

## **Streszczenie i wnioski dotyczące realizacji tematu badawczego „Opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na integracji danych pozyskiwanych różnymi technikami geomatycznymi”**

Prowadzenie zrównoważonej gospodarki leśnej wymaga oparcia się o pełną i wszechstronną informację o lesie. Dlatego też współczesne zarządzanie lasu musi polegać na dokładnych metodach pomiaru lasu. Z jednej strony wymaga to doskonalenia statystycznych podstaw metod pomiaru, z drugiej zaś - stosowania nowych, dokładniejszych i wydajniejszych technik pomiaru drzew i drzewostanów.

Wychodząc z takiego założenia, w kwietniu 2006 roku Dyrekcja Generalna Lasów Państwowych zleciła Wydziałowi Leśnemu Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego wykonanie pracy naukowo-badawczej *Opracowanie metody inwentaryzacji lasu opartej na integracji danych pozyskiwanych różnymi technikami geomatycznymi*. Jej celem było wyselekcjonowanie sposobów zdalnej rejestracji obrazu lasu użytecznych w leśnictwie opartych na wybranych technikach geomatycznych, takich jak: lidar (naziemny i lotniczy), zdjęcia hemisferyczne, zdjęcia cyfrowe naziemne i lotnicze, system kartowania mobilnego, wysokorozdzielcze zdjęcia satelitarne. Zamiarem podjętych badań było opracowanie obrębowej metody pomiaru lasu dla potrzeb planowania okresowego z wykorzystaniem technik geomatycznych. Ten kompleksowy program realizowany był przez wielodyscyplinarny zespół, który podjął próbę opracowania metod inwentaryzacji lasu opartych na nowoczesnych danych geomatycznych.

Analizy były prowadzone w odniesieniu do cech inwentaryzacyjnych drzewostanów, określonych metodą pomiarów terenowych. Poszukiwane były nowe kierunki inwentaryzacji z wykorzystaniem współczesnych narzędzi teledetekcyjnych. Założeniem pracy było, aby nowa metoda wykorzystywała techniki geomatyczne w powiązaniu z SILP, Leśną Mapę Numeryczną i modelami symulacyjnymi. Wykorzystywano przy tym wyniki prac badawczych dotyczących geomatyki, finansowane równoległe przez DGLP, Komitet Badań Naukowych i Unię Europejską.

Podjęte badania objęły:

- konfrontację potrzeb dotyczących inwentaryzacji lasu z aktualnymi możliwościami teledetekcji,
- selekcję rozwiązań technicznych i stosowanych typów zobrazowań,

- organizację badań empirycznych na wybranych poligonach badawczych,
- pomiary terenowe, obrazowanie z poziomu terenowego, lotniczego i satelitarnego,
- analiza pozyskanych danych w SIP,
- wnioskowanie dotyczące użyteczności poszczególnych typów zobrazowań, ich dokładności i dostępności (możliwości stosowania operacyjnego, mobilność sprzętu, jego użyteczność w warunkach terenowych),
- opracowanie koncepcji zastosowań praktycznych,
- analiza ekonomiczna,
- opracowanie scenariuszy aplikacji.

Prace wykorzystywały dane zbierane z następujących poziomów:

1. Dane referencyjne – inwentaryzacja terenowa
2. Dane naziemne
  - Lidar
  - Zdjęcia hemisferyczne
  - Wskaźnik powierzchni projekcyjnej liści (Leaf Area Index-LAI)
  - System kartowania mobilnego (Mobile Mapping System-MMS)
3. Dane lotnicze
  - Lidar
  - Wielospektralne zdjęcia cyfrowe

Jest to pierwsza w Polsce próba zintegrowanego wdrażania fragmentarycznych dotychczas badań nad wykorzystaniem szczególnych technik geomatycznych. Zamiarem wykonawców było sprawdzenie możliwości kompleksowego ich wykorzystania. Wyniki tej pracy dają odpowiedź na pytania, czy jest to możliwe, celowe i korzystne ze względów ekonomicznych? Mając na uwadze obszerny zakres prac zaproponowano podzielenie go na etapy.

