

OKREŚLANIE WYSOKOŚCI DRZEWOSTANÓW NADLEŚNICTWA CHOJNA W OPARCIU O LOTNICZY SKANING LASEROWY (ALS)

AIRBORNE LASER SCANNING (ALS)-BASED DETERMINATION OF THE CHOJNA FOREST DISTRICT TREE STAND HEIGHTS

Piotr Wężyk, Krzysztof Solecki

Laboratorium GIS i Teledetekcji, Wydział Leśny, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie

SŁOWA KLUCZOWE: lotniczy skaningu laserowy (ALS), wysokość drzew i drzewostanów, powierzchnie próbne

STRESZCZENIE: Praca omawia nowe możliwości określania wysokości drzew i drzewostanów w oparciu o techniki lotniczego skaningu laserowego (*LiDAR*) porównując uzyskane wyniki do tradycyjnych metod inwentaryzacji lasu. Obiekt badawczy stanowił Obręb Piasek (Nadleśnictwo Chojna) o powierzchni 6.380,26 ha. Zestaw danych referencyjnych stanowiło 276 powierzchni próbnych (zwane TEREN) założone w 2006 roku oraz zaktualizowana baza danych opisowych (SILP) z roku 2005. Do analiz wysokości drzew na powierzchniach kołowych oraz całych wydziałów wykonywanych w oparciu o ALS, posłużył zNMPT (*nDSM*; 90 percentyl). Badania wykazały, iż na podstawie ALS uzyskano wyższe wartości wysokości drzewostanów w porównaniu do wyników urządzania lasu (SILP 2005). Największą zgodność wyników z danymi referencyjnymi zaobserwowano w przypadku całych drzewostanów liściastych, dla których średnie różnice wynosiły: +1.07 m (LIDAR - SILP) ÷ -1.72 m (TEREN - LIDAR). Inaczej było w przypadku drzewostanów iglastych +3.58 m (LIDAR - SILP) ÷ -3.01 m (TEREN - LIDAR). W przypadku niektórych powierzchni kołowych stwierdzono tendencję zaniżania wysokości określanej na podstawie ALS (drzewostany iglaste: -0.02m (LIDAR - SILP) ÷ +0.76 m (TEREN - LIDAR); d-stany liściaste -0.41 m (LIDAR - SILP), co potwierdzają w zasadzie wyniki innych prac naukowych. Otrzymane wyniki pozwalają wnioskować, iż technologia ALS wspomagana ortofotomapami doskonale nadaje się do obiektywnego i precyzyjnego określania wysokości całych drzewostanów i rewizji wektora LMN.

1. WPROWADZENIE

Wysokość drzew jest niezmiernie ważną cechą taksacyjną rejestrowaną podczas prac z zakresu inwentaryzacji lasu, odgrywającą znaczącą rolę w procesie określania zasobności drzewostanów. Wysokość drzew jest wypadkową takich zmiennych jak: 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 stosowana metodykę prac inwentaryzacyjnych. Często błąd określenia wysokości przez taksatora posługującego się nawet precyzyjnym wysokościomierzem może przekraczać dopuszczalne 5 % i wiąże się zwykle z dużą subiektywnością wskazania wierzchołka oraz pochyleniem całego drzewa.

Inwentaryzacja, wykonywana co 10 lat, opiera się w głównej mierze na pomiarze wysokości kilku drzew na wytypowanych powierzchniach kołowych reprezentujących grupy stratyfikacyjne drzewostanów. Wysokości pojedynczych drzew jak i całych drzewostanów mogą być jednak określane w sposób bardziej obiektywny i precyzyjny, przy wykorzystaniu technologii lotniczego skaningu laserowego (ALS; Airborne Laser Scanning; Næsset et al. 2002, Maltamo et al. 2004, McGaughey et al. 2004, Heurich et al. 2004, Holmgren et al. 2004, Yu et al. 2004,) co potwierdzają praktyczne wdrożenia w krajach wysokorozwiniętych. Celem prezentowanej pracy było określenie przydatności wykorzystania danych ALS w pracach z zakresu inwentaryzacji lasu w Polsce, szczególnie w aspekcie określania wysokości drzewostanów.

