

**dr hab. inż. Piotr Wężyk, prof. URK**  
Katedra Zarządzania Zasobami Leśnymi  
Wydział Leśny  
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie  
al. Mickiewicza 21  
31-120 Kraków

Kraków, dn. 11.11.2023 r.

## **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Adama Młynarczyka**

pod tytułem:

### **Wykorzystanie wskaźników spektralnych do oceny troficzności siedlisk leśnych**

- przygotowanej na Wydziale Nauk Geograficznych i Geologicznych (instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania środowiska Przyrodniczego) Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu pod kierunkiem: prof. dr. hab. inż. Pawła Rutkowskiego z Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu oraz dr. hab. Jana Piekarczyka z Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza.

Podstawą przygotowania niniejszej recenzji było pismo z dnia 05.10.2023, Pana prof. dr hab. Grzegorza Rachlewicza - Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny nauki o Ziemi i środowisku UAM informujące o uchwale 111-2022/2023 z dnia 29.09.2023 – tejże Rady Dyscypliny - o wyznaczeniu mojej osoby na recenzenta.

### **Ocena celowości podjętych badań**

Wraz z nasilającymi się zmianami klimatu prowadzącymi do pogarszających się warunków dla rozwoju roślin i życia zwierząt oraz naszej cywilizacji, w celu lepszego rozumienia tych zjawisk, obserwujemy lawinowy rozwój technologii teledetekcyjnych służących zdalnym obserwacjom Ziemi (ang. EO; Earth Observation). Nowe sensory teledetekcyjne umieszczane są na różnych platformach od bezzałogowych statków powietrznych (BSP), poprzez samoloty, śmigłowce, pseudolity (ang. *High-Altitude Platform Stations*; HAPS) i w końcu sztuczne satelity Ziemi (ISS – międzynarodowa stacja kosmiczna; satelity okołobiegunowe i geostacjonarne). Rejestracja zjawisk zachodzących na Ziemi jest konieczna dla wielu dziedzin gospodarki (np. rolnictwo; bezpieczeństwo żywnościowe) jak i ochrony zdrowia czy życia ludzi (sytuacje kryzysowe: np. pożary lasów, powodzie, osuwiska, jakość powietrza i wód i in.). Obecnie badania naukowe skupiają się nad możliwością wykorzystania teledetekcji satelitarnej do lepszego zrozumienia procesów zachodzących dynamicznie w ekosystemach leśnych oraz analizowania wpływu zrównoważonego ich użytkowania a także nieprzewidywalnych łatwo zmian klimatycznych procesy w przyszłości. Na podstawie wielokryterialnych analiz przestrzennych bazujących na wynikach detekcji składów gatunkowych drzewostanów oraz ich kondycji zdrowotnej, korelowanych z przemianami klimatycznymi oraz zmianami troficzności siedlisk tworzy się scenariusze

docelowych składów gatunkowych drzewostanów na przyszłe dekady w celu zapewnienia trwałości ekosystemów leśnych.

Zmiany klimatyczne zachodzące na Ziemi prowadzić mogą do zmian przebiegu zasięgu lub też całkowitego wycofywania się niektórych gatunków drzew lasotwórczych (np. świerk pospolity; *Picea abies* (L) H. Karst.) ze swoich obecnych, mniej lub bardziej „naturalnych” zasięgów. Nie znamy dziś jeszcze odpowiedzi na pytanie, w jakich konkretnych gatunkach drzew powinniśmy pokładać nadzieję w przyszłości pod kątem trwania lasu, serwowania licznych usług ekosystemowych (ES) w tym, zapewniających: budulec, opał czy też przede wszystkim sekwestrację dwutlenku węgla, produkcję tlenu, nie wspominając o tak ważnej roli jak retencja wód opadowych i współtworzenie klimatu (zwolnione odprowadzanie wody, jej wyparowanie, wzrost wilgotności powietrza itp.).