Pierwszy etap prac (2006 – 2008), którego dotyczy niniejsze sprawozdanie, to projekt pilotowy, który poświęcono na:

1. Analizę potrzeb inwentaryzacji lasu w zestawieniu ze współczesnymi narzędziami teledetekcyjnymi.

2. Przeprowadzenie prac pilotowych dotyczących zastosowania danych optycznych (lidarowych, zdjęć hemisferycznych oraz zdjęć wykonywanych kamerami cyfrowymi, a także rozpocząć pracę nad wysokorozdzielczymi zdjęciami satelitarnymi) na poligonach badawczych.

Etap ten kończy się:

- opracowaniem propozycji zastosowania wyselekcjonowanych technik teledetekcyjnych w inwentaryzacji lasu,
- wstępną analizą ekonomiczną proponowanych rozwiązań.

Drugi etap, który trzy lata temu proponowano rozpocząć z końcem 2008 roku, poświęcony miał być następującym zagadnieniom:

1. Przetestowanie technik radarowych (zarówno lotniczych, jak i satelitarnych).
2. Kontynuacja prac nad danymi optycznymi, bazując na wynikach etapu I.2. - uszczegółowienie metod.
3. Kontynuacja prac nad satelitarnymi zdjęciami optycznymi.
4. Wytyczne dla praktyki leśnej.

Obecne zlecenie DGLP obejmuje zakres I etapu. Był on realizowany na poligonie badawczym zlokalizowanym w Nadleśnictwie Milicz z wykorzystaniem wyników badań prowadzonych w ścisłej współpracy przez Nadleśnictwo Świeradów (inicjatywa Nadleśnictwa, finansowana przez fundusz Inicjatywy Wspólnotowej – Interreg i DGLP).

Prace odbywały się według następujących założeń ogólnych:

1. Wykorzystane zostały dane z istniejących powierzchni próbnych.
2. Założono szereg nowych, uzupełniających referencyjnych powierzchni próbnych (zakres inwentaryzacji: gatunek drzewa, pierśnica, wysokość, azymut i odległość od środka powierzchni próbnej, wysokość podstawy korony, szerokość korony, rzut korony, grubość na 5 metrach, zdjęcia stereoskopowe).
3. Analizy obrazowań lotniczych (lidar i zdjęcia wielospektralne) dokonywano w odniesieniu do terenowych powierzchni próbnych.
4. Analizy obrazowań terenowych (lidar, zdjęcia hemisferyczne, LAI, MMS) dokonywane były w odniesieniu do referencyjnych powierzchni próbnych.

5. Analizy wykonywane w relacji do LMN w pierwszej kolejności odnosiły się do parametrów mierzonych na powierzchniach próbnych podczas okresowych inwentaryzacji lasu, a w dalszych analizach były rozszerzane o inne parametry, z uwzględnieniem:

- możliwości określenia parametrów drzew (gatunek, pierśnica, wysokość, średnice na różnych wysokościach) i drzewostanów (stopień zagęszczenia, przeciętna wysokość, zwarcie, skład gatunkowy, forma zmieszania) na podstawie danych obrazowych,
- dokładności pomiarów na danych obrazowych,
- opracowania algorytmów przetwarzania i analizy danych obrazowych.

**W pierwszym etapie** prac dokonano rozpoznania potrzeb inwentaryzacji lasu oraz zestawiono je z technikami geomatycznymi technologicznie dostępnymi do badań i wdrożeń.

**W drugim etapie**, dotyczącym terenowego skaningu laserowego, prace koncentrowały się na ocenie dokładności skaningu (dobre rozpoznawanie lokalizacji drzew, wysoka korelacja pomiędzy wielkościami pierśnic pomierzonych terenowo i określonych na podstawie skaningu) i zmierzały do sformułowania praktycznych wskazówek wykorzystania tej techniki geomatycznej. Ważnym osiągnięciem w tym zakresie było opracowanie oprogramowania, które pozwala na automatyczne określanie parametrów drzew na powierzchni próbnej.

W ramach projektu wykonywano pomiary drzewostanów według istniejącego systemu inwentaryzacji lasu. Doświadczenia zdobyte w projekcie pokazują, że stosowanie nowoczesnych metod wymaga opracowania nowej instrukcji inwentaryzacyjnej (inna stratyfikacja drzewostanów, mniejsza ilość powierzchni próbnych, większa powierzchnia próbna).

Stwierdzono, że:

- W sytuacji prowadzenia podstawowych prac inwentaryzacyjnych laserowy skaningu naziemny (TLS) ze środkowego stanowiska w drzewostanach starszych klas wieku powinien być wystarczający przy założeniu dopuszczalnych „strat” wynikających z przesłaniania się drzew (należy rozważyć możliwość powiększenia powierzchni opracowania lub zmianę jej kształtu).
- W sytuacjach występowania podszytu lub skanowania na duże odległości (max. 70m) należy rozważyć możliwość wykorzystania odpowiednich folii odbłaskowych. Trzeba

jednak sobie zdawać sprawę, iż taki materiał o silnych właściwościach odbijania światła może spowodować „prześwietlenie” obszaru pomiaru pierśnicy na obrazie planarnym.

- W przypadku wykorzystywania technologii TLS korzystniejsze wydaje się być zakładanie nowych sieci pomiarowych (np. stałych powierzchni obserwacyjnych) a nie wykorzystywanie już istniejących. Powierzchnie obserwacyjne należy zakładać w taki sposób aby:
  - środek powierzchni (a tym samym centralna pozycja skanera) nie był położony zbyt blisko pni najbliższych drzew, ze względu na ich negatywny wpływ na „ocienianie” przestrzeni;
  - pomiar dGPS pozycji skanera prowadzić bezpośrednio po wykonaniu skaningu (minimum 240-300 epok pomiarowych; maska 10 stopni, min 4 satelity, PDOP <9, staja referencyjna do 75 km);
  - miejsca opróbowania nie były wybierane subiektywnie lecz przy wykorzystaniu istniejących danych np. zdjęć lotniczych czy też ALS;
  - w drzewostanach młodszych skanowanie należy prowadzić „na klasycznej wysokości głowicy” a w przypadku upraw do około 1,0 metra wysokości przy możliwie wysoko wysuniętym statywie;
  - w zwartych młodnikach, tyczkowie czy w sytuacjach zaniedbanych drzewostanów (brak czyszczeń i trzebieży) przeprowadzenie skaningu naziemnego (TLS) może okazać się niemożliwie do przeprowadzenia i całkowicie bezzasadne;
  - w starszych klasach wieku skanować „z klasycznej wysokości” zwracając baczną uwagę na podszyt i roślinność zielną, które mogą znacznie utrudniać pomiary i wpływać negatywnie na jakość generowanego NMT czy klasyfikację.
- Należy optymalizować wielkość powierzchni urządzeniowej w zależności od klasy wieku tzn. tak dobierać pozycję (liczbie i rozmieszczenia) aby było ich jak najmniej a z drugiej strony maksymalnie wykorzystywać chmurę punktów (maksymalizacja – lepsze statystyczne reprezentacja).

**Etap trzeci** był poświęcony analizom dotyczącym danych lotniczych (skaniny laserowy i zdjęcia cyfrowe) i obejmował tworzenie ortofotomap, modeli terenu i pokrycia terenu oraz

określenia liczby drzew w drzewostanach i ich wysokości, struktury drzewostanów, składu gatunkowego.

Spośród szeregu zbieranych w trakcie taksacji lasu cech drzewostanu, możliwe do automatycznego określenia z wykorzystaniem danych z lotniczego skanowania laserowego (ALS) i zdjęć lotniczych (lub wysokorozdzielczych zdjęć satelitarnych) są następujące:

- miąższość drzewostanu,
- wysokość pojedynczych drzew i drzewostanów,
- liczba drzew na jednostkę powierzchni,
- budowa pionowa drzewostanu,
- wydzielenie powierzchni nie stanowiących wydzieleni, określenie zasięgu luk oraz ich wysokościowego położenia,
- określenie składu gatunkowego,
- określenie położenia przestojów,
- wskazanie niższych warstw drzewostanu (np.: młodego pokolenia),
- zmieszanie (wyrażone obiektywną liczbą),
- zwarcie i zagęszczenie (wyrażone obiektywną liczbą),
- określenie bonitacji (o ile wiek będzie znany),
- stopień uszkodzenia drzewostanu (wymaga nowej definicji),
- przyrost drzewostanu – możliwy przy cyklicznym wykorzystaniu LIDAR-a,
- określenie przebiegu liniowych szczegółów sytuacyjnych,
- pochylenie, wystawa i inne cechy związane z numerycznym modelem terenu będą operacją automatyczną, (nie ma w tej chwili danych, które mogą dostarczyć w szybszy sposób NMT dla ogromnego obszaru z taką dokładnością jak LIDAR),
- podział przestrzeni leśnej na homogeniczne partie drzewostanu.

Wymienione określenie zapasu wymaga zmiany podejścia do inwentaryzacji lasu. W pierwszej kolejności określenia grup drzewostanów, w których możliwa jest tego typu inwentaryzacja, przy jak najmniejszym udziale prac naziemnych. Oznacza to również ustalenie wielkości powierzchni próbnej oraz jej kształtu, znalezienia nowych kryteriów

(uwzględniających patrzenie na las z „góry”) dzielenia drzewostanów na grupy stratyfikacyjne (co oczywiście jest możliwe).

**W etapie czwartym** omawianych prac badaniom poddano cyfrowe zdjęcia hemisferyczne. Analizowane je z punktu widzenia ich wykorzystania do pomiarów LAI (Leaf Area Index) i na tej podstawie do określania parametrów koron drzew.

Innym zakresem prac wykonywanych w tym etapie były badania systemu kartowania mobilnego (MMS), który wykorzystany był do inwentaryzacji dróg leśnych wraz z rejestrowaniem parametrów dróg zgodnie ze wymogami SILP i standardem LMN.

Na podstawie przeprowadzonych badań i analiz można wysnuć następujące wnioski dotyczące inwentaryzacji obiektów liniowych (dróg) z wykorzystaniem metody wykorzystującej technologię MMS, zdjęcia stereoskopowe oraz skaniny laserowe:

- techniki geomatyczne pozwalają na efektywne zbieranie i gromadzenie danych o drogach w lasach, pozyskując atrybuty zgodnie z wymogami SILP i LMN,
- nowe rozwiązania technologiczne integrujące dane z GPS i INS pozwalają zwiększyć dokładność pozycjonowania samochodu pomiarowego, a tym samym dokładność określanych parametrów roślin do 1m,
- wykorzystując dane wieloźródłowe można uzyskiwać dokładności poniżej 1m, optymalizując ekonomicznie gromadzenie danych i dostosowując powstające informacje do potrzeb użytkowników.

Powyższe stwierdzenia pozwalają sądzić, iż wykorzystanie technologii MMS w praktyce leśnej zaowocuje:

- uzyskaniem dobrej jakości danych przestrzennych o drogach z zapewnieniem topologii, koniecznej do przeprowadzania analiz sieciowych i biznesowych, umożliwiających efektywne zarządzanie, jak też stanowiących platformę do negocjacji leśników z odbiorcami drewna,
- usprawnieniem działań straży pożarnych, oraz zarządzania sytuacjami kryzysowymi, jak też zarządzania bieżącą działalnością nadleśnictw,
- umożliwieniem nawigacji po drogach leśnych jako naturalnego uzupełnienia nawigacji po drogach publicznych.

Ostatnim, **piątym etapem** prac była analiza ekonomiczna zastosowanych rozwiązań geomatycznych. Dokonano jej na podstawie obliczeń czasochłonności poszczególnych czynności podczas wykonywania projektu. Należy podkreślić, że czasochłonność, a więc i koszty w ten sposób obliczone są jedynie orientacyjne. Wpływa na to przebieg prac badawczych w terenie, które podporządkowane są prawom eksperymentu, a nie efektywności działania.

Badaniami objęto stosunkowo niewielki obszar (jeden obręb nadleśnictwa Milicz), stąd cena jednostkowa (w przeliczeniu na jednostkę powierzchni) pozyskania informacji zdalnej (zdjęcia lotnicze, skanowanie laserowe, NMT, NMPT) była wysoka. Nie bez znaczenia jest również zwiększenie kosztów wynikające z faktu prowadzenia badań dotyczących m.in. możliwości zastosowania różnych algorytmów do przetwarzania danych. W przypadku objęcia analizą większego obszaru oraz przy zautomatyzowaniu przetwarzania danych, koszty te są znacząco niższe.