2. TEREN BADAŃ

Przy wyborze obiektu badawczego w nadleśnictwie Chojna (RDLP Szczecin) kierowano się: wielkością obiektu (Obręb Piasek 6.380,26 ha), aktualnością danych z pomiarów inwentaryzacyjnych (prace urządzeniowe rok 2005), kształtem obiektu (kompaktowy, regularny kształt), wiekiem drzewostanów (średnio 59 lat) zróżnicowaniem gatunkowym (sosna pospolita *Pinus sylvestris* 61%; dąb szypułkowy *Quercus robur* i bezszypułkowy *Quercus petraea* ok. 11%; buk zwyczajny *Fagus sylvatica* 16%; inne 5%) i układem siedlisk leśnych, jak również zróżnicowaniem rzeźby terenu (Zajączkowski, Wężyk 2007).

3. METODYKA

Realizacja projektu zleconego przez Instytut Badawczy Leśnictwa w Warszawie wymagała integracji technologii geoinformatycznych z tradycyjną metodyką inwentaryzacji lasu.

3.1. Moduł naziemny

Na potrzeby projektu utworzono tzw. grupy stratyfikacyjne, wg kryterium: typu drzewostanu (iglasty/liściasty) oraz średniej wysokości drzew. W ten sposób można uzyskać reprezentację poszczególnych drzewostanów kolejnych faz rozwojowych. W terenie założono: 148 powierzchni kołowych w 67 pododdziałach liściastych oraz 128 powierzchni kołowych w 66 pododdziałach iglastych. Przy wyborze powierzchni uwagę skierowano głównie na takie gatunki lasotwórcze jak: sosna pospolita (*Pinus sylvestris*), modrzew (*Larix sp.*), daglezja zielona (*Pseudotsuga menziesii*) oraz buk pospolity (*Fagus sylvatica*) i dęby (*Quercus sp.*). Prace terenowe prowadzono w lipcu 2006 roku. Drzewostany wytypowano na podstawie zapytań SQL do bazy danych LAS systemu SILP. W terenie nawigowano się do wybranych wyłączeń drzewostanowych przy wykorzystaniu odbiorników kartograficznych Pathfinder ProXRS (Trimble). Wielkość powierzchni badawczych uzależniona była od wysokości drzewostanu i wahała się od 200 m² (klasa wysokości drzewostanu 10 oraz 15 m) do 500 m² (klasa wysokości > 30 m) (Zajączkowski, Wężyk 2007). Na powierzchniach kołowych pomierzono współrzędne środka powierzchni (dGPS ASG-PL; min. 300 epok) oraz określono

położenie pni drzew (pomiar biegunowy) i środków koron. Pomierzono wysokości 5-ciu najbliższych środka powierzchni drzew (teoretycznie widocznych z góry; dokładność do 0,1 m) oraz ich pierśnice (z dokładnością do 0,05 m). W pododdziale zakładano najczęściej po 2 powierzchnie kołowe, stąd średnia wysokość dla pododdziału obliczona była jako średnia z 10 drzew. Ze względu na nawigację i pomiary dGPS a także sposób zapisu danych z poziomu lotniczego, przyjęto układ współrzędnych WGS-84 w odwzorowaniu UTM (strefa 33N). Transformacji do tego odwzorowania poddano wektor Leśnej Mapy Numerycznej z PUWG 1992/19.

3.2. Moduł lotniczy

W dniach 6 i 8 września 2006 r. firma Milan Flug GmbH przeprowadziła lotniczy skaning laserowy (*ALS*) przy wykorzystaniu urządzenia skaner RIEGL LMS-Q560 (typ skanera *full waveform*) wraz z jednoczesnym pozyskiwaniem zdjęć lotniczych cyfrową kamerą Rolleiflex 6008 digital metric (rozdzielczość terenowa około 7cm). Nalot prowadzono z wysokości ok. 500 m nad terenem wykorzystując śmigłowiec Eurocopter w szeregach na kierunkach: NE ↔ SW. Szerokość jednego skanu wynosiła ok. 600 m a ich wzajemne pokrycie poprzeczne kształtowało się na poziomie 60-80 %. Łącznie pozyskano 44 skany (ang. *strip, scan*), które zapisano w 54 plikach. Korekcję dGPS prowadzono w oparciu o sieć niemieckich stacji referencyjnych SAPOS ze względu na bezpośrednie sąsiedztwo obszaru badań. Dokładność lokalizacyjna połączonych skanów wg. raportu wykonawcy kształtowała się na poziomie około 0.5 m dla współrzędnych płaskich (XY) oraz 0.15 m dla wysokościowej (Z). Zakładano uzyskanie średniego zagęszczenia punktów na poziomie 4 pkt/m². Poza przekazaniem przez wykonawcę nalotu danych z pierwszego i ostatniego odbicia (na podstawie analizy pełnej fali; *full waveform*) wygenerowano także: Numeryczny Model Terenu (NMT) oraz Numeryczny Model Powierzchni Terenu (NMPT) zapisując je do postaci siatki o oczku 1.0 m (ASCII).