Zmiany klimatu pociągną za sobą liczne zmiany w strukturze gatunkowej, zarówno lasów iglastych jak i liściastych, przez co obecnie stosowane modele matematyczne (statystyczne) by być precyzyjne, będą potrzebowały zasilania nowymi, aktualnymi, wieloźródłowymi danymi przestrzennymi. Przy obecnym wzroście dostępności obrazowań satelitarnych, charakteryzujących się coraz większą rozdzielczością przestrzenną (rozmiar piksela; GSD – ang. Ground Size Distance), spektralnej (liczba rejestrowanych pasm PEM) oraz czasowej (częstość rewizyty w tym samym miejscu), a także zaawansowanych metod uczenia maszynowego (ML) - detekcja drzewostanów pośrednio wskazujących odpowiadające im habitaty oraz detekcja ich składu gatunkowego i stopnia zdrowotności (np. defoliacji), będzie jedną z efektywnych, szybkich i obiektywnych metod zasilania modeli matematycznych np. stosowanych w modelowaniu klimatu, erozji gleby czy zagrożeń pożarami. Wciąż problemem jednak pozostanie zmienność osobnicza drzew i trudność określenia ich gatunku (szczególnie wśród drzew liściastych), ale z pomocą przychodzą tutaj w sukurs inne technologie lotnicze i satelitarne, wykorzystujące takie sensory, jak: sensory hiperspektralne (od 200-400 kanałów spektralnych; np. EnMAP, TANAGER), lotnicze skanowanie laserowe LiDAR ALS czy satelitarne skanowanie laserowe SLS (moduł GEDI na ISS; ICeSAT-2 NASA) - wspomagające określanie struktury piętrowej, wiekowej i zwarcia drzewostanów - a więc parametrów odgrywających podstawową rolę w modelowaniu sekwestracji CO<sub>2</sub> oraz biomasy nadziemnej (ang. AGB). Poza wykorzystaniem sensorów wielospektralnych (np. Sentinel-2 ESA; PlanetScope SuperDove; WorldView-3 MAXAR etc.) czy hiperspektralnych (HS) istnieje szereg dedykowanych satelitów środowiskowych (EO; Earth Observation), których detektory pozwalają badać jakość powietrza w skali globalnej (np. Sentinel-5P; program CEPERNICUS- ESA, TANAGER – źródła emisji metanu i CO<sub>2</sub>).

Istnieją również mikrofalowe systemy satelitarne służące ocenie wilgotności gruntu takie jak: misja SMOS (ESA) satelity z radiometrem *Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis* (MIRAS), Sentinel-1 (ESA) lub SMAP (NASA) czy modelowanie danych (EUMETSAT H-SAF) z sensora ASCAT satelitów meteorologicznych Metop.

Technologie satelitarne umożliwiają więc dziś poszukiwanie zależności pomiędzy aktualnie występującym pokryciem terenu (land cover; np. lasami) a lokalnymi warunkami glebowymi i wilgotnościowymi (oba składają się na trofizm siedliska) współtworzonymi przez klimat oraz opartych o walidację wyników modelowania matematycznego w skalach regionalnych i globalnych. Wydają się więc, iż w niedalekiej przyszłości, to właśnie na

zdalnych technologiach teledetekcyjnych oparte zostanie modelowanie matematyczne, przy wykorzystaniu odpowiednich metod kalibracji sensorów (np. pomiary spektro-radiometrem z pułapu BSP). Aktualizowane przez różne agencje (np. EEA UE) dane referencyjne GIS, takie jak Corine Land Cover (CLC), opierają się przede wszystkim na klasyfikacji aktualnych zobrazowań satelitarnych, co potwierdza ten kierunek wykorzystania satelitów środowiskowych również do badań nad oceną siedlisk leśnych. W gospodarce leśnej teledetekcja satelitarna wykorzystywana jest nie tylko w ścisłych badaniach naukowych nad nowymi efektywnymi metodami obserwacji ekosystemów leśnych ale często w wielu krajach świata stosuje się ją już w sposób operacyjny np. dla monitorowania zasobów (np. Kanada).

Zaletą częstego dokumentowania stanu siedlisk leśnych przy wykorzystaniu obiektywnych obrazów teledetekcyjnych, będących zapisem odpowiedzi drzewostanów na promieniowanie elektromagnetyczne (PEM) odbite czy też emitowane (np. w zakresie TIR) może przyczynić się do opracowania nowych metod opartych na analizach dużych zbiorów danych (BigData; Deep Learning, Machine Learning). Niewątpliwie procesy związane z okresową inwentaryzacją zasobów leśnych (np. 10-letni cykl urządzania lasu) mogą ulec w przyszłości skróceniu i bazować na dynamicznych systemach analizujących na bieżąco dane EO, a nie co 10 lat czy co 30 lat wykonywanych pracach terenowych.

O ile w skali globalnej od dawna prowadzi się badania nad biomami leśnymi z wykorzystaniem zobrazowań teledetekcyjnych, to w Polsce miały one do tej pory raczej charakter eksperymentalny ograniczony lokalnie lub regionalnie. W ostatnich latach rozpoczęto badania przed-wdrożeniowe z wykorzystaniem między innymi satelitarnych danych wielospektralnych nad zagrożeniami powodowanymi ze strony zmian klimatu (np. susza) czy emisji związków azotu skutkującymi m.in. pojawianiem się nowych gradacji szkodników owadzych czy szybszego przyrostu drzew szczególnie na uboższych siedliskach leśnych (efekt nawożeniowy emisji tlenków azotu). Brak jest jeszcze obecnie na poziomie operacyjnym DG PGL Lasy Państwowe systemu do monitorowania drzewostanów w skali kraju zasilanego danymi teledetekcyjnymi i analizującymi bardzo szczegółowe dane GIS i inne geodane (np. chmury punktów ALS LiDAR, modele wysokościowe, dane geometryczne LMN czy dane z operatów glebowo-siedliskowych i inwentaryzacji drzewostanów). Jednak, w stosunkowo niewielkim zakresie prowadzone są badania w których dane teledetekcyjne, w sposób pośredni, poprzez charakterystyki spektralne powierzchni leśnych dostarczają informacji o czynnikach siedliskowych takich jak właściwości glebowe, geologiczne, topograficzne lub wodne.

Podsumowując, uważam, że wybrana **tematyka rozprawy doktorskiej jest istotna** z punktu widzenia naukowego i praktycznych jej zastosowań.

### **Ocena formalna przedłożonej rozprawy doktorskiej**

Recenzowana rozprawa doktorska stanowi zbiór składający się aż z sześciu pozycji, w składzie których znajdują się

I. 2 manuskrypty współautorskich artykułów opublikowanych w renomowanych czasopismach:

- **Młynarczyk A.** (60%), Konatowska M., Królewicz S., Rutkowski P., Piekarczyk J., Kowalewski W., 2022. Spectral Indices as a Tool to Assess the Moisture Status of Forest Habitats. *Remote Sensing*, 14, 4267. (**poz. 1.**)
- Konatowska M., **Młynarczyk A.** (40%), Rutkowski P., 2023. Prospects for the Preservation of the Main *Pinus sylvestris* L. Ecotypes in Poland in the Context of the Habitat Conditions of their Occurrence. *Forests*, 2023 (**poz. 3.**)

II. 1 manuskrypt współautorskiego artykułu jeszcze w trakcie cyklu wydawniczego po pozytywnych recenzjach:

- Konatowska M., **Młynarczyk A.** (45%), Rutkowski P., Kowalewski W., 2023. NDVI as a potential tool for forecasting changes in geographical range of sycamore (*Acer pseudoplatanus* L.). *Scientific Reports*, 2023. (poz. 2.)

III. 1 manuskrypt współautorskiej monografii po pozytywnych recenzjach:

- **Młynarczyk A.** (50%), Konatowska M., Kowalewski, W. Królewicz S., Tonello K.C., Toppa R.H., Martines M.R., Piekarczyk J., Rutkowski P. NDVI as a Tool for Determining the Moisture of Habitats at the Edge of the Cerrado and Atlantic Forest Biomes (Brazil). Złożony do czasopisma 04.06.2023 do *iForest - Biogeosciences and Forestry* (**Załącznik nr 3**)

IV. 1 zgłoszenie patentowe oraz sprawozdanie o stanie techniki wykonane przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej (**poz. 4.**):

- **Młynarczyk A.** (60%), Królewicz S., Rutkowski P., Konatowska M., Piekarczyk J. 2021. P.439801 „Wniosek o udzielenie patentu na wynalazek: Sposób wyznaczania stopni uwilgotnienia lasu na podstawie zdjęć satelitarnych”;

V. 1 wdrożenie w PGL LP udokumentowane w postaci rozdziału (7.3.1.1.) w elaboracie: Operat siedliskowy Nadleśnictwo Karnieszewice wg stanu na 1.01.2023 (BULiGL Oddział w Poznaniu 2023), Opracowanie: Z. Krysztofiak, T. Adamski oraz Ł. Marciniak (**poz. 5**):

- Rutkowski P. - Specyfika siedliskowa leśnictwa Iwięcino, kompleks leśny Iwięcino. Biuro Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej Oddział w Poznaniu. s. 351-354. Materiały niepublikowane. Wdrożona metoda w oparciu o metodę opracowaną przez zespół podany w zgłoszeniu Patentowym: **Młynarczyk A.** (30%), Królewicz S., Rutkowski P., Konatowska M., Piekarczyk J.

VI. Manuskrypt zgłoszony w czasopiśmie *iForest* (**poz. 6**):

- **Młynarczyk A.** (50%), Konatowska M., Kowalewski, W. Królewicz S., Tonello K.C., Toppa R.H., Martines M.R., Piekarczyk J., Rutkowski P. *NDVI as a Tool for Determining the Moisture of Habitats at the Edge of the Cerrado and Atlantic Forest Biomes (Brazil)*. Złożony do czasopisma 04.06.2023 do *iForest - Biogeosciences and Forestry*

Pozycja nr I to dwa artykuły wydane w czasopismach naukowych, związanych z teledetekcją, posiadających IF wynoszący obecnie 5,0 (*Remote Sensing*, poz. 1) oraz 2,9 (*Forests*; poz. 3).

Kolejne zamieszczone w doktoracie publikacje to dwa manuskrypty: 1 artykułu z pozytywnymi recenzjami (poz. 2) oraz monografia w trakcie recenzji (poz. 6). Ponadto w skład zgłoszonego zbioru dorobku składającego się na rozprawę doktorską przedłożone zostały: 1 - zgłoszenie patentowe RP oraz 1-wdrożenie.

W rozprawie doktorskiej przedłożonej do recenzji, oprócz listy wspomnianych artykułów, znalazły się następujące części:

- informacja o źródłach finansowania badań,
- streszczenia w języku polskim i angielskim, w których opisano krótko oryginalne rozwiązanie problemu naukowego,
- opis przeprowadzonych badań obejmujący: wstęp, cel i hipotezy badawcze, metody badań, wyniki badań, wnioski, spis tabel i rycin,
- trzy załączniki obejmujące: zestawienie indeksów objętych wstępną analizą danych (Załącznik 1), wyniki analizy 191 wskaźników spektralnych objętych badaniami (Załącznik nr 2) oraz manuskrypt zgłoszony (04.06.2023 r.) w czasopiśmie iForest – Biogeosciences and Forestry – w trakcie recenzji (Załącznik nr 3; poz. 6).
- oświadczenia współautorów nt. ich udziału w publikacjach i innych załączonych opracowaniach.

Biorąc pod uwagę wszystkie powyższe informacje stwierdzam, że przedłożona do recenzji rozprawa doktorska **spełnia wymagania formalne** określone w art. 187 ust. 3 oraz ust. 4 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018, poz. 1668 z późn. zm.).

### **Ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej**

We Wstępie pracy doktorskiej zostały przedstawione podstawowe zagadnienia związane z tematyką pracy, która dotyczy oceny siedlisk leśnych. Doktorant opisał najczęściej stosowane, nie tylko w Polsce, tradycyjne metody klasyfikacji troficznej siedlisk leśnych zwracając uwagę, że coraz większe zainteresowanie ze strony zarówno leśników jak i środowisk naukowych skupia się na doskonaleniu metod teledetekcyjnych w tym zakresie. W dalszej części Wstępu, Doktorant opisał rozwój zastosowań teledetekcji w leśnictwie, podkreślając jej wielorakie zastosowanie. Przegląd literatury został właściwie opracowany i wprowadza czytelnika w zagadnienia związane z tematyką przedłożonej pracy doktorskiej, choć zabrakło może omówienia kilku aspektów. Przegląd literatury przedmiotu świadczy o dobrym przygotowaniu teoretycznym Doktoranta do badań, których się podjął w ramach swojej pracy doktorskiej.

Autor sformułował jeden główny cel badawczy, którym było określenie zależności między danymi obrazowymi rejestrowanymi przez sensor MSI satelitów Sentinel-2 (ESA) i charakterystykami pośrednio opisującymi troficzność (a w zasadzie uwilgotnienie) siedlisk leśnych. Uszczegółowienie celu badań zostało przeprowadzone za pomocą trzech pytań dotyczących możliwości wykorzystania wskaźników spektralnych, ustalenia, który z nich jest najbardziej przydatny i jak można je wykorzystać w ocenie troficzności siedlisk leśnych.

W rozdziale 3 pracy została opisana metodyka i narzędzia zastosowane w badaniach opisanych w artykułach składających się na pracę doktorską. Badania opierały się na wykorzystaniu różnych baz danych o lasach (BDL) oraz obrazów satelitarnych (SAT4ENVI) i prowadzono je na zróżnicowanych obiektach badawczych, którymi były drzewostany w Borach Tucholskich, lasach Mata-Atlantica (Ipanema National Forest) w Brazylii oraz w drzewostanach jaworowych w PGL LP a także w 7 reprezentatywnych dla obszaru Polski drzewostanów z ekotypami sosny zwyczajnej.

Źródłem danych spektralnych wykorzystanych w badaniach były obrazy zarejestrowane przez sensory MSI satelitów Sentinel-2A i 2B (ESA). Wybór spektralnych zobrazowań satelitarnych był podyktowany prawdopodobnie ich relatywnie dużą dostępnością w aspekcie przestrzennym: cały glob i relatywnie wysoką rozdzielczością przestrzenną (10 m GSD), podejściem ekonomicznym (są one nieodpłatne), wysoką rozdzielczością spektralną (13 kanałów) i często czasową (około 5 dni). Na uwagę zasługuje wykorzystanie do przetwarzania danych bardzo zaawansowanych algorytmów uczenia maszynowego (ML).

Co ciekawe, przetestowano niemal wszystkie opisane w literaturze teledetekcyjne wskaźniki roślinności. Z jednej strony wskazywać to może na testowanie czułości, możliwej dużej ilości kombinacji kanałów, a z drugiej strony może świadczyć też o braku sprecyzowanego podejścia ale za to bezkrytyczną wiarę w uczenie maszynowe, które jest w stanie wskazać najbardziej istotne zmienne używane w modelu.

Należy stwierdzić, że zastosowana w prezentowanych badaniach metodyka badawcza co do zasady jest poprawna (w dalszej części sprecyzuję uwagi) i umożliwiła realizację założonego celu badań.

Kolejny rozdział pracy doktorskiej obejmuje przedstawienie wyników uzyskiwanych na poszczególnych etapach badań.

**Artykuł nr 1** dotyczył określenia zależności pomiędzy wartościami wskaźników spektralnych generowanych w oparciu o wartości kanałów spektralnych zobrazowań satelitarnych S-2 (ESA) – a stopniem uwilgotnienia siedlisk leśnych, które jest istotnym, ale nie jedynym czynnikiem wpływającym na troficzność siedlisk leśnych.

Istotnym osiągnięciem pracy doktorskiej w tym zakresie jest uzyskanie charakterystyk spektralnych dla siedlisk leśnych klasyfikowanych według powszechnie stosowanych w siedliskoznawstwie leśnym - kategorii uwilgotnienia TSL. Uzyskane charakterystyki spektralne dla zobrazowań S-2 (ESA) wydają się być wiarygodne dzięki dużej liczbie analizowanych wariantów TSL oraz wykorzystaniu w badaniach wieloczasowych obserwacji satelitarnych. Recenzent nie znalazł w oryginalnym tekście pracy informacji o dacie aktualności mapy uwilgotnienia siedlisk leśnych sporządzanej prawdopodobnie w przeszłości podczas prac glebowo-siedliskowych w PNBT. Co prawda, informacje te bardzo szybko nie ulegają dezaktualizacji, ale same metody kartowania siedlisk stosowane w lasach pozostawiają dużo do życzenia, szczególnie w sytuacji ich porównywania do wyników na zobrazowaniach satelitarnych co do np. przebiegu zasięgu siedlisk (związanych z zasięgiem gatunków) czy gęstości i lokalizacji odkrywek glebowych. O ile autorzy podają metodykę weryfikacji zachmurzenia scen satelitarnych, to recenzent ma trudność z odnalezieniem informacji ile

łącznie scen przeanalizowano z okresu pełnej wegetacji w obszarze PNBT. Czy tylko z dat, które przedstawiono na rycinach 5 i 6? Proszę o udzielenie takich informacji.

Najbardziej przydatnym do realizacji celu pracy wg przeprowadzonych badań okazał się znormalizowany różnicowy wskaźnik roślinności - NDVI, szczególnie gdy wykorzystywane były zobrazowania S-2 (ESA) z okresu lipiec-wrzesień. W zasadzie jest to trochę „oczywista oczywistość”, gdyż zarówno w przypadku wykonywania lotniczych zdjęć spektrostrefowych CIR jak i prowadzenia analiz teledetekcyjnych, wybiera się zawsze okres tzw. pełnej wegetacji co oznacza w pełni wykształcony aparat asymilacyjny. Jest to zazwyczaj okres od końca czerwca do połowy sierpnia, ale jest on bardzo mocno uzależniony choćby od wysokości n.p.m. oraz innych lokalnych warunków orograficznych i klimatycznych.

W pracy wykazano, m.in. na Rycinie 6, iż istnieje zależność pomiędzy wartością wskaźnika NDVI a stopniem uwilgotnienia siedliska i w zasadzie determinuje ją prawdopodobnie skład gatunkowy drzewostanu i po części też roślinność runa (na siedliskach skrajnie suchych np. zbiorowiskach boru chrobotkowego). Jak pokazują wykresy poza okresem wegetacyjnym (dane od czerwca do września) siedliska bardzo wilgotne charakteryzują się niższymi wartościami NDVI w stosunku do siedlisk świeżych i suchych ze względu na brak aparatu asymilacyjnego w przypadku drzew liściastych (głównie olsza czarna która porasta obszary wzdłuż połączeń pomiędzy jeziorami wzdłuż cieków oraz ich brzegi). Co ciekawe nie wykazano wysokiej przydatności indeksów bardziej naturalnie zbliżonych do wskazywania zróżnicowania wilgotnościowego czyli z zakresu kanałów SWIR z S-2 (ESA) ale te charakteryzują się niższą rozdzielczością przestrzenną (np. B11 i B12 posiadają 20m GSD) i autorzy artykułu ich nie poddali analizie (wskaźniki NDWI czy MSI).

**Artykuł nr 2** składający się na pracę doktorską mgr Adama Młynarczyka dotyczył określenia możliwości wykorzystania wskaźnika NDVI generowanego w oparciu o zobrazowania satelitarne S-2 (ESA) do oceny charakterystyk spektralnych drzewostanów jaworowych w PGL LP oraz prognozowania jego ewentualnej ekspansji na obszarze Polski i Europy przy wykorzystaniu narzędzi z zakresu uczenia maszynowego. Wykorzystując w badaniach zależności pomiędzy średnimi wartościami wskaźnika NDVI oraz zmiennymi opisującymi warunki środowiska w postaci: wariantu wysokościowego (n.p.m.), troficzności siedliska (3 klasy), stan uwilgotnienia (4 klasy) oraz kombinacje troficzności i wariantu wysokościowego. Autorzy wskazali na algorytm MLP (stosowane były też: LDA, QDA, SVC oraz RF), który wykazał związki pomiędzy średnią wartością NDVI a sumą opadów, średnią temperaturą powietrza i średnią wilgotnością gleby oraz TSL w zależności od stopnia uwilgotnienia siedliska. W autoreferacie na stronie 35 Doktorant opisuje Rycinę 15 wskazując na mapę NDVI dla roku 2018 jako mapę zmiany wartości wskaźnika w latach 2018 i 2020. Czy na pewno chodzi o zmianę wartości NDVI czy jednak zmienność przestrzenną wartości wskaźnika w poszczególnych latach? Nie można też znaleźć w publikacji informacji z jakich dat akwizycji pochodziły sceny satelitarne wykorzystane do analiz w latach 2018 oraz 2020 w roku przedstawianych na Ryc. 15.

Przy okazji tych rozważań recenzent chciał zwrócić uwagę, iż w końcu sierpnia i na początku września 2020 roku w Polsce w bardzo wielu miejscach obserwowano nasilenie się gradacji Borecznika sosnowego (*Diprion pini*), który co prawda, atakuje drzewostany sosnowe, jednak chodzi w tej uwadze o podkreślenie ogromnej dynamiki jakiej podlegają

drzewostany (np. gradacjom) ale też fluktuacjom czynników atmosferycznych (np. susza glebowa czy przymrozki). Zastosowanie do analiz wyłącznie dwóch tygodni sierpnia 2022 do obