

dr hab. inż. Piotr Wężyk
Instytut Zarządzania Zasobami Leśnymi,
Zakład Urządzania Lasu, Geomatyki i Ekonomiki Leśnictwa
Wydział Leśny Uniwersytetu Rolniczego im. H. Kołłątaja
w Krakowie; al. 29 Listopada 46
31-425 Kraków

Kraków, dn. 03.12.2018 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Alex S. Olpenda,

pt.: *Modeling light conditions in mixed stands using airborne LiDAR data:
Bialowieza Forest example*

przygotowanej na Wydziale Leśnym Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego
w Warszawie (Promotor: dr hab. inż. Krzysztof Będkowski, prof. UŁ)

Podstawa przygotowania recenzji

Podstawą opracowania przedłożonej recenzji była Uchwała Rady Wydziału Leśnego Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego oraz pismo (numer WL.510.1.2018) z dnia 15 października 2018 r. w sprawie powołania mojej osoby na recenzenta w postępowaniu związanym z przewodem doktorskim mgr inż. Alex S. Olpenda.

Wstęp

Światło słoneczne jest jednym z podstawowych, obok temperatury, wody i pierwiastków biogennych – czynników determinujących występowanie roślinności na Ziemi. Dostęp bezpośredni lub pośredni światła słonecznego oraz jego spektrum (zakres długości fali elektromagnetycznej) decyduje o tempie rozwoju drzew czy ich odnawianiu się oraz o wielu innych naturalnych procesach, w tym tempie rozkładu materii organicznej i tworzeniu specyficznego leśnego mikroklimatu. Sterowanie dostępem światła przez manipulowanie zwarcie poziomym koron drzew jest podstawą zabiegów hodowlanych stosowanych w lasach gospodarczych. W przypadku lasów naturalnych lub pierwotnych, procesy stopniowego wydzielania się drzew (starzenia), ich nagłego zamierania lub wpadania (wyładowania atmosferyczne i wiatrołomy) - prowadzą do powstawania luk, w których dzięki dostępowi energii słonecznej następuje stopniowa wymiana generacji lasu. Poznanie dynamiki procesów dostępu ilościowego i jakościowego energii elektromagnetycznej (światła słonecznego) do

poszczególnych pięter drzewostanów, w trakcie jego trwania czy przemian jakim podlega, jest niezmiernie ważne w badaniach naukowych opisujących historię kompleksów leśnych, ich naturalność czy pierwotność, bądź też skupiających się na prognozowaniu ich zrównoważonego rozwoju i zachowania w jak najlepszej strukturze przestrzennej (gatunkowej, pionowej czy poziomej).

Lotnicze skanowanie laserowe (*ang.* Airborne Laser Scanning; ALS) jest niezmiernie dynamicznie rozwijającą się dziedziną geomatyki, zarówno w zakresie badań naukowych jak i praktycznych aplikacji w leśnictwie. Ta innowacyjna technologia z szerszej grupy nazywanej LiDAR (*ang.* Light Detection And Ranging) stała się swego rodzaju nowym paradygmatem w nauce oraz praktyce zastępując, a w zasadzie gwałtownie wypierając, dotychczasowe tradycyjne techniki geodezyjne i inne metody pomiarowe przestrzeni leśnej. Wykorzystywane w technologii ALS promieniowanie elektromagnetyczne w postaci energii lasera, pozwala w bardzo precyzyjny sposób określać strukturę 3D drzewostanów (drzew, krzewów, aproksymować grunt, wyznaczać wybrane parametry biometryczne i in.) w oparciu o pomiar czasu wędrowki sygnału lasera oraz danych o położeniu skanera w statku powietrznym (samolot, BSP – Bezzałogowy Statek Powietrzny). Zintegrowane ze sobą technologie GNSS (*ang.* Global Navigation Satellite System) oraz nawigacji bezwładnościowej IMU (*ang.* Inertial Measurement Unit) w połączeniu z ogromną wydajnością generowania impulsów światła lasera przez skaner – powoduje, iż technologia ALS stała się konkurencyjna w stosunku do innych znanych metod pomiarowych. O ile początkowo technologia ALS wykorzystywana była tylko do generowania numerycznych modeli wysokościowych, w tym Numerycznego Modelu Terenu (NMT), tak obecnie, dzięki nowym generacjom skanerów działających w oparciu o zapis pełnej fali (*ang.* full-waveform) pojawiają się nowe możliwości ich zastosowań. Zdolność penetracji wiązki lasera przez poszczególne piętra roślinności i docieranie plamki światła do warstw runa i do gruntu, daje technologii ALS LiDAR ogromną przewagę nad zdjęciami lotniczymi i opracowaniami fotogrametrycznymi w tym zakresie. Technologia skanowania laserowego (lotniczego bądź naziemnego - TLS) jest aktywną technologią teledetekcyjną całkowicie niezależną od światła słonecznego, z powodu wysyłania własnej energii w postaci światła lasera. W sytuacji pozyskiwania precyzyjnych informacji o obiektach na podstawie analiz chmur punktów ALS, kluczowe są: gęstość chmury punktów, kąt wysyłania wiązki lasera, trajektoria skanowania, liczba ech sygnału a nawet intensywność lub zakres spektralny użytego światła (np. skanery wielospektralne Optech TITAN lub operujące wiązką zieloną i z zakresu bliskiej podczerwieni – RIEGL VQ-1560i-DW).