Potwierdzają to między innymi doświadczenia zdobyte podczas sporządzania systemu informacji przestrzennej dla LKP Sudety Zachodnie (około 85 000 ha, koszt netto wykonania: fotogrametrycznej osnowy terenowej, zdjęć lotniczych, ortofotomapy, lotniczego skaningu laserowego, MNT, NMPT (6 klas), mapy 2D i 3D – bez prac urządzeniowych – był o ponad połowę niższy, niż w przypadku realizacji tematu).

Ponadto:

- skaningu terenowego ze środka powierzchni (tylko jedna pozycja skanera na każdej powierzchni próbnej) daje zadawalające rezultaty odnośnie do parametrów drzew, a przy tym znacząco zmniejsza koszt prac terenowych (jedno ustawienie statywu zamiast czterech),
- zastosowanie automatyzacji przetwarzania i pomiarów danych ze skaningu terenowego (wykorzystanie oprogramowania opracowanego w ramach projektu) przyspiesza proces pozyskiwania parametrów drzew, a co za tym idzie – wpływa na obniżenie kosztów,
- w ramach projektu wykonywano pomiary drzewostanów narzędziami geomatycznymi, według istniejącego systemu inwentaryzacji lasu. Doświadczenia zdobyte w projekcie pokazują, że stosowanie tych nowoczesnych metod wymaga opracowania nowej instrukcji inwentaryzacyjnej, dla której należy inaczej

stratyfikować drzewostany, zmniejszyć ilość powierzchni próbnych oraz zwiększyć ich powierzchnię.

Zdobyte doświadczenia pozwalają na uszeregowanie analizowanych technologii pod względem użyteczności i gotowości do wdrożenia. Z punktu widzenia praktycznego technologia MMS jest w zasadzie gotowa do wdrożenia – problemem jest tutaj jedynie określenie realnego zapotrzebowania na dane dotyczące obiektów liniowych. Najbardziej obiecującą z analizowanych technologii wydaje się lotnicze skanowanie laserowe (ALS). Dostarcza ono produktów, które już dziś mogłyby stać się elementem planu urządzenia lasu (ortofotomapa, NMT, NMPT), zastępując lub uzupełniając informację pochodzącą ze zdjęć lotniczych. Po wdrożeniu pilotowym możliwe jest również wykorzystanie informacji z ALS do określania miąższości drzewostanów oraz niektórych ich cech. Świadczą o tym m.in. wyniki uzyskane w połączeniu z powierzchniami naziemnymi. Szacowane koszty wykorzystania tej technologii są porównywalne z metodą tradycyjną, natomiast zakres uzyskiwanych informacji – znacznie większy. Technologia naziemnego skanowania laserowego (TLS) daje obiecujące wyniki, jednak jej praktyczne zastosowanie uwarunkowane jest dalszym postępem nad aspektami technicznymi (wielkość i masa urządzenia) i technologicznymi (doskonalenie oprogramowania do automatycznego określania cech drzewostanów oraz stworzenie nowej instrukcji pomiarowej uwzględniającej większe powierzchnie próbne). Zdjęcia hemisferyczne mogą znaleźć zastosowanie w praktyce, zwłaszcza w inwentaryzacji wielkoobszarowej, jednak pod warunkiem precyzyjnego określenia celu i zakresu ich stosowania.

Podsumowując, w celu dokładnego określenia możliwości i celowości stosowania nowoczesnych metod geomatycznych w urządzeniu lasu, proponujemy rozważenie możliwości wykonania pilotowego urządzenia lasu w co najmniej jednym obiekcie – równoległe z urządzeniem klasycznym oraz typowym zastosowaniem stałych kontrolnych powierzchni próbnych. Dzięki temu możliwe byłoby również dalsze doskonalenie metod inwentaryzacji i – w dłuższej perspektywie – zmniejszenie jej kosztów z jednoczesnym zwiększeniem zakresu uzyskiwanych informacji.