

# **AUTOREFERAT**

**dr inż. Krzysztof Stereńczak**

**Instytut Badawczy Leśnictwa**

## POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE

- 08.03.2011      **doktor nauk leśnych w zakresie leśnictwa**  
Wydział Leśny SGGW w Warszawie  
Promotor: dr hab. Krzysztof Będkowski, prof. SGGW  
Tytuł rozprawy doktorskiej: „Wykorzystanie danych lotniczego skanowania laserowego do określania zagęszczenia drzew w jednopiętrowych drzewostanach sosnowych”.
- 18.05.2010      **Master of Science in Geographical Information Science**  
Center for Geoinformatics, Paris-Lodron University of Salzburg (European Master, UNIGIS)  
Promotor: prof. dr hab. Jacek Kozak  
Tytuł pracy magisterskiej: “Accuracy of Digital Terrain Models generated from laser scanning data under forest conditions”.
- 19.05.2006      **magister inżynier leśnictwa**  
Wydział Leśny SGGW w Warszawie  
Promotor: dr hab. Krzysztof Będkowski, prof. SGGW  
Tytuł pracy magisterskiej: „Aktualizacja leśnej mapy numerycznej na przykładzie wybranych obiektów Nadleśnictwa Rogów”.

## DODATKOWE WYKSZTAŁCENIE

- 2007-2009      **Uniwersytet Jagielloński w Krakowie**, Studia podyplomowe w zakresie Systemów Informacji Geograficznej UNIGIS.

## INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH

- 01.12.2012-aktualnie      **Instytut Badawczy Leśnictwa**, ul. Braci Leśnej nr 3, Sękocin Stary, 05-090 Raszyn - pracownik naukowy (adiunkt)
- 01.06.2011-30.11.2012      **Wydział Leśny Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie**, ul. Nowoursynowska 159, Budynek 34, 02-776 Warszawa - pracownik naukowy (adiunkt)
- 01.03.2006-30.06.2006      **Instytut Badawczy Leśnictwa**, ul. Braci Leśnej nr 3, Sękocin Stary, 05-090 Raszyn - technolog

**OSIĄGNIĘCIE BĘDĄCE PODSTAWĄ UBIEGANIA SIĘ O STOPIEŃ DOKTORA  
HABILITOWANEGO**

Jako osiągnięcie wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.) wskazuję cykl pięciu oryginalnych publikacji naukowych pod tytułem

**Numeryczny model terenu interpolowany z danych lotniczego skanowania laserowego – jego dokładność i zastosowanie w leśnictwie**

w których jestem głównym autorem:

- **Stereńczak K.**, Zasada M., Brach M. 2013. Influence of terrain slope, model pixel size and stand structure on accuracy of DTM generated under pine stands from LIDAR data. *Baltic Forestry*, 19(2): 252-262.

**IF<sub>2013</sub>: 0,304/Pkt MNiSW<sub>2013</sub>: 15**

- **Stereńczak K.**, Kozak J. 2011. Evaluation of digital terrain models generated from airborne laser scanning data under forest conditions. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 26: 374-384.

**IF<sub>2011</sub>: 1,197/Pkt MNiSW<sub>2011</sub>: 30**

- **Stereńczak K.**, Ciesielski M., Bałazy R., Zawila-Niedźwiecki T. 2016. Comparison of various algorithms for DTM interpolation from LIDAR data in dense mountain forests. *European Journal of Remote Sensing*, 49: 599 – 621.

**IF<sub>2016</sub>: 1,533/Pkt MNiSW<sub>2016</sub>: 15**

- **Stereńczak K.**, Będkowski K. 2011. Wykorzystanie numerycznego modelu terenu i modelu pokrycia terenu do klasyfikacji drzewostanów na podstawie ich struktury pionowej i gatunkowej. *Sylvan*, 155 (4): 219-227.

**IF<sub>2011</sub>: 0,159/Pkt MNiSW<sub>2011</sub>: 15**

- **Stereńczak K.**, Moskalik T. 2014. The possibilities of using a LIDAR-based Digital Terrain Model and single tree segmentation data to determine an optimal forest skid trail network. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 8: 661-667.

**IF<sub>2014</sub>: 1,269/Pkt MNiSW<sub>2014</sub>: 25**

**W sumie: IF: 4,462/Pkt MNiSW: 100**

## OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO PRAC ZGŁOSZONYCH DO POSTĘPOWANIA HABILITACYJNEGO I OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW

Od dawna starano się dokładnie scharakteryzować/pomierzyć ukształtowanie powierzchni Ziemi, lokalnie często zamiennie nazywane ukształtowaniem terenu. Chęć poznania dokładnego kształtu terenu wynika z faktu, iż ma on ogromny wpływ na działalność człowieka w wielu obszarach jego aktywności. Praktycznie większość przejawów działalności człowieka wymaga dokładnych informacji o powierzchni Ziemi. Ukształtowanie powierzchni Ziemi wpływa też na klimat. Klimat w różnej skali i zakresie wpływa na kształt ekosystemów, a w szczególności różnorodność biocenozy.

Od wieków rozwijane są metody umożliwiające pomiar kształtu oraz powierzchni Ziemi. Najpierw były to metody naziemne, a od momentu pojawienia się technologii lotniczych i satelitarnych pomiar może być realizowany także przy pomocy tych narzędzi. Aktualne metody oparte na danych teledetekcyjnych pozyskiwanych z poziomu satelitarnego umożliwiają dość dokładne odzwierciedlenie globalnego kształtu i powierzchni Ziemi. Dla mniejszych obszarów pomiar powierzchni Ziemi realizowany jest współcześnie z wykorzystaniem zdjęć lotniczych lub lotniczego skanowania laserowego. Lotnicze skanowanie laserowe zrewolucjonizowało i bardzo mocno poprawiło dokładność pomiarów powierzchni Ziemi, umożliwiając je także na obszarach pokrytych przez roślinność.

Upraszczając, numeryczny model terenu (NMT) jest cyfrowym odwzorowaniem powierzchni terenu/Ziemi. Bardziej precyzyjnie można zdefiniować numeryczny model terenu, jako numeryczną reprezentację powierzchni terenowej, utworzoną zazwyczaj przez zbiór odpowiednio wybranych punktów (XYZ) tej powierzchni oraz algorytmy interpolacyjne umożliwiające odtworzenie jej kształtu na określonym obszarze (Gaździcki 2001<sup>1</sup>). W efekcie przetworzenia chmury punktów lotniczego skanowania laserowego tworzony jest także numeryczny model pokrycia terenu (NMPT). NMPT jest obrazem powierzchni terenu wraz obiektami znajdującymi się na jego powierzchni i trwale związanymi z gruntem. Przez odejmowanie odpowiadających sobie pikseli w NMPT i NMT, powstaje znormalizowany numeryczny model pokrycia terenu (zNMPT), który obrazuje wysokość wszystkich obiektów na powierzchni terenu. W warunkach leśnych model ten przedstawia głównie zróżnicowanie wysokościowe drzew i drzewostanów, stąd często wykorzystywany jest w różnego rodzaju analizach. zNMPT w warunkach leśnych definiowany jest także, jako wysokościowy model koron (WMK).

W systemach informacji przestrzennej (SIP) stosuje się dwa modele numerycznego modelu terenu: model rastrowy lub wektorowy. Model rastrowy wykorzystuje do reprezentacji powierzchni terenu macierz elementów najczęściej nazywanych oczkami siatki. Każde oczko przechowuje średnią wysokość pola podstawowego, którego wymiary zależą od przyjętej rozdzielczości przestrzennej NMT. Rozdzielczość w istotny sposób wpływa na sposób odzwierciedlenia szczegółów charakteryzujących powierzchnię. Im większy piksel (oczko siatki) tym rozdzielczość modelu i zdolność do otwierania w nim szczegółów jest mniejsza. Zalety stosowania modelu rastrowego to przede wszystkim łatwość jego przetworzenia oraz prostota zapisu danych. Model wektorowy reprezentowany jest najczęściej z wykorzystaniem nieregularnej siatki trójkątów (ang. *Triangular Irregular Network*, TIN). Wierzchołki trójkątów odpowiadają punktom wysokościowym. Zalety stosowania tego modelu danych to duża precyzja

<sup>1</sup> Gaździcki J. 2001. Leksykon geomatyczny. Polskie Towarzystwo Informacji Przestrzennej. Warszawa.

oraz możliwość odzwierciedlenia szczegółów. W literaturze opisywane są również modele hybrydowe, które wykorzystują pozytywne cechy obu wyżej omówionych modeli.

Numeryczny model terenu jest aktualnie najczęściej i najszerzej wykorzystywanym materiałem teledetekcyjnym. Istnieją dwa główne kierunki wykorzystania cyfrowego modelu terenu. Po pierwsze, jest on elementem różnego rodzaju wskaźników opisujących zmienność ukształtowania terenu; po drugie jest on odniesieniem do określania wysokości obiektów znajdujących się na powierzchni ziemi.

Od momentu pojawienia się numerycznego modelu terenu interpolowanego na podstawie danych lotniczego skanowania laserowego rozpoczęto badania nad jego dokładnością. Większość badań dokładności numerycznego modelu terenu prowadzonych do tej pory koncentrowała się na obszarach otwartych, stąd dysponujemy dość dużą ilością informacji na temat zmiennych wpływających na dokładność numerycznego modelu terenu. Jednocześnie istnieje dość ograniczona liczba prac, których celem byłaby analiza dokładności numerycznego modelu terenu w warunkach leśnych.

Można wydzielić kilka grup czynników wpływających na dokładność numerycznego modelu terenu. W pierwszej kolejności są to charakterystyki związane z wykonaniem nalotu fotogrametrycznego oraz typu skanera, który wykorzystany jest do pozyskania chmury punktów. W następnej kolejności czynnikiem decydującym o jakości numerycznego modelu terenu jest sposób przetworzenia danych punktowych, przede wszystkim ich filtracja oraz algorytm wykorzystywany do interpolowania powierzchni terenu. Istotnym czynnikiem warunkującym dokładność modelu jest środowisko, w którym dany model jest pozyskiwany. Generalnie można stwierdzić, iż numeryczny model terenu dla obszaru nie pokrytego roślinnością jest dokładniejszy niż numeryczny model terenu pozyskany dla obszaru pokrytego roślinnością. Charakterystyki roślinności, między innymi jej wysokość i gęstość, decydują o tym ile i jak rozłożonych przestrzennie sygnałów laserowych było w stanie dotrzeć do gruntu.

Poza tym model terenu o wysokiej rozdzielczości staje się powoli narzędziem wykorzystywanym w zarządzaniu obszarami leśnymi. Jest on częstym elementem systemów wspierania decyzji (ang. *Decision Support Systems*, DSS). Jest też podstawowym materiałem teledetekcyjnym wykorzystywanym w opisywaniu wybranych charakterystyk środowiska leśnego. W większości prac dotyczących wykorzystania danych teledetekcyjnych w leśnictwie, w szczególności skanowania laserowego, numeryczny model terenu wykorzystywany jest do normalizacji chmury punktów lub tworzenia wysokościowego modelu koron – wykorzystywanego do detekcji pojedynczych drzew. Rezultaty przetworzeń wykorzystywane są następnie do określania cech pojedynczych drzew (wysokości, objętości korony, etc.) lub całych drzewostanów (zasobność, biomasa, struktura, etc.).

Głównym celem serii artykułów będących podstawą ubiegania się o stopień doktora habilitowanego było choć częściowe wypełnienie luki w wiedzy na temat dokładności numerycznego modelu terenu, w tym także na obszarach górskich, oraz czynników wpływających na tę dokładność w warunkach leśnych. Celem cyklu artykułów było także wskazanie nowych kierunków wykorzystania modeli terenu w leśnictwie. Stąd przeanalizowano wpływ rozdzielczości modelu i terminu pozyskania danych, następnie analizowano wpływ składu gatunkowego oraz struktury drzewostanów, a finalnie zajęto się wpływem sposobu filtracji chmury punktów oraz wykorzystania różnego rodzaju algorytmów do interpolacji

numerycznego modelu, na jego finalną dokładność. W drugiej części przedstawionego cyklu zastosowano zdobyte doświadczenie w określeniu czynników warunkujących dokładność numerycznego terenu do ich praktycznego wykorzystania w klasyfikacji środowiska leśnego, biorąc pod uwagę jego strukturę i skład gatunkowy. Wskazano również aplikacje modelu w planowaniu zabiegów trzebieżowych, jednego z istotnych elementów pielęgnacji drzewostanu.

Podstawowym celem cyklu publikacji było zdobycie nowej wiedzy na temat tego, jak środowisko leśne może wpływać na dokładność numerycznego modelu terenu, przy uwzględnieniu również innych czynników wpływających na ostateczny wynik. Ze względu na dużą zmienność lasów na świecie (ich struktury, składu gatunkowego, sposobu zagospodarowania), różne ukształtowanie terenu, dostępność różnych systemów lotniczego skanowania laserowego, wykorzystywanie różnych metod filtracji danych ALS i różnych algorytmów do interpolacji numerycznego modelu terenu, trudno o porównywalność wyników. Ograniczona jest liczba prac, które testują dokładności różnych metod interpolacji i filtracji chmury punktów w warunkach leśnych. Las jest o tyle szczególnym środowiskiem, że trudno jest dokonać wizualnej interpretacji zarejestrowanej chmury punktów w celu korekty ewentualnych błędów. Większość wcześniejszych prac zajmujących się tym problemem analizowała dokładność numerycznego terenu z punktu widzenia klas użytkowania terenu (np. las, teren zurbanizowany, pole). Las jest jednak bardzo skomplikowanym i zmiennym w swej strukturze środowiskiem, stąd istotne jest rozstrzygnięcie jak ta zmienność determinuje dokładności numerycznego modelu i jakie są najważniejsze czynniki determinujące dokładność numerycznego modelu w różnych warunkach leśnych.

Istotnym czynnikiem warunkującym dokładność numerycznego modelu terenu jest termin pozyskania danych lotniczego skanowania laserowego wykorzystanych następnie do jego interpolacji. Z reguły pozyskanie danych lotniczego skanowania laserowego odbywa się w okresie bezlistnym i bezśnieżnym. Z kolei dane na potrzeby analizy roślinności pozyskuje się w okresie wegetacyjnym. W tym czasie poza liśćmi na drzewach, grunt pokryty jest roślinnością runa. Na świecie istnieje zaledwie kilka prac, głównie ze Skandynawii, które odnoszą się do dokładności numerycznego modelu terenu interpolowanego z danych lotniczego skanowania laserowego pozyskanych w różnych terminach okresu wegetacyjnego.

Poza poznaniem dokładności numerycznego modelu ważna jest również możliwość jego zastosowania w praktyce leśnej. NMT może być źródłem informacji o ukształtowaniu terenu, stąd ma on ogromny potencjał w zarządzaniu środowiskiem leśnym. Jego wykorzystanie wiąże się z potrzebą zaimplementowania odpowiednich procedur i przetworzeń, by uzyskana informacja pozwalała na podejmowanie optymalnych decyzji gospodarczych.

Cele prowadzonych badań koncentrowały się na odpowiedzi na następujące pytania :

- 1) W jakim stopniu różne fazy rozwojowe drzewostanów sosnowych wpływają na dokładność numerycznego modelu terenu?
- 2) W jaki sposób rozdzielczość numerycznego modelu terenu wpływa na jego dokładność oraz jakie są różnice pomiędzy modelem wygenerowanym z danych pozyskanych w okresie wiosny i lata, biorąc pod uwagę również strukturę drzewostanu?

- 3) W jaki sposób strategia filtracji oraz użyty algorytm interpolacyjny wpływają na dokładność oraz który z czynników w największym stopniu warunkuje dokładność modelu terenu w warunkach leśnych na terenach o dużej zmienności rzeźby terenu?
- 4) Czy modele terenu zbudowane na podstawie danych pozyskanych w różnych okresach wegetacyjnych umożliwiają klasyfikację drzewostanów na iglaste i liściaste oraz na jedno- i wielowarstwowe?
- 5) W jaki sposób numeryczny model terenu oraz informacje na temat położenia pojedynczych drzew wpływają na optymalizację przebiegu szlaków zrywkowych w lesie?

**Szczegółowy opis wyników badań opisanych w poszczególnych publikacjach:**

- 1) **Stereńczak K., Zasada M., Brach M.** 2013. Influence of terrain slope, model pixel size and stand structure on accuracy of DTM generated under pine stands from LIDAR data. *Baltic Forestry*, 19(2): 252-262.

Struktura drzewostanu oraz pokrywa gleby są czynnikami warunkującymi dokładność numerycznego modelu terenu w lesie. Są to czynniki związane z rodzajem środowiska leśnego oraz sposobem jego zagospodarowania. Chcąc przeanalizować wpływ struktury drzewostanu na dokładność numerycznego terenu, należy wyłączyć wpływ innych czynników, a szczególnie pokrywy, z takich analiz. Takie doświadczenie przeprowadzono w odniesieniu do drzewostanów sosnowych znajdujących się na siedliskach boru świeżego. Jest to jeden z dominujących siedliskowych typów lasu w Polsce. Na takich siedliskach pokrywa gleby charakteryzuje się niewielkimi rozmiarami i pokryciem, w związku z tym można założyć niewielki wpływ tego czynnika na wynik interpolowania numerycznego modelu terenu. Doświadczenie założono w czterech drzewostanach o łącznej powierzchni 5 ha i wieku odpowiednio: 2, 8, 28 i 109 lat, w których sosna zwyczajna (*Pinus silvestris* L.) stanowiła 100% składu gatunkowego. Na 30% obszaru wybranych drzewostanów położona była wydma, która umożliwiła uwzględnienie w analizie wpływu pochylenia terenu na dokładność numerycznego modelu terenu. W efekcie cały obszar podzielony został na 8 pod-powierzchni o różnej strukturze drzewostanu i płaskiej bądź pochylej rzeźbie.

Na potrzeby doświadczenia wykonano w terenie pomiary referencyjne GPS z wykorzystaniem odbiornika GNSS RTK Topcon HiperPro. Każdy punkt bazowy mierzony był przez dwie godziny. W oparciu o te punkty założonych zostało 468 punktów referencyjnych będących odniesieniem do analiz numerycznego modelu terenu. Dokładność założonych w terenie punktów referencyjnych w każdej z płaszczyzn wynosiła poniżej 5 centymetrów.

Analizy przeprowadzono dla sześciu rozdzielczości numerycznego modelu terenu, gdzie wielkości pikseli to odpowiednio: 0,5; 1; 2; 3; 4; 5 i 10 m. Modele terenu wyinterpolowane zostały z danych lotniczego skanowania laserowego pozyskanych 2-3 maja 2007 roku.

Dla porównania wykorzystano piksele wygenerowanych rastrów, które pokrywały się z lokalizacją punktów referencyjnych pomierzonych w terenie. Dodatkowo przefiltrowano modele filtrem uśredniającym o wielkości okna 3x3 pikseli. Podobnie jak wcześniej do porównania użyto piksele pokrywające się z punktami pomierzonymi w terenie. Filtracja miała na celu odpowiedź na pytanie, czy spadki powodują dodatkowe błędy wartości generowanych modeli.

W analizie porównawczej zastosowano uogólniony model liniowy dla pomiarów powtórzonych. W celu pokazania rozkładu różnicy pomiędzy porównywalnymi wartościami określono błąd średni i błąd średniokwadratowy.

Wyniki badań wykazały, że:

- Rozkład błędów dla rastrów o analizowanych rozdzielczościach różnił się istotnie od rozkładu normalnego i miał ujemną skośność.
- Dokładność analizowanych modeli wzrasta wraz ze zwiększaniem się ich rozdzielczości.



- Wartości pikseli z modelu oryginalnego oraz modelu filtrowanego nie różnią się istotnie w przypadku płaskich obszarów.
- Stwierdzono, że na płaskim obszarze RMSE, ME i 68 percentyl różnic pomiędzy pomiarem naziemnym, a wartością pokrywającego się piksela z NMT mają bardzo podobne wartości i trendy.
- Wartości różnic pomiędzy poszczególnymi drzewostanami nie są istotne statystycznie, przy czym wartość statystyki  $p$  była niska (0,069), więc zbliżona do założonego poziomu istotności.
- Wszystkie analizowane wartości percentyli przyjmowały podobny trend dla poszczególnych drzewostanów, poza młodnikiem, gdzie trend był odwrotny.
- Uwzględnienie typu drzewostanu oraz typu terenu wykazało, że dla obszarów płaskich użyte miary błędów przyjmowały podobne trendy i wartości.
- Wykazano, iż najlepsze wyniki interpolacji modelu otrzymano w drzewostanach najmłodszych i w starszych klasach wieku. Młodnik w wieku 28 lat okazał się najtrudniejszym środowiskiem do penetracji przez wiązki laserowe, a co za tym idzie wyniki interpolacji modeli terenu były najgorsze.
- Wykazano, iż średni błąd i wartość 68 percentyla wartości różnic mają bardzo podobne wartości w analizowanych rozdzielczościach modeli, a 95 percentyl wartości różnic jest bardzo podatny na pojawiające się czasami duże wartości błędów. Użycie różnych miar w ocenie błędu może prowadzić do wnioskowania na temat charakteru terenu.

- 2) **Stereńczak K.**, Kozak J. 2011. Evaluation of digital terrain models generated from airborne laser scanning data under forest conditions. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 26: 374-384.

Analizy wieloczasowe z wykorzystaniem numerycznych modeli terenu tworzonych w oparciu o dane lotniczego skanowania laserowego obarczone są błędami wynikającymi z różnic w rozwoju roślinności pokrywającej dany obszar. W zależności od składu gatunkowego, struktury oraz wieku roślinności można spodziewać się, iż te różnice przyjmują różne wartości. Dotychczas w literaturze znaleźć można bardzo mało przykładów takich analiz, w których porównywano numeryczny model terenu pozyskany w różnych terminach okresu wegetacyjnego i dzięki którym możliwe było poznanie natury wpływu fenologii na dokładność NMT w warunkach leśnych. Dodatkowo badano także różne rozdzielczości modelu oraz różnice pomiędzy nimi w dwóch terminach pozyskania danych.

Badania prowadzono w Uroczysku Głuchów - części Leśnego Zakładu Doświadczalnego SGGW w Rogowie. W terenie pomierzono 95 punktów referencyjnych w różnych typach drzewostanów (głównie: sosnowych, dębowych, olszowych, brzoźowych i modrzewiowych) w wieku od 30 do 120 lat. Punkty pomierzone były z wykorzystaniem tachimetru elektronicznego. Dokładność pomierzonych punktów wynosiła  $\pm 9$  cm w płaszczyźnie poziomej i  $\pm 4$  cm w płaszczyźnie pionowej.

Cechy drzewostanu, takie jak liczba warstw, gatunek oraz pokrycie przez korony określono w terenie w trakcie pomiarów. Dodatkowo posiłkowano się zdjęciami lotniczymi o rozdzielczości 15 cm. Tak pozyskane i przetworzone dane były podstawą do dalszych analiz.

Dane lotniczego skanowania laserowego, które były podstawą do interpolacji numerycznego modelu terenu, pozyskano w dniach 1-2 maja i 18 sierpnia 2007 r. Pierwszy zestaw danych określany był mianem nalotu wiosennego, drugi - nalotu letniego. Oba zestawy danych przetworzone zostały do postaci numerycznych modeli terenu przy zastosowaniu tych samych ustawień algorytmów interpolujących. Dla obu terminów wygenerowano numeryczny model terenu rozdzielczości 1, 2, 3, 5, 10 i 20 m.

W związku z tym, że dwa zestawy danych lotniczego skanowania laserowego różniły się między sobą gęstością punktów, sprawdzono, czy te różnice mogą mieć wpływ na dokładności numeryczny model terenu. W wyniku testu przeprowadzonego w obszarze leśnym i na otwartej przestrzeni stwierdzono, iż obie gęstości chmury punktów mogą być traktowane jako takie same, gdyż jedynie dla numerycznego modelu terenu o rozdzielczości 1 m różnica pomiędzy obydwojema modelami była istotna statystycznie przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$ .

Dokładność obu modeli określana była za pomocą błędu średniego oraz błędu średniokwadratowego, a wpływ poszczególnych czynników na wielkość błędów testowany był przy wykorzystaniu wieloczynnikowej analizy wariancji (ANOVA).

W wyniku badań stwierdzono, że:

- Dla wszystkich analizowanych przypadków razem, wartości w modelach zawyżały wysokość terenu średnio o 8 cm.
- 96% procent błędów znajdowało się w przedziale  $\pm 1$ m, a rozkład błędów był zbliżony do normalnego, jednak test Shapiro-Wilka odrzucił takie założenie (przy  $\alpha=0,05$ ).
- Błąd średni przyjmował wartości od -0,18 m dla rastra o rozdzielczości 1 m, do +0,21 m dla rastra o wielkości piksela równej 20 m. Oznacza to, że wraz ze wzrostem wielkości piksela model obniżał się w stosunku do pomiarów referencyjnych.
- Zakres błędów osiągał największe wartości dla modelu o 20 m wielkości piksela, a najmniejsze dla modelu z pikselem o wielkości 3 m.
- Błąd średni dla modeli o wielkości piksela od 1-5 m nie różnił się istotnie statystycznie, tak jak dla modeli 10 i 20 m. Pomędzy tymi grupami występowały różnice istotnie statystyczne.
- Błędy w modelach letnich wykazywały ponad dwukrotnie większy zakres niż w przypadku modeli wiosennych.
- W wyniku uśrednienia błędów dla poszczególnych rozdzielczości, zarówno wartość błędu średniego, jak i średniokwadratowego wykazywały wysoki współczynnik determinacji ( $R^2$  w zakresie 0,889 do 0,999).
- Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic pomiędzy dokładnościami modeli w drzewostanach jedno- i wielopiętrowych.
- Współczynnik korelacji pomiędzy błędami w modelach letnich i wiosennych był wysoki dla drzewostanów jednopiętrowych i wyniósł  $r=0,809$ . Dla drzewostanów wielopiętrowych wyniósł  $r=0,481$ .
- Z punktu widzenia modelowania błędu drzewostany jednopiętrowe oraz iglaste dają bardziej stabilne wyniki, stąd możliwe jest pewniejsze przewidywanie wielkości błędu. W drzewostanach wielogatunkowych i liściastych sezonowość powoduje większe różnice, a przewidywanie błędów jest mniej wiarygodne.

- 3) **Stereńczak K.**, Ciesielski M., Bałazy R., Zawila-Niedźwiecki T. 2016. Comparison of various algorithms for DTM interpolation from LIDAR data in dense mountain forests. *European Journal of Remote Sensing*, 49: 599 – 621.

Wiele czynników warunkuje dokładność numerycznego modelu terenu w lesie. Są to czynniki związane z pozyskaniem danych, skomplikowaniem środowiska leśnego oraz sposobem przetworzenia pozyskanej chmury punktów lotniczego skanowania laserowego. W badaniach zajęto się głównie ostatnimi dwiema grupami czynników. Spośród cech terenu wzięto pod uwagę liczbę warstw drzewostanu, nachylenie terenu, wysokość runa leśnego, rodzaj powierzchni (w lesie, poza lasem, drogi). Przy przetwarzaniu danych zastosowano 3 metody filtracji oraz 15 algorytmów interpolujących numeryczny model terenu, używając różnych ich ustawień. Dodatkowo przeanalizowano kąt padania wiązek laserowych na dokładność numerycznego modelu terenu. Ostatecznie w analizach wykorzystano 24 najlepsze modele terenu z poszczególnych wariantów.

Badania prowadzono w południowo-zachodniej części kraju, w gminach Platerówka i Lubań. W pracach wykorzystano dane referencyjne pozyskane odbiornikiem GPS (klasy geodezyjnej - RTK) w 23 drzewostanach. W składzie gatunkowym drzewostanów dominował świerk (9 drzewostanów), następnie sosna (4 drzewostany), klon (4 drzewostany), buk (3 drzewostany) oraz jesion, dąb i brzoza (po 1 drzewostanie). Wiek drzewostanów mieścił się w przedziale od 29 do 114 lat. Teren był mocno pofałdowany, a zakresie wysokości wynosił od 232 do 375 m n.p.m.

Dane lotniczego skanowania laserowego pozyskane zostały skanerem RIEGL LMS-Q680i w sierpniu 2012 roku. Następnie przetworzone i sklasyfikowane zostały one za pomocą oprogramowania TerraSolid. Po wygenerowaniu różnych numerycznych modeli terenu określono ich dokładność względem referencyjnych pomiarów GPS. W ocenie dokładności wykorzystano wartości błędu systematycznego (bias) i błąd średniokwadratowy (RMSE). Różnice uzyskanych wyników zostały określone przy pomocy testu t przy poziomie istotności  $\alpha=0,05$ .

W wyniku badań stwierdzono, że:

- Nachylenie terenu, a zwłaszcza rodzaj roślinności pokrywającej grunt, są najważniejszymi czynnikami wpływającymi na dokładność numerycznego modelu terenu w gęstych lasach na obszarach górskich. Im większe nachylenie terenu i wyższa roślinność runa tym błędy są większe.
- Wszystkie metody interpolacji numerycznego modelu terenu mogą dostarczyć wyników o podobnej dokładności, o ile określono ich optymalne ustawienia.
- Błąd systematyczny i średniokwadratowy są dwukrotnie wyższe w terenach otwartych pokrytych roślinnością, niż dla dróg.
- Wraz ze wzrostem kąta skanowania błędy się powiększają. Dzięki pokryciu pomiędzy szeregami, na skrajach szeregów błędy są minimalizowane.
- W analizowanym przypadku nie było jakościowego zysku przy zamówieniu NMT w firmie zajmującej się profesjonalnie pozyskiwaniem i przetwarzaniem danych. Osiągnięte wyniki filtracji i interpolacji były co najmniej tak dobre, jak otrzymane od firmy komercyjnej.

- 4) **Stereńczak K.**, Będkowski K. 2011. Wykorzystanie numerycznego modelu terenu i modelu pokrycia terenu do klasyfikacji drzewostanów na podstawie ich struktury pionowej i gatunkowej. *Sylwan*, 155 (4): 219-227.

Stwierdzone doświadczalnie różnice między modelami, wynikające z warunków środowiska oraz wpływu sezonowej zmienności lasu, mają negatywny wpływ na proces określania m.in. wysokości drzewostanów. Te istniejące uwarunkowania można wykorzystać do uzyskania innego rodzaju informacji o lesie. W pracy analizowano czy możliwe jest wykorzystanie zależności między modelami terenu oraz modelami pokrycia terenu do automatyzacji procesu klasyfikacji drzewostanów na podstawie ich struktury pionowej i gatunkowej. Podstawę takiej klasyfikacji stanowił teoretyczny zespół relacji między modelami NMT i NMPT drzewostanów iglastych i liściastych, uwzględniający wpływ sezonu wegetacyjnego oraz budowę pionową drzewostanów.

Analizę przeprowadzono na podstawie drzewostanów Uroczyska Głuchów, stanowiącego część Leśnego Zakładu Doświadczalnego w Rogowie, należącego do Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. W badaniach wykorzystano wyniki skanowania laserowego wykonanego w 2007 r. w dniach 2-3 maja oraz 9 lipca i 30 sierpnia. Zastosowano skaner laserowy FALCON II firmy TopoSys. Dane w postaci surowej chmury punktów analizowano za pomocą programu TreesVis, umożliwiającego przetwarzanie danych lotniczego skanowania laserowego. Do wygenerowania numerycznego modelu terenu wykorzystano chmury punktów zawierające tylko tzw. ostatnie odbicia, a do wygenerowania numerycznego modelu pokrycia terenu chmury zawierające tzw. pierwsze odbicia. Modele interpolowano w rozdzielczości przestrzennej 1 m, z rzędnymi wysokościami wyrażonymi z zaokrągleniem do 1 cm.

W pierwszej fazie doświadczenia następującą hipotezę, że pora roku (wiosna, lato) powoduje, że pomiędzy drzewostanami iglastymi a liściastymi i mieszanymi istnieje statystycznie istotna różnica pomiędzy średnimi wartościami wysokości (rzędnych): numerycznego modelu terenu (NMT), numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT) i wysokościowego modelu koron (WMK). W tym celu w granicach każdego drzewostanu obliczono wartości średnie rzędnych z modeli „wiosennych” i „letnich”. Do oceny istotności różnic między średnimi wykorzystano analizę ANOVA wykonaną za pomocą pakietu Statgraphics. Stwierdzono, że istnieje istotna statystycznie różnica pomiędzy grupą 48 drzewostanów iglastych i 39 drzewostanów liściastych i mieszanych dla NMT i NMPT. Wynik doświadczenia upoważnił do podjęcia próby wykorzystania tej informacji do klasyfikacji struktury pionowej i gatunkowej drzewostanów.

Aby mieć pewność, że przetwarzane dane nie są zniekształcone przez inne czynniki (np. niewłaściwą kalibrację chmur punktów laserowych), wprowadzono do analizy także dwie grupy obiektów kontrolnych – łąki oraz utwardzone drogi. Wybór tych obiektów uzasadniony jest założeniem, że budowane dla nich modele NMT, NMPT i wynikowe modele różnicowe rNMPT (NMPT – NMT) nie powinny wykazywać różnic wynikających z pory roku.

Druga część doświadczenia miała na celu sprawdzenie, czy budowa pionowa (warstwowa) drzewostanów ma wpływ na tworzone modele NMT, NMPT oraz wynikowy WMK. Dzięki analizie stereoskopowej zdjęć lotniczych możliwe było wskazanie drzewostanów iglastych i liściastych oraz mieszanych o strukturze jedno- i dwuwarstwowej. W przedstawionym doświadczeniu, biorąc pod uwagę pierwszą warstwę drzewostanu, połączono drzewostany liściaste i wielogatunkowe w jedną grupę. Analizowano, jak poprzednio, różnice między

wartościami średnimi modeli NMT, NMPT oraz WMK, obliczonymi dla wariantu „wiosennego” i „letniego”. Przy budowie funkcji dyskryminacji wykorzystano wszystkie modele, gdyż pozwoliło to na osiągnięcie wyższej dokładności klasyfikacji.

W wyniku badań stwierdzono, że:

- Zaproponowana metodyka pozwala podzielić drzewostany na iglaste oraz liściaste i mieszane z dokładnością rzędu 71 % (dokładność całkowita).
- Zaproponowana metodyka pozwala podzielić drzewostany na jedno- i dwuwarstwowe. Osiągnięto dokładność około 71-79 % (dokładność całkowita).
- Różnice między NMT (lato i wiosna) wskazują, że niższe warstwy drzewostanu oraz runo mają wpływ na położenie (rzędne) interpolowanych warstw.
- W analizowanych danych nie stwierdzono błędów systematycznych ani wpływu innych czynników, co wykazano na podstawie wyników uzyskanych dla 45 powierzchni kontrolnych umieszczonych na łąkach i drogach.

- 5) **Stereńczak K.**, Moskalik T. 2014. The possibilities of using a LIDAR-based Digital Terrain Model and single tree segmentation data to determine an optimal forest skid trail network. *iForest - Biogeosciences and Forestry*, 8: 661-667.

Numeryczny model terenu powstały w wyniku interpolowania danych lotniczego skanowania laserowego jest materiałem dostarczającym bardzo precyzyjnej informacji o ukształtowaniu terenu w środowisku leśnym. Stąd materiał ten może być podstawą planowania wielu działań gospodarczych. Wykorzystywany jest także w planowaniu prac pielęgnacyjnych i pozyskaniu drewna głównie w określaniu możliwości wykorzystania określonych technologii.

Badania dotyczyły możliwości wykorzystania numerycznego modelu terenu oraz wyników detekcji koron poszczególnych drzew w optymalizacji miejsc zakładania szlaków zrywkowych. Analizę przeprowadzono na podstawie 170 drzewostanów sosnowych Uroczyska Głuchów stanowiącego część Leśnego Zakładu Doświadczalnego SGGW w Rogowie. W badaniach wykorzystano dane lotniczego skanowania laserowego wykonanego w 2007 r. w dniach 2-3 maja oraz 9 lipca i 30 sierpnia. Zastosowano skaner laserowy FALCON II firmy TopoSys. Dane przetworzono do postaci numerycznego modelu terenu i numerycznego modelu pokrycia terenu. W wyniku przetworzenia modeli terenu uzyskano wysokościowy model koron, który następnie poddano procesowi detekcji pojedynczych koron drzew. W dalszych analizach wykorzystano numeryczny model terenu i wyniki detekcji drzew.

W pracy opracowano zestaw reguł, które w oparciu o dane przestrzenne i ich przetworzenia, teoretyczną sieć szlaków zrywkowych oraz dodatkowe kryteria, wykorzystane zostały w optymalizacji przebiegu szlaków zrywkowych. Optymalizacja dotyczyła szlaków operacyjnych wykorzystywanych w klasycznej metodzie trzebieży ze zrywką oraz trzebieży wykonanej z zastosowaniem harwesterów. Istotą optymalizacji było wskazanie, przed udaniem się w teren, obszarów niedostępnych (ze względu na zbyt duże pochyłości terenu) dla przyjętych rozwiązań. Założono również, że szlaki powinny być tak wyznaczone, aby liczba usuniętych drzew była jak najmniejsza, m.in. dzięki wykorzystaniu istniejących luk w drzewostanach.

W wyniku przeprowadzonych prac stwierdzono, że:

- Długość sieci szlaków zrywkowych po optymalizacji zmniejszyła się o około 2% dla tradycyjnej metody pozyskania i praktycznie nie zmieniła się dla metody zmechanizowanej (nieistotna różnica o około 0,06%).
- W wyniku optymalizacji zaplanowane liczby usuwanych drzew zmieniły się również nieznacznie (dla metody tradycyjnej o 2,8%, a dla metody maszynowej o 0,55%). Dla miąższości i biomasy percentyl były bardzo podobne. Powyższe różnice nie były istotnie statystycznie przy  $\alpha=0,05$ .
- Pomimo niewielkich zmian w stosunku do pierwotnego kształtu sieci szlaków zrywkowych zdiagnozowano miejsca niedostępne dla określonych technologii. Należy wziąć pod uwagę, że analizowany obszar obejmował niewielką powierzchnię i był relatywnie płaski. Innych wyników należałoby się spodziewać w obszarach górskich, gdzie wykorzystanie NMT pozwoliłoby na wyłączenie z operacji obszarów o zbyt dużych pochyłościach terenu i zaplanowanie innych metod cięć pielęgnacyjnych, jeszcze na etapie planowania.

### Najważniejsze wyniki badań ujętych w cyklu publikacji:

- Ukształtowanie terenu, także w warunkach leśnych, jest istotnym czynnikiem wpływającym na dokładność numerycznego modelu terenu. Średni błąd i mediana różnic dla punktów znajdujących się na stokach był średnio 3 razy większy, niż punktów znajdujących się na terenie płaskim.
- W wyniku badań wykazano, że najważniejszym czynnikiem wpływającym na dokładność numerycznego modelu terenu w gęstych lasach na obszarach górskich jest przede wszystkim roślinność runa.
- Struktura lasu jest czynnikiem warunkującym dokładność numerycznego modelu terenu. Największe błędy zaobserwowano dla drzewostanów we wczesnej fazie rozwoju, gdy tworzy on zwarte młodniki. Faza początkowego wzrostu (uprawa) oraz okres po rozluźnieniu zwarcia (od drągowiny) nie powodują tak dużych błędów numerycznego modelu terenu. Młodnik okazał się najtrudniejszym środowiskiem do penetracji przez wiązki laserowe, a co za tym idzie wyniki interpolacji modeli terenu były najmniej dokładne.
- Wartości błędów osiągnął około 10-30 cm dla NMT wiosennych i około 30-60cm dla NMT letnich; błędy były wyraźnie związane z rozdzielczością modeli i zwiększały się wraz ze wzrostem wielkości pikseli; przeszacowanie wysokości, typowe dla wyższych rozdzielczości, zamieniło się w niedoszacowanie wielkości wyjściowej piksela > 10 m. Nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic pomiędzy dokładnościami modeli uzyskanych z danych lotniczego skanowania laserowego pozyskanych w różnych terminach okresu wegetacyjnego dla modeli o wielkości pikseli do 5 m. Dla modeli o wielkości pikseli 10 i 20 m zanotowano istotne statystycznie różnice pomiędzy dwoma terminami pozyskania danych. Oznacza to, że zarówno filtracja chmury punktów, a także pośrednio struktura lasu, wpływają na ten wynik.
- Wpływ terminu pozyskania danych był różny dla różnych drzewostanów. Modele letnie charakteryzowały się większym zakresem błędów przypadkowych i większym błędem systematycznym. Drzewostany jednopiętrowe były bardziej wrażliwe na termin pozyskania danych niż drzewostany wielopiętrowe, podobnie jak drzewostany modrzewiowe i olszowe w porównaniu do drzewostanów sosnowych i dębowych. Może to być efektem tego, iż w drzewostanach gęstych – wielopiętrowych, przez cały czas warunki światła są podobne i niewiele światła dociera do dna lasu, co ogranicza rozwój roślinności runa lub podszytu. Dodatkowo gęsta struktura lasu ogranicza ilość wiązek laserowych docierających do dna lasu, niezależnie od tego czy na drzewach są liście. W drzewostanach jednopiętrowych ilość światła docierająca do dna lasu jest większa, choć może być zmienna w trakcie okresu wegetacyjnego. O ile w drzewostanach iglastych warunki świetlne nie zmieniają się istotnie w okresie wegetacyjnym, o tyle w drzewostanach liściastych zmiany są duże, co ma wpływ na rozwój roślinności runa. Oznacza to, że na obszarach o sezonowo zmiennym wyglądzie zbiorowisk roślinnych, stan bezlistny może nie być optymalnym momentem pozyskania danych ALS do stworzenia numerycznego modelu terenu. Przykładem mogą być niektóre siedliska grądowe, gdzie wiosną pojawia się na krótki moment w runie leśnym zawilec gajowy czy czosnaczek niedźwiedzi.
- Średni błąd i wartość 68 percentyla różnic mają bardzo podobne wartości dla modeli o różnych analizowanych wielkościach pikseli, a 95 percentyl jest bardzo podatny na pojawiające się czasami duże wartości błędów związanych z wpływem nachylenia

terenu czy struktury roślinności. Użycie różnych miar statystycznych w ocenie błędu numerycznego terenu może prowadzić do wnioskowania na temat ukształtowania terenu (obszar o zmiennej rzeźbie terenu, czy obszar płaski). Użycie percentyli jest bardziej odpowiednie w przypadkach, gdy rozkład wartości (błędów/różnic) nie ma rozkładu normalnego i jest skośny.

- Różne strategie filtracji skutkowały różnymi gęstościami chmury punktów. Generalnie wykorzystywana w badaniach chmura punktów była gęsta i oferowała bardzo dokładne odzwierciedlenie topografii. Najgęstsza chmura punktów wykorzystana do interpolacji NMT nie gwarantowała najlepszej jego dokładności. Różnice były jednak bardzo małe (około 1-2 cm). BIAS i RMSE dla wszystkich modeli interpolowanych z najgęstszych danych, przyjęły najwyższe wartości. Wynik ten można wytłumaczyć tym, że zbyt wiele punktów poza gruntem zostało zachowanych w chmurze i użytych w interpolacji NMT.
- Wszystkie metody interpolacji numerycznego modelu terenu mogą dostarczyć wyników o podobnej dokładności, o ile zastosowano ich optymalne ustawienia. Badania pokazały, że w analizowanym przypadku nie było istotnej jakościowej różnicy pomiędzy NMT dostarczonym przez komercyjnych wykonawców, a efektami prac własnych.
- Zaproponowana metodyka wykorzystania modeli terenu do klasyfikacji drzewostanów na klasy: z dominującym udziałem gatunków liściastych i drzewostany mieszane oraz osobno iglaste, osiąga dokładność rzędu 71% (dokładność całkowita). Zaproponowana metodyka wykorzystania modeli terenu do klasyfikacji drzewostanów na jedno- i dwuwarstwowe osiąga dokładność rzędu 71-79% (dokładność całkowita). W obydwu przypadkach wyniki potwierdziły, iż struktura drzewostanu wpływa, na jakość numerycznych modeli terenu. Dzięki temu możliwe jest wykorzystanie tego stałego wpływu w klasyfikacji.
- NMT i wyniki detekcji pojedynczych drzew umożliwiają optymalizację przebiegu szlaków zrywkowych. Długość sieci szlaków zrywkowych po optymalizacji zmniejszyła się o około 2% dla tradycyjnej metody pozyskania i praktycznie nie zmieniła się dla metody zmechanizowanej (nieistotna różnica o około 0,06%). W wyniku optymalizacji zaplanowane liczby usuwanych drzew zmieniły się również nieznacznie (dla metody tradycyjnej o 2,8%, a dla metody maszynowej o 0,55%). Dla miąższości i biomasy percentyl były bardzo podobne. Powyższe różnice nie były istotnie statystycznie przy  $\alpha=0,05$ . NMT już na etapie planowania pozwolił na wskazanie miejsc niedostępnych lub uniemożliwiających wykorzystanie określonych technologii nawet w obszarach płaskich. Zdecydowanie istotniejsze wyniki możliwe byłby do uzyskania w obszarach górskich gdzie deniwelacje terenu są zdecydowanie większe niż na wykorzystanym w badaniach obszarze Uroczyska Głuchów.



## OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO-BADAWCZYCH, DYDAKTYCZNYCH I ORGANIZACYJNYCH

### Przebieg mojej pracy naukowej przed uzyskaniem stopnia doktora.

Moje zainteresowania naukowe rozpoczęły się w trakcie studiów na Wydziale Leśnym Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Studia rozpocząłem w 2000 r., a zakończyłem w 2006 r. W trakcie studiów zdecydowałem się na roczną przerwę wynikającą z konieczności podjęcia pracy zarobkowej. Unormowanie sytuacji finansowej umożliwiło mi przygotowanie pracy magisterskiej pod tytułem: *„Aktualizacja leśnej mapy numerycznej na przykładzie wybranych obiektów Nadleśnictwa Rogów”*. Promotorem pracy był dr hab. inż. Krzysztof Będkowski, prof. SGGW. Studia magisterskie na Wydziale Leśnym ukończyłem z wynikiem bardzo dobrym. Jeszcze w trakcie trwania studiów podjąłem decyzję o kontynuowaniu pracy naukowej.

W 2007 r. podjąłem studia doktoranckie na Wydziale Leśnym Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Aktywnie włączyłem się również do prowadzonych w Katedrze Geomatyki i Gospodarki Przestrzennej badań naukowych (10 projektów), m.in. nad zastosowaniem skanowania laserowego w leśnictwie. Pod kierunkiem dr hab. inż. Krzysztofa Będkowskiego, profesora SGGW, przygotowałem wyróżnioną przez Radę Wydziału Leśnego rozprawę doktorską pod tytułem *„Wykorzystanie danych lotniczego skanowania laserowego do określania zagęszczenia drzew w jednopiętrowych drzewostanach sosnowych”*. Badania prowadzące do powstania pracy doktorskiej zostały wsparte między innymi przez Mazowieckie Stypendium Doktoranckie przyznane w ramach Zintegrowanego Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego, Działania 2.6 „Regionalne Strategie Innowacyjne i transfer wiedzy”, finansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego. Ponadto doktorat powstał przy wsparciu środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2009-2011 w ramach grantu promotorskiego N N309 113237 pt. *„Wykorzystanie danych lotniczego skanowania laserowego do określania zagęszczenia drzew w jednopiętrowych drzewostanach sosnowych”* (kierownik projektu: dr hab. inż. Krzysztof Będkowski, prof. SGGW).

Równolegle do studiów doktoranckich w latach 2007-2010 podjąłem anglojęzyczne studia UNIGIS prowadzone wspólnie przez Uniwersytet w Salzburgu (Austria) i Uniwersytet Jagielloński. Studia te ukończyłem na najwyższym z możliwych poziomów (European Master), uzyskując tytuł Master of Science in Geographical Information Science and Systems. Moja praca dyplomowa wysłana została na międzynarodowy konkurs prac magisterskich – UNIGIS International Association 2010 Academic Excellence, gdzie zajęła 6 miejsce.

W trakcie studiów doktoranckich wykazywałem się aktywnością naukową. Opublikowałem w czasie studiów 33 publikacje naukowe i popularno-naukowe. Złożyły się na niego liczne prace, samodzielne i opracowane wraz z innymi autorami, opublikowane w monografiach, czasopismach naukowych i materiałach konferencyjnych. Pierwsza praca o charakterze naukowym ukazała się w 2006 r. Ponadto w trakcie studiów doktoranckich miałem 16 wystąpień konferencyjnych/seminaryjnych, z czego 6 w języku angielskim. Uczestniczyłem w 6 międzynarodowych szkołach letnich. Ukończyłem 2 dodatkowe kursy e-learningowe (pierwszy na Uniwersytecie w New Brunswick (Kanada), drugi w ramach European Spatial Data Research Network), 3 szkolenia, otrzymałem 3 stypendia (travel sholarship) na konferencje

w Chinach i USA. W okresie od 19.09.2007 do 14.02.2008 przebywałem na stypendium doktoranckim ERASMUS na Uniwersytecie we Freiburgu (Niemcy).

W trakcie ubiegania się o Mazowieckie Stypendium Doktoranckie mój dorobek naukowy został najwyżej oceniony wśród wniosków w kategorii Środowisko, co zostało wyróżnione listem gratulacyjnym Marszałka Województwa Mazowieckiego Adama Struzika. Ponadto otrzymałem Nagrodę „Best Paper Award”, jako współautor wyróżnionego artykułu w sesji młodych naukowców (Youth Forum), w trakcie XXI Kongresu ISPRS w Pekinie w czerwcu 2008 r. W listopadzie 2009 r. otrzymałem Nagrodę Scopus-Perspektywy Young Researcher Award ufundowaną przez Elsevier B. V. oraz Fundację Edukacyjną Perspektywy – 1 miejsce w kategorii Środowisko.

**Przebieg mojej pracy naukowej po uzyskaniu stopnia doktora (omówienie osiągnięć naukowo-badawczych innych niż te, które są podstawą ubiegania się o stopień doktora habilitowanego).**

Po osiągnięciu stopnia naukowego doktora nauk leśnych zostałem zatrudniony w Katedrze Geomatyki i Gospodarki Przestrzennej Wydziału Leśnego Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie (lipiec 2011 r.). Po kilkunastu miesiącach rozpocząłem pracę naukową w Instytucie Badawczym Leśnictwa (grudzień 2012 r.) i kontynuuję ją do dzisiaj.

Od 2011 r. byłem zaangażowany w realizację 10 projektów badawczych (finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego i Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych), jako koordynator zadań i główny wykonawca = i trzech jako ich kierownik (finansowanych przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, Unię Europejską, Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej oraz Europejską Agencję Kosmiczną). Szczególnie istotne jest dla mnie realizowanie dwóch projektów:

- Projektu wdrożeniowego REMBIOFOR „Teledetekcyjne określanie biomasy drzewnej i zasobów węgla w lasach”, współfinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, w ramach programu „Środowisko naturalne, rolnictwo i leśnictwo” BIOSTRATEG, na podstawie umowy nr BIOSTRATEG1/267755/4/NCBR/2015. Projekt realizowany jest przez konsorcjum 8 instytucji: Instytut Badawczy Leśnictwa (Lider konsorcjum), Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych (partner biznesowy), Szkołę Główną Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Instytut Dendrologii PAN w Kórniku, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Instytut Technologii Drewna w Poznaniu, Instytut Geodezji i Kartografii w Warszawie. Jestem głównym Autorem i Kierownikiem projektu. Budżet projektu to 20 968 761 PLN.
- Projektu LIFE+ ForBioSensing PL „Kompleksowy monitoring dynamiki drzewostanów Puszczy Białowieskiej z wykorzystaniem danych teledetekcyjnych”, który jest współfinansowany ze środków Komisji Europejskiej w ramach instrumentu finansowego Unii Europejskiej LIFE+ oraz ze środków Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW) Nr umowy z KE: LIFE13 ENV/PL/000048; Nr umowy z NFOŚiGW: 485/2014/WN10/OP-NM-LF/D. Projekt ten jest pierwszym tak kompleksowym projektem, który w szeroki sposób analizuje stan i dynamikę drzewostanów Puszczy Białowieskiej. Jestem głównym Autorem i Kierownikiem projektu. Budżet projektu to 16 857 123 PLN.

W opisywanych projektach zaangażowanych jest ponad 120 osób, co poza wiedzą merytoryczną wymaga ode mnie także umiejętności organizacyjnych i zarządczych, które stale rozwijam. W opisywanym okresie ukończyłem i otrzymałem certyfikaty m. in.: PRINCE2 Practitioner, AgilePM Practitioner, „Zarządzanie ludźmi w projekcie badawczym” w projekcie „STER dla B+R” nr UDA-POKL.04.02.00-00-022/11, szkolenie współfinansowane z Europejskiego Funduszu Społecznego w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Priorytet IV „Szkolnictwo wyższe i nauka”, Działanie 4.2 „Rozwój kwalifikacji kadr systemu B+R i wzrost świadomości roli nauki w rozwoju gospodarczym”, „Zarządzanie ryzykiem” oraz „Zarządzanie sobą w czasie”.

Moja działalność naukowa w latach 2011-2017 skupiała się na trzech głównych obszarach tematycznych:

- 1) Określanie cech taksacyjnych drzew i drzewostanów z wykorzystaniem danych skanowania laserowego,
- 2) Analiza składu gatunkowego i kondycji lasów z wykorzystaniem danych teledetekcyjnych,
- 3) Analiza wybranych zmiennych drzew i drzewostanów z wykorzystaniem bezzałogowych systemów latających.

#### **Ad.1 Określanie cech taksacyjnych drzew i drzewostanów z wykorzystaniem danych skanowania laserowego**

W związku z ciągłym rozwojem technologii i pojawianiem się na rynku nowych narzędzi, które potencjalnie mogą zostać wykorzystane w precyzyjniejszym, szybszym lub tańszym pomiarze lasu, istnieje potrzeba ciągłych badań nad ich praktycznym zastosowaniem. W prowadzonych badaniach, poza aspektami technicznymi, należy również uwzględnić to, iż lasy w Polsce mają swoistą charakterystykę, m.in. pod względem sposobu zagospodarowania, składu gatunkowego czy struktury. Poniższe przykłady badań prowadzonych w różnych zespołach odnoszą się głównie do zagadnień związanych z wykorzystaniem w leśnictwie danych skanowania laserowego. Część z poniżej prezentowanych badań jest kontynuacją moich prac prowadzonych jeszcze w trakcie studiów doktoranckich oraz wykorzystuje wyniki mojego doktoratu. W pracach tych, prowadzonych głównie z prof. dr hab. Stanisławem Miścickim, skupialiśmy się na wykorzystaniu efektów przetworzenia danych lotniczego skanowania laserowego na potrzeby inwentaryzacji podstawowej cechy taksacyjnej lasu – zasobności drzewostanów. Prowadzone przez nas prace pozwoliły, pierwszy raz w Polsce, na szczegółowe zinwentaryzowanie dużego kompleksu leśnego - Parku Narodowego Gór Stołowych - z wykorzystaniem danych lotniczego skanowania laserowego (projekt pt.: „Opracowanie metody pomiaru zasobów leśnych z wykorzystaniem lotniczego scanningu laserowego (na przykładzie terenu górskiego objętego ochroną)”). Tam powstały podstawy metody inwentaryzacji zapasu rozwijanej aktualnie w ramach projektu programu NCBiR BIOSTRATEG („Teledetekcyjne określanie biomasy drzewnej i zasobów węgla w lasach –REMBIOFOR”).

- W przeglądowym rozdziale dotyczącym lotniczego skanowania laserowego opisano w dość syntetyczny sposób historię oraz wybrane aspekty techniczne tej technologii. W części dotyczącej historii odnotowano również najważniejsze fakty związane z wykorzystaniem lotniczego skanowania laserowego w badaniach środowiska leśnego

w Polsce. W rozdziale dotyczącym opisu technologii przedstawiono syntetyczną charakterystykę podstawowych zmiennych systemu m.in.: typy sensorów, częstotliwości skanowania oraz gęstość chmury punktów. Następnie omówiono najważniejsze produkty uzyskiwane w wyniku lotniczego skanowania laserowego i przedstawiono charakterystykę danych, które były podstawą analiz przedstawionych w monografii.

*Stereńczak K. 2011 Lotnicze skanowanie laserowe. [w] K. Będkowski (red.) Las w rastrowym modelu danych przestrzennych, Wydawnictwo SGGW, Warszawa, s. 63-74.*

- Z wykorzystaniem danych pozyskanych w wyniku lotniczego skanowania laserowego analizowano możliwość detekcji drzew w chmurze punktów. W celu weryfikacji metody wykorzystano powierzchnie próbné pozyskane w Nadleśnictwie Milicz. Testowane podejście do detekcji drzew jest o tyle zaawansowane, że wykorzystuje chmurę punktów, a nie model pokrycia terenu czy wysokościowy model koron, jest więc analizą w przestrzeni 3D a nie 2,5D. Wyniki detekcji drzew dla poszczególnych powierzchni różniły się w zależności od gatunku (od 60 do 85,7% poprawnie określonych drzew) i wieku (od 57,1 do 100% poprawnie określonych drzew).

*Gupta S., Weinacker H., Stereńczak K, Koch B. 2013 Single tree delineation using airborne LIDAR data. European Scientific Journal, 9(32): 405-435.*

- Analizowano dokładność określania wysokości drzewostanów z wykorzystaniem wyników detekcji pojedynczych drzew. Doświadczenie prowadzone było w drzewostanach sosnowych (*Pinus silvestris* L.) Nadleśnictwa Milicz. Badania wykazały, iż określana na podstawie danych lotniczego skanowania laserowego średnia wysokość drzewostanów jest niedoszacowana średnio o 0,82 m (prawie -5%), z kolei wysokość górna była niedoszacowana średnio o 2 m (-9%). Uzyskana dokładność segmentacji była porównywalna z innymi pracami i wydaje się, że nie wpłynęła negatywnie na określanie wybranych wysokości drzewostanów.

*Stereńczak K., Zasada M. 2011. Accuracy of tree height estimation based on LIDAR data analysis. Folia Forestalia Polonica, ser. A, 53 (2): 123-129.*

- Badano możliwość zastosowania wysokościowego modelu koron (WMK) do określania wysokości i zagęszczenia drzewostanów. Obie zmienne taksacyjne określane były w pierwszej kolejności dla tak zwanych pól podstawowych (oczek rastrów) o wielkości 5 i 20 m. Wartości uzyskane dla poszczególnych wielkości oczek rastrów uśrednione były dla całych wydzieleń. Poza określeniem zmiennych istotnych z gospodarczego punktu widzenia, zaprezentowane rozwiązania metodyczne umożliwiały wydzielenie na obszarze całego kompleksu leśnego homogenicznych fragmentów drzewostanów. Wyniki określone na podstawie analizy danych z WMK porównywano z wartościami określonymi na podstawie urządzania lasu. Najwyższy współczynnik determinacji uzyskano dla wariantu, w którym średnia wysokość określana była na podstawie wszystkich oczek rastra w pełni znajdujących się wewnątrz wydzieleń. Nieco gorsze wyniki uzyskano dla wariantu, w którym wszystkie oczka rastra przecinające się z powierzchnią wydzielenia były brane pod uwagę. Podobne tendencje zaobserwowano dla wysokości maksymalnej, przy czym współczynniki determinacji przyjmowały nieco wyższe wartości wynoszące  $R^2=0,81$ . W przypadku charakterystyki, jaką jest zagęszczenia drzew na jednostkę powierzchni zastosowana metoda umożliwia

zarejestrowanie i wskazanie przestrzennego zróżnicowania tej cechy na obszarze wydzieleni.

*Stereńczak K., Będkowski K. 2011: Wysokość drzewostanu i zagęszczenie. [w] K. Będkowski (red.) Las w rastrowym modelu danych przestrzennych, Wydawnictwo SGGW, Warszawa, s. 78-90.*

- Dysponując dwoma zestawami danych lotniczego skanowania laserowego pozyskanymi dla obszaru Leśnego Zakładu Doświadczalnego w Rogowie, przeprowadzono analizę możliwości zarejestrowania przyrostu wysokości w jednym sezonie wegetacyjnym. Wykorzystane dane pozyskane zostały w maju i sierpniu 2007 roku, więc na początku i końcu intensywnego wzrostu wysokości drzew. Przyrost określany był w wydzieleniach i uśredniany w klasach wysokości. Wyniki wykazały, iż dane pozyskane w wyniku lotniczego skanowania laserowego umożliwiają detekcję jednorocznego przyrostu wysokości drzew.

*Stereńczak K., Mielcarek M. 2014. Assessing one year pine growth at stand level with single tree detection based on ALS data. Proceedings of the 6th Precision Forestry Symposium: The anchor of your value chain. Edited by Pierre Ackerman, Elizabeth Gleasure and Hannél Ham, 3-5 March 2014, Stellenbosch University, Stellenbosch, South Africa, 16-18.*

- Przedmiotem analizy była zależność pomiędzy pierśnicą drzew a wybranymi zmiennymi koron drzew określonych z wykorzystaniem lotniczego skanowania laserowego. Doświadczenie prowadzone było w drzewostanach sosnowych (*Pinus silvestris* L.) Nadleśnictwa Milicz. W wyniku badań okazało się, że najlepszym zestawem cech do określania zależności między grubością drzew a charakterystykami koron okazały się pierśnicowe pola przekroju drzew jako zmienna zależna oraz powierzchnia rzutu korony jako zmienna niezależna. Związek między grubością drzew a parametrami koron był istotny, lecz stosunkowo słaby ( $R^2$  od 0,33 do 0,52). Najlepsze wyniki uzyskano dla algorytmu o nazwie „pouring”, za pomocą którego detekcja drzew odbywa się w ścisłym związku z budową morfologiczną koron, stąd tak znaczna poprawa wyników. Na dokładność analizy miały również wpływ inne cechy drzew i drzewostanów, a także dokładność detekcji drzew, która nigdy nie przyjmuje wartości 100%. Mimo stosunkowo niewielkiej siły związku pola przekroju drzewa i powierzchni rzutu korony, możliwe jest stworzenie nieobciążonego modelu służącego do automatycznego określania pierśnic drzew.

*Zasada M., Stereńczak K., Brach M. 2011. Zależność między cechami koron uzyskanymi z lotniczego skanowania laserowego a pierśnicami drzew. Sylwan, 155 (11): 725-735.*

- Analizowano wybrane cechy drzew i drzewostanów, ustalone i zmierzone na zobrazowaniu aerolidarowym, pod kątem ich przydatności do zdalnego i automatycznego określania zasobności drzewostanów. Przeanalizowano cechy określone dla pojedynczych drzew w oparciu o wysokościowy model koron (WMK). Badania przeprowadzono w terenie górskim, w południowo-zachodniej części Parku Narodowego Gór Stołowych. Przeanalizowano 7 cech lub grup cech określonych w oparciu o wysokościowy model koron i segmentację drzewostanu na pojedyncze korony. Zmienność cechy zależnej – wielkości zapasu na powierzchniach próbnych - była najlepiej objaśniana przez takie zmienne niezależne, jak: średnia wysokość drzew oraz

iloczyn sumy objętości koron i sumy wysokości drzew w obrębie powierzchni. Współczynnik korelacji wielokrotnej był wysoki ( $R=0,820$   $p<0,001$ ). Silna zależność między zasobnością na powierzchniach próbnych naziemnych a cechami na powierzchniach próbnych aerolidarowych (z pominięciem cech pośrednich takich jak np. wiek drzewostanu) wskazuje, że możliwe jest stosowanie dwufazowej metody inwentaryzacji lasów silnie zróżnicowanych, a także zbliżonych do naturalnych, występujących w parkach narodowych. Prezentowana metoda była integracją metod powierzchniowej i bazującej na pojedynczych drzewach. Była to jedna z pierwszych tego typu prac w świecie.

*Miścicki S., Stereńczak K. 2012. Wykorzystanie cech określonych na podstawie wysokościowego modelu koron w dwufazowej metodzie inwentaryzacji zapasu drzewostanu. Roczniki Geomatyki X, 5(55): 47-54.*

- Kolejnym rozwinięciem prac nad wykorzystaniem danych lotniczego skanowania laserowego była analiza wpływu wielkości powierzchni, sposobu selekcji drzew (koron) należących do powierzchni próbnej, jak i zestawu zmiennych wykorzystanych do budowy modelu. Obliczenia zostały wykonane czterokrotnie z uwzględnieniem wielkości próby i sposobu zaliczenia drzew (koron) do próby. W wyniku przeprowadzonych analiz uznano, iż wskazane jest stosowanie powierzchni próbnych aerolidarowych (powierzchni stworzonych przy wykorzystaniu danych lotniczego skanowania laserowego) o wielkości odpowiadającej odwzorowaniu powierzchni próbnych naziemnych. Użycie powierzchni większych prowadziło do pogorszenia wyniku obliczenia zależności między zasobnością lub zagęszczeniem drzew zmierzonym na ziemi a cechami zmierzonymi w obrębie prób aerolidarowych. Stwierdzono, iż lepszym sposobem zaliczania drzew do próby aerolidarowej jest metoda „centroidy”, czyli biorąca pod uwagę to, czy centroid korony drzew znajduje się wewnątrz powierzchni próbnej. Badania wykazały, że cechą aerolidarową szczególnie przydatną do obliczenia zasobności i zagęszczenia drzew jest „suma objętości koron”. Pozostałe cechy: wysokość (górną lub średnią), liczba drzew widoczna na zobrazowaniu lub suma wysokości drzew także mogą być wykorzystane i mają podobne znaczenie dla objaśnienia zależności między wartością zmienną cech zmierzonych na ziemi (zasobnością lub zagęszczeniem drzew) a wartością zmienną cech zmierzonych w obrębie prób aerolidarowych.

*Miścicki S., Stereńczak K. 2013. Określanie miąższości i zagęszczenia drzew w drzewostanach Centralnej Polski na podstawie danych lotniczego skanowania laserowego w dwufazowej metodzie inwentaryzacji zapasu. Leśne Prace Badawcze 74 (2): 127-136.*

- Analizowano również wpływ wielkości korony (rzut poziomy korony) na wynik modelowania zasobności na powierzchniach próbnych. W tym celu przeanalizowano wybrane powierzchnie próbne założone w Parku Narodowym Gór Stołowych. Wykazano, że sposób określenia zasięgu koron oraz zmienne opisujące zasobność określone na tej podstawie wpływają na wartość współczynnika determinacji w trakcie tworzenia modelu i zwiększa błąd określania zasobności. Dodatkowo sposób selekcji drzew należących do powierzchni próbnej również powoduje niewielkie różnice we współczynniku determinacji pomiędzy zasobnością modelowaną a określoną w terenie uznaną za referencyjną. Ważnym wynikiem badań było empiryczne wykazanie potrzeby detekcji i odrzucenie z analiz martwych drzew znajdujących się na analizowanym obszarze powierzchni próbnych.

*Stereńczak K., Miścicki S. 2012. Crown delineation influence on standing volume calculations in protected area. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XXXIX-B8, 441-445.*

- W oparciu o analizę 3043 drzew znajdujących się na 30 powierzchniach próbnych o średnicy ponad 20 metrów przeprowadzono badania wpływu wzajemnego zasłaniania się drzew na określenie pierśnicowego pola przekroju i liczby drzew w sytuacji, gdyby pomiar wykonany był za pomocą naziemnego skanowania laserowego lub relaskopu z jednego stanowiska (w środku powierzchni próbnej). Badania te prowadzone były w Leśnym Zakładzie Doświadczalnym SGGW w Rogowie i miały na celu analizę wykorzystania naziemnego skanowania laserowego w praktyce leśnej. Wyniki wykazały, iż możliwe jest stworzenie modelu teoretycznego opisującego widoczność drzew wraz z powiększaniem się promienia powierzchni przy uwzględnieniu zasłaniania się wzajemnego drzew. Stwierdzono, że liczba drzew ukrytych przed osobą mierzącą bądź promieniem lasera emitowanym przez skaner rośnie wraz ze wzrostem promienia powierzchni próbnej, co oznacza jednocześnie zwiększanie się błędu szacowania liczby drzew i innych pokrewnych charakterystyk drzewostanu. Dodatkowo wykazano, iż nie ma związku pomiędzy procentem widocznej powierzchni próbnej (niezacienionej) a określonym pierśnicowym polem powierzchni. W praktyce oznacza to, że nie można zakładać, że drzewa, szczególnie te znajdujące się blisko stanowiska pomiarowego, zasłaniają większą część powierzchni, co powoduje, że widocznych jest mniej drzew niż jest ich w rzeczywistości, i odwrotnie. Wykazano również, iż na powierzchniach o promieniu do 15 m dla określenia pierśnicowego pola przekroju popełniany jest średnio błąd 5%, co uzasadnia stwierdzenie, iż przy promieniu powierzchni próbnej równym 15 m popełniany jest stosunkowo niewielki, akceptowalny błąd szacowania liczby drzew i pierśnicowego pola przekroju drzewostanu.

*Zasada M., Stereńczak K., Dudek W., Rybski A. 2013. Horizon visibility and accuracy of stocking determination on circular sample plots using automated remote measurement techniques. Forest Ecology and Management 302: 171-177.*

- Konsekwencją powyżej opisanych badań była kolejna praca dotycząca dokładności określania wybranych parametrów rozkładów pierśnic drzew w drzewostanach sosnowych za pomocą naziemnego skanowania laserowego. Założono, że pomimo stwierdzenia we wcześniejszych badaniach, iż liczba drzew ukrytych przed osobą mierzącą bądź promieniem lasera emitowanym przez skaner rośnie wraz ze wzrostem promienia powierzchni próbnej, nie musi to oznaczać jednocześnie zwiększania się błędu szacowania innych parametrów drzewostanu, np. średniej i przeciętnej pierśnicy, miar zmienności czy też parametrów różnych rozkładów pierśnic. W celu weryfikacji tej hipotezy wykorzystano dane z 27 sosnowych powierzchni próbnych i 2671 drzew. Na każdej ze współśrodkowych powierzchni o promieniu 5, 10, 15 i 20 m określono następujące cechy: liczbę drzew na hektar, minimalną i maksymalną pierśnicę, średnią arytmetyczną pierśnic, przeciętną pierśnicę, odchylenie standardowe pierśnic, 25, 31, 50, 63, 75 i 95 percentyl pierśnic, skośność i kurtozę rozkładu, które potraktowano jako referencję. Dla każdej powierzchni utworzono plan pni, który użyto do określenia cechy rozkładu pierśnic drzewostanu na podstawie drzew widocznych ze środka powierzchni w odległości 5, 10, 15 i 20 m. Uzyskane wyniki porównano z wartościami referencyjnymi (określonymi na podstawie pomiarów wszystkich drzew na powierzchni o założonym

promieniu). W wyniku badań stwierdzono, że przeciętna pierśnica, odchylenie standardowe pierśnic i percentyle rozkładów określone na podstawie wszystkich drzew i drzew widocznych na kołowych powierzchniach próbnych o promieniu do 20 metrów nie różnią się od siebie istotnie. Wskaźniki skośności i kurtozy nie różnią się istotnie od siebie dla powierzchni o promieniu 5 i 10 m. Przy powierzchni o promieniu 15 m istotną różnicę stwierdzono jedynie na około 15% analizowanych powierzchni.

*Zasada M., Stereńczak K. 2013. Dokładność określania wybranych parametrów rozkładów pierśnic drzew w drzewostanach sosnowych za pomocą naziemnego skanowania laserowego. Sylwan, 157(12): 883-891.*

## **Ad 2. Analiza składu gatunkowego i kondycji lasów z wykorzystaniem danych teledetekcyjnych**

Drugim zagadnieniem naukowym, którym zajmowałem się po doktoracie, było wykorzystanie informacji spektralnej w analizie składu gatunkowego i stanu zdrowotnego lasów. Badania w tym zakresie prowadziłem z wykorzystaniem różnego rodzaju danych, charakteryzujących się różną rozdzielczością spektralną, przestrzenną i radiometryczną. W tym zagadnieniu skupiałem się na klasycznych poziomach pozyskania danych: lotniczym i satelitarnym, które mają obecnie operacyjne zastosowanie. Na końcu opisuję dwie prace przeglądowe opublikowane w ostatnim czasie, które w kompleksowy sposób podsumowują aktualny potencjał teledetekcji i stan wiedzy w zakresie gatunkowej klasyfikacji danych teledetekcyjnych, ze szczególnym uwzględnieniem zobrazowań hiperspektralnych.

- Analizowano możliwość wykorzystania danych teledetekcyjnych w określeniu potencjalnego zagrożenia szlaków komunikacyjnych ze strony stojących w ich pobliżu martwych drzew. Badania prowadzono na terenie polskiej części Puszczy Białowieskiej. W pracy analizowano trzy różne warianty integracji danych teledetekcyjnych i innych danych przestrzennych. W pierwszym wariantcie wykorzystano jedynie wyniki klasyfikacji obrazów wielospektralnych. W drugim połączono informację z klasyfikacji z informacją o wysokości drzew z leśnej mapy numerycznej. W trzecim wariantcie zintegrowano wyniki klasyfikacji z wynikami segmentacji danych lotniczego skanowania laserowego. Integracja danych miała na celu połączenie informacji o położeniu martwych stojących drzew z informacją o ich wysokości. W efekcie możliwe stało się oszacowanie czy drzewo stojące w pobliżu szlaku komunikacyjnego stanowiłoby realne zagrożenie, gdyby przewróciło się w jego kierunku. Analiza wykazała, iż najbardziej wiarygodne dane pozwalające na określenie potencjalnego zagrożenia szlaków komunikacyjnych ze strony martwych stojących drzew były te, w których wykorzystano dane lotniczego skanowania laserowego. Poza ustaleniem dokładnej pozycji tych drzew, możliwe było również wskazanie tych, które zagrażają większej liczbie szlaków. Wyniki pracy zostały wdrożone w praktyce przez Dyрекcję Generalną Lasów Państwowych.

*Stereńczak K., Kraszewski B., Mielcarek M., Piasecka Ż. 2017. Inventory of standing dead trees in the surroundings of communication routes – The contribution of remote sensing to potential risk assessments. Forest Ecology and Management, 402: 76-91.*

- Badano optymalną rozdzielczość przestrzenną obrazów satelitarnych pod kątem ich przydatności do detekcji martwych drzew. Badania prowadzono na obszarze Beskidu



Żywieckiego w Nadleśnictwie Ujsoły. Podstawą do wykonania analiz była ortofotomapa lotnicza o rozdzielczości przestrzennej 0,5 m. Dla potrzeb badań symulowano obrazy wielospektralne o wymiarach terenowych piksela: 1 m, 2,5 m i 5 m, korespondujących z obecnie funkcjonującymi systemami satelitarnymi (m.in. Pleiades, SPOT5, RapidEye). Na każdym obrazie przeprowadzono wybrane przetworzenia będące wstępem do klasyfikacji, a następnie przeprowadzono klasyfikację nadzorowaną. Wyniki klasyfikacji porównywano do danych uzyskanych w wyniku interpretacji wizualnej obrazów wyjściowych. Referencje stanowiły poligony zakreślone przez obserwatora. W efekcie badań stwierdzono, iż najgorsze wyniki uzyskano dla obrazu o rozdzielczości 5 m. W przypadku mniejszej wielkości piksela uzyskano bardzo dobre wyniki dokładności użytkownika oscylujące wokół 90%. Analizowane zjawisko zamierania świerków dotyczy głównie starszych klas wieku. Biorąc pod uwagę wielkość piksela, uzyskiwaną dokładność oraz badane zjawisko stwierdzono, iż wielkość piksela na poziomie 2,5 m jest wystarczająca do zidentyfikowania drzew zamarłych. Wielkość ta jest zgodna z teorią detekcji mówiącą o tym, iż wielkość poszukiwanego obiektu powinna być mniej więcej dwukrotnie większa niż wielkość piksela obrazu wykorzystanego w takiej analizie.

*Pluto-Kossakowska J., Osińska-Skotak K., Stereńczak K. 2017. Określenie rozdzielczości przestrzennej wielospektralnych zdjęć satelitarnych optymalnej do detekcji martwych drzew na obszarach leśnych. Sylwan 161 (5): 395–404.*

- Badano zależność optymalizacji parametrów klasyfikacji zobrazowań lotniczych pozyskanych kamerą UltraCam-D na dokładność detekcji koron drzew w półpustynnych obszarach Zagros w Iranie. Optymalizowano ustawienia następujących algorytmów: metody wektorów nośnych (SVM), sieci neuronowych (ANN) i klasyfikacji obiektowej (OBIA) z wykorzystaniem metody Taguchi. Analizy wykazały, że obrana metoda optymalizacji spełniła swoje zadanie i można ją rekomendować do używania w podobnych celach. Najlepsze wyniki klasyfikacji po optymalizacji osiągnęła metoda klasyfikacji obiektowej (OBIA) zarówno w zakresie dokładności i precyzji, jak i w zakresie specyficzności i swoistości. Pozostałe metody osiągnęły nieco gorsze wyniki.

*Erfanifard Y., Stereńczak K., Behnia N. 2014. Parameter optimization of image classification techniques to delineate crowns of coppice trees on UltraCam-D aerial imagery in woodlands. Journal of Applied Remote Sensing 8(1), 083520. doi:10.1117/1.JRS.8.083520.*

- Elementem osobnych badań było opracowanie metodyki klasyfikacji bazującej na danych teledetekcyjnych RapidEye (BlackBridge), z wykorzystaniem której planowano dokonać detekcji posuszu kornikowego w drzewostanach Sudetów i Beskidów, gdzie gatunkiem przeważającym jest świerk pospolity (*Picea abies* (L.) H.Karst). Dodatkowo sprawdzono wpływ terminu wykonania zobrazowań BlackBridge na dokładność detekcji martwych drzew. Przeprowadzono klasyfikację następujących zestawów danych utworzonych odpowiednio z kanałów: 2,3,4,5; 1,2,3,4,5; 5,4,3; 5,4,2; 5,3,2. Wykorzystywano także teledetekcyjne wskaźniki roślinności (NDVI, RENDVI) do klasyfikacji, tworząc następujące zestawy klasyfikowanych danych: NDVI; RENDVI; 4, NDVI, 2; 3, NDVIRE, 2. Największą dokładność klasyfikacji uzyskano wykorzystując algorytm największej wiarygodności (Maximum Likelihood). Pora roku znacznie wpływa na klasyfikację zobrazowania pod kątem oceny stanu drzewostanu, a także wydzielenia typów drzewostanu. Najwyższą dokładność klasyfikacji martwych drzew osiągnięto dla

zobrazowań satelitarnych pochodzących z okresu letniego, gdzie w pełni rozwinięty jest aparat asymilacyjny drzew. Zdjęcia wiosenne oraz jesienne uniemożliwiają prawidłowe sklasyfikowanie drzewostanu liściastego. Dokładność całkowita sklasyfikowanych zdjęć dla obszaru badań z 2012 r. wyniosła średnio 0,53, natomiast z 2013 - 0,69.

Kycko M., Stereńczak K., Bałazy R. 2016. Detekcja posuszu kornikowego z wykorzystaniem zobrazowań BlackBridge na przykładzie drzewostanów Sudetów i Beskidów. *Sylwan*, 160 (9): 707-719.

- Obszernym przeglądem literatury podsumowano aktualny stan wiedzy oraz możliwości wykorzystania danych teledetekcyjnych w klasyfikacji gatunkowej drzew w różnych skalach (poziom grupy drzew, poziom pojedynczego drzewa i poziom gałęzi drzew). Wykazano, że liczba badań skupiających się na klasyfikacji gatunków drzew stale wzrastała w ciągu ostatnich czterech dekad. Można znaleźć kilka obiecujących podejść, które w skali lokalnej osiągnęły wysokie dokładności klasyfikacji. Zaledwie kilka przykładów klasyfikacji gatunkowej zastosowanych zostało dla obszarów o dużym zasięgu geograficznym. Nadal inwentaryzacja gatunków drzew na dużych obszarach jest jednym z największych wyzwań w tej dziedzinie badań. Poza tym, tylko kilka prac dokonało systematycznego opisu i analizy zmiennych, które warunkują różnice w rejestracji fali elektromagnetycznej, a tym samym poprawiają lub pogarszają wyniki klasyfikacji gatunkowej. Większość badań to lokalne studia wykorzystujące konkretne dane i skupiające się na uzyskaniu najlepszej możliwej dokładności. Konkluzją z pracy jest potrzeba głębszego poznania procesu klasyfikacji oraz zrozumienia, dlaczego w określonych warunkach daje ona gorsze wyniki.

*Fassnacht F.E., Latifi H., Stereńczak K., Modzelewska A., Lefsky M., Waser L.T., Straub C., Ghosh A. 2016. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, 186: 64–87.*

- Przeanalizowano możliwości klasyfikacji gatunkowej z wykorzystaniem danych hiperspektralnych w strefie umiarkowanej. Celem przeglądu było przeanalizowanie aktualnego stanu wiedzy w kontekście klasyfikacji lasów Polski. Podsumowując prowadzone prace stwierdzono, że przeprowadzenie korekcji atmosferycznej dla danych hiperspektralnych nie jest konieczne. Stwierdzono, iż wyższą dokładność całkowitą klasyfikacji uzyskuje się po ograniczeniu liczby wykorzystywanych zakresów spektralnych. Najwyższą dokładność klasyfikacji gatunkowej drzewostanów uzyskuje się stosując klasyfikator SVM (wektorów nośnych). Ponadto zintegrowanie danych hiperspektralnych z danymi ALS może przyczynić się do poprawienia dokładności klasyfikacji. Rozpoznano, iż najczęściej wykorzystywaną w tym celu informacją jest wysokość drzew. Wykazano, iż wyższą rozróżnialnością charakteryzują się gatunki iglaste. Ostatecznie podkreślono, że praktyczne używanie danych hiperspektralnych wymaga dalszego rozwoju technologii, znacznego spadku cen i/lub wnikliwej analizy ekonomicznej zysków płynących z użycia danych hiperspektralnych w gospodarce leśnej. Praca ta była pierwszą tego typu w Polsce.

*Wietecha M., Modzelewska A., Stereńczak K. 2017. Wykorzystanie lotniczej teledetekcji hiperspektralnej w klasyfikacji gatunkowej lasów strefy umiarkowanej. Sylwan, 161 (1): 3–17.*

### Ad 3. Analiza wybranych zmiennych drzew i drzewostanów z wykorzystaniem bezzałogowych systemów latających.

Wydzieliłem rozdział dotyczący wykorzystania bezzałogowych systemów latających (BSL) przede wszystkim dlatego, iż badania w tym zakresie mają zdecydowanie doświadczalny charakter. Można mieć wrażenie, że w pewnym sensie zagadnienia opisane w tym rozdziale pokrywają się z wyżej opisanymi. Niemniej jednak ograniczenia, jakie niesie za sobą technologia BSL, nadają im specyfikę, która znacząco odróżnia je od materiałów lotniczych i satelitarnych. Cywilna i ekonomiczna technologia BSL ma na razie dość ograniczone możliwości obrazowania obszarów leśnych (krótki czas lotu, problemy z możliwością startu i lądowania w dużych kompleksach leśnych, warunki atmosferyczne), co znacząco ogranicza możliwość ich zastosowania. Z drugiej strony wysokość nalotów oraz szczegółowość pozyskiwanych materiałów dostarcza nowych możliwości, jakich wcześniej nie można było osiągnąć przy wykorzystaniu teledetekcji lotniczej czy satelitarnej. Prace opisywane poniżej prowadzone były głównie wspólnie z dr hab. inż. Krzysztofem Będkowskim i miały charakter pionierski w Polsce. Doświadczenia te opisuję w pierwszej części poniższego przeglądu. Na końcu podaję również nowe doświadczenia związane z próbą wykorzystania BSL w detekcji szyszek.

- Przeprowadzono badania mające na celu określenie możliwości zastosowania niemetrycznych wielospektralnych zdjęć cyfrowych pozyskanych za pomocą kamer przenoszonych przez bezzałogowy statek latający do analizy wybranych cech dendrometrycznych drzew w drzewostanach sosnowych. Badania przeprowadzone zostały w czterech drzewostanach Uroczyska Głuchów będącego fragmentem Leśnego Zakładu Doświadczalnego SGGW w Rogowie. Podczas prac terenowych pomierzono w terenie dla 56 drzew wielkość rzutu poziomego korony oraz ich pierśnicę. Ortomozaiki wykorzystano do zwektoryzowania (wykreślenia zasięgów) koron sosen, które uprzednio były inwentaryzowane w terenie. Wektoryzację wykonano w dwóch wariantach: rejestrując zasięgi koron zwartych, tj. bez pojedynczych „odstających” gałęzi, oraz całych koron. Badania wykazały, iż zależność pomiędzy pierśnicowym polem przekroju drzew pomierzonym w terenie i zwektoryzowanym na ortomozaice zasięgiem koron drzew wykazała wysokie wartości wskaźnika determinacji  $R^2=0,78$ . Ostatnim etapem analiz rzutów poziomych koron było porównanie wyników wektoryzacji z pomiarem powierzchni pierśnicowego pola przekroju w terenie. Wartość współczynnika determinacji ( $R^2$ ) wyniosła odpowiednio: dla całych koron 0,80, a dla zwartych części koron – 0,68. Badania wykazały wysoką jakość obrazów wykonanych z niskiego pułapu, przez co wyniki ich interpretacji były zbliżone lub lepsze, niż uproszczony pomiar w terenie. Ustalone zależności mogą być wykorzystane w inwentaryzacji drzewostanów np. na terenach pokłeskowych czy trudnych do inwentaryzacji naziemnej.

*Stereńczak K., Będkowski K. 2012. Ocena ortomozaik obrazów uzyskanych za pomocą bezzałogowego statku latającego do określania wybranych cech dendrometrycznych drzew w drzewostanach sosnowych. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 24: 345-355.*

- Celem badań było przedstawienie koncepcji zastosowania quasi-obiektowej metody klasyfikacji treści obrazów do klasyfikacji drzew wg gatunków przy zastosowaniu danych obrazowych pozyskanych jesienią przy zastosowaniu bezzałogowego systemu latającego (BSL). Analizowane drzewostany składały się głównie z sosny zwyczajnej,

dębu bezszypułkowego oraz pojedynczo brzozy i dębu czerwonego. Charakterystykami opisującymi drzewa były: średnia wartość jasności obrazu korony (DN), którą określono osobno dla każdego gatunku i zakresu spektralnego. Zebrane dane potraktowano dalej tak, jak sygnatury uzyskane z pól treningowych w klasyfikacji nadzorowanej. Porównano możliwość odróżniania gatunków drzew za pomocą zaproponowanej metody tworzenia wzorców klas (na podstawie wartości opisujących całe korony) z wielospektralną klasyfikacją pikselową. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że zaproponowana quasi-obiektowa metoda pozwoli na lepsze odróżnienie od siebie gatunków niż metoda pikselowa.

*Będkowski K., Stereńczak K. 2012. Zarys koncepcji quasi-obiektowej metody analizy wielospektralnych zdjęć lotniczych i jej zastosowania do analizy składu gatunkowego drzewostanów. Roczniki Geomatyki X, 5(55): 19-26.*

- Celem badań prowadzonych z wykorzystaniem zdjęć lotniczych była identyfikacja osobników dębu czerwonego i innych gatunków na podstawie cyfrowej analizy wybranych cech spektralnych obrazów wykonanych za pomocą cyfrowych kamer niemetrycznych Sigma DP2, które rejestrowały obrazy w czterech zakresach spektralnych: niebieskim, zielonym, czerwonym oraz podczerwonym. Kamery były przenoszone przez bezzałogowy statek latający AVI-1. Zdjęcia wykonano w dniu 17 października 2011 r. Testowano dwie metody automatycznego rozpoznania (klasyfikacji) treści zdjęć: najmniejszej odległości oraz największego prawdopodobieństwa. Najlepsze rezultaty klasyfikacji uzyskano dla sosny, następnie brzozy. Rozróżnienie dębu czerwonego od pozostałych dębów jest trudne. W końcowej fazie sezonu wegetacyjnego jest on bardzo podobny spektralnie do dębu bezszypułkowego z liśćmi przebarwionymi na kolor brązowy.

*Będkowski K., Stereńczak K. 2012. Rozpoznawanie dębu czerwonego *Quercus rubra* L. na zdjęciach lotniczych wykonanych w końcowej fazie sezonu wegetacyjnego. Studia i Materiały CEPL w Rogowie, R. 14., z. 4(33): 168-177.*

- Prowadzono badania nad wykorzystaniem zdjęć lotniczych w określaniu faz fenologicznych jesienno-przebarwiania liści u osobników dębu bezszypułkowego. Zastosowano zdjęcia wykonane za pomocą cyfrowych kamer niemetrycznych Sigma DP2, które rejestrowały obrazy w czterech zakresach spektralnych: niebieskim, zielonym, czerwonym oraz podczerwonym. Dwóch obserwatorów dokonało wizualnej klasyfikacji 556 dębów, na podstawie dominującej barwy liści, do trzech grup koron: zielonych, żółtych i brązowych. W wyniku badań stwierdzono, że między obserwatorami występuje duża zgodność klasyfikacji (79,7%), więc zjawisko zmienności fenologicznej dębu może być rejestrowana na poziomie pojedynczych drzew przy zastosowaniu BSL.

*Będkowski K., Stereńczak K. 2013. Sessile oak (*Quercus petraea* (Mattuschka) Liebl.) trees variability according to an analysis of multispectral images taken from UAV – first results. Ecological Questions 17: 25-33.*

- Badania dotyczyły zastosowania niemetrycznych wielospektralnych zdjęć cyfrowych pozyskanych za pomocą kamer przenoszonych przez bezzałogowy statek latający (BSL) do oceny gęstości aparatu asymilacyjnego koron drzew w drzewostanach sosnowych. Zdjęcia wykonano w październiku 2011 r. W terenie oceniono stan 272 sosen, zaliczając je do 10 klas gęstości koron. Wyniki te porównano ze średnią jasnością pikseli w czterech kanałach spektralnych: R, G, B oraz IR, pobranych w trzech wariantach –

z całych obrazów koron drzew, z części korony zwartej (po odrzuceniu tzw. gałęzi „odstających”) oraz z części środkowych o promieniu 0,63 m. Badania wykazały, że obrazy koron drzew należących do różnych klas defoliacji różnią się jasnością. Szczególnie dotyczy to klasy drzew o bardzo dużym stopniu defoliacji oraz drzew martwych. Od 5 stopnia uiglenia można zaobserwować stabilizację krzywych, co oznacza, że dalszy wzrost gęstości korony nie powoduje zwiększenia odbicia spektralnego.

*Stereńczak K., Będkowski K. 2013. Assessment of the Scots pine (Pinus sylvestris L.) crowns density based on multispectral images obtained by unmanned aerial vehicle. Ecological Questions 17: 89-99.*

- Prowadzone badania nad wykorzystaniem danych z bezzałogowego systemu latającego do oceny urodzaju szyszek miały charakter pilotażowy. Jak dotąd Autorzy nie znaleźli innych publikowanych prac, które zajmowałyby się podobnym tematem. W pierwszej kolejności analizowano i zaplanowano system wspierania decyzji, którego celem miałyby być wsparcie procesu szacowania obradzania nasion oraz przygotowanie aplikacji umożliwiającej propagowanie dostępnych baz nasiennych w ramach regionów nasiennych. Drugim celem publikacji był test możliwości wykorzystania bezzałogowego systemu latającego do oszacowania liczby szyszek na pojedynczym drzewie w zależności od sposobu zobrazowania korony drzewa. W efekcie wykazano, iż do oceny ilości szyszek na pojedynczych drzewach najlepiej nadają się obrazy skośne. Zdjęcia ortogonalne pozyskiwane z ponad drzew charakteryzują się dużym błędem systematycznym. Niemniej jednak są dużo łatwiejsze do pozyskania. Wskazaliśmy również na dalszą potrzebę badań, szczególnie z wykorzystaniem bloku zdjęć pochodzących z jednego obszaru.

*Stereńczak K., Mroczek P., Jastrzębowski S., Krok G., Lisańczuk M., Klisz M., Kantorowicz W. 2016. UAV and GIS based tool for collection and propagation of seeds material – first results. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLI-B8, 663-667.*

**Od 2011 r. (gdy uzyskałem stopień naukowy doktora) byłem autorem i współautorem 19 prac indeksowanych przez Thomson Reuters (czasopisma z listy A Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego), 13 prac z listy B MNiSW, 2 monografie, 10 rozdziałów w monografiach oraz 14 prac o charakterze popularno-naukowym. Prace te cytowane były (do 20.12.2017) 67 razy w bazie danych Web of Science Core Collection, Thomson Reuters<sup>TM</sup> (H-index = 5). Sumaryczny Impact Factor opublikowanych przeze mnie artykułów zgodnie z rokiem ich opublikowania (po 2011 r.) wynosi 26,670. Sumaryczna liczba punktów wg. punktacji MNiSW uzyskanych od 2011 roku wynosi 611. Dodatkowo, sumaryczny Impact Factor opublikowanych przeze mnie artykułów, bez uwzględnienia cyklu (po 2011 r.), wynosi 22,208, a sumaryczna liczba punktów wg. punktacji MNiSW wynosi 511.**

Moje osiągnięcia naukowe był zauważone m.in. przez:

- Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego poprzez przyznanie mi stypendium dla wybitnych młodych naukowców w 2015 roku,
- Dyrektora IBL poprzez przyznanie mi nagrody rocznej II stopnia za publikacje naukowe z afiliacją IBL w 2014 roku i 2016,

- Rektora Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie poprzez przyznanie mi Nagrody Indywidualnej II Stopnia za osiągnięcia naukowe w 2011 roku,
- Radę Wydziału Leśnego, która wyróżniła mój doktorat w 2011 roku.

W 2016 r. Instytut Badawczy Leśnictwa otrzymał Polską Nagrodę Inteligentnego Rozwoju w kategorii: Jednostki Naukowe. Docenione zostały realizacje opisanych wyżej projektów: REMBIOFOR „Teledetekcyjne określanie biomasy drzewnej i zasobów węgla w lasach” oraz projektu LIFE+ ForBioSensing PL „Kompleksowy monitoring dynamiki drzewostanów Puszczy Białowieskiej z wykorzystaniem danych teledetekcyjnych”.

Od 2011 r. prezentowałem wyniki badań na różnego rodzaju krajowych i zagranicznych konferencjach, seminariach i spotkaniach roboczych (w sumie 118 wystąpień, w tym 38 referatów (w tym 13 na konferencjach międzynarodowych), 26 posterów (w tym 8 na konferencjach międzynarodowych) i 54 inne wystąpienia (w tym 12 na spotkaniach międzynarodowych)).

Moja wiedza specjalistyczna została zauważona i wykorzystana między innymi w pracach zespołu zadaniowego do opracowania instrukcji stosowania technik teledetekcyjnych w Lasach Państwowych, powołanego przez Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych (Zarządzenie nr 56 z dnia 31.07.2012 r. Dyrektora Generalnego Lasów Państwowych). Zadaniem zespołu było opracowanie instrukcji, która miała określać zasady przetwarzania i interpretowania danych teledetekcyjnych (zdjęć lotniczych, satelitarnych i naziemnych rejestrowanych w różnych technikach i zakresach spektralnych) pod kątem analizowania obszarów leśnych. Dodatkowo byłem współautorem opracowania „Zalecenia odnośnie pozyskiwania, przetwarzania, analizy i wykorzystania danych LIDAR w celu rozpoznania zasobów dziedzictwa archeologicznego w ramach programu AZP” wykonanego na zlecenie Narodowego Instytutu Dziedzictwa.

Staram się również brać udział w inicjatywach o szerszym zasięgu geograficznym. Jestem członkiem the Global Forest Biodiversity Team – międzynarodowej grupy badaczy profesjonalnie zajmujących się badaniami nad bioróżnorodnością zbiorowisk leśnych oraz mechanizmami kształtującymi je globalnie. Ponadto jestem członkiem The Forest Observation System – międzynarodowej inicjatywy związanej w celu stworzenia globalnej bazy danych biomasy leśnej (powierzchni in-situ) w celu wspierania satelitarnych systemów obserwacji. Dodatkowo, dzięki mojemu zaangażowaniu, dane z projektu LIFE+ ForBioSensing zostały wykorzystane do kalibracji Global Ecosystem Dynamics Investigation Lidar (GEDI) - satelitarnego systemu skanowania laserowego stworzonego przez NASA do globalnego monitorowania kierunków i zmian w ekosystemach leśnych.

Poza stypendium odbytych przed uzyskaniem stopnia doktora, moją wiedzę poszerzyłem także poprzez udział w krótkoterminowym wyjeździe zagranicznym w 2013 r. do Swiss Federal Research Institute WSL. Dodatkowo, poza szkoleniami związanymi z zarządzaniem, uczestniczyłem w 13 szkoleniach rozwijających moje kompetencje w zakresie szeroko rozumianej geomatyki i statystyki.

Dodatkowo moja wiedza i doświadczenie wykorzystywane były również w trakcie prowadzonych przeze mnie szkoleń dla administracji leśnej i firm zajmujących się inwentaryzacją lasu, dotyczących wykorzystania danych teledetekcyjnych w analizach przyrodniczych.

Od 2011 r. wykonałem 34 recenzje prac naukowych i abstraktów dla czasopism naukowych, w tym indeksowanych przez Thomson Reuters™, tj.: Canadian Journal of Forest Research (1), Scandinavian Journal of Forest Research (1), Remote Sensing (3), IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing (1), Computers and Electronics in Agriculture (1), European Journal of Remote Sensing (1), Forest Systems (1), Dendrobiology (1), Folia Forestalia Polonica Series A-Forestry (7), Folia Geographica Socio-Oeconomica (1), Acta Scientiarum Polonorum series Geodesia et Descriptio Terrarum (1), Leśne Prace Badawcze (1), Miscellanea Geographica (1), Roczniki Geomatyki (1), Archiwum Fotogrametrii i Teledetekcji (2), Studia i Materiały Centrum Edukacji Przyrodniczo-Leśnej w Rogowie (1), Teledetekcji Środowiska (1) oraz The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences – abstrakty (8).

Zawsze starałem się być aktywnym członkiem organizacji naukowych. Byłem członkiem komisji rewizyjnej Klubu Teledetekcji Środowiska Polskiego Towarzystwa Geograficznego, także sekretarzem IUFRO TF Education in Forest Science w latach 2011-2014 oraz przewodniczącym (Chair: 2016-2020) i współprzewodniczącym, (Co-Chair: 2012-2016) grup roboczych odpowiedni: V/5 i VI/5 w Międzynarodowym Towarzystwie Fotogrametrii i Teledetekcji (ISPRS Working Group odpowiednio V/5 i VI/5).

Jestem także pomocniczym opiekunem naukowym pięciu doktorantów: A. Modzelewskiej, M. Mielcarka, T. Hyczy, M. Ciesielskiego i A. Olpendy, których wspieram swoim doświadczeniem i wiedzą wspólnie z profesorami o uznanym autorytecie naukowym w Polsce: dr hab. Krzysztofem Będkowskim, prof. nadzw. UŁ i prof. dr hab. Tomaszem Zawiałą-Niedźwieckim.

Efekty moich projektów były prezentowane między innymi w radiu i telewizji, a także na łamach gazet lokalnych i ogólnopolskich, takich jak Telewizja Białystok, Radio Białystok czy Puls Biznesu.

### **Działalność organizacyjna i dydaktyczna**

Podczas studiów na Wydziale Leśnym SGGW byłem starostą rocznika studiów, przewodniczącym Samorządu Studenckiego Wydziału Leśnego. Aktywnie uczestniczyłem też w pracach Koła Naukowego Leśników.

W trakcie studiów doktoranckich prowadziłem działalność na rzecz nauki i środowiska doktorantów Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Pełniłem funkcję członka i przewodniczącego (2008-2010) Rady Doktorantów SGGW. Byłem także m.in. członkiem Rektorskiej Komisji Stypendialnej i członkiem Komisji Rewizyjnej przy Krajowej Reprezentacji Doktorantów (2009-2010). Uczestniczyłem w organizowaniu kilku konferencji naukowych, m.in. dzięki mojemu zaangażowaniu Wydział Leśny Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie otrzymał od Międzynarodowego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji prawo zorganizowania w 2009 r. prestiżowego przedsięwzięcia, jakim była Międzynarodowa Szkoła Letnia, połączona z Konferencją Naukową. Od 2008 do 2012 roku byłem współprzewodniczącym organizacji studenckiej działającej w ramach Międzynarodowego Towarzystwa Fotogrametrii i Teledetekcji (International Society for Photogrammetry and Remote Sensing Student Consortium).

W ramach studiów doktoranckich prowadziłem zajęcia dydaktyczne z przedmiotów realizowanych na Wydziale Leśnym, Studium Podyplomowym GIS i Gospodarce Przestrzennej SGGW: Podstawy fotogrametrii i SIP, Fotogrametria i SIP, Teledetekcja i fotogrametria, Geomatyka, Systemy Informacji Przestrzennej i Technologie Informacyjne.

Od 2011 r., po uzyskaniu stopnia doktora nauk leśnych, prowadziłem różnego rodzaju zajęcia w języku polskim i angielskim dla słuchaczy studiów dziennych i zaocznych, na kierunkach Leśnictwo i Gospodarka Przestrzenna z następujących przedmiotów: „Podstawy fotogrametrii i Systemy Informacji Przestrzennej”, „Fotogrametria i Systemy Informacji Przestrzennej”, „Geodezja leśna i Systemy Informacji Przestrzennej”, „Fotogrametria i teledetekcja”, „Geomatyka w leśnictwie”, „Technologie informacyjne”, „Zarządzanie przyrodą”, „TLS in forestry” i „Contemporary remote-sensing-based inventory methods”(special module) – Forest Information Technology”. Od momentu uzyskania stopnia doktora nauk leśnych byłem promotorem 5 prac magisterskich i 1 inżynierskiej na Wydziale Leśnym SGGW. Dodatkowo byłem drugim promotorem pracy magisterskiej na Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie oraz 1 pracy dyplomowej na Wojskowej Akademii Technicznej.

Moje umiejętności rozwijałem także poprzez organizację konferencji i szkół letnich. Organizowałem i współorganizowałem 4 konferencje (w tym 1 międzynarodową - EARSel 3<sup>rd</sup> Workshop SIG on Forestry, 15-16 września 2016 r. Kraków, Polska) oraz 6 międzynarodowych szkół letnich organizowanych w Polsce, USA i Turcji. Byłem przewodniczącym Komitetu Organizacyjnego i Naukowego I Międzynarodowej Konferencji Naukowej Projektu LIFE+ ForBioSensing PL Kompleksowy monitoring dynamiki drzewostanów Puszczy Białowieskiej z wykorzystaniem danych teledetekcyjnych, p.t.: „Aktualny stan Puszczy Białowieskiej na podstawie pierwszych wyników Projektu LIFE+ ForBioSensing”. Byłem również przewodniczącym Komitetu Organizacyjnego i Członkiem Komitetu Naukowego konferencji pt. „Dziedzictwo kulturowe w Puszczy Białowieskiej, stan i perspektywy badań”.

Z racji tego, że praca ze studentami dawała mi dużo radości, brałem czynny udział w pracach kół naukowych Wydziału Leśnego SGGW w Warszawie: Koła Naukowego Leśników, którym także opiekowałem się w latach 2010 i 2011, oraz Koła Naukowego Gospodarki Przestrzennej.

Angażuję się również w prace Instytutu Badawczego Leśnictwa. Poza aktywną promocją Instytutu na różnych polach (Dni Ziemi, Festiwal Nauki) jestem Członkiem Rady Naukowej Instytutu Badawczego Leśnictwa, a w niej członkiem Komisji ds. Naukowych.

Sękocin Stary, 20 grudnia 2017



Krzysztof Stereńczak