

**dr hab. inż. Katarzyna Osińska-Skotak**, prof. uczelni  
Zakład Fotogrametrii, Teledetekcji i Systemów Informacji Przestrzennej  
Wydział Geodezji i Kartografii  
Politechnika Warszawska  
Pl. Politechniki 1  
00-661 Warszawa

**RECENZJA**  
**ROZPRAWY DOKTORSKIEJ**  
**mgr Anety Modzelewskiej**

**nt. „Zastosowanie wieloczasowych lotniczych danych hiperspektralnych w określaniu składu gatunkowego zróżnicowanych lasów strefy umiarkowanej”**

**Promotor: dr hab. Krzysztof Stereńczak, prof. IBL**

**Promotor pomocniczy: dr Fabian Fassnacht**

**1. Podstawa formalno-prawna**

Podstawą formalno-prawną przygotowania recenzji rozprawy doktorskiej mgr Anety Modzelewskiej na temat: „Zastosowanie wieloczasowych lotniczych danych hiperspektralnych w określaniu składu gatunkowego zróżnicowanych lasów strefy umiarkowanej” jest uchwała Rady Naukowej Instytutu Badawczego Leśnictwa z dn. 22 kwietnia 2021 r. o wyznaczeniu recenzentów w przewodzie doktorskim mgr Anety Modzelewskiej oraz umowa na jej wykonanie.

**2. Ogólna charakterystyka rozprawy**

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr Anety Modzelewskiej na temat: „Zastosowanie wieloczasowych lotniczych danych hiperspektralnych w określaniu składu gatunkowego zróżnicowanych lasów strefy umiarkowanej” została wykonana pod opieką naukową promotora – dr hab. Krzysztofa Stereńczaka z Instytutu Badawczego Leśnictwa, oraz promotora pomocniczego – dr Fabiana Fassnacha z Karlsruhe Institute of Technology.

Rozprawa doktorska została przygotowana w formie zbioru trzech, spójnych tematycznie artykułów naukowych, opublikowanych w czasopismach naukowych, w tym dwóch o bardzo dużej renomie, a także dużym współczynniku wpływu Impact Factor.

Przedłożony do recenzji cykl artykułów obejmuje następujące pozycje:

- I. Martyna Wietecha, Aneta Modzelewska, Krzysztof Stereńczak, 2017. Wykorzystanie lotniczej teledetekcji hiperspektralnej w klasyfikacji gatunkowej lasów strefy umiarkowanej, Sylwan 161(1), DOI: 10.26202/sylwan.201610; 15 pkt MEiN; IF:0,62.
- II. Aneta Modzelewska, Fabian Ewald Fassnacht, Krzysztof Stereńczak, 2020. Tree species identification within an extensive forest area with diverse management regimes using airborne

hyperspectral data, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 84, DOI: 10.1016/j.jag.2019.101960; 140 pkt MEiN; IF: 4,65.

III. Aneta Modzelewska, Agnieszka Kamińska, Fabian Ewald Fassnacht, Krzysztof Stereńczak, 2021. Multitemporal hyperspectral tree species classification in the Białowieża Forest World Heritage site, Forestry: An International Journal of Forest Research, cpa048, DOI: 10.1093/forestry/cpa048; 140 pkt MEiN; IF: 2,29.

Łączny Impact Factor publikacji składających się na rozprawę doktorską mgr Anety Modzelewskiej wynosi 7,56, a suma punktów wg listy czasopism Ministerstwa Edukacji i Nauki to 295.

Cykl ten opatrzony jest wprowadzaniem, w którym wyjaśniono motywacje podjęcia tematu pracy, sformułowano cel naukowy rozprawy oraz stawiane hipotezy, jak również omówiono pokrótce w szerszym kontekście podejście metodyczne zrealizowanych badań.