3.3. Prace kameralne

Ze względu na wielkość danych i możliwości techniczne ich przetwarzania w roku 2006 i 2007 (komputery PC oraz oprogramowanie) chmurę punktów ALS przekonwertowano do postaci umożliwiającej użycie programów w środowisku ESRI. Konwersji poddano także NMT oraz NMPT do formatu *.ERS (ER Mapper Raster Dataset), co pozwoliło znacznie zmniejszyć rozmiary plików jak i skrócić czas przeprowadzania analiz. W oprogramowaniu ER Mapper Professional 7.1, na podstawie NMPT i NMT wygenerowano tzw. znormalizowany Numeryczny Model Powierzchni Terenu (zNMPT; ang. *nDSM*) niezbędny i podstawowy produkt wykorzystany w kolejnych krokach do określania wysokości drzew i drzewostanów. Obrazuje on wysokości obiektów (szaty roślinnej) znajdujących się w obszarze lotniczego skanowania laserowego.

3.4. Określanie wysokości drzew i drzewostanów

Podstawowym produktem wykorzystywanym w analizach przydatności danych ALS do określania wysokości drzew i drzewostanów, był znormalizowany Numeryczny Model Powierzchni Terenu (zNMPT, ang. *nDSM*) nazywany także często w przypadku obszarów leśnych Modelem Koron Drzew (ang. CHM - *Crown*

Height Model). Na podstawie wektora Leśnej Mapy Numerycznej (LMN) wyselekcjonowano do dalszych analiz tylko te dane ALS (FE), które zawierały się w pododdziałach, w których z kolei zlokalizowano kołowe powierzchnie badawcze. Z tych zestawów wyselekcjonowano dalsze, odpowiadające tylko powierzchniom kołowym (analizy przestrzenne GIS). Na podstawie analizy modelu nDSM (ang. *CHM – Crown Height Model*) określano wysokość maksymalną tzw. H_{\max} wydzielenia/powierzchni, która stanowiła podstawę do wstępnego podziału na 3 strefy wysokościowe.

Najbardziej interesująca w aspekcie badań wysokości była najwyżej położona górna strefa, obejmująca obszar do 1/3 d-stanu. (strefa koron). Kolejnym krokiem było podzielenie najwyższej strefy na 5 kolejnych podstref i wyselekcjonowanie punktów nDSM, mieszczących się w przedziale powyżej 90% percentyla (1/15 wartości zasięgu maksymalnego H_{\max}). Dla tego zestawu punktów obliczono podstawowe statystyki w postaci wartości średniej, która traktowanej była jako właściwa wysokość drzewostanu bądź też średnia wysokość drzew na powierzchni kołowej. Strefa 1/15 w przypadku d-stanów o wysokości około 30 metrów odpowiadała mniej więcej zakresowi przyjętej dokładności ($\pm 1 \div 2$ m) w pomiarach tradycyjnych (zwanym dalej H_{SILP}), choć w instrukcji urządzania lasu przyjmuje się wartość 0.5 m jako błąd dopuszczalny. Analizy koncentrowały się na różnicach pomiędzy wysokością drzewostanu uzyskaną na podstawie nDSM (ALS; zwaną H_{LIDAR}) a poszczególnymi danymi referencyjnymi, tj.: z prac urzędziowych (2005 r.; dalej zwanych H_{SILP}) oraz z własnych pomiarów terenowych na powierzchniach kołowych (dalej zwane H_{TEREN}). W celu uzyskania jak najlepszych wyników dane ALS poddano szczegółowej analizie pod kątem zgodności przebiegu wektora LMN z modelem nDSM oraz cyfrową ortomozaiką. Te dwa zintegrowane ze sobą rastrowe warstwy informacyjne pozwoliły na korektę przebiegu granic i doprowadzenie LMN do zgodności topologicznej (poprawne relacje przestrzenne i powierzchnia).

