

Warszawa, 22 września 2018 r.

Prof. dr hab. Stanisław Miścicki
Katedra Urządzania Lasu i Ekonomiki Leśnictwa SGGW
ul. Nowoursynowska 159
02-776 Warszawa

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr. inż. Pawła Hawryło
**„Określanie zasobności drzewostanów sosnowych metodą przetwarzania
chmur punktów pochodzących z dopasowania zdjęć lotniczych oraz
lotniczego skanowania laserowego”**

Podstawa wykonania recenzji

Recenzję rozprawy doktorskiej pana mgr. inż. Pawła Hawryło „**Określanie zasobności drzewostanów sosnowych metodą przetwarzania chmur punktów pochodzących z dopasowania zdjęć lotniczych oraz lotniczego skanowania laserowego**”, napisanej pod kierunkiem pana dr hab. inż. Piotra Wężyka, wykonuję na podstawie uchwały Rady Wydziału Leśnego Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie z dnia 4 lipca 2018 roku, oznaczonej numerem 89/2018.

Znaczenie pracy

Od lat 90. ubiegłego wieku nastąpił dynamiczny rozwój teledetekcyjnej techniki skanowania laserowego. Pojawił się także nowy sposób przetwarzania tradycyjnych zdjęć lotniczych: generowanie chmury punktów na podstawie dopasowania zdjęć. Dane pozyskane z użyciem tych technik, zwłaszcza zbierane z poziomu lotniczego, są wykorzystywane w pomiarach zasobów leśnych. W tworzeniu nowych rozwiązań technologicznych uwzględnia się także zobrazowania satelitarne, w związku z niewielkimi kosztami ich uzyskania oraz zwiększaniem ich rozdzielczości przestrzennej.

Mimo pozytywnych wyników badań podejmowanych od około połowy lat 1990 (w Polsce od około 2005 roku) i prób ich praktycznego wykorzystania w leśnictwie, kontynuowane są prace dotyczące wykorzystania w pomiarach lasu wskazanych wyżej technik teledetekcyjnych. Powodem jest dążenie do: zwiększenia dokładności pomiarów, zastosowania wypracowanych rozwiązań w lasach o złożonej budowie, a także szacowania zasobów w małych jednostkach, takich jak poszczególne drzewostany.

W tej sytuacji badania dotyczące określania zasobności – najważniejszej cechy w urządzeniowej inwentaryzacji lasu – z użyciem cech tzw. chmury punktów, podjęte przez pana mgr. inż. Pawła Hawryło, należy uznać za potrzebne, o dużym znaczeniu poznawczym i praktycznym.

Ogólna charakterystyka rozprawy

Praca doktorska została przedstawiona przez pana mgr. inż. Pawła Hawryło w formie spójnego tematycznie zbioru trzech artykułów opublikowanych w ostatnim okresie (w latach 2017-2018): dwóch prac wspólnych, w których doktorant był głównym autorem i jednej pracy indywidualnej. (Dla porządku podaję je w kolejności wyznaczonej przez doktoranta: **1.** Hawryło, P., Tompalski, P., Wężyk, P., 2017. Area-based estimation of growing stock volume in Scots pine stands using ALS and airborne image-based point clouds. *Forestry*, 90(5), 686–696, doi: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpx026>; **2.** Hawryło, P., 2017. Określanie wybranych cech drzewostanów sosnowych z wykorzystaniem chmur punktów pozyskanych w procesie automatycznego dopasowania cyfrowych zdjęć lotniczych. *Sylwan*, 161(9), 707-714;

3. Hawryło, P., Wężyk, P., 2018. Predicting Growing Stock Volume of Scots Pine Stands Using Sentinel-2 Satellite Imagery and Airborne Image-Derived Point Clouds. *Forests*, 9(5), 274, doi: 10.3390/f9050274.) Do pracy został dołączony autoreferat liczący 25 stron zasadniczego tekstu. Ma on charakter syntezy uzyskanych wyników, a jednocześnie podkreśla powiązanie tematyczne trzech artykułów. W autoreferacie został także podany wkład poszczególnych autorów w tworzeniu tych opracowań. W odniesieniu do doktoranta – pana Pawła Hawryło – było to odpowiednio: 80, 100 i 65%. Dwa z trzech artykułów stanowiących rozprawę zostały opublikowane w języku angielskim w znaczących czasopismach (*Forestry* i *Forests*). Trzeci artykuł został opublikowany w języku polskim w „Sylwaniu”, też ocenianym jako czasopismo znaczące – ze względu na fakt docierania do leśnej kadry inżynierskiej oraz osób sterujących polskim leśnictwem.

