chmurę punktów (*.ply) RGB plechy chrobotka leśnego (*Cladonia arbuscula*; Rys. 8). Wszystkie analizowane plechy chrobotków dostępne są w aplikacji Sketchfab.com pod adresem (<https://sketchfab.com/dabbartek3d/collections/chrobotki-3d-bory-tucholskie>).



Rys. 8. Chmura punktów (*.ply) RGB plechy chrobotka leśnego (*Cladonia arbuscula*).

5. WNIOSKI

Zaprezentowane wyniki są efektem badań przeprowadzonych w 2017 przed rozpoczęciem zabiegów z zakresu ochrony czynnej borów chrobotkowych w PNBT. Jesienią 2017 i latem 2018 przeprowadzono zabiegi polegające na usunięciu znaczącej liczby drzew z analizowanych wydzieleń, co ma w efekcie doprowadzić do zwiększonego dopływu światła do dna drzewostanu. Na części wydzieleń usunięto także nadkładową warstwę ściółki oraz mszaków w celu obserwacji procesu zasiedlania obszaru przez chrobotki. W roku 2018 badania struktury przestrzennej drzewostanów z wykorzystaniem chmur punktów LiDAR ALS oraz TLS są kontynuowane. Pozwolą one na określenie zmian jakie zaszły w strukturze drzewostanów jako jednego z ważniejszych czynników warunkujących występowanie chrobotków poprzez kształtowanie podkapowych warunków mikroklimatycznych.

6. INFORMACJE DODATKOWE

Opracowanie zostało zrealizowane w ramach projektu: „Wykorzystanie danych LiDAR do określenia znaczenia struktury przestrzennej drzewostanów sosnowych w zachowaniu borów chrobotkowych na terenie Parku Narodowego Bory Tucholskie”, zleconego przez Park Narodowy „Bory Tucholskie”, przy finansowaniu ze środków Funduszu Leśnego PGL Lasy Państwowe w 2017 roku.

LITERATURA

- Banaszak J., Tobolski K., 2002. Park Narodowy „Bory Tucholskie”. *Park Narodowy „Bory Tucholskie”*.
- Bienert A., Scheller S., Keane E., Mullooly G., Mohan F. 2006: Application of terrestrial laserscanners for the determination of forest inventory parameters. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5).
- Danielewicz W., Pawlaczyk P., 2004. Śródładowy bór chrobotkowy. [w:] *Lasy i bory. Poradniki ochrony siedlisk i gatunków Natura 2000 – podręcznik metodyczny*, tom 5. Herbich J. (red.), Ministerstwo Środowiska, Warszawa, 289–298.
- Dingová Košuthová A., Svitková I., Pišut I., Senko D., Valachovič M. 2013. The impact of forest management on changes in composition of terricolous lichens in dry acidophilous Scots pine forests. *Lichenologist*, 45, 413-425.
- Ermakov N., Morozova O., 2011. Syntaxonomical survey of boreal oligotrophic pine forests in northern Europe and Western Siberia. *Applied Vegetation Science*, 14, 524–536.
- Hopkinson C., Chasmer L., Young-Pow C., Treitz, P., 2004: Assessing forest metrics with a ground-based scanning lidar. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(3), 573-583.
- Hyypä J., Hyypä H., Litkey P., Yu X., Haggren H., Rönholm P., Pyysalo U., Pitkanen J., Maltamo M., 2004. Algorithms and methods of airborne laser-scanning for forest measurements. Thies M., Koch B., Spiecker H. i Weinacker H. (eds.): *Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment: Proceedings of the ISPRS Working Group VIII/2*. Freiburg, Germany. *ISPRS Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 36, 8.
- Kurczyński Z., Bakula K., 2013. Generowanie referencyjnego Numerycznego Modelu Terenu o zasięgu krajowym w oparciu o lotnicze skanowanie laserowe w projekcie ISOK. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 59-68.
- Lipnicki L. 2003. Porosty Borów Tucholskich. *Wydawnictwo Parku Narodowego Bory Tucholskie*, Charzykowy.
- Maas H., Bienert A., Scheller S., Keane E., 2008: Automatic forest inventory parameter determination from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing*, 29(5), 1579-1593.
- Maier B., Tiede, D., Dorren L., 2008. Characterising mountain forest structure using landscape metrics on LIDAR-based canopy surface models, *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography*, Object-Based Image Analysis, 625-643.
- Maltamo M., Naesset E., Vauhkonen J., 2014. *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning. Concepts and Case Studies*. Springer.
- Matuszkiewicz W., Matuszkiewicz, J., 1973. Przegląd fitosocjologiczny zbiorowisk leśnych Polski. Cz. 2. Bory sosnowe. Phytocoenosis. *Biuletyn Fitosocjologiczny*, 2, 273–356.
- McGaughey R. J., Carson W., Reutebuch S., Andersen, H. E., 2004. Direct measurement of individual tree characteristics from lidar data. *Proceedings of the Annual ASPRS Conference*. Denver. American Society of Photogrammetry and Remote Sensing.