Ważnym elementem oceny rozprawy doktorskiej prezentowanej w tej formie, czyli cyklu spójnych tematycznie artykułów naukowych, które są autorstwem kilku osób jest określenie wkładu merytorycznego kandydata do stopnia doktora w poszczególnych publikacjach, co jednoznacznie określono w przewodniku do rozprawy doktorskiej mgr Anety Modzelewskiej, zarówno w postaci określenia udziału procentowego, jak i wskazania wkładu merytorycznego. Należy podkreślić, że udział mgr Anety Modzelewskiej w każdej z publikacji był bardzo znaczący, a w dwóch publikacjach wręcz kluczowy. W pierwszej z wymienionych publikacji mgr Aneta Modzelewska ma wkład na poziomie 45% i obejmuje on: 1. przygotowanie, we współpracy ze współautorami, metodyki przeglądu literatury, 2. dobór publikacji i przeanalizowanie obecnego stanu wiedzy w temacie badań, jak również 3. przygotowanie, we współpracy z pozostałymi dwoma współautorami, oryginalnej wersji artykułu i korekta na podstawie otrzymanych recenzji. W pozostałych dwóch publikacjach cyklu mgr Aneta Modzelewska ma rolę wiodącą, a jej udział w ich przygotowaniu wynosi 90% w przypadku publikacji II i 75% w odniesieniu do publikacji III. W publikacji II była Ona odpowiedzialna za: 1. opracowanie koncepcji pracy, we współpracy z pozostałymi współautorami, 2. wykonanie przeglądu literatury, 3. zaprojektowanie metodyki opracowania, 4. przygotowanie i przetworzenie materiałów teledetekcyjnych, 5. wykonanie klasyfikacji i opracowanie wyników, 6. przygotowanie, we współpracy ze współautorami, oryginalnej wersji artykułu i korekta na podstawie otrzymanych recenzji. Z kolei w przypadku publikacji III Jej udział polegał na: 1. współpracy ze współautorami w zakresie koncepcji i metodyki pracy, 2. wykonaniu przeglądu literatury, 3. przygotowaniu i przetworzeniu materiałów teledetekcyjnych, 4. współpracy ze współautorami przy wykonaniu klasyfikacji i opracowaniu wyników oraz 5. przygotowaniu, we współpracy ze współautorami, oryginalnej wersji artykułu i dokonaniu korekty na podstawie otrzymanych recenzji. W tych dwóch ostatnich publikacjach mgr Aneta Modzelewska była pierwszym autorem, jak również autorem korespondencyjnym.

### **3. Ocena istotności i celowości podjętego tematu**

Rozprawa doktorska mgr Anety Modzelewskiej wpisuje się w rozwijany intensywnie nurt badań naukowych dotyczących zastosowań teledetekcji hiperspektralnej w różnych obszarach nauki i gospodarki, w tym także w naukach leśnych. W ostatnich latach badania w tym zakresie nabrały większego tempa zarówno w kraju, jak i na świecie. Związane jest z tym, że dane te stały się bardziej dostępne, a szybki rozwój technologiczny w zakresie geoinformacji skutkuje dostępem do dużych zasobów obliczeniowych, rozwiązań chmurowych, jak również pojawieniem się nowych algorytmów przetwarzania dużych zbiorów danych, co stwarza nowe możliwości badawcze, ale także i ma

znaczenie w praktyce aplikacyjnej. Dane hiperspektralne zawsze stanowiły duże wyzwanie podczas przetwarzania i analizy z uwagi na ich znaczną objętość i to, co nie było możliwe jeszcze kilka lat temu ze względu na stosunkowo niską wydajność obliczeniową sprzętu informatycznego, dziś nie stanowi już przeszkody.

Podjęty temat rozprawy jest ważny dla praktyki prowadzenia monitoringu lasów, ale także obszarów, na które wkraczają drzewa (obserwowanie sukcesji wtórnej w obszarach chronionych). Aby móc skutecznie wdrożyć tego rodzaju podejście ważne jest określenie możliwości, jak i ograniczeń w określaniu składu gatunkowego lasów z wykorzystaniem technik hiperspektralnych. Realizacja takiego zadania metodami terenowymi jest wyjątkowo koszt- i czasochłonna, w szczególności gdy mamy do czynienia z obszarami o znacznej wielkości. Dodatkowo problematyczne są obszary trudnodostępne lub niedostępne, jak np. obszary bagienne. W takich przypadkach zastosowanie technik teledetekcyjnych wydaje się być optymalnym rozwiązaniem. Prace badawcze prowadzone dotychczas przez różne zespoły badawcze wskazują na taką możliwość, ale zwykle eksperymenty te obejmowały stosunkowo niewielkie obszary, najczęściej analizie poddawano jeden zestaw danych hiperspektralnych, nie zawsze optymalnie pozyskany. Jak słusznie w rozprawie zauważyła mgr Aneta Modzelewska nie było do tej pory prowadzonych prac na tak szeroką skalę, gdzie badania obejmowałyby tak zróżnicowany obszar drzewostanów zajmujących dużą powierzchnię, a dodatkowo analizie poddano zestaw danych wieloczasowych pozyskanych w ciągu jednego roku, czyli można było dokonać analizy fazy rozwojowej w cyklu fenologicznym wpływającej na skuteczność rozpoznania gatunków drzew.

W mojej opinii podjęta przez mgr Anetę Modzelewską problematyka badawcza jest aktualna i ważna dla rozwoju nauk leśnych, a także bardzo mocno osadzona w realiach. Jej rozprawa doktorska ma duży wymiar praktyczny z punktu widzenia oceny możliwości monitorowania ekosystemów leśnych na obszarach ochronnych, ale także dla zarządzania lasami gospodarczymi. Z całą pewnością są to zagadnienia, które nadal będą rozwijane. Miniaturyzacja sensorów, szybki rozwój technologii kosmicznych, bezzałogowych statków latających oraz technik obliczeniowych spowodują jeszcze szerszy dostęp do danych i technologii, a co za tym idzie także szersze wykorzystanie danych hiperspektralnych. Jest to już widoczne w kraju, m.in. w parkach narodowych, które upatrują w technikach satelitarnych i lotniczych możliwości wsparcia realizacji zadań ochronnych, realizując projekty wdrożeniowe obejmujące technologie teledetekcyjne.

#### **4. Ocena merytoryczna rozprawy**

Głównym celem rozprawy doktorskiej mgr Anety Modzelewskiej była „ocena możliwości zastosowania wieloczasowych lotniczych danych hiperspektralnych w określaniu składu gatunkowego drzewostanu w lasach o zróżnicowanej strukturze gatunkowej i różnorodnej strategii zarządzania i ochrony, zlokalizowanych w strefie klimatów półkuli północnej.” Do osiągnięcia tego celu zaprojektowano spójną i dobrze przemyślaną metodykę badawczą, która doprowadziła Autorkę rozprawy do weryfikacji postawionych w pracy hipotez badawczych (sześciu).

Pierwsza z publikacji, stanowiących cykl obejmuje krytyczny przegląd literatury naukowej pod kątem metod przetwarzania danych hiperspektralnych stosowanych do określenia składu gatunkowego lasów strefy umiarkowanej. Warto tu podkreślić, że analiza objęła kolejne etapy przetwarzania, w tym przetwarzanie wstępne obrazów, a nie jedynie kwestie dotyczące analizy skuteczności algorytmów klasyfikacji. W odniesieniu do samej klasyfikacji dokonano głębszej analizy rezultatów klasyfikacji w zależności od zastosowanego algorytmu, ale także pod kątem efektywności

rozpoznania różnych gatunków drzew w podziale na gatunki iglaste i liściaste. Natomiast to co w mojej opinii warto byłoby dodać w tym przeglądzie literatury, to elementy dotyczące strategii przygotowania danych referencyjnych, gdyż ten element ma kluczowe znaczenie w klasyfikacji gatunków. Dokonany przegląd literatury pozwolił Autorce rozprawy na wskazanie kwestii ważnych i wartych weryfikacji poprzez eksperymenty badawcze i wyraźnie ukierunkował zaprojektowane w dalszej kolejności prace badawcze.

Druga publikacja skupia się na ocenie dokładności określania składu gatunkowego lasów w zależności od przyjętej strategii zarządzania i ich ochrony (obszar ochrony ścisłej, rezerwaty poza ochroną ścisłą, las gospodarczy). Uzyskane wyniki jednoznacznie wskazały na to, że dokładność klasyfikacji dla lasów gospodarczych jest zdecydowanie wyższa (o kilkanaście punktów procentowych) w porównaniu do pozostałych analizowanych form zarządzania i ochrony. Eksperyment ten jest bardzo ciekawy i ma duże znaczenie praktyczne z punktu widzenia ewentualnego przyszłego wdrożenia technik hiperspektralnych w zarządzaniu lasami.