Tradycyjne pomiary promieniowania słonecznego w drzewostanie wykorzystywały do tej pory fotografię (zdjęcia hemisferyczne) najpierw analogową a z czasem cyfrową. W obu przypadkach, fotony światła słonecznego wnikające bezpośrednio lub pośrednio (światło rozproszone) do drzewostanu są podstawą do rejestracji takich obiektów jak: liście, igły, gałęzie, pnie i inne stanowiące przesłonę dla wnikania do wnętrza lasu bezpośrednich promieni słonecznych. Rejestracja obiektów na zdjęciach hemisferycznych tworzących drzewostan jest możliwa głównie dzięki światłu rozproszonemu pod okapem drzewostanu powstającemu poprzez liczne odbicia bądź częściowe

przenikanie przez aparat asymilacyjny. Wykorzystanie oprogramowania komputerowego w transformacji hemisferycznej do rzutu ortogonalnego pozwala na przeliczenie powierzchni zajmowanej przez wyżej wymienione obiekty drzewostanu w stosunku do całej hemisfery. W efekcie prowadzi to do obliczenia zwarcia poziomego drzewostanu ale po części również fragmentów hemisfery w zakresie kątowym mniejszym niż kąt wyznaczony przez punkt główny obiektu wykonującego zdjęcie pionowe (obiekty typu rybie oko) i zasięg koron drzew analizowanych w danym zakresie promienia powierzchni kołowej (monitoringowej). Choć wykonywanie zdjęć hemisferycznych oraz ALS LiDAR bazują na wykorzystaniu fotonów światła jako nośnika informacji, to trzeba podkreślić, iż rejestrują one w zasadzie różny typ promieniowania. Echo sygnału LiDAR pochodzi od powierzchni zatrzymujących i odbijających pod tym samym kątem promieniowanie (np. powierzchni liści czy konarów, pni i in.), natomiast zdjęcie hemisferyczne rejestruje fotony zmierzające niejako w przeciwnym kierunku. W celu rejestracji występowania okapu drzewostanu czy pni w naziemnych zdjęciach hemisferycznych potrzebne jest w głównej mierze światło rozproszone oświetlające (odbijające się) te obiekty, które zatrzymują światło z kierunku jego padania (np. pnie drzew). Czasami brak wartości energii na pikselu matrycy aparatu cyfrowego rejestrującego zdjęcie też jest pewnego rodzaju informacją o pełnym przesłonięciu kierunku docierania fotonów. Może to być wykorzystane w procesie przetwarzania tych informacji w kierunku określania zwarcia drzewostanu. Luki w drzewostanie charakteryzują się z kolei bardzo wysoką energią promieniowania bezpośredniego ze względu na 100% wartość parametru ażurowość (*ang.* penetration rate), który można obliczać na podstawie analizy stosunku echa promieniowania LiDAR docierającego do drzewostanu i poszczególnych stref wysokościowych (np. do wys. 2.0 nad gruntem; tzw. progowanie). Część liści może przepuszczać nadmiar (np. w zakresie zielonym) światła zbędnego w procesie fotosyntezy, co częściowo może prowadzić do zakłócenia rejestracji zdjęć hemisferycznych przez zapis miejsc na matrycy aparatu wskazujących na wysoką energię (przypominające otwarte sklepienie / horyzont).

Poza wykorzystaniem fotograficznych zdjęć hemisferycznych w badaniach nad strukturą drzewostanu (pionowa i pozioma) oraz parametrem zwarcia czy LAI, stosuje się także inne aktywne technologie generowania chmur punktów 3-D na drodze naziemnego skanowania laserowego (*ang.* TLS; Terrestrial Laser Scanning). Skaner wysyła promieniowanie laserowe, które przy dużym zagęszczeniu emitowanych impulsów odbija się od napotykanym na swej drodze przeszkód (gałęzie, pnie, liście). Proces ten jest jakby niepełnym procesem zdjęć hemisferycznych czyli dokonywany jest pomiar światła emitowanego z wnętrza drzewostanu. Na podstawie odbić można generować nie tylko powierzchnię 3-D reprezentującą sklepienie (zwarcie) ale wygenerować ortofotomozaikę będącą rozwinięciem rzutu środkowego do rzutu ortogonalnego. Luki pomiędzy liśćmi czy większe wolne przestrzenie są drogą ucieczki dla promieni lasera i ich dalszej wędrówki wyznaczając w ten sposób parametr ażurowości (*ang.* penetration rate) sklepienia koron (*ang.* canopy cover).

Istnieją też w badaniach nad nasłonecznieniem w drzewostanie metody pasywne, polegające na wystawianiu materiałów światłoczułych (np. naświetlanie papieru fotograficznego w dawnych badaniach botanicznych) lub cyfrowych czujników nasłonecznienia. W każdym z przypadków

analizowany jest w zasadzie niewielki fragment powierzchni kołowej, do której dociera bezpośrednio lub pośrednio promieniowanie słoneczne. W zasadzie powinno się stosować referencyjne pomiary nasłonecznienia na otwartym terenie (brak przeszkód na nieboskłonie), co jednak w przypadku technologii TLS czy ALS nie jest wymagane (metody aktywne).

Analizy warunków oświetleniowych wewnątrz drzewostanu bądź na odsłoniętych jego fragmentach (np. na gniazdach odnowieniowych) są coraz częściej przedmiotem badań interdyscyplinarnych, szczególnie w aspekcie przemian klimatu i reakcji drzew na anomalie pogodowe, skutkujące albo wcześniejszym ulistnieniem koron, lub zbyt wczesnym zrzucaniem liści jako obroną przed suszą.

Dysertacja autorstwa mgr inż. Alex S. Olpnda została przygotowana na Wydziale Leśnym SGGW w Warszawie a jej zakres tematyczny jest w ścisłej związku z wcześniejszymi i obecnie realizowanymi badaniami w tej jednostce w zakresie wykorzystania lotniczego skanowania laserowego (ALS LiDAR) w gospodarce leśnej i ochronie przyrody.

