

**AKTUALIZACJA BAZ DANYCH SILP ORAZ LEŚNEJ MAPY NUMERYCZNEJ
W OPARCIU O DANE Z LOTNICZEGO SKANINGU LASEROWEGO**

**UPDATING SILP AND DIGITAL FOREST MAP DATA BASES USING AIRBORNE
LASER SCANNING**

Piotr Węzyk, Marta Szostak, Piotr Tompalski

Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Wydział Leśny, Katedra Ekologii Lasu,
Laboratorium GIS i Teledetekcji

SŁOWA KLUCZOWE: SILP, LMN, lotniczy skaniny laserowy, NMT, NMPT, inwentaryzacja lasu

STRESZCZENIE: Celem pracy było zaimplementowanie danych pozyskanych technologią lotniczego skaningu laserowego (ALS) w zautomatyzowanej procedurze aktualizacji granic pododdziałów, tj. przebiegu wektorów obiektów podstawowych Leśnej Mapy Numerycznej (LMN) oraz weryfikacji atrybutu wysokości drzewostanów, zapisanej w bazie danych Systemu Informatycznego Lasów Państwowych (SILP). Obiektami testowymi były obręby w Nadleśnictwach Milicz (Milicz) i Chojna (Piasek). Obszar badań w każdym z obrębów obejmował ok. 6 000 ha lasów, z czego blisko 80% stanowiły drzewostany sosnowe. Prace rozpoczęto od aktualizacji przebiegu granic wektora (SHAPE) pododdziałów zapisanych w bazie geometrycznej LMN w oparciu o modele generowane z chmury punktów ALS oraz obraz cyfrowej ortofotomapy. Następnie przeprowadzono aktualizację atrybutowej bazy danych SILP/LAS. Określenie wysokości całego drzewostanu oparto na powierzchni pododdziału z wyłączeniem luk, wykorzystując analizę chmury punktów ALS, tj. 95 percentyl. W celu porównania wyników do danych referencyjnych zbieranych metodami tradycyjnymi (SILP), wygenerowano modele rastrowe (GRID) wysokości drzewostanów określone metodą ALS (H_{ALS}) oraz H_{SILP} . W obu obrębach stwierdzono zaniżenie wartości wysokości z bazy SILP/LAS. Średnia różnica (H_{DIFF}) wyznaczenia wysokości metodą ALS w stosunku do SILP wyniosła dla obrębu Piasek i Milicz, przy uwzględnieniu znaków odchyłek, odpowiednio +0.9 m oraz +2.3 m, natomiast w przypadku wartości bezwzględnych 2.1 m oraz 3.2 m. Ustalono, że zasadniczą rolę w wartości błędu odegrały licznie występujące drzewostany młodszych klas wieku.

1. WPROWADZENIE

Od ponad 15 lat w Lasach Państwowych stosowany jest System Informatyczny Lasów Państwowych (SILP), będący standardem we wszystkich 431 nadleśnictwach. System ten, w jednym ze swych modułów (LAS), zawiera bazę szczegółowych informacji opisowych (atrybutów) o każdym z 8 milionów pododdziałów będących w administracji PGL LP. Poprzez wykonanie relacji w oprogramowaniu GIS, tablice SILP/LAS mogą zostać połączone relacją z bazą geometryczną, tj. – Leśną Mapą Numeryczną (LMN). Razem tworzą poprawną topologicznie warstwę przestrzenną zawierającą wiele atrybutów pochodzących z leśnej inwentaryzacji i planu urządzania lasu. Biorąc pod uwagę przepisy zawarte

w Instrukcji Urządzania Lasu (IUL 2003), baza opisowa (SILP/LAS) oraz geometryczna (LMN), powinny być okresowo aktualizowane na podstawie danych zebranych podczas pomiarów terenowych (np. GPS) bądź też dostępnych zobrazowań (głównie ortofotomapy lotnicze) poza cyklicznym, wykonywanym, co 10 lat, nowym planem urządzania gospodarstwa leśnego. Coraz częściej Biura Urządzania Lasu i Gospodarki Leśnej (BULiGL), wykonujące prace inwentaryzacyjne, zamawiają wykonanie ortofotomap lotniczych by aktualizować mapy, jakie powstały na drodze wektoryzacji dokumentów papierowych. Dodatkowo takie zjawiska jak wiatrolomy czy pożary stają się coraz częstsze i wymagają aktualizacji materiałów kartograficznych i zmian w bazach opisowych. Poza pilotowymi projektami (Będkowski, Stereńczak 2008; Wężyk, Solecki 2008; Wężyk *et al.* 2008a, 2008b) dotyczącymi wykorzystania technologii lotniczego skaningu laserowego (ang. ALS; Airborne Laser Scanning) w pracach z zakresu urządzania i inwentaryzacji lasu, brakuje wciąż przepisów i instrukcji wykonawczych, które umożliwiłyby na szeroką skalę implementację tej technologii.

Lotniczy skaningu laserowy jest technologią teledetekcyjną, dzięki której pozyskiwana zostaje chmura punktów o współrzędnych XYZ z bardzo wysoką dokładnością (ok. ± 15 cm Z; ± 30 cm XY). Odpowiednie metody filtracji i klasyfikacji zbiorów punktów prowadzą do wygenerowania wysokiej jakości modeli w tym: Numerycznego Modelu Terenu (NMT; ang. DTM), Numerycznego Modelu Powierzchni Terenu (NMPT; ang. DSM) oraz pochodnego produktu jakim jest znormalizowany Numeryczny Model Powierzchni Terenu (zNMPT; ang. nDSM) reprezentujących aproksymowaną powierzchnię obiektów (Axelsson 2000; Wężyk *et al.* 2008a). Dokładne modele terenu mają bardzo wiele zastosowań w gospodarce leśnej ale mogą służyć także badaniom ekologicznym nad biomasa czy sekwestracją węgla (Gołuch *et al.* 2009; Wężyk *et al.* 2008b). Technologia ALS jest w stanie dostarczać precyzyjnych informacji dla dużych obszarów o rzeźbie terenu jak i o cechach opisujących strukturę roślinności, w tym wybrane parametry drzewostanów takie jak choćby ich wysokość (McGaughey *et al.* 2004). Wysokość drzew jest niezmiernie ważną cechą taksacyjną określaną tradycyjnymi metodami (wysokościomierze) podczas inwentaryzacji lasu.

Wysokość drzew jest wypadkową takich czynników jak: gatunek i wiek drzewa, jakość siedliska czy kondycja drzewa, jednocześnie obrazując efekty zabiegów gospodarczych i zdarzeń losowych zachodzących w drzewostanie. Pomiar wysokości wszystkich drzew w drzewostanie był do tej pory niemożliwy do przeprowadzenia ze względu na czasochłonność i stosowaną metodykę prac inwentaryzacyjnych. Często błąd określenia wysokości przez taksatora posługującego się nawet precyzyjnym wysokościomierzem (jak Vertex III; Haglöf) może przekraczać dopuszczalne w instrukcjach 5% i wiąże się zwykle z dużą subiektywnością wskazania wierzchołka drzewa oraz jego pochyleniem. Pomiar wysokości stosuje się jedynie do nielicznej reprezentacji drzew na powierzchniach kołowych w wybranych drzewostanach poszczególnych grup stratyfikacyjnych. Wybór miejsca lokalizacji powierzchni kołowej choć ma charakter stochastyczny (regularna siatka) to może prowadzić do analizy niereprezentatywnej grupy (np. lokalna zmienność mikrosiedliska). Zaletą technologii ALS w takim przypadku jest określenie wartości średniej dla całego analizowanego pododdziału z pominięciem luk czy biogrup innych gatunków na podstawie statystyk pionowego rozkładu chmury punktów ALS.

Celem prezentowanej pracy było udokumentowanie przydatności danych lotniczego skaningu laserowego oraz generowanych na ich podstawie numerycznych modeli do

aktualizacji baz danych: geometrycznej – LMN oraz opisowej – SILP/LAS. Opracowano i przetestowano metodykę automatycznego procesu przetwarzania chmur punktów ALS zintegrowaną z analizami przestrzennymi GIS, w kierunku korekcji geometrii obiektów podstawowych tworzących LMN, w tym detekcji: luk, polan, nowych zrębów, wiatrołomów czy obszarów o niskim zwarcie drzewostanu (halizny). Wyniki automatycznego procesu weryfikacji i aktualizacji baz danych geometrycznych i atrybutowych (wysokość) w oparciu o ALS porównano do danych referencyjnych tworzonych metodami tradycyjnymi poprzez ekranową wektoryzację ortofotomapy lotniczej wzmocnionej informacją wysokościową z zNMPT. Dane referencyjne dotyczące wysokości drzewostanu pochodziły z SILP i zostały pozyskane w terenie metodami tradycyjnymi w roku poprzedzającym naloty ALS.

2. TEREN BADAŃ

Jako teren badań wybrano obręb Milicz (nr 1) zlokalizowany w Nadleśnictwie Milicz (RDLP Wrocław; 51° 27" N; 17° 12" E) oraz obręb Piasek w Nadleśnictwie Chojna (RDLP Szczecin; 52° 57" N; 14° 25" E). Przy wyborze obiektów badawczych kierowano się przede wszystkim ich średnią na warunki Polski wielkością oraz aktualnością baz danych. Pozostała charakterystyka, obiektów badań związana była z ich kształtem (kompaktowy, regularny), wiekiem drzewostanów (średnio 60 lat) oraz zróżnicowaniem gatunkowym (udział sosny zwyczajnej *Pinus sylvestris* > 70%; Tabela 1) a także układem siedlisk leśnych, jak również zróżnicowaniem rzeźby terenu (Zajączkowski, Wężyk 2007).

Tab. 1. Skład gatunkowy drzewostanów w obrębach Nadleśnictw Chojna i Milicz

Gatunek	Powierzchnia analizowana w N-ctwie [ha]		Udział powierzchni [%]		Analizowana liczba wydzieleń [szt.]	
	Chojna	Milicz	Chojna	Milicz	Chojna	Milicz
So	4 275.21	4393.43	74.39	82.06	1 032	1 084
Bk	407.57	356.33	7.09	6.66	111	73
Db	584.42	308.21	10.17	5.76	183	95
Ol cz	132.93	104.92	2.31	1.96	85	75
inne	347.24	190.93	6.04	3.57	154	107
Razem	5 747.37	5 353.82	100.00	100.00	1 565	1 434

3. METODYKA

Dla obrębu Piasek w Nadleśnictwie Chojna we wrześniu 2006 roku (rok po pracach inwentaryzacyjnych) na zlecenie Instytutu Badawczego Leśnictwa w Warszawie, firma ProGea Consulting przeprowadziła lotniczy skaning laserowy (ALS) przy wykorzystaniu śmigłowca oraz skanera RIEGL LMS-Q560 (typ full waveform). Podczas lotu wykonano zdjęcia lotnicze cyfrową kamerą Rolleiflex 6008 digital metric (rozdzielczość terenowa obrazu około 7 cm). Średnie zagęszczenie chmury punktów wynosiło około 4 pkt./m². Dane ALS dla Nadleśnictwa Milicz zostały pozyskane w ramach projektu badawczego realizo-

wanego na zlecenie Dyrekcji Generalnej Lasów Państwowych w lipcu 2007 roku przy wykorzystaniu skanera Falcon II firmy TopoSys. Średnia gęstość zarejestrowanych punktów wyniosła 7 pkt./m² (Stereńczak 2009; Wężyk *et al.* 2008b). Podczas nalotu dokonano rejestracji wielospektralnym skanerem liniowym Toposys (16 Bit; 4 kanały: R, G, B, NIR; rozdzielczość terenowa 0.25 m; GoeTIFF), uzyskując ortoobraz bliski tzw. rzeczywistej ortofotografii (ang. *true ortho*).

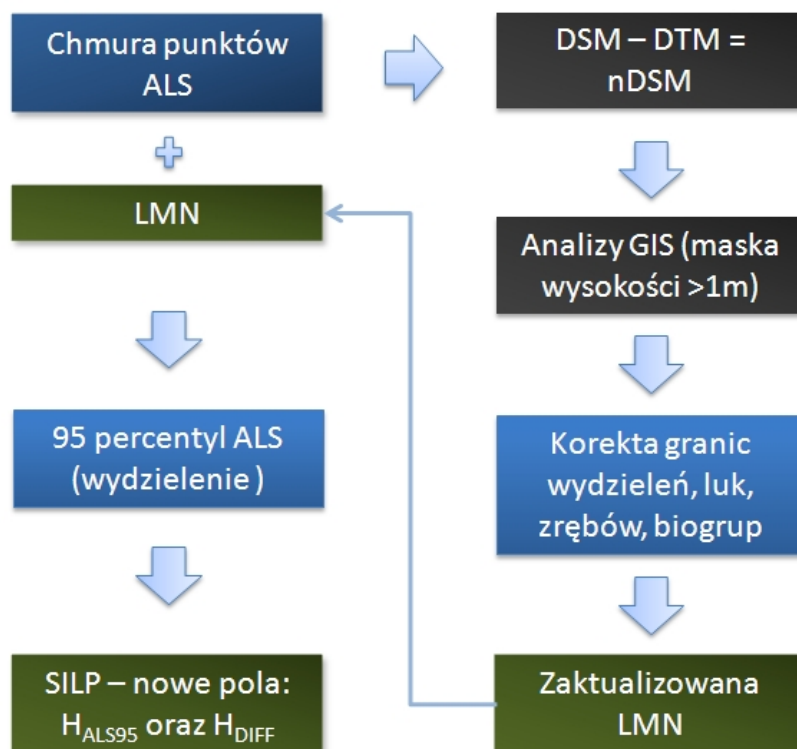
Po wyrównaniu geometrycznym szeregów przez wykonawców (Milan Flug oraz TopoSys) dane ALS zostały zapisane w postaci plików ASCII z zachowaniem kolejnego echa sygnału (FE oraz LE) oraz intensywności.

Posługując się oprogramowaniem Terrascan i Terramodeler (Terrasolid Ltd.), a także FUSION (USDA Forest Service, McGaughey 2007) wygenerowano: NMT (algorytm w oprogramowaniu Terrascan autorstwa Axelsson 2000) oraz Numeryczny Model Powierzchni Terenu zapisując je do postaci siatki o oczku 1.0 m (ASCII). Bardzo ważnym etapem przetwarzania danych było uzyskanie poprawnego znormalizowanego Numerycznego Modelu Powierzchni Terenu, na który wpływ ma zarówno dokładność NMT jak i NMPT. Parametry generowanego modelu NMPT dobrano na podstawie wcześniejszych prac zespołu (Tompalski *et al.* 2009). Na poszczególnych etapach przetwarzania danych takich jak wektoryzacja ekranowa czy generowanie modeli rastrowych (GRID) z danych referencyjnych (SILP) oraz automatyzacja analiz przestrzennych GIS wykorzystano ArcGIS 9.3 (ESRI) w tym narzędzia ModelBuilder. Ze względu na dużą ilość danych zastosowano makropolecenia i tryb wsadowy, przy czym chmurę punktów przetwarzano po uprzednim jej podziale na regiony 1000 × 1000 m.

Pozyskanie danych referencyjnych do aktualizacji baz geometrycznych polegało na weryfikacji przebiegu granic pododdziałów LMN. Przeprowadzana była ona przez operatora na ekranie komputera. Większość modyfikacji dotyczyła zmiany przebiegu granic pododdziałów (linii podziału) ale wektoryzowano także nowe obiekty (tzw. „luki”) wewnątrz drzewostanów. Weryfikacji i aktualizacji dokonano na obrazie cyfrowej ortofotomozajki wzmocnionej barwną kompozycją modelu zNMPT (Wężyk *et al.* 2008b; Tompalski *et al.* 2009). Model ten poddano reklasyfikacji powyżej i poniżej 1.0 m. W ten sposób uzyskano obszary z pokrywą drzewostanu (ID = 0) oraz jej pozbawione (luki, zręby, halizny; ID = 1). Na uzyskanych w ten sposób klasach przeprowadzono generalizację, eliminując obszary mniejsze niż 200 m², które nie spełniały warunków zdefiniowanych w IUL (2003) jako luki.

Po uzyskaniu poprawnego i aktualnego wektora LMN przeprowadzone zostały prace w kierunku aktualizacji wysokości drzewostanu w opisowej bazie danych SILP/LAS. Wysokość (średnia całego pododdziału z wyłączeniem wykrytych luk; H_{95ALS}) zweryfikowanych geometrycznie pododdziałów określano w oparciu o algorytmy zawarte w programie FUSION (McGaughey 2007) wykorzystując w tym celu wartość 95 percentyla znormalizowanej chmury punktów.

Na podstawie bazy danych SILP/LAS wygenerowano obrazy rastrowe (GRID) reprezentujące wysokość drzewostanów gatunku głównego (H_{SILP}) wg inwentaryzacji przeprowadzonej metodami tradycyjnymi. W dalszych krokach model H_{SILP} porównywano z modelem wysokości ALS (H_{95ALS}), uzyskując w ten sposób raster obrazujący różnice modelu wysokości drzewostanów (H_{Diff}). W bazie danych SILP utworzono dwa nowe pola: H_{95ALS} oraz H_{Diff} i wypełniono je wartościami w trybie automatycznym z wykorzystaniem aplikacji ModelBuilder (ESRI; rys. 1).



Rys. 1. Metoda aktualizacji baz danych SILP oraz LMN przy wykorzystaniu danych ALS

4. WYNIKI

Weryfikacja i aktualizacja bazy geometrycznej LMN

W wyniku przeprowadzonej fotointerpretacji i wektoryzacji ekranowej ortofotomozaiki oraz zNMPT dla obszaru badań w Nadleśnictwie Chojna, operator wyszczególnił 244 luki (wartość średnia = 0.28 ha) o łącznej powierzchni 68.80 ha. Automatyczna analiza oparta na klasyfikacji zNMPT wykazała jednak mniejszą powierzchnię, bo 58.58 ha (342 luki; wartość średnia 0.17 ha). Różnica zastosowania tych dwóch metod osiągnęła 10.22 ha, co stanowiło 14.8%. Zgodność lokalizacji luk dla obu metod stwierdzono w przypadku 206 obiektów (84.4%) przyjmując za referencję fotointerpretację dokonaną przez operatora (Tabela 2). W przypadku obrębu Milicz automatycznie wykryte luki w liczbie 928 (niemal dwa razy więcej niż dane referencyjne) stanowiły 375.54 ha (+10.1% więcej od referencji). Średnia wielkość automatycznie wykrytej luki różniła się o +43.3% od średniej wartości określonej manualnie, przy czym ich zgodność lokalizacji była bardzo zbliżona (85.6%) do wyników osiągniętych dla obrębu Piasek.

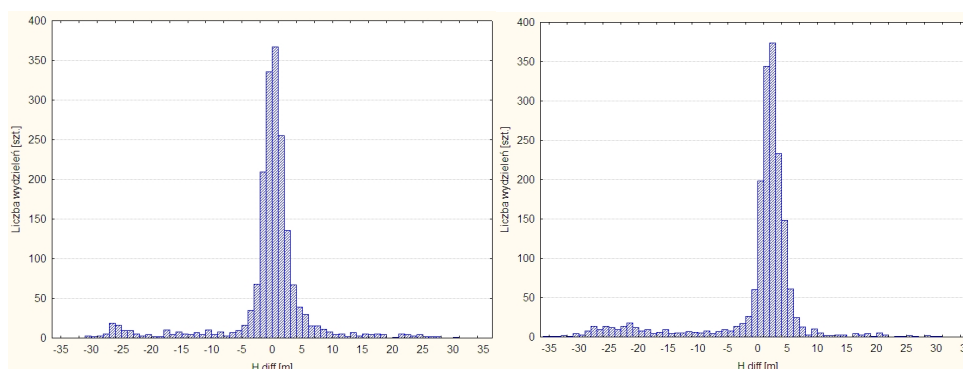
Tab. 2. Wyniki aktualizacji bazy geometrycznej LMN metodami: manualnej wektoryzacji ekranowej oraz na drodze automatycznego przetwarzania danych ALS

Typ aktualizacji	Powierzchnia [ha]	Liczba luk [szt.]	Średnia powierzchnia [ha]	Poprawna lokalizacja [szt.]
Obwód Piasek				
manualna – ortofotomozajka/zNMPT	68.80	244	0.28	244
automatyczna zNMPT (ALS)	58.58	342	0.17	206
Różnica	10.22	98	0.11	38
Obwód Milicz				
manualna – ortofotomozajka/zNMPT	341.18	478	0.71	478
automatyczna zNMPT (ALS)	375.54	928	0.40	409
Różnica	34.36	450	0.31	69

W celu weryfikacji wysokości drzewostanów zapisanych w bazie SILP dokonano porównania do wartości H_{95ALS} dla obu analizowanych obwodów. Sprawdzone istotność różnic (STATISTICA 9) wykorzystując nieparametryczny test Wilcoxona dla par zmiennych. Wykazał on, że różnice w każdym z analizowanych obwodów zarówno pododdziału jak i poszczególnych gatunków głównych, były w większości wysoce istotne ($p < 0.05$). Jedynie drzewostany sosnowe starszych klas wieku (>60 lat) w obrębie Piasek (N-ctwo Chojna) nie wykazywały istotności różnic (poza klasą V).

Analiza wartości różnic wysokości (H_{Diff}) wszystkich drzewostanów określanych dwoma metodami (ALS i pomiar terenowy) w obrębach Nadleśnictwach Chojna oraz Milicz wykazała, iż przy uwzględnianiu znaków odchyłek metoda tradycyjna (referencja) zaniża jednak wynik odpowiednio o wartość $+0.90$ m (Piasek) oraz $+2.28$ m (Milicz). Jeżeli analizować jedynie wartości bezwzględne różnicy dla wszystkich drzewostanów to wzrastają one odpowiednio do 2.06 m i 3.19 m (Tabela 3). Uwzględniając powierzchnię poszczególnych pododdziałów (wagując różnicę wysokości powierzchnią poligonu) uzyskano wartości H_{Diff} wynoszące $+0.60$ m oraz $+2.38$ m (przy uwzględnieniu znaków odchyłek) oraz 1.52 m i 2.70 m (wartości bezwzględne bez znoszenia się znaków odchyłek). Dla obu analizowanych obwodów stwierdzono jednoznacznie zniżenie wartości zapisanej w bazie SILP/LAS, wprowadzanej na podstawie naziemnych pomiarów wykonywanych wysokościomierzem dla próby kliku drzew na powierzchni kołowej (Rys. 2).

Średnia różnica określenia wysokości wszystkich drzewostanów sosnowych metodą ALS w stosunku do tradycyjnej wyniosła $+0.57$ m (Piasek) oraz $+2.21$ m (Milicz). Jeśli jednak wszystkie wartości H_{Diff} potraktować jako wartości bezwzględne to okazuje się, że średnia różnica wzrasta ponad 3 krotnie do poziomu 1.76 m dla obrębu Piasek a w przypadku obrębu Milicz utrzymuje się na podobnym poziomie (2.83 m). Analizując te wyniki pod kątem udziału powierzchniowego poszczególnych drzewostanów sosnowych stwierdzono, iż średni błąd wysokości drzewostanu sosnowego określonego metodą ALS w stosunku do danych referencyjnych wyniósł $+0.41$ m dla obrębu Piasek oraz $+2.33$ m dla obrębu Milicz. Analizując jedynie wartości bezwzględne (bez znoszenia się znaków przeciwnych) wartości te osiągnęły poziom 1.34 m (Piasek) oraz 2.55 m (Milicz).



Rys. 2. Histogramy liczności pododdziałów w poszczególnych stopniach odchyłki dla obrębu Piasek (z lewej) oraz Milicz (z prawej)

W przypadku analizowanych pozostałych liściastych gatunków głównych w obrębach Piasek i Milicz, średnia różnica wysokości (H_{Diff}) w wariancie uwzględnienia znaków odchyłek i przy zastosowaniu wartości bezwzględnych (moduł) przyjęła odpowiednio wartości: Bk +1.63 m oraz +3.61 m (2.51 m i 3.93 m), Db +1.67 m i +2.28 m (2.89 m i 4.96 m) oraz Ol cz. +1.00 m i +1.22 m (2.31 m i 4.96 m). W sytuacji zastosowania wagi jaką była powierzchnia poszczególnych pododdziałów uzyskano odpowiednio wyniki: Bk +1.37 m i +2.59 m (2.21 m i 2.85 m), Db +1.09 m i +2.84 m (2.10 m i 3.86 m) oraz Ol cz. +1.43 m i +2.07 m (2.20 m i 3.58 m). Wyraźnie w przypadku drzewostanów liściastych różnica wysokości określonej metodą ALS w stosunku do tradycyjnej okazała się być większa niż w przypadku drzewostanów sosnowych, ale ze względu na niewielki udział powierzchniowy (około 20% powierzchni analizowanych obrębów), nie miała znaczącego wpływu na końcowe wyniki. W przypadku wszystkich analizowanych gatunków uzyskane wyniki były odwrotne niż cytowane przez wielu autorów zaniżanie pomiaru wysokości drzew w przypadku metody ALS (Andersen *et al.* 2006; Hyypä, Inkinen 2004; Persson *et al.*, 2002; Maltamo *et al.*, 2004; McGaughey *et al.*, 2004; Abraham *et al.*, 2006). Chmura punktów ALS nie może fizycznie przewyższać wierzchołków drzew, stąd prawdopodobnie dane referencyjne obarczone były błędem pomiarowym.

Tab. 3. Różnica wysokości (H_{Diff}) drzewostanów pomiędzy metodami ALS oraz tradycyjnymi pomiarami (SILP)

Gatunek główny	Średnia H_{Diff} [m]		Średnia H_{Diff} moduł [m]		Średnia H_{Diff} ważona powierzchnią [m]		Średnia H_{Diff} ważona powierzchnią moduł [m]	
	Piasek	Milicz	Piasek	Milicz	Piasek	Milicz	Piasek	Milicz
Wszystkie	+0.90	+2.28	2.06	3.19	+0.60	+2.38	1.52	2.70
So	+0.57	+2.21	1.76	2.83	+0.41	+2.33	1.34	2.55
Bk	+1.63	+3.61	2.51	3.93	+1.37	+2.59	2.21	2.85
Db	+1.67	+2.28	2.89	4.96	+1.09	+2.84	2.10	3.86
Ol cz.	+1.00	+1.22	2.31	4.06	+1.43	+2.07	2.20	3.58

5. WNIOSKI

Otrzymane wyniki dowiodły możliwości wykorzystania danych laserowych ALS w zautomatyzowanym procesie aktualizacji baz danych GIS, tj. bazy geometrycznej (korekcja przebiegu granic LMN) oraz opisowej (atrybutów wysokość drzewostanu (SILP)). Wykorzystanie automatycznego trybu analizy modelu zNMPT może znacznie przyspieszyć bardzo kosztowne prace z zakresu pomiarów geodezyjnych granic wydzieleni oraz dać precyzyjną informację o lokalizacji powstałych zrębów czy gniazd. Do chwili obecnej brak jest ścisłej regulacji w IUL (2003) na temat określania lokalizacji większych luk czy biogrup w poszczególnych wydzieleniach i istnieje jedynie wymóg opisu miejsca bez podania ścisłej lokalizacji. Zaletą technologii ALS nad ortofotomapami polega na tym, iż na modelu zNMPT brak jest przesunięcia radialnego jakim obciążona jest ortofotomapa generowana zazwyczaj na NMT. Automatyczna analiza wysokości daje możliwość obiektywnego wyboru dla lokalizacji powierzchni kołowych w drzewostanie, gdyż jak się okazuje w większości przypadków pomimo zakładanej homogeniczności: wieku, składu gatunkowego i zmieszania oraz siedliska – wysokości drzew różnią się od siebie w obrębie pododdziału. W konsekwencji więc możliwe jest wykorzystanie tej informacji do opracowania map (np. rastrowych) przestrzennego rozkładu zasobności. Analiza chmury punktów ALS dla całego pododdziału pod kątem średniej wysokości wszystkich drzew jest niewątpliwie bardziej obiektywna niż pomiar kilku na powierzchni kołowej i to nie we wszystkich wydzieleniach.

Okresowe monitorowanie drzewostanów w oparciu o technologię ALS i fotogrametrię cyfrową gwarantuje utrzymanie baz danych SILP oraz LMN na wysokim poziomie aktualizacji bez potrzeby ciągłego wykonywania prac terenowych, które stają się coraz bardziej czaso- i kosztochłonne. Uruchamiane właśnie w Polsce duże projekty laserowego skanowania lotniczego mają pokryć niemal 2/3 terytorium kraju w ciągu prawie 3 lat. W związku z powyższym należy jak najszybciej dostosować odpowiednie wewnętrzne instrukcje w PGL LP i przepisy tak, aby umożliwić wykorzystanie aktualnych danych ALS.

6. LITERATURA

- Abraham, J., Adolt, R. 2006. Stand height estimations using aerial images and laser scanning data. In: *International Workshop "3D Remote Sensing in Forestry"*. Wien, s. 24–31.
- Andersen H. E., Reutebuch S. E., Mcgaughey R. J. 2006. A rigorous assessment of tree height measurements obtained using airborne lidar and conventional field methods. *Canadian Journal of Remote Sensing*, Vol: 32 (5), s.355–366.
- Axelsson P., 2000. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXIII/4B, Amsterdam., s. 203–210.
- Będkowski K., Stereńczak K. 2008. Przestrzenny rozkład punktów odbić impulsów skanera laserowego a wybrane cechy drzewostanu. *Roczniki Geomatyki*, VI(8), s. 55–60.
- Gołuch P., Borkowski A., Józków G., Tymków P., Mokwa M., 2009. Application of Digital Terrain Model generated from Airborne Laser Scanning data in Hydrodynamic Modelling. *Studia Geotechnica et Mechanica*, Vol. XXXI No. 3, s. 61–72.
- Hyypä, J., Inkinen, M. 1999. Detecting and estimating attributes for single trees using laser scanner. *The Photogrammetric Journal of Finland*, vol. 16, No. 2, s. 27–42.
- IUL, 2003. Forest Management Guide. Part 3. Polish State Forest Holding, Warsaw 2003.

- Maltamo M., Mustonen K., Hyypä J., Pitkänen J., Yu X. 2004. The accuracy of estimating individual tree variables with airborne laser scanning in boreal nature reserve. Abstract. *Canadian Journal of Forest Research*, s. 1791–1801.
- McGaughey R. J. 2007. Fusion/ldv: Software for lidar data analysis and visualization. Software manual. USDA Forest Service. Pacific Northwest Research Station.
- McGaughey, R., Carson, W., Reutebuch, S., Andersen, H.-E. 2004. Direct measurement of individual tree characteristics from LIDAR data. *Proceedings of the Annual ASPRS Conference, 23–28 May 2004, Denver: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS)*.
- Persson, A., Holmgren, J., Söderman, U. 2002. Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 68, No. 9, s. 925–932
- Stereńczak K. 2009. Single tree detection based on airborne LIDAR (ALS) data. *Annals of Geomatics*, Vol. VII, 2 (32), s. 121–126
- Tompalski P., Wężyk P., de Kok R., Kukawski M., 2009. Determining the number of trees using airborne laser scanning and true orthoimagery. *Annals of Geomatics*, Vol. VII, 2 (32), s. 133–141.
- Wężyk P., Borowiec N., Szombara S., Wańczyk R. 2008a. Generowanie numerycznych modeli powierzchni oraz terenu w Tatrach na podstawie chmury punktów z lotniczego skaningu laserowego (ALS). *Geoinformacja obrazowa w świetle aktualnych potrzeb. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*. Vol. 18, s. 651–661.
- Wężyk P., Solecki K., 2008. Określanie wysokości drzewostanów nadleśnictwa Chojna w oparciu o lotniczy skaningu laserowy (ALS). In: *Geoinformacja obrazowa w świetle aktualnych potrzeb. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*. Vol. 18, s. 663–672.
- Wężyk P., Tompalski P., Szostak M., Glista M., Pierzchalski M. 2008b. 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*. Sept. 17-19. 2008 – Edinburgh, UK. ISBN 978-0-85538-774-7 (CD), s. 636–645.
- Zajączkowski, G., Wężyk, P. 2007. Ocena przydatności skaningu laserowego oraz cyfrowych obrazów multi- i hiperspektralnych do określania miąższości drzewostanów. Sękocin Stary, Raport z tematu BLP 302. Instytut Badawczy Leśnictwa, Sękocin Stary.

UPDATING SILP AND DIGITAL FOREST MAP DATA BASES USING AIRBORNE LASER SCANNING

KEY WORDS: SILP, LMN, ALS, DTM, DSM, forest inventory

SUMMARY: Automatic processing of remotely sensed data, like ALS point clouds, is crucial for modern economy, including forestry. The aim of the study was to develop automated procedures for digital forest map (LMN) revision and automated verification of the attributes (height) stored in the forest descriptive database (SILP), both based on airborne laser scanner datasets. The study areas were the Piasek (Chojna) and Milicz management forest districts, covering about 6,000 ha (80% Scots pine stands). The workflow of verifying and updating a digital map started with updating the compartment borders, which was based on nDSM (created from classified point cloud) and digital orthophoto (RGB+NIR) as well. The developed method, based on normalized ALS point cloud and GIS analysis, provided instant possibility for compartment border update, revealing additional objects like gaps or tree biogroups. The total area of automatically detected objects was around 15% lower when compared to the reference data for Chojna forest district and 10% higher regarding Milicz forest

district. Around 84.0% and 85.5% of the gaps matched the reference for Chojna and Milicz forest districts, respectively. A method based on point cloud distribution (95th percentile) within compartment borders to assess its height was presented in the study. The results were compared to a height model (GRID) generated from descriptive database. For both the study areas the height stored in SILP database was lower than the height value derived from ALS data. The difference was equal to +0.9 m (Chojna; absolute difference 2.1 m) and +2.3 m (Milicz; absolute difference 3.2 m). When the stand area was used as a weight in the difference calculation, the difference values (H_{Diff}) changed to +0.6 m (Chojna; absolute difference 1.5 m) and +2.4 m (Milicz; absolute difference 2.7 m). Concerning the deciduous stands, the difference was higher (~+1 m) than for the Scots pine stands. The analysis performed confirms the possibility of using airborne laser scanning for geometrical (LMN) and descriptive (SILP/height) database updating. Periodical stand monitoring based on ALS technology can guarantee keeping the databases up to date without the necessity of costly and time consuming field measurements.

dr inż. Piotr Wężyk
e-mail: rlwezyk@cyf-kr.edu.pl
telefon: +48 12 662 50 82
fax: +48 12 411 97 15

dr inż. Marta Szostak
e-mail: rlszosta@cyf-kr.edu.pl
telefon: +48 12 662 50 76
fax: +48 12 411 97 15

mgr inż. Piotr Tompalski
e-mail: piotr.tompalski@ur.krakow.pl
telefon: +48 12 662 50 76
fax: +48 12 411 97 15