W trzeciej publikacji podjęto się oceny wpływu zastosowania zestawu danych wieloczasowych na dokładność klasyfikacji gatunków drzew w porównaniu do rezultatów osiąganych na podstawie zobrażeń pozyskanych w jednym terminie. Analizowano dane z początku lipca, końca sierpnia i początku października, czyli dane ukazujące różne fazy cyklu fenologicznego. Kluczowym wnioskiem z tych prac jest stwierdzenie, że zastosowanie wieloczasowego zestawu danych hiperspektralnych tylko nieznacznie podniosło dokładność klasyfikacji gatunków drzew (na poziomie 1%), co z punktu widzenia praktycznego zastosowania tej techniki jest bardzo ważne, ponieważ pozyskanie pojedynczego zestawu danych w optymalnym terminie jest zdecydowanie mniej kosztowne niż wykonanie nalotów w trzech porach roku. W publikacji tej przeprowadzona została również pogłębiona analiza rezultatów, obejmująca ocenę wpływu różnych parametrów biometrycznych drzew na dokładność klasyfikacji w podziale na gatunki. Przeanalizowano wpływ wysokości i powierzchni korony drzew i potwierdzono, że w przypadku niektórych gatunków są to cechy mające istotny wpływ na poprawność ich klasyfikacji.

W mojej opinii, opierając się na szczegółowej analizie publikacji naukowych stanowiących rozprawę, mgr Aneta Modzelewska prawidłowo zdiagnozowała luki badawcze w obszarze zastosowania danych hiperspektralnych w określaniu zróżnicowania gatunkowego drzewostanów leśnych, postawiła właściwe hipotezy badawcze, rozwiązała w prawidłowy sposób postawione problemy badawcze. Badania, jak już wspomniano, zostały prowadzone w dobrze przemyślanym schemacie metodycznym, w taki sposób, aby kolejno realizować postawione cele pośrednie, weryfikując postawione hipotezy badawcze, prowadząc do osiągnięcia celu głównego. Postawione hipotezy badawcze stanowiły podstawę oceny możliwości zastosowania wieloczasowych lotniczych danych hiperspektralnych w określaniu składu gatunkowego drzewostanu w lasach o zróżnicowanej strukturze gatunkowej, jak również prowadziły do zdiagnozowania ograniczeń czy też czynników wpływających na skuteczność tego rodzaju podejścia. Każda z postawionych hipotez została zweryfikowana w toku przeprowadzonych prac. Uważam, że cykl publikacji, składających się na rozprawę doktorską jest logiczny i spójny tematycznie, ale jednocześnie każda z publikacji cyklu stanowi niezależną, zamkniętą część, omawiającą wyczerpująco przeprowadzone eksperymenty i wskazującą na problemy badawcze, które warto dogłębniej zbadać.

Potwierdzeniem jakości przeprowadzanych badań i ich oryginalności jest również opublikowanie ich w renomowanych czasopismach jakimi są *Remote Sensing of Environment* oraz *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*.

## 5. Uwagi szczegółowe i komentarze

Analizując badania przeprowadzone w ramach rozprawy doktorskiej widzę kilka interesujących kwestii, które warto było w przyszłości podjąć i które są ważne dla praktyki wdrożenia technik hiperspektralnych do monitorowania i zarządzania lasami o różnej strategii zarządzania i ochrony. Dotyczą one różnych aspektów badawczych.