Ocena formalna pracy

Przedłożona do recenzji rozprawa obejmuje 147 stron maszynopisu i została sporządzona całkowicie w języku angielskim. Zawiera ona łącznie 23 tabele i 58 rycin oraz Załączniki (przykładowe: rycina i tabela). Tytuł dysertacji w pełni odpowiada treści pracy i nie budzi wątpliwości co do treści samej pracy. Układ pracy nie odbiega od stosowanego zwykle w naukach przyrodniczych (może poza małym wyjątkiem rozdziału Rekomendacje). Struktura dysertacji obejmuje: Spis treści (3 strony; 2% tekstu), Spis rycin (3 strony; 2%), Spis tabel (1 strona; 1%); Słownik stosowanych akronimów (3 strony; 2%), Terminologię i wzory (2 strony; 1%), Wstęp (5 stron, 3%), Przegląd literatury (20 stron, 14%), Metodologię badań (29 stron, 20%), Wyniki badań (33 stron, 22%), Dyskusję (8 stron, 5%), Podsumowanie wyników i wniosków (3 strony; 2%), Rekomendację (1 strona; 1%), Literaturę (17 stron; 12%) oraz Załączniki (9 stron; 6%). Poszczególne rozdziały zostały podzielone na czytelne podrozdziały ułatwiające studiowanie pracy i nawigowanie po jej zawartości. Spis literatury liczy 187 pozycji, z czego 3 lub 4 należy pominąć ze względu na niepełne cytowanie spowodowane prawdopodobnie użyciem zautomatyzowanej opcji wstawiania odnośników (np. Wesołowski T. i in. lub Kujawa A. i in.). Aż 43 pozycje literatury pochodzą z ostatnich 5 lat (od 2013 roku) co stanowi niemal 25% wszystkich wymienionych pozycji.

Pięć pierwszych wymienionych powyżej rozdziałów Autor podzielił na wyraźne podrozdziały pozwalające czytelnikowi w logiczny sposób rozumieć, poruszać się i zagłębiać w szczegóły pracy. Przyjęty standard na rozdziały oraz ich treści są typowe i odpowiednie dla charakteru dysertacji, spełniając wymogi stawianym rozprawom naukowym.

Autor dysertacji położył największy nacisk na wykazanie przydatności technologii lotniczego skanowania laserowego w zakresie zastąpienia tradycyjnie stosowanych fotograficznych zdjęć hemisferycznych w opisie i modelowaniu warunków świetlnych pod okapem drzewostanu - poprzez zastosowanie metryk (statystycznych) chmury punktów LiDAR. Autor oparł swoje wyniki badań

i wnioski na materiale empirycznym pozyskanym w drzewostanach Puszczy Białowieskiej w ramach projektu, w którym po części jak pisze uczestniczył (Life+ ForBioSensing Project). W rozdziale **WSTĘP**, na stronie 22 dysertacji, Autor zdefiniował pięć szczegółowych celów badawczych pracy oraz cel ogólny pracy.

Następnie Autor formułuje główną tezę badawczą pracy brzmiącą: „Stawia się hipotezę, iż można szacować ilość promieniowania słonecznego docierającego do podszytów i podrostów na podstawie analiz zbiorów (danych) lotniczego skanowania radarowego”. Na tej samej stronie (s. 23), Autor wymienia aż 8 hipotez uszczegółwiających hipotezę główną. Na końcu podrozdziału 1.5. autor konkretyzuje tzw. pytania badawcze, na które zamierzał uzyskać odpowiedzi w toku realizacji swej dysertacji. Są nimi po kolei poniższe pytania:

1. Czy można stwierdzić występowanie istotnie statystycznych związków pomiędzy wartością nasłonecznienia panującego w dolnych warstwach drzewostanu (część podokapowa – podszyt i podrost) - a parametrami struktury przestrzennej drzewostanu pomierzonych tradycyjnymi pomiarami?
2. Czy można potwierdzić istnienie statystycznie istotnych związków pomiędzy nasłonecznieniem pod okapem drzewostanu a wybranymi parametrami koron drzew opisanymi metrykami ALS LIDAR?
3. Co oznacza optymalny dobór promienia kołowych powierzchni próbnych zapewniający pozyskanie kompletnych informacji z danych ALS oraz jaka jest wartość progowania wysokości podstawy korony w celu wskazania właściwych parametrów?
4. Jaki pojedynczy parametr statystyczny opisujący korony lub kombinacja takich metryk LiDAR byłaby najbardziej odpowiednia do opisu nasłonecznienia podokapowego i czy można zastosować parametryczne modele regresji liniowej do opisu tego związku?

W drugim rozdziale **PRZEGLĄD LITERATURY**, autor dysertacji zaprezentował w podrozdziałach następujące zagadnienia:

1. Przegląd i charakterystyki promieniowania słonecznego docierającego do lasu.
2. Rolę światła słonecznego dla rozwoju drzewostanu.
3. Interakcje promieniowania słonecznego i koron drzew.
4. Związek pomiędzy pomiarami drzew a wartością nasłonecznienia podokapowego,
5. Metodyka wykonywania podokapowych zdjęć hemisferycznych.
6. Metodykę technologii lotniczego skanowania laserowego (LiDAR).
7. Przegląd metod teledetekcyjnych do rejestracji nasłonecznienia pod okapem drzew.
8. Charakterystykę przyrodniczo-leśną terenu Puszczy Białowieskiej.

Kolejny rozdział poświęcony metodyce pracy zawiera (co trochę dziwi że nie jest to wydzielony rozdział poza Metodyką) szczegółowy opis obszaru badawczego i dalej już sposobu rozmieszczenia, geometrii i rozmiarów powierzchni próbnych, wyboru parametrów drzew

i drzewostanów (takich jak: gatunek drzewa, pierśnica, wysokość drzewa, pokrycie powierzchni przez korony (ang. canopy cover), sposobu wykonywania pomiarów naziemnych tych parametrów).

Rozdział **WYNIKI** składa się z kolejno uzyskiwanych rezultatów badań, tj.:

- charakterystyki wybranych parametrów biometrycznych drzewostanów na kołowych powierzchniach próbnych (np. wysokości średnie, maksymalne drzew, odchylenie standardowe, zagęszczenie drzew/1ha, G, czy zwarcie);
- składu gatunkowego analizowanych drzewostanów (tab. 8);
- wyników przetwarzania hemisferycznych zdjęć naziemnych (z 96 powierzchni) w oprogramowaniu WinSCANOPY (tab. 9, 10,11);
- analizy statystycznej poszukiwania korelacji pomiędzy wybranymi parametrami biometrycznymi (np. wysokość drzewa, zwarcia poziome) a promieniowaniem bezpośrednim, rozproszonym i całkowitym w drzewostanie (tab. 12);
- analizy regresji w wariantach różnego progowania chmury ALS (filtracja impulsów na różnych wysokościach AGL: 1.0, 1.37, 2.0, 3.0, 3.6m) oraz wielkości promienia powierzchni kołowej pomiędzy 5.0-15.0m (ryc. 40-48);
- analiz poszukiwania korelacji pomiędzy metrykami (statystykami) chmury punktów bazującymi na odbiciach (ang. return; echo sygnału) ALS a wartościami promieniowania słonecznego: bezpośredniego, rozproszonego i całkowitego (tab.13);
- analiz korelacji pomiędzy metrykami (statystykami) wysokościowymi znormalizowanej chmury punktów ALS a wartościami promieniowania słonecznego: bezpośredniego, rozproszonego i całkowitego (tab.14);
- analiz poszukiwania korelacji pomiędzy percentylami chmury punktów bazującymi na odbiciach (ang. return; echo sygnału) ALS a wartościami promieniowania słonecznego: bezpośredniego, rozproszonego i całkowitego (tab.15);
- analiz poszukiwania korelacji pomiędzy metrykami intensywności (ang. Intensity) odbicia promieniowania zapisanej w chmurze punktów ALS a wartościami promieniowania słonecznego: bezpośredniego, rozproszonego i całkowitego (tab.16) a następnie ich percentylami (tab. 17)
- analiz poszukiwania korelacji pomiędzy statystykami chmury punktów ALS bazującymi na współczynnikach/ilorazach zmiennych (np. CC lub CRR; bicentyle) a wartościami promieniowania słonecznego: bezpośredniego, rozproszonego i całkowitego (tab.18);
- analiz wyboru zmiennej objaśniającej do modelu SLR (Simple Linear Regression) opisującego związku cechy (metryki) chmury ALS a komponentami światła pod drzewostanem (bezpośrednie, rozproszone, całkowite; ryc. 49);
- analiz wyboru zmiennych objaśniających do modelu wielokrotnej regresji MLR (Multiple Linear Regression) z większą ilością zmiennych niezależnych opisującego związku cechy (metryki) chmury ALS a komponentami światła pod drzewostanem (bezpośrednie, rozproszone, całkowite; ryc. 50-54; tab. 19-23);

- mapy nasłonecznienia bezpośredniego, rozproszonego i całkowitego dla wybranego fragmentu terenu badań.

Rozdział **DYSKUSJA** zbudowany jest z pięciu podrozdziałów w kolejności opisujących wyniki na tle prac innych autorów, tj.: efekt stosowania zdjęć hemisferycznych w trybie wielostanowiskowym dla powierzchni kołowej; wpływu wielkości powierzchni kołowej oraz wysokości progowania (wysokości filtracji nad gruntem odbić sygnału przy obliczaniu parametru zwarcia); metodę SLR oraz metodę MLR do wyboru zmiennych objaśniających oraz poszukiwanie źródeł błędów i niepewności dla uzyskanych wyników.

Rozdział **PODSUMOWANIE i WNIOSKI**, na których autor raz jeszcze stara się streścić najważniejsze swoje wyniki dotyczące doboru odpowiedniej wielkości promienia powierzchni kołowej czy korelacji wybranych cech taksacyjnych z nasłonecznieniem mierzonym podokapowo. Szczegółowo autor omawia wybrane metryki związane z echem, wysokością czy intensywnością sygnału LiDAR oraz ich związki (korelację) z nasłonecznieniem.

Autor zdecydował się dość nietypowo na stworzenie ostatniego 1-stronicowego rozdziału o nazwie **REKOMENDACJE**, w którym dość krytycznie wskazuje na pewne elementy zastosowanej przez siebie metodyki i zaleca w przyszłości przyjąć pewne poprawki prowadzące do uniknięcia błędów.

Na zakończenie pracy Autor przedstawia spis **LITERATURY** i zamieszcza **ZAŁĄCZNIK**.

Podsumowując, postawiony cel główny pracy, poszczególne pytania badawcze (hipotezy) oraz zakres metodyczny pracy autor definiuje i prezentuje bardzo zrozumiale dla czytelnika pracy. Praca napisana jest w sposób logiczny w zasadzie wg standardu przyjętego dla tego typu opracowań (poza rozdziałem Rekomendacje). Poziom edycyjny dokumentu tj. rycin i tabel a także przytaczanych wzorów jest na dobrym poziomie.

Ogólne uwagi recenzenta

Niewątpliwie tematyka dysertacji podjęta przez mgr inż. Alex S. Olpenda jest niezmiernie ważna w nowoczesnych badaniach naukowych zmierzających do stworzenia matematycznego opisu (modelu) funkcjonowania drzew, drzewostanów i całych ekosystemów leśnych (np. lasów naturalnych), i to zarówno w podejściu ściśle badawczym jak i gospodarczym (optymalizacja zabiegów hodowlanych w lasach podlegających urządzaniu i hodowli). Badania nad parametrem nasłonecznienia w drzewostanach prowadzi się czasem w celu zapewnienia ochrony zagrożonym gatunkom światłożądnym bądź wymagających specyficznych warunków mikroklimatycznych (np. sukulentów, roślinność kserotermiczna, porosty). W takich sytuacjach posługiwanie się wymiernymi wskaźnikami (np. zwarcia) obliczanymi na podstawie np. analiz chmur punktów ALS daje podstawę do

podjęcia racjonalnych zabiegów z zakresu ochrony czynnej. Bardzo ważnym elementem w badaniach nad sekwestracją węgla (np. LGW) przez drzewostany jest właśnie wartość nasłonecznienia i innych warunków klimatycznych podlegających widocznym zmianom w ostatnich dekadach (np. ocieplenie się klimatu) i reakcja przyrostowa drzew na nie przy jednoczesnej zmianie żyzności siedlisk (zmiany bonitacji; eutrofizacja siedlisk). Wykorzystanie zdjęć hemisferycznych w aspekcie ich szybkiego zastąpienia (choć taka wyraźna konkluzja nie pada wprost ze strony Doktoranta) technologią lotniczego skanowania laserowego (ALS) oraz zaawansowanych analiz z zakresu statystyki i GIS jest niewątpliwie celnym wyborem dysertacji wpisującym się w nowoczesne nurty badawcze. Należy zaznaczyć, iż w przypadku naszego kraju ponad 92% powierzchni posiada chmury punktów ALS pozyskane w okresie 2011-2018. To niezmiernie ważna informacja zarówno dla leśników jak i badaczy, gdyż dane te są dostępne nieodpłatnie. Co więcej, w przypadku miast gęstość chmur punktów ALS jest 3x wyższa (aż 12 pkt/m²) niż dla innych obszarów i są one sukcesywnie powtarzane, co daje wspaniałe możliwości rozszerzenia badań na kwestie tzw. serwisów (usług) ekosystemowych świadczonych przez drzewa, parki i lasy miejskie – m.in. pod kątem schładzania miejskich wysp ciepła i wzmocnienia gospodarki wodnej czy jakości powietrza przez pochłanianie zanieczyszczeń i jednoczesnej produkcji tlenu. Temat dysertacji wybrany przez doktoranta wspaniale wpisuje się więc w poszukiwanie uniwersalnych metod automatycznego określania usług ekosystemowych z wykorzystaniem chmur punktów LiDAR. W przypadku braku danych ALS można się posilkować metodami dopasowania zdjęć lotniczych (*ang.* matching; stereo-matching), które jednak nie dają takich możliwości jak aktywna technologia ALS pozwalająca na penetrację warstw koron drzew (wyznaczanie parametru ażurowość czy LAI, biomasy koron lub ich objętości i innych pochodnych). Najnowocześniejszym współcześnie podejściem badawczym jest stosowanie naziemnego skanowania laserowego w postaci klasycznych pomiarów statycznych TLS bądź też Mobilnego Skanowania Laserowego (*ang.* MLS; Mobile Laser Scanning). Ta ostatnia technologia może być zarówno stosowana z mobilnych platform (samochód, quad) lub też tzw. nosi nazwę „ubieralnej” (*ang.* wearable) co zawdzięcza sytuacji noszenia skanera w specjalistycznym plecaku wyposażonym ponadto w system kamer cyfrowych, odbiornik GNSS, precyzyjny IMU oraz blok rejestracji danych. O ile obie wyżej wymienione technologie (TLS/MLS oraz dopasowania zdjęć) nie były przedmiotem jego doktoratu w ramach ForBioSensing, to doktorant nie wspomina o nich np. w ostatnim rozdziale Rekomendacje, a jedynie wskazuje, co mogłoby poprawić tradycyjnie stosowane technologie zdjęć hemisferycznych. Nie oznacza to absolutnie, iż doktorant nic nie wie o tych technologiach, gdyż w dysertacji cytuje pracę przeglądową (*Modeling Solar Radiation in the Forest Using Remote Sensing Data: A Review of Approaches and Opportunities*) opublikowaną w renomowanym czasopiśmie, której jest pierwszym autorem. Jest ona przeglądem literatury wskazującym iż niemal 1/3 z technologii LiDAR stosowanej w modelowaniu światła słonecznego w drzewostanach zajmuje TLS. Zdaniem recenzenta, doktorant śmiało powinien rekomendować te techniki szczególnie w aspekcie ich integracji z chmurami ALS uzyskując w ten sposób pełną informację o strukturze drzewostanu. Tak czy inaczej pomijając powyższe uwagi jako mało znaczące – przedłożona rozprawa może być oceniana wysoko, jako bardzo trafna, dobrze zaplanowana

i metodycznie dopracowana, od momentu zaplanowania prac terenowych, ich wykonania, przez etap przetwarzania zdjęć hemisferycznych po analizy statystyczne. Autor starał się wskazać na pewne metryki (statystyki) chmury punktów ALS, które w jednoznaczny sposób pozwoliłyby opisać warunki nasłonecznienia pod okapem drzewostanu. Dzięki zachowanej systematyczności podejścia metodycznego w zbieraniu i przetwarzaniu danych można uznać, iż osiągnięte wyniki modelowania statystycznego (SLM oraz MLR) wskazujące na zmienne objaśniające są wiarygodne.

W przypadku modelu SLR Autor wskazuje na zmienne objaśniające RHBin7 (Bicentile 7%) oraz RH LPI (LPI) z progowaniem na 3.0 m od gruntu - jako charakteryzujące się największą siłą współczynnika R^2 dla opisu światła bezpośredniego i rozproszonego oraz ich sumy pod okapem drzewostanu.

Autor ostatecznie dokonuje wskazania modelu przez porównywanie otrzymywanych wartości RMSE i braku korelacji resztek cząstkowych. Autor do wyboru najistotniejszych zmiennych objaśniających opiera się na wskaźniku współliniowości (*ang.* VIF; Variance Inflation Factor). W tabeli 20 zawarte są najważniejsze zmienne objaśniające, a następująca po nich rycina 51 prezentuje między innymi rozkłady częstości i rozrzutu oraz współczynnik korelacji. Ze względu na dużą skośność wykresów rozkładu (po zastosowaniu testu Shapiro-Wilka) aż 6 z 8 wytypowanych zmiennych objaśniających, Autor poddaje transformacji logarymicznej.

W wyniku przeprowadzonych analiz statystycznych Autor typuje zmienną - ażurowość koron drzew (*ang.* Laser Penetration Index; LPI), jako najważniejszą zmienną objaśniającą nasłonecznienie (energii bezpośredniej i pośredniej) pod okapem drzewostanu w modelu wielokrotnej regresji liniowej (MLR). Kolejne najważniejsze zmienne objaśniające w modelu MLR to statystyki: RH(<DBH) median, RImean oraz Return 1%.

Analizy statystyczne wykonane są przez Autora bardzo starannie, są dobrze przemyślane, opisane i poprawnie zastosowane.

Można z pewnością stwierdzić, że Autor podjął się w dysertacji tematyki poruszającej bardzo złożone zagadnienia o charakterze interdyscyplinarnym z zakresu nauk leśnych ale i fizyki światła czy technologii pomiarowej LiDAR a nawet fotografii i przetwarzania obrazów cyfrowych. Szczególnie te ostatnie dane wydają się być bardzo dobrze opracowane przez autora w oprogramowaniu WinSCANOPY.

Uwagi szczegółowe recenzenta

Pomimo ogromu pracy poświęconej na przygotowanie rozprawy, którą należy pochwalić i docenić, Autor nie ustrzegł się niegroźnych błędów, które jednak nie są w stanie przesłonić wartości przedłożonej dysertacji. Wymieniam je aby pomóc doktorantowi w późniejszych publikacjach fragmentów dysertacji, bo jest ona tego warta.

1. W Słowniku zastosowanych akronimów, Autor pracy błędnie wyjaśnia skrót GPS (powinno być NAVSTR-GPS tłumaczone jako Global a nie Geographical) czy niewłaściwie stosuje pisownię jednostek kHz czy °C. Sam akronim LiDAR tak często przez niego używany też ma

zamienione brzmienie (powinno być Light Detecion And Ranging tak jak użyta nazwa w rozdziale 2.7). Pisownia niektórych skrótów wymaga ujednolicenia stosowania dużych liter taka jak w przypadku UTM.

2. W tabelach Terminologia, jednostki i wzory - występuje błąd pisowni jednostek w indeksie górnym (np. m^2).
3. Podrozdział 1.2. (str. 20) - Autor opisując dokładność systemów LiDAR (w domyśle autor pisze jedynie o ALS) – wymienia dokładność milimetrową (ang. sub-centimeter), przy czym w rzeczywistości wynosi ona kilka- do kilkunastu cm na osi Z do kilkudziesięciu cm (20-25 cm) dla współrzędnych płaskich (XY), co szczególnie w środowisku leśnym pozbawionym infrastruktury i możliwości dokładnego pomiaru GNSS jest trudne do określenia. Bezsprzecznie technologia ALS może być uznawana jako nowy paradygmat pomiarowy ale nie można wyznawać zasady milimetrowych dokładności, gdyż w dużej mierze niedokładność bierze się z braku możliwości ustalenia precyzyjnej pozycji platformy skanującej zamontowanej w samolocie (pomimo precyzyjnych: odbiornika GNSS i nawigacji bezwładnościowej IMU; błąd położenia około 2 cm). Zresztą w rozdziale 3.5. Autor sam cytuje informacje o dokładności (XY-20cm / Z – 15cm).
4. W podrozdziale 1.5. Hipotezy i pytania badawcze – Autor stawia 4 pierwsze pytania, na które w zasadzie bez ich weryfikacji znamy dziś odpowiedź o istnieniu związku pomiędzy strukturą lasu i warunkami świetlnymi w nim panującymi. Myślę, iż autor zafascynowany technologią LiDAR mało szczegółowo postawił pytania, stąd wrażenie, że pierwsze 4 pytania są w zasadzie zbędne. Hipoteza pracy nie może być po prostu zbyt oczywista. Dopiero 4 kolejne hipotezy brzmią poprawnie w rozumieniu recenzenta, gdyż wymagają zweryfikowania ich poprawności.
5. W podrozdziale znajduję dość niejasne stwierdzenie na temat części dyskusji pochodzącej od osób trzecich. Rozumiem to jako zbieranie informacji od osób zaangażowanych w projekcie, które przekazały swoje osobiste doświadczenia Autorowi, który z oczywistych względów w całym projekcie nie uczestniczył a jedynie skorzystał z użyczonych mu danych projektu LIFE.
6. Podrozdział 3.1. Teren badań - mógł być połączony w zasadzie z rozdziałem 2.9 i nie pojawiać się w metodyce badań. W przypadku zapisu współrzędnych geograficznych powinno się stosować N oraz E odpowiednio dla szerokości i długości geograficznej (str. 47).
7. W rozdziale 3.2 (str. 48) recenzent nie może doszukać się informacji na temat modelu zastosowanego odbiornika GNSS-RTK (nie używałbym słowa GPS w przypadku gdy był to odbiornik dwu-systemowy np. NAVSTAR/GLONASS). Autor pracy nie podał też niestety żadnych miar dokładności wyznaczania pozycji tym odbiornikiem choć recenzent zdaje sobie sprawę z problemów uzyskiwanych dokładności w takich drzewostanach i braku stacji ASG-EUPOS od strony granicy wschodniej naszego kraju.
8. Rozdział 3.3. Tabela 3. – nie podano żadnych jednostek ani w jakiej skali określano zwarcie posługując się metodą wzrokową a jest to dość zasadnicza kwestia. Czy przez „Trunk height”

na pewno należy rozumieć podstawę wysokości korony drzewa? Wg recenzenta powinno się stosować angielską nazwę – „crown base”.

9. Rozdział 3.4. – recenzent nie może znaleźć informacji o jakiej porze roku wykonano pomiary naziemne i jaki był ich zakres czasowy (w jakich miesiącach rozpoczęto i zakończono pomiary). Zdjęcia w pracy wskazują na okres wegetacji ale informacje szczegółowe podpowiadają, że wykonywano je w 2015 i w 2017 roku.
10. Rozdział 3.5 - Czy podany kąt maksymalny 60° dotyczy sumy kątów nadir-off ($2 \times 30^\circ$) czy też pojedynczego? Zamiast akronimu DEM proponowałbym stosować bardziej europejski DTM (Digital Terrain Model), który jednoznacznie określa czego ten model wysokościowy dotyczy. Akronim DEM często jest stosowany w literaturze z obszarów Ameryki Północnej ale może dotyczyć też danych z misji SRTM i modeli zawierających w sobie poza informacją o aproksymowanym gruncie także szcążkowe informacje pochodzące od roślinności czy budynków. W sytuacji precyzyjnych zapisów i analiz na kartometrycznych danych ALS, nie stosuje się tak jak pisze Autor – „geographic coordinates” – tj. zapisu w postaci stopni czy minut i sekund. Należy wymienić przyjęty układ odniesienia współrzędnych płaskich (podejrzewam, że PL-1992) oraz wysokościowych (prawdopodobnie Kronsztadt '86).
11. Rozdział 3.6.1. – proponowałbym stosować zamiast pojęcia *trunk height* – pojęcie *base of crown* oraz zamiast *crown height* – pojęcie *crown length*. Inne pytanie recenzenta: czy zastosowany wzór nr 8 uwzględnia luki pomiędzy koronami drzew na powierzchni próbnej? Dlaczego Autor nie policzył rzeczywistej objętości wykorzystując modele DSM oraz DTM (DEM) oraz średniej wysokości podstawy korony?
12. Rozdział 3.8.1 – liczba ech sygnału w skanerach typu full waveform może być generowania niemal dowolnie w zależności od struktury obiektów (drzew) i odległości pomiędzy ich elementami (np. konarami). Autor pracy pisze, iż sensor użyty w projekcie wspiera do 5-ciu odbić tymczasem, zapewne można by ich wygenerować więcej ale takie parametry przyjęto prawdopodobnie na etapie specyfikacji zamówienia publicznego.
13. Rozdział 3.8.3. – Autor podjął ryzyko dowiedzenia istotności intensywności sygnału jako zmiennej objaśniającej w modelach. Tymczasem nie stosuje się tej wartości zazwyczaj w badaniach z tego względu, iż kąty wysyłania i kąt padania promienia na gałęzie i aparat asymilacyjny, są bardzo różne i często pochodzą z sąsiednich szeregów. Tak więc parametr intensywności sygnału często może być mylnie interpretowana. Niewątpliwie intensywność zawiera w sobie pewne informacje, które można by ekstrahować i poddać interpretacji ale wtedy stosuje się normalizację odległością od skanera raz kątem wysłania wiązki, czego Autor prawdopodobnie nie przeprowadził. Brak też opisu atrybutów samej chmury ALS czy zawiera ona takie dane.
14. Rozdział 3.8.4. – Wzór nr 22 – co w sytuacji jeśli roślinność runa lasu będzie się charakteryzowała wysoką intensywnością a drzewostan główny będzie stosunkowo ażurowy o małym zwarciu (np. zamierające korony świerków)? Czy ten wzór faktycznie może być bezpiecznie stosowany jako porównawczy? Intensywność odbitego promieniowania w

zakresie bliskiej podczerwieni bazuje w głównej mierze na strukturze komórkowej aparatu asymilacyjnego (w przypadku jego istnienia) a mniej na geometrii obiektu (choć oczywiście im większa planarność i kąt zbliżony do padającego tym większe odbicie).

15. Rozdział 4.1. – Mapka rozlokowania powierzchni próbnych ze zdjęciami hemisferycznymi – jest krytycznie mała i ze źle dobraną kolorystyką dla symbolu powierzchni kołowych oraz zbędnego w sumie tła pochodzącego prawdopodobnie ze zobrazenia satelitarnego (kompozycja CIR). Dalej Tabela 7 – pytanie czy ostatnia kolumna opisująca zwarcie przedstawia wyniki pomiarów dokonywanych wzrokowo na powierzchniach kołowych? Jeśli tak jaka była skala (stopnie ? procenty?) i zasięg wartości pomiarów (0-100)? Wydaje się, iż źle podpisany został rysunek prezentujący wartość G (basal area) stosując jednostki przewidziane dla nasłonecznienia zamiast m²/ha dla G.
16. Rozdział 4.2 – wszędzie w tym rozdziale w przypadku opisów po łacinie brak skrótu od nazwiska autora np. *Pinus sylvestris* L. – czyli w tym przypadku Karola Linneusza. Opis Ryc. 38 – brakuje słowa Tree przed słowem „species”.
17. Rozdział 4.3. – w tym bardzo ważnym rozdziale, recenzent nie znajduje szczegółowej analizy lewostronnych rozkładów dla nasłonecznienia ani nie bardzo rozumie dlaczego Autor przytacza w tym miejscu dyskusje z wynikami prac innych autorów realizowanych w Tucznie bądź w innych miejscach. Temu w zasadzie poświęcony jest następny rozdział Dyskusja wyników.
18. Rozdział 4.4. – w tym rozdziale recenzent spodziewał się głębokiej analizy uzyskanych wyników. Niestety znów pojawia się dyskusja z wynikami innych autorów i tabela 12, która powinna być szczegółowo zanalizowana. Przez ten fakt wyniki własne tak ważne podlegają zatarciu przez nadmiar informacji. Recenzent nie może też znaleźć tabeli, w której Autor zawarł informacje na temat: liczby drzew na powierzchni (chyba że Tabela 1 Załącznika w kolumnie Total count – brak jednak jednostek). To samo dotyczy objętości koron?
19. Rozdział 4.6.1. – tabela 13 - Autor od tego momentu miał problemy edycyjne z poprawną pisownią cyfr. Brakuje zera przed przecinkiem w wielu lokalizacjach co może być wynikiem importu z innych zewnętrznych programów statystycznych. Nie ma bowiem takiej wartości jak -.236. To odnosi się to tabel 15-18.
20. Rozdział 4.10 (str. 105 – Autor jest w sumie niekonsekwentny (można powiedzieć wyczuwa intencje recenzenta) stosując akronim DTM zamiast wcześniej stosowanego DEM. Nie bardzo zrozumiałe dla recenzenta jest zdanie „Using the normalized point cloud, digital terrain model (DTM) and digital surface model (DSM) were generated..” Na podstawie znormalizowanej chmury punktów nie można stworzyć sensownego DTM (punkty klasy grunt przybierają wartość zero, więc model TIN uzyskuje wartości dla płaskich figur = 0; Flat triangle). Tym bardziej nie da się ze znormalizowanej chmury stworzyć DSM a jedynie nDSM czyli znormalizowany Numeryczny Model Pokrycia Terenu (pl. zNMPT). Myślę, iż to poważne przejęzyczenie Autora. Podpis pod Ryc.55. Zaczynający się od „RGB Image of LiDAR... nie brzmi też poprawnie. Należy go zastąpić angielskim brzmieniem: Wizualizacja chmur

punktów LiDAR po atrybucie RGB... Strona 106 i 107 - ryc. 56 i 57. Nie zastosowano skali, opisu ramkowego lub choćby strzałki północy w tych kompozycjach mapowych poza jedną RHmedian (tylko skala linikowa). Na Ryc. 58 (strona 108) wyłączono z analiz zręby zupełnie czego chyba nie opisał Autor w Metodyce. One wskazywałyby nasłonecznienie bezpośrednio na zrębie jako dobrą referencję dla terenu w miarę odsłoniętego (poza wpływem ściany lasu oceniającej część gniazda). Nie uszczegółowiono w opisie ryciny czy średnia dzienna odnosi się do okresu wegetacji czy jest to wartość średnia roczna?

21. Rozdział 6. Strona 117 – dlaczego zdecydowano o wyłączeniu analiz powierzchni kołowych z zamierającymi bądź martwymi drzewostanami? Czy powodem była trudność określenia zwarcia martwych i zamierających koron podczas badań naziemnych?
22. W rozdziale Rekomendacje – recenzentowi bardzo brakuje choćby informacji o trendach w badaniach z wykorzystaniem technologii TLS czy MLS lub skanowania ULS (z platformy BSP) co opisał już wcześniej.

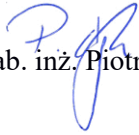
11. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedłożona praca doktorska Pana mgr inż. Alexa S. Olpendy, pomimo wymienionych powyżej stwierdzonych niewielkich usterek oceniam bardzo wysoko. Jest ona przykładem dojrzałej pracy naukowej, na realizację której Autor poświęcił wiele lat pracy kameralnej i obszerne studia literaturowe. Praca wykazuje ogólną dobrą widzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie leśnictwo oraz potwierdza umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy badawczej. Doktorant podjął niełatwy temat dysertacji wskazując tym samym na trendy rozwoju badań w naukach leśnych oraz ich implementacji na rozległe obszary leśne, a nie tylko ograniczanie analiz przestrzennych wyłącznie do sieci powierzchni próbnych. Przy dostępie do chmur punktów ALS dla niemal całej powierzchni leśnej kraju, można na szeroka skalę modelować wartości nasłonecznienia podokapowego jako bardzo ważnego parametru rozwoju i trwałości ekosystemów leśnych zarówno PGL LP, Parków Narodowych jak i lasów prywatnych i in. Zastosowanie nowoczesnych metod teledetekcyjnych oraz analizy statystycznych poszukujących najistotniejszych zmiennych objaśniających natężenie promieniowania słonecznego pod okapem drzewostanu, pozwoliło poprawnie zweryfikować założone hipotezy badawcze, wyciągnąć odpowiednie wnioski i sformułować rekomendację dla badań w przyszłości.

Po wnikliwym zapoznaniu się z przedłożoną dysertacją, stwierdzam, iż wkład Doktoranta Pana Alexa S. Olpenda w zakresie nauk związanych z szeroką pojętą Geomatyką leśną, a w szczególności w zakresie stosowania technologii lotniczego skanowania laserowego (ALS) w aspekcie wykorzystania metryk (statystyk) opisowych chmury punktów LiDAR do analiz struktury poziomej i pionowej drzewostanu - a tym samym modelowania warunków świetlnych panujących pod okapem drzewostanu - jest znaczący. Przedstawiona rozprawa zawiera oryginalne rozwiązanie prawidłowo postawionego i mającego istotne znaczenie praktyczne - problemu badawczego czyli określenia związku pomiędzy podokapowymi warunkami świetlnymi (będącymi wynikiem zmieniającego się w trakcie życia drzewostanu) parametru biometrycznego zwarcia poziomego koron - a metrykami (statystykami) ALS LiDAR –

- spełnia wszelkie warunki określone w ustawie z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2017 poz. 1789) - i rekomenduję tym samym Radzie Wydziału Leśnego SGGW w Warszawie - dopuszczenie jej do publicznej obrony i do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jednocześnie ze względu na zastosowania innowacyjnej technologii ALS oraz uzyskania obiecujących wyników badań, wskazujących na nowe kierunki badań naukowych w leśnictwie i ochronie przyrody - wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Olexa S. Olpenda.


dr hab. inż. Piotr Wężyk