Przedstawienie rozprawy doktorskiej w formie zbioru artykułów z jednej strony jest ułatwieniem. Przejście przez kolejne etapy recenzji przyczynia się do uporządkowania tekstu, oceny zastosowanych metod, zwrócenia uwagi na najważniejsze, aktualne publikacje. Z drugiej strony ścisły limit objętości tekstu może powodować zbyt oszczędne omówienie niektórych trudnych partii. Oba te aspekty są dostrzegalne w rozprawie, ale ogólnie jest ona zrozumiała, a przewodnia myśl jest łatwa do uchwycenia.

Ocena szczegółowa

Przedstawione przez pana mgr. inż. Pawła Hawryło wyniki badań dotyczą fragmentu zagadnienia oszacowania, z użyciem metody dwufazowej, stanu cech charakteryzujących drzewostany lub rozległe obszary leśne. Ta metoda jest jednym z rozwiązań metody reprezentacyjnej. Ogólnie polega na wykorzystaniu powiązanych ze sobą dwóch różnych rodzajów prób niejednakowo licznych, przy czym stosowanie tej metody ma sens, gdy koszty pozyskania prób liczniejszych są znacząco mniejsze niż prób mniej licznych. W kontekście recenzowanej pracy chodziło o powiązanie prób naziemnych z próbami na przetworzonym obrazowaniu teledetekcyjnym. Tradycyjnie (w epoce żmudnego mierzenia cech teledetekcyjnych) liczba prób teledetekcyjnych była kilku-, rzadziej kilkunastokrotnie większa niż prób naziemnych. Jednak wraz z wprowadzeniem automatycznego przetwarzania danych możliwe stało się wykonanie kompletnego pokrycia zobrazowanego terenu przez próby teledetekcyjne. Tak więc w przeciętnym obrębie leśnym liczba takich przylegających do siebie powierzchni próbnych (najczęściej kwadratów), np. 4-arowych, wynosi około 200 tysięcy. Częściami metody dwufazowej jest: (1) pozyskanie danych obu faz (naziemnych i teledetekcyjnych) w odpowiedni sposób powiązanych, (2) przetworzenie surowych danych na cechy teledetekcyjne, a później zmienne objaśniające, (3) określenie zależności między zmienną zależną (np. zasobnością zmierzoną na ziemi), a zmiennymi niezależnymi – tu cechami teledetekcyjnymi, (4) wykonanie oszacowania stanu interesującej cechy (tradycyjnie wartości średniej dla całego obszaru lub – co najwyżej – kilku jego fragmentów; współcześnie – na całym obszarze lasu i w poszczególnych małych obszarach np. drzewostanach). Oceniana praca dotyczyła (pomijając pierwszą część o znaczeniu głównie technicznym) części drugiej i trzeciej. Czwarta część była fragmentarycznie podjęta w publikacji 1, co nie jest traktowane jako ujemna strona prezentowanej rozprawy badań. Należy podkreślić, że badania dotyczące czwartej części są trudne, stanowią wyodrębnione zagadnienie i w literaturze światowej dopiero teraz pojawiają się rozwiązania uważane za dość dobre i nie wzbudzające krytyki.

W artykułach składających się na rozprawę pan mgr. inż. Paweł Hawryło wyraźnie wskazał cele badań. Jest ich w sumie osiem, które mogą być traktowane jako cele cząstkowe. Znajdują one odzwierciedlenie w powiązaniu badań prezentowanych w trzech artykułach. Elementem łączącym te prace było zagadnienie wykorzystania chmury punktów, uzyskanej z automatycznego dopasowania cyfrowych zdjęć lotniczych, do oszacowania cech

taksacyjnych. W przypadku pierwszego artykułu przeciwstawieniem (równoległym badaniem) było wykorzystanie chmury punktów uzyskanych z lotniczego skanowania laserowego do oszacowania zasobności. W drugim artykule badanie dotyczyło poszerzonego zakresu cech (zasobność, wysokość drzewostanu wg Lorey'a, pierścicowe pole przekroju) oraz wykorzystania – oprócz danych teledetekcyjnych aktualnych – także danych nieaktualnych, uzyskanych trzy lata wcześniej. W artykule 3 równoległość dotyczyła badania efektów wzmocnienia danych z chmury punktów danymi ze zobrazenia satelitarnego Sentinel-2 lub tylko przydatności danych ze zobrazenia satelitarnego. Innym elementem łączącym artykuły było wykorzystanie, jako części materiału badawczego, tych samych danych pochodzących z pomiaru 94 naziemnych powierzchni próbnych.

Materiał badawczy został zebrany na obszarze Obrębu Władysławów w Nadleśnictwie Janów Lubelski. W drzewostanach sosnowych w roku 2015 zmierzono 94 naziemne kołowe powierzchnie próbne wielkości 400 m². Ich lokalizacja została ustalona po wykonaniu, w oparciu o trzy cechy, stratyfikacji lasu na 47 warstw. Powierzchnie próbne zmierzono w drzewostanach, w których w latach 2012-2015 nie wykonano pozyskania drewna. Liczba prób naziemnych mogłaby być uznana za wystarczającą w przypadku dysponowania ustalonym modelem zależności między zasobnością, a cechami teledetekcyjnymi. W przypadku badań, gdy liczba rozpatrywanych zmiennych przekraczała 10 (np. artykuł 3), liczbę prób naziemnych uznałabym tylko za dostateczną. Część danych teledetekcyjnych została pozyskana w momencie zbliżonym do terminu zebrania danych naziemnych (zobrazowanie satelitarne, zdjęcia lotnicze CIR). Inne zebrano wcześniej (w roku 2012 zdjęcia CIR i RGB; zobrazenia lidarowe ALS w roku 2013). Zdjęcia lotnicze nieaktualne pan mgr. inż. Paweł Hawryło wykorzystał w specjalnych badaniach. Trochę wątpliwości budzi nieaktualność (dwa lata) zobrazenia lidarowego. Drzewostany – nawet nieużytkowane – zmieniają się w wyniku przyrostu drzew czy ich naturalnego wydzielenia się. Ogólnie – nieaktualność nie była duża i można przyjąć, że w niewielkim stopniu wpłynęło to na pogorszenie siły związku między cechą zależną, a cechami teledetekcyjnymi.

W związku z opisem pozyskania materiału badawczego nasunęły się następujące uwagi dotyczące spraw niewyjaśnionych w artykułach:

- jak doktorant ustalił dokładne położenie środków powierzchni próbnych po tym, jak dane miejsce lasu zostało wylosowane do założenia próby?
- dlaczego nie było prób naziemnych, w których zasobność wynosiła zero? (teoretycznie powinny być, bo istniała klasa pokrycia koronami 0-25%; a może należało utworzyć klasę „0”; takie miejsca o powierzchni 400 m² w lesie istnieją – ich pominięcie mogło wpływać na rezultaty rozszerzenia wyników regresji czy lasu losowego na cały obszar badań),
- dlaczego próby naziemne były zakładane w miejscach, w których wysokość drzew (ustalona na podstawie danych lidarowych) wynosiła co najmniej 10,0 metrów? (dąży się do tego, aby w pracach urządzeniowych były mierzone drzewostany o wysokości od 7,0 m; włączenie drzewostanów z zakresu wysokości 7-10 metrów byłoby większym wyzwaniem i zapewne wpłynęłoby na uzyskane wyniki).