- McGaughey R.J., 2015. *FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization*. USDA Forest Service, Pacific Northwest Research Station: Seattle, WA, USA.
- Naesset E., 2002. Predicting forest stand characteristics with airborne scanning laser using a practical two-stage procedure and field data. *Remote Sensing of Environment*, 80, 80-99.
- Ostrowski W., Górski K., Pilarska M., Salach A., Bakuła K., 2017. Comparison of the laser scanning solutions for the Unmanned Aerial Vehicles. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 29, 101-123.
- Thies M., Pfeifer N., Winterhalder D., Gorte, B., 2004: Three-dimensional reconstruction of stems for assessment of taper, sweep and lean based on laser scanning of standing trees. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(6), 571-581.
- Watt P.J., Donoghue D.N.M., 2005. Measuring forest structure with terrestrial laser scanning. *International Journal of Remote Sensing*, 26(7), 1437-1446
- Węgrzyn M., Masłowska M., 2010. *91T0 Śródlądowy bór chrobotkowy*. [w]: *Monitoring siedlisk przyrodniczych. Przewodnik metodyczny*. Część pierwsza, Mróz W. (Red), Inspekcja Ochrony Środowiska, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa, pp. 295–311.
- Węgrzyn M., Wietrzyk P., 2017. Stan zachowania i propozycje czynnej ochrony borów chrobotkowych (zespół Cladonio-Pinetum) w Parku Narodowym „Bory Tucholskie”. *Chrońmy Przyrodę Ojczyznę*, 73(1), 17–29.
- Wężyk P., Hawryło P., Szostak M., 2016. Determination of the number of trees in the Bory Tucholskie National Park using crown delineation of the canopy height models derived from aerial photos matching and Airborne Laser Scanning data. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 28, 137-156.
- Wężyk P., Koziół K., Glista M., Pierzchalski M., 2007. Terrestrial laser scanning versus traditional forest inventory. First results From the Polish forests. *ISPRS Volume XXXVI, Part 3/W52*. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, September 12-14, 2007, Finland, 424-429
- Wężyk P., Tompalski P., 2010. Określanie parametru zagęszczenia drzew w drzewostanach sosnowych na podstawie analizy chmury punktów naziemnego skaningu laserowego *Roczniki Geomatyki*, 8, 7(43), 83-90.
- Wężyk P., Tompalski P., de Kok R., Szostak M., Kukawski M., 2010. Metoda szacowania liczby drzew w drzewostanie z wykorzystaniem danych ALS i ortoobrazów. *Sylwan*, 154, 773–782.
- Wężyk P., Tompalski P., Szostak M., Glista M., Pierzchalski M., 2008. Describing the selected canopy layer parameters of the Scots pine stands using ALS data. 8th International conference on LiDAR applications in forest assessment and inventory. SilviLaser 2008, Edinburgh, pp. 636-645.
- Zhen Z., Quackenbush L.J., Zhang L., 2016. Trends in Automatic Individual Tree Crown Detection and Delineation—Evolution of LiDAR Data. *Remote Sensing*, 8, 1–26.

USING LIDAR DATA FOR MONITORING OF FOREST LICHEN COMMUNITIES IN "BORY TUCHOLSKIE" NATIONAL PARK

KEY WORDS: point clouds, airborne and terrestrial laser scanning, Bory Tucholskie National Park, 3D modelling

Summary

Forest lichen communities develop on dry and poor in biogens sandy areas. The center of occurrence of this plant community in Europe coincides with Natura 2000 sites located in Poland, including the Bory Tucholskie National Park (BT NP). The aim of the study was to determine the spatial structure of selected Scots pine stands of BT NP, where a program of active protection of lichen communities was initiated. The research area included two forest compartments: 18 and 19. The analysis was performed in the following sub-compartments: 18c, 19d, 19g, 19h, 19i, 19j and 19 k. The research was carried out using airborne (ALS) and terrestrial (TLS) laser scanning (LiDAR). Thanks to the use of LiDAR technology, it was possible to make a very precise description of the structure of stands in 2D and 3D space. As a result of the conducted study, a number of stand parameters have been defined, such as: number of trees, tree density in the stand, number of live trees, average distance between living trees, number of dead trees, basal area, horizontal cover of tree crowns, crown penetration ratio, average height of trees, height of the crown base, tree crown length, crown layer volume, 2D and 3D crown surface, average crown radius, canopy relief ration and vertical range of dead branches. A map of crown gaps with an area of more than 2 m² was also developed. Research activities with the use of laser scanning technology is continued in 2018 (repeated ALS and TLS scanning). The conducted research will allow to determine the influence of the stand structure on factors influencing the occurrence of lichens, including: shaping of microclimatic conditions.

Dane autorów / Authors details

dr hab. inż. Piotr Wężyk
e-mail: p.wezyk@ur.krakow.pl
telefon: +48 12 6625082
fax: +48 12 4119715

Przesłano / Submitted 9.11.2018
Zaakceptowano / Accepted 29.12.2018