4. WYNIKI I DYSKUSJA

Wysokość drzewostanów zapisana w bazach danych LAS/SILP oznacza w zasadzie przeciętną wysokość drzew określonego gatunku obliczoną na podstawie nie mniej niż 5-ciu drzew rosnących w miejscach przeciętnych i reprezentatywnych dla danego pododdziału, albo też na podstawie powierzchni kołowej zakładanej w celu pomiaru pierśnic. Informacja z bazy danych SILP nie uwzględniała jeszcze przyrostu wysokości jaki dokonał się pomiędzy inwentaryzacją (2005 r.) a nalotem (2006 r.) czy też pomiarami terenowymi (2006 r.). Wartość przyrostu wysokości dla najstarszych (najwyższych) drzewostanów iglastych oszacowano na podstawie obserwacji terenowych na poziomie około $0.15 \div 0.25$ m. W przypadku drzewostanów młodszych klas wieku wartość ta mogła jednak osiągać nawet 0.5 m.

Porównując wysokość pomierzoną w terenie (TEREN) do uzyskanej na podstawie nDSM (ALS), dla całych pododdziałów, zdecydowano się wykorzystać średnią wartość wysokości ze wszystkich założonych w terenie badawczych powierzchni kołowych. W przypadku, gdy porównywano się tylko do obszaru powierzchni kołowych, obliczano wówczas średnią wysokość (H_{TEREN}) na podstawie 5-ciu drzew. Zestawienie uzyskanych wyników będących różnicą wysokości określanej poszczególnymi metodami przedstawiono na różnych poziomach stratyfikacyjnych drzewostanów

w zależności od typu (liściaste i iglaste) oraz analizowanego obszaru (pododdział/powierzchnia kołowa) i klas wysokości (Tabela 1 i 2). Odniesienie wyników do skali całych pododdziałów (warianty: A.1, A.2, B.1 i B.2) miało na celu ukazanie dokładności metody tradycyjnej określenia wysokości drzewostanów w oparciu o miejsca, których lokalizacje do tej pory nie były trwale stabilizowane.

Tabela 1. Podstawowe statystyki dla wysokości określonej w terenie na powierzchniach kołowych (TEREN), z bazy SILP oraz na podstawie danych ALS (LIDAR)

Wariant	Porównanie	Średnia [m]	Minimum [m]	Maksimum [m]	Wariancja	Odch. std.
LIŚCIASTE – CAŁE PODODDZIAŁY						
A.1.1	LIDAR – SILP	1.07	-3.89	5.59	2.51	1.58
A.1.2	TEREN – LIDAR	-1.72	-8.5	7.15	7.18	2.68
A.1.3	TEREN – SILP	-0.63	-7.00	6.95	8.48	2.91
LIŚCIASTE – POWIERZCHNIE KOŁOWE						
A.3.1	LIDAR – SILP	-0.41	-6.88	7.63	5.89	2.42
A.3.2	TEREN – LIDAR	-0.30	-7.28	6.42	5.81	2.41
A.3.3	TEREN – SILP	-0.63	-7.80	7.90	10.83	3.29
IGLASTE – CAŁE PODODDZIAŁY						
B.1.1	LIDAR – SILP	3.58	-0.75	7.98	2.69	1.64
B.1.2	TEREN – LIDAR	-3.01	-6.83	0.78	2.90	1.70
B.1.3	TEREN – SILP	0.85	-4.30	6.70	4.03	2.01
IGLASTE – POWIERZCHNIE KOŁOWE						
B.3.1	LIDAR – SILP	-0.02	-4.58	6.14	3.56	1.89
B.3.2	TEREN – LIDAR	0.76	5.31	5.19	2.42	1.56
B.3.3	TEREN – SILP	0.74	-4.90	6.70	4.90	2.21

Inne warianty (A.3, A.4, B.3 oraz B.4) odnoszą się do porównania różnych metod pomiarowych na konkretnych drzewach na powierzchniach kołowych. Analizując uzyskane wyniki można zaobserwować, iż informacje o wysokości tych samych drzewostanów różnią się między sobą, w zależności od metody jej określania (Tabela 1 i 2).