1. W publikacji drugiej, gdzie dokonano oceny wpływu przyjętej strategii zarządzania i ochrony drzewostanów leśnych na dokładność określania składu gatunkowego uzyskano kilkunastoprocentową różnicę w dokładności klasyfikacji na korzyść lasów gospodarczych. Analizie poddano jeden zestaw danych z końca sierpnia. Zastanawia mnie jednak czy analogiczną różnicę dokładności klasyfikacji uzyskano by również w przypadku innych terminów pozyskania danych. Być może faza fenologiczna wpłynęła by także na wyniki tego eksperymentu.
2. W badaniach eksperymentalnych zastosowano klasyfikator Support Vector Machine (SVM). We wprowadzeniu do rozprawy wskazano, iż jest to klasyfikator dający wyższe dokładności w porównaniu do innych. Interesuje mnie jednak czy planując eksperymenty badawcze bazowano w tym elemencie jedynie na przeglądzie literatury, czy też przeprowadzono wstępne prace w celu porównania skuteczności różnych klasyfikatorów na tym, konkretnym obszarze. Z moich obserwacji i doświadczeń wynika, że równie skuteczny jest klasyfikator Spectral Angle Mapper (SAM), przy czym sam proces przetwarzania w tym przypadku jest bardziej czasochłonny. Ponadto w przypadku tego klasyfikatora nie ma możliwości wprowadzenia do samego procesu klasyfikacji innych danych niespektralnych, ale w niniejszej rozprawie doktorskiej tego rodzaju sytuacja nie miała miejsca.
3. Interesującym aspektem przeprowadzonych badań jest ocena wpływu cech biometrycznych drzew na skuteczność rozpoznania gatunków. Jak wiadomo struktura korony wpływa na „czystość” odpowiedzi spektralnej, rejestrowanej na zobrazowaniu teledetekcyjnym. Uważam, że warto te badania kontynuować i przeprowadzić pogłębione analizy uwzględniające inne cechy (np. zwartość korony) oraz siedlisko, ponieważ to co jest w tle korony drzewa wpływa na wypadkową odpowiedź spektralną, a zmienia się ona także wraz z fazą rozwojową roślinności niższych pięter lasów. Taki kierunek prac badawczych mógłby doprowadzić do określenia poziomu skuteczności rozpoznania poszczególnych gatunków oraz zdefiniowania minimalnych cech biometrycznych drzew w zależności od siedliska, w którym występują.
4. Kolejnym ważnym elementem mogącym mieć wpływ na możliwość realnego wdrożenia technik hiperspektralnych do monitorowania lasów jest kwestia wstępnego przetwarzania zobrazowań hiperspektralnych, w tym procedur korekcji radiometrycznej i atmosferycznej. Jak zauważono w przeglądzie literatury (publikacja I), w tym aspekcie pojawiają się różne wnioski i opinie badaczy. Czy w podczas realizacji badań zauważono wpływ np. różnego oświetlenia poszczególnych szeregów nalotu, czy też udało się je wyeliminować? W przypadku długich nalotów, dodatkowo wykonywanych w przeciągu kilku dni są to często pojawiające się problemy, stąd interesujące jest czy tego rodzaju aspekty analizowano i jakie są tutaj wnioski czy spostrzeżenia.

Byłabym wdzięczna za ustosunkowanie się i skomentowanie poruszonych powyżej kwestii podczas publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

## 6. Wniosek końcowy

Wynikiem zrealizowanych przez mgr Anetę Modzelewską prac badawczych, stanowiącym osiągnięcie naukowe jest udowodnienie, że zobrażenia hiperspektralne mogą stanowić samodzielnie dobre źródło informacji o składzie gatunkowym zróżnicowanych lasów strefy umiarkowanej oraz że skuteczność rozpoznania gatunków z wykorzystaniem danych z jednego, optymalnego terminu jest porównywalna z wynikami uzyskiwanymi na podstawie zestawu danych wieloczasowych. Wyniki te mają znaczenie praktyczne w obszarze nauk leśnych, ale także dla nauk przyrodniczych. Hipotezy badawcze, sformułowane we wstępie do rozprawy doktorskiej, zostały zweryfikowane, a cele badawcze (główny, jak i pośrednie) osiągnięte.

Na podstawie szczegółowej analizy przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej stwierdzam, iż mgr Aneta Modzelewska wykazała się wiedzę teoretyczną z zakresu teledetekcji, znajomością metod przetwarzania dużych zbiorów danych, a także wiedzą z zakresu leśnictwa oraz umiejętnością prawidłowego projektowania eksperymentów badawczych i prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. Ma także umiejętność krytycznej, wieloaspektowej analizy oraz właściwie formułuje konkluzje z przeprowadzonych eksperymentów, dostrzegając także ich ograniczenia czy elementy wpływające na uzyskiwanie rezultaty.

Stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska mgr Anety Modzelewskiej na temat: „Zastosowanie wieloczasowych lotniczych danych hiperspektralnych w określaniu składu gatunkowego zróżnicowanych lasów strefy umiarkowanej” spełnia warunki dla rozpraw doktorskich określone w art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. z 2003 r. nr 65 poz. 595 ze zmianą w Dz. U. z 2005 r. nr 164 poz. 1365). Wnoszę zatem o dopuszczenie mgr Anety Modzelewskiej do publicznej obrony przedłożonej rozprawy doktorskiej.



Warszawa, 9 lipca 2021 r.