Metodyka badań została bardzo dobrze zaprojektowana i wykonana. Tworząc próby teledetekcyjne na podstawie chmury punktów pan mgr. inż. Paweł Hawryło wykorzystał cechy powszechnie znane, ale także i te stosowane rzadziej. Można je podzielić na dwie grupy: związane z wysokością drzew, związane z pokryciem przez korony. W przypadku zobrażeń satelitarnych wykorzystał jako zmienne objaśniające stopień odbicia spektralnego zarejestrowany w poszczególnych kanałach. Zależność między zasobnością zmierzoną w obrębie powierzchni próbnych naziemnych, a zmiennymi uzyskanymi na powierzchniach próbnych teledetekcyjnych (w miejscach odwzorowania prób naziemnych), określił z użyciem korelacji wielorakiej, a także nieparametrycznej metody lasu losowego

(artykuł 3). Rozpatrywał różne kombinacje cech, a więc liczba testowanych modeli była duża – choć wstępnie odrzucił cechy silnie skorelowane. Najlepsze modele regresyjne wybierał na podstawie wskaźnika AIC oraz pierwiastka błędu średniokwadratowego. W przypadku lasu losowego do wyboru cech wykorzystał parametr *mtry*. Walidację modeli predykcyjnych wykonał z użyciem metody bootstrapowej. Określił ważność poszczególnych zmiennych objaśniających. W celu poznania ewentualnych różnic między modelami predykcyjnymi, w artykule 3 zastosował test t-Studenta dla prób związanych.

W związku z opisem metodyki nasunęły się następujące uwagi dotyczące spraw niewyjaśnionych w artykułach:

- czy doktorant zbadał (zapewne nie) czy zależność między zmienną zależną (zasobnością), a daną cechą teledetekcyjną nie ma charakteru krzywoliniowego? (często tak jest; zastosowanie prostej transformacji mogłoby zwiększyć dokładność modelu, a niekiedy rozwiązać problem odbiegania empirycznego rozkładu danych od rozkładu normalnego),
- czy podjął próbę (zapewne nie) wykorzystania iloczynu np. najlepszych cech, a zwłaszcza iloczynu cechy związanej z wysokością i cechy związanej z pokryciem przez korony? (to też mogłoby zwiększyć dokładność modelu),
- czy wykonał jakieś zabezpieczenie (zapewne nie), aby wartość zasobności oszacowana z modelu nie przyjmowała nierealnych wartości, np. mniejszych od zera?
- jaka była podstawa metodyczna do odrzucenia jednej z cech, gdy współczynnik korelacji Spearmana przekraczał 0,9? (to jest ostre kryterium; w przypadku korelacji Pearsona ten zwyczajowy próg jest mniejszy; istnieją testy służące wykryciu istotnej współliniowości).

Wyniki badań przyniosły objaśnienia i podpowiedzi dotyczące praktycznego stosowania wybranych materiałów teledetekcyjnych. Jako najważniejsze można wskazać:

- na podstawie chmury punktów z automatycznego dopasowania cyfrowych zdjęć lotniczych doktorant uzyskał wyniki oszacowania zasobności niewiele gorsze niż na podstawie chmury punktów z lotniczego skanowania laserowego (choć należy pamiętać, że ta różnica przełożona na zwiększenie ilości materiału empirycznego, koniecznego do uzyskania tej samej dokładności oszacowania, wynosiła około 20% – co nie jest małą wartością),
- wyniki uzyskane na podstawie chmury punktów IPC-RGB były nieco gorsze niż uzyskane na podstawie chmury punktów IPC-CIR, co wynikało z różnic (na niekorzyść IPC-RGB) liczby odbić przy tworzeniu chmury punktów,
- różnica trzech lat między pozyskaniem danych referencyjnych, a teledetekcyjnych, w przypadku braku użytkowania drzew, nie wpłynęła istotnie na dokładność szacowania zasobności,
- w modelowaniu zależności zasobności od cech teledetekcyjnych lepsze były wyniki przy stosowaniu regresji wielorakiej niż lasu losowego,
- włączenie danych dotyczących dobiecia spektralnego, uzyskanych z satelity Sentinel-2, do modelu zależności zasobności od cech z chmury punktów IPC-CIR, na tyle mało zwiększyło dokładność oszacowania, że wykorzystanie danych z satelity należało uznać za bezzasadne.

W związku z opisem wyników nasunęła się następująca uwaga dotycząca spraw niewyjaśnionych:

- w artykule 1 doktorant podjął próbę oszacowania średniej zasobności w całym terenie badań; wynik na podstawie danych ze skanowania lidarowego okazał się znacząco mniejszy niż dwóch wyników (podobnych) uzyskanych z chmur punktów wygenerowanych ze zdjęć lotniczych; doktorant powinien wyjaśnić jaka była przyczyna takiej różnicy, bo to wskazuje, że któraś z metod, a może wszystkie,

obarczona była błędem systematycznym; należy przy tym zwrócić uwagę, że różnica oszacowania zasobności całego obiektu wystąpiła, chociaż średnia wartość błędu każdej z metod (na podstawie badania bootstrapowego) była bardzo mała (bias $\leq 0,2$ m³/ha).

Dyskusje we wszystkich trzech artykułach, prezentowanych przez pana mgr. inż. Pawła Hawryła jako praca doktorska, zostały ładnie i przekonująco poprowadzone. Doktorant odniósł się do najnowszych wyników badań z podkreśleniem tych, które inni autorzy wykonali w oparciu o zbliżony materiał badawczy lub w podobnych lasach.

Wnioski w poszczególnych artykułach wynikały z rezultatów badań. W jednym przypadku sugerowałbym większe stonowanie. Dotyczyło to wykorzystania danych teledetekcyjnych zebranych kilka lat wcześniej niż danych referencyjnych. Wprawdzie wniosek wynika z rezultatów badań, ale w praktyce może być źle zrozumiany, że „można dopuścić do znacznej różnicy w terminach zbioru danych”. W artykule doktorant podkreślił, że próby naziemne były pobrane w miejscach, w których nie wykonano pozyskania. W praktyce wyszukiwanie miejsc w lesie bez zabiegów wykonanych w danym okresie lub odtwarzanie, które drzewa mogły rosnąć w chwili zebrania danych teledetekcyjnych, a które nie, byłoby trudne, a wyniki niepewne. Ja preferuję zebranie obu rodzajów danych w terminach możliwe zbliżonych do siebie. Natomiast inny wniosek, także odniesiony do danych teledetekcyjnych zebranych niegdyś, ale dotyczący czegoś innego, uważam za ważny i godny propagowania. Chodzi o wykonanie oszacowania cech (np. zasobności) na podstawie archiwalnych zdjęć lotniczych. Należy mieć świadomość, że wyniki takiego obliczenia mogą być obciążone pewnym błędem, ale dzięki nim można byłoby odtworzyć stan niektórych lasów o dużym znaczeniu, np. w parkach narodowych. Archiwalne dane teledetekcyjne mogą być jedynymi materiałami umożliwiającymi dość dokładne odtworzenie historycznego stanu tych lasów.

Ocena końcowa

Praca doktorska zrealizowana przez pana mgr. inż. Pawła Hawryła ma – moim zdaniem – znaczenie dla rozwoju leśnictwa, a zwłaszcza metod pomiaru zasobów leśnych. Wynika to z faktu, że doktorant przeprowadził badania, których wyniki mają duże znaczenie praktyczne, są realizowane równoległe w wielu krajach, a niektóre zagadnienia nie zostały dotychczas w zadowalający sposób rozwiązane.

Uważam, że doktorant zrealizował postawione cele badań. Materiał badawczy, którym dysponował nie uprawniał do tego, aby wyniki można było przenieść na większość lasów w Polsce. Drzewostany sosnowe stanowią wprawdzie ponad 60% powierzchni lasów, ale szacuje się, że jednogatunkowe sosnowe pokrywają 20-25% powierzchni. Doktorant był tego świadom, co zaznaczył w artykule 3. Tak więc rozprawę należy traktować przede wszystkim jako sposób budowania i testowania modelu zależności między wybranymi cechami określającymi stan zasobów leśnych, a odpowiednio przetworzonymi cechami teledetekcyjnymi.

Z wcześniejszej partii recenzji można się zorientować, że miałem tylko jedno zastrzeżenie. Dotyczyło ono braku wyjaśnienia różnic między wynikami oszacowania zasobności w całym obiekcie badań z użyciem danych ze skanowania laserowego, a z użyciem danych ze zdjęć lotniczych. Ten fragment artykułu zapewne nie był skrytykowany przez recenzentów „Forestry”. Zwracam uwagę, że tzw. rozszerzenie modelu na cały obiekt leśny traktowałem jako zagadnienie osobne, trudne, stanowiące ostatni etap wdrożenia metody dwufazowej i w zasadzie wyłączone z niniejszej rozprawy.

Kilka spraw zaliczyłbym do grupy „sugerowałbym inne wykonanie”. Może w przyszłości moje uwagi pomogłyby zwiększyć atrakcyjność artykułów (które zapewne powstaną). I tak:

- podałbym skalę wykorzystanych zdjęć lotniczych (w artykułach nie ma to znaczenia, wystarczyło podanie gęstości punktów w chmurze punktów, ale w kontekście wykorzystywania zdjęć lotniczych w pracach urzędniowych, ważne byłoby np. oszacowanie zdjęciami w jakiej skali, po powiększeniu do formatu praktycznego w użyciu, dysponowałyby w terenie taksatorzy),
- w polskim tekście nie stosowałbym terminu „statystyka” w odniesieniu do takich cech jak np. percentyl-95; w języku angielskim doktorant użył prawidłowego określenia „metrics”, a w modelach „variable”; w języku polskim chyba lepsze byłoby określenie „cecha” i „zmienna”,
- na rysunkach wartości „szacowane” umieściłbym na osi 0X, a wartości „obserwowane” na osi 0Y (tak jest w artykule 3, ale nie w 1 i 2),
- na rysunkach typu „szacowane x obserwowane” nie stosowałbym klas wartości (tak jest np. w rysunku 2 w artykule 2); wartości na powierzchni próbnej rozpatrywanych trzech cech – wysokości, pola przekroju, zasobności – mają charakter ciągły,
- na rysunku takim jak 7 w artykule 1, dotyczącym zróżnicowania przestrzennego zasobności, zastosowałbym 7-8 klas barwnych – od fioletu do czerwieni, przy czym granicę klasy najmniejszej i największej ustawiłbym tak, aby liczba obserwacji (komórek) była na tyle duża, że byłyby one zauważalne na rysunku; w obecnej postaci rysunek jest mało czytelny,
- podałbym wartości współczynników w regresjach (przynajmniej dla najlepszego modelu), a wtedy także z podaniem wartości średnich i zakresu poszczególnych cech.

Ogólnie, pracę doktorską pana mgr. inż. Pawła Hawryła przedstawioną w formie zbioru trzech artykułów, uważam za bardzo dobrą. Na tę ocenę składają się następujące elementy:

- odpowiednie zaprojektowanie badań,
- wykorzystanie poprawnych, nowoczesnych metod analiz statystycznych,
- wykorzystanie jednolitego zbioru danych referencyjnych,
- wykorzystanie zróżnicowanego materiału badawczego w zakresie teledetekcji,
- umiejętność zorganizowania, uporządkowania i przedstawienia wyników badań,
- uzyskanie nowych, udokumentowanych faktów naukowych,
- umiejętne formułowanie wniosków z badań i rekomendacji dla praktyki leśnej.

Stwierdzam, że praca pana mgr. inż. Pawła Hawryła – przedstawiona jako praca doktorska – stanowi samodzielny dorobek naukowy z zakresu leśnictwa – ze szczególnym uwzględnieniem teledetekcji i metod pomiaru lasu. Odpowiednie zaprojektowanie eksperymentów i umiejętność interpretacji wyników wskazują, że doktorant posiada odpowiednią wiedzę i jest dobrze teoretycznie przygotowany do prowadzenia badań.

Wyrażam pogląd, że praca pana mgr. inż. Pawła Hawryła „Określanie zasobności drzewostanów sosnowych metodą przetwarzania chmur punktów pochodzących z dopasowania zdjęć lotniczych oraz lotniczego skanowania laserowego” spełnia warunki jakie rozprawom doktorskim stawia Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku (t. jedn. Dz. U. 2017 poz. 1789). Wobec tego przedkładam Radzie Wydziału Leśnego Uniwersytetu Rolniczego im. Hugona Kołłątaja w Krakowie wniosek o dopuszczenie pana mgr inż. Pawła Hawryła do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

St. Miśnicki

Stanisław Miśnicki