Na podstawie zaprezentowanych statystyk (Tabela 1 i 2) zaobserwować można, iż w przypadku drzewostanów liściastych wysokość określana dla całych pododdziałów metodami tradycyjnymi (urządzenie lasu 2005 rok - SILP oraz powierzchnie kołowe 2006 rok - TEREN) jest zaniżana w stosunku do danych ALS średnio o około 1,0 m (dla młodszych klas wieku 3.3 m; starsze klasy 0.5 m). Analiza regresji wykazała wysoka wartość współczynnika determinacji $R^2 = 0.92$. Porównując wartość określoną dla powierzchni kołowej metodą tradycyjną (TEREN) oraz LiDAR (ALS) stwierdzono tendencję znacznego zaniżania przez obserwatora wysokości drzewa (średnia o około -1.7 m; $R^2=0.77$). Okazuje się, że dla wszystkich klas poza najwyższymi drzewostanami (pełna zgodność) wartości te wahały się od -3.2 m do -1.46 m. Przyczynę tej sytuacji można najprościej wytłumaczyć nie tylko subiektywizmem obserwatora odczytującego wskazania wysokościomierza wycelowanego w hipotetyczny wierzchołek, co ewentualnie niezbyt odpowiednim wyborem lokalizacji powierzchni kołowych wewnątrz drzewostanu. Lokalizacja powierzchni i wysokość drzew na nich mierzonych determinowała wartość średnią dla pododdziału.

Tabela 2. Podstawowe statystyki dla wysokości określonej w terenie (TEREN), z bazy SILP oraz na podstawie danych ALS (LIDAR) dla grup stratyfikacyjnych wysokości

		WARIANT					
		PODODDZIAŁY LIŚCIASTE			POW. KOŁOWE LIŚCIASTE		
		A.2.1	A.2.2	A.2.3	A.4.1	A.4.2	A.4.3
Klasa wys. [m]	LIDAR - SILP	TEREN - LIDAR	TEREN - SILP	LIDAR - SILP	TEREN - LIDAR	TEREN - SILP	
	ŚREDNIA	10	+3.34	-3.2	+0.12	+1.22	-2.09
15		+1.53	-3.94	-2.1	-1.06	-2.1	-3.2
20		+0.98	-2.93	-1.94	-0.96	-1.35	-2.32
25		+0.54	-1.46	-0.91	-0.69	-0.27	-0.96
30		+1.0	-0.01	+0.98	+0.04	+1.45	+1.65
ODCH. STD.	10	2.29	1.85	3.86	3.96	1.56	3.58
	15	2.06	3.32	3.68	2.19	1.44	2.02
	20	1.3	2.42	2.5	2.53	2.02	2.68
	25	1.44	1.85	1.8	1.83	1.96	2.09
	30	1.37	2.53	2.95	2.17	2.26	3.31
		PODODDZIAŁY IGLASTE			POW. KOŁOWE IGLASTE		
		B.2.1	B.2.2	B.2.3	B.4.1	B.4.2	B.4.3
		LIDAR - SILP	TEREN - LIDAR	TEREN - SILP	LIDAR - SILP	TEREN - LIDAR	TEREN - SILP
ŚREDNIA	10	+3.54	-2.06	+1.48	+0.22	+1.23	+1.46
	15	+3.66	-3.69	+0.54	-0.62	+0.86	+0.23
	20	+3.96	-3.81	+0.41	+0.08	+0.38	+0.46
	25	+3.27	-2.91	+0.36	+0.22	+0.11	+0.33
	30	+3.02	-1.96	+1.49	+0.01	+1.59	+1.61
	35	+4.91	-1.49	+3.42	+0.72	+1.77	+2.50
ODCH. STD.	10	2.23	0.77	1.78	1.54	1.44	1.88
	15	1.39	1.89	2.25	2.08	1.36	2.15
	20	1.61	1.62	1.83	1.86	1.52	2.19
	25	1.51	1.18	1.61	1.76	1.30	1.91
	30	1.66	1.61	1.98	1.91	1.79	2.39
	35	1.67	2.24	3.92	2.88	1.16	3.75

Uwiarygodnienie wyników następowo przez porównanie własnych wyników pomiarów terenowych (TEREN) z danymi z urządzania lasu (SILP). Stwierdzono, iż wartość średnia (-0.63 m; $R^2=0.72$) dla wszystkich analizowanych drzewostanów liściastych wskazuje, iż powierzchnie kołowe zlokalizowano niestety na obszarze o lokalnej niższej wysokości drzew (np. wpływ mikrosiedliska). Największe różnice wykazano dla klasy stratyfikacyjnej 15 m drzewostanów liściastych, tj. -2.1 m. Maksymalne różnice pomiędzy pomiarami sięgały około ± 7 m co potwierdza z jednej strony przypadkowość wyboru miejsca opróbowania, a z drugiej niedoskonałość samej metody stosowanej w urządzaniu lasu, która zakłada pomiar wysokości jedynie w części wybranych pododdziałów z grup stratyfikacyjnych. W przypadku powierzchni kołowych ulokowanych w wydzieleniach liściastych stwierdzono tendencję odwrotną do opisanej powyżej, tj. zaniżania wysokości określonej na podstawie LiDAR (średnio o -0.41 m; $R^2=0.77$). Analizując szczegółowo poszczególne grupy stratyfikacyjne wykazano jednak, iż w klasach 15 m, 20 m i 25 m występuje zniżenie wysokości LiDAR o około 1.0 m, a dla najniższych drzewostanów (klasa 10 m) obserwuje się różnicę odwrotną

(+1.22 m). Grupa najstarszych (najwyższych) drzewostanów (klasa 30 m) nie wykazywała znaczących różnic określania wysokości różnymi technologiami. Oznaczać to może, iż właśnie w przypadku wykształcenia się pełnych koron drzew bez wyraźnych pędów wierzchołkowych pierwsze impulsy skanera odbijane są przede wszystkim z wierzchnich warstw sklepienia drzewostanu (ang. *forest canopy*). W przypadku młodszych klas wieku korony drzew mogą charakteryzować się zupełnie inną strukturą przestrzenną wywołaną obecnością pędów wierzchołkowych dominujących nad resztą. Promień lasera ma niewielką szansę przy założonej gęstości 4 punktów na jednostce powierzchni aby trafić w taki właśnie pęd i najczęściej odbicie następuje z niższych części korony. Podobne zjawisko występuje w okresie bezliśnym kiedy brak liści determinuje odbijanie się promienia lasera wyłącznie od grubszych gałęzi czy fragmentów pnia. Analizując różnice pomiędzy pomiarem TEREN a SILP na powierzchniach kołowych uzyskano niemal identyczne wyniki jak w przypadku całych pododdziałów z tym, że maksymalne i minimalne różnice uległy powiększeniu do niemal $\div 8$ m. Niedoszacowanie wartości wysokości drzewostanów liściastych stwierdzili w swoich badaniach także Persson et al. (2002), Maltamo et al. (2004), McGaughey et al. (2004), Heurich et al. (2004), Abraham et al. (2006). W większości przypadków były to bardzo zbliżone wyniki aczkolwiek stosowane technologie i gęstość punktów były zazwyczaj różne od siebie.

Analiza różnic wysokości w obrębie całych drzewostanów iglastych wykazała jednoznacznie zaniżanie wysokości przez pomiary taksatorów, na podstawie których co 10 lat wypełnia się bazy danych SILP/LAS. Średnia wartość różnicy LIDAR-SILP wskazuje na duże zaniżanie wartości przez SILP aż o 3.58 m (we wszystkich klasach wysokościowych, poza drzewostanami 35 m; wartość aż +4.91 m) przy jednoczesnym wysokim współczynniku determinacji $R^2=0.93$. Analiza porównawcza TEREN - LiDAR ponownie wykazuje różnice około 3 m wskazując na wyżej położone punkty chmury ALS. Nie jest to wynik błędnej filtracji, ale co najwyżej niedokładność pomiaru terenowego lub skutek niereprezentatywnego wyboru lokalizacji powierzchni kołowej w obszarze o lokalnie niższych drzewach. Zdecydowana większość wyników badań innych autorów (Hyypä et al., 1999; Persson et al., 2002; Maltamo et al., 2004; Yu et al., 2004; McGaughey et al., 2004; Heurich et al., 2004; Abraham et al., 2006) wskazuje na zupełnie odmienną sytuację czyli na zaniżanie wysokości drzew przez ALS w drzewostanach iglastych, co można łatwo wytłumaczyć problemem z trafieniem w wierzchołek drzewa przy stosunkowo niewielkiej ilości punktów lasera na jednostce powierzchni. Odbicie impulsu od części wierzchołkowej uzależnione jest od gatunku drzewa (pokrój wierzchołkowej części korony) jak również lokalnie kształtowanych ekotypów przez warunki abiotyczne i biotyczne. Swoiste „zawyżanie” wysokości drzew przez LiDAR w stosunku do pomiarów terenowych wykazali Holmgren et al. (2004) oraz Næsset et al. (2002) jednak używanie tego określenia wydaje się niewłaściwe, gdyż albo to dane ALS są niewłaściwie przetworzone (pomiar GPS/INS, pasowanie skanów, *ghost points*) albo dane referencyjne są niepoprawne. Średnia różnica pomiarów TEREN-SILP okazała się stosunkowo niewielka (+0.85m) osiągając w najwyższych drzewostanach (klasa stratyfikacyjna 35m) około +3.4 m. Ta ostatnia wartość może wzbudzać duże zaniepokojenie niedokładnością metod tradycyjnych przy założeniu, iż powierzchnia kołowa w roku 2006 została wybrana w miejscu reprezentatywnym (podobnie jak zbieranie danych dla SILP).

Analizy wysokości przeprowadzone w drzewostanach iglastych na powierzchniach kołowych wykazały niemal całkowitą zgodność -0.02 m (odch. std. 1.56; $R^2=0.77$)

w przypadku porównywania danych LiDAR-SILP. Dla poszczególnych grup stratyfikacyjnych największe wartości ponownie wykazano dla klasy 30 metrowych drzewostanów (+0.7 m) co potwierdza jedynie problemy pomiaru drzew wysokich o trudno widocznych wierzchołkach. Różnice pomiędzy danymi LIDAR – TEREN ($R^2=0.83$) wyniosły średnio jedynie +0.76 m co wskazywać może na zaniżanie pomiaru przez taksatora lub nieodpowiednią lokalizację drzew na powierzchniach kołowych, z których obliczana jest średnia (TEREN). W poszczególnych klasach stratyfikacyjnych różnice oscylowały na różnym poziomie z tym że w przypadku najstarszych drzewostanów i najmłodszych miały one największe wartości co można tłumaczyć albo problemami wskazania wierzchołka i pochylenia wysokich drzew lub też szybkim wzrostem młodych drzewostanów (nawet od 1,0 m rocznie sosna pospolita) podobnym poziomie. Niemal identyczna wartość różnicy (+0.74 m; $R^2=0.76$) wykazano dla danych TEREN oraz SILP, przy czym SILP wskazywał na niższą wartość. Pomimo, iż instrukcja urządzania lasu przewiduje dokładność 0.5 m to w praktyce akceptowane są o wiele wyższe różnice.

5. WNIOSKI

Podstawą funkcjonowania nowoczesnej gospodarki leśnej jest szybkie i dokładne szacowanie zasobów drzewnych, w celu wypełniania postulatów z zakresu trwałości ekosystemów i ochrony przyrody przy jednoczesnym zapewnieniu poprawnego modelu ekonomicznego. Dotychczasowe sposoby pozyskiwania informacji o zasobach leśnych muszą być wspomagane nowoczesnymi technologiami geoinformatycznymi, takimi jak lotniczy skaning laserowy (ALS), który oferuje znacznie więcej niż tylko określanie wysokości obiektów czy generowanie numerycznych modeli terenu. Uzyskane wyniki dla drzewostanów liściastych Obrębu Piasek w Nadleśnictwie Chojna wskazują na bardzo niewielkie różnice pomiędzy pomiarem wysokości metodą LiDAR a metodami tradycyjnymi inwentaryzacji (w granicach dopuszczalnego błędu) przy jednocześnie bardzo wysokim współczynniku determinacji ($R^2=0.92$). Uzasadnia to potrzebę jak najszybszego wdrożenia technologii ALS na skalę ogólnokrajową. W przypadku jednak drzewostanów iglastych stwierdzone znaczne różnice wysokości drzewostanów pomiędzy pomiarem wykonanym na podstawie chmury punktów LiDAR a aktualną bazą danych SILP dają podstawy do rewizji wykonanych już opracowań (pomimo współczynnika $R^2=0.93$). Różnica ze znakiem dodatnim (rezerwa) odgrywa znacząco pozytywną rolę w szerszym rozumieniu roli lasu i biomasy traktowanej jako odnawialne źródło energii czy w procesie handlu emisjami CO₂.

Lotniczy skaning laserowy, jak pokazuje praktyka krajów wysoko rozwiniętych z pewnością zdominuje czy wręcz zastąpi tradycyjne metody inwentaryzacji zasobów drzewnych. Ze względu na pełen obiektywizm pozyskiwanych informacji, metoda ta jest niewątpliwie bardziej wiarygodna od subiektywnej oceny przeprowadzonej przez taksatora i umożliwia pozyskiwanie danych na dużych obszarach w krótkim czasie. Spadające koszty skaningu laserowego i rosnące koszty pracy tradycyjnej inwentaryzacji stanowią poważny argument za wykorzystywaniem tej technologii w procesie pozyskiwania informacji o lasach.

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, ss. 24-31.

Heurich, M., Persson, A., Holmgren, J., Kennel, E. 2004. Detecting and Measuring Individual Trees with Laser Scanning in Mixed Mountain Forest of Central Europe Using an Algorithm Developed for Swedish Boreal Forests Conditions. *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"* In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI, part 8/W2*. ss. 307-312

Holmgren, J., Jonsson, T. 2004. Large Scale Airborne Laser Scanning of Forest Resources in Sweden. *Proc. of the ISPRS working group VII/2 "Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment"*. Freiburg, Germany: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI, part 8/W2. s. 157-160

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.

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

Næsset, E., Okland, T. 2002. Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 79, s. 105-115.

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., 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).

Yu, X., Hyypä, J., Hyypä, H., Maltamo, M. 2004. Effects of flight altitude on tree height estimation using airborne laser-scanning. *Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment: Proceedings of the ISPRS Working Group VIII/2, 3-6 October 2004*. Edited by M.Thies, B. Koch, H. Spiecker, and H. Weinacker. Freiburg, Germany: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and the Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI-8/W2.

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*.

**AIRBORNE LASER SCANNING (ALS)-BASED DETERMINATION OF THE
CHOJNA FOREST DISTRICT TREE STAND HEIGHTS**

KEY WORDS: airborne laser scanning (ALS), tree and stand height, inventory plots

Summary

The paper describes the most recent development in using the airborne laser scanning technology (ALS; LiDAR) to determine heights of individual trees and tree stands and compares the results to data derived from the traditional forest inventory. The Piasek Forest of 6,380.26 ha (the Chojna forest district managed by the Regional State Forest Administration in Szczeci) was chosen as a test site. The first reference data set for the forest stand height was obtained from the SILP data base (LAS tables) updated a year (2005) before the ALS was performed. The other reference data set (called TERRAIN) was assembled during the ground-truthing campaign in 2006, which resulted in establishing 276 circular inventory plots (148 plots in 67 deciduous stands and 128 plots in 66 coniferous forest stands). The nDSM (90th percentile) was selected as the input data for the height analysis. The results showed that the ALS-based tree heights were higher than those recorded in the official SILP database for the Chojna district. In the deciduous forest stand, differences between the LiDAR and SILP data were not particularly large and amounted to as little as about 1.07 m ($R^2 = 0.92$). Differences between the LIDAR and TERRAIN data sets were about 1.72 m ($R^2=0.77$), higher values being obtained using ALS. In the coniferous stands, differences between the LIDAR and SILP were considerably higher, up to +3.58 m ($R^2 = 0.93$), whereas the other TERRAIN set, when compared to the LIDAR data, showed that the traditional forest inventory underestimated the Scots pine height by about -3.01 m. A detailed analyses revealed that, in some inventory plots, the LIDAR data underestimated the tree stand height (LIDAR vs SILP; coniferous: -0.02m; deciduous: -0.41 m). Such underestimation may be explained by the lack of signals coming back from warming tops of the trees. The results obtained allow to conclude that the LIDAR technology supported by the digital orthophotomaps can objectively and precisely supply height data not only for single trees, but it makes it possible to measure the whole stand (whole trees). Therefore, the existing inventory methods need to be changed to make forest planning and monitoring more precise, faster, comparable, cheaper, and not dependable on subjective measurements.

Piotr Wężyk
rlwezyk@cyf-kr.edu.pl
tel. +48 (0)12-662 50 82
fax: +48 (0)12-662 50 82

Krzysztof Solecki
krsolecki@gmail.com
tel. +48 (0)12-662 50 82
fax: +48 (0)12-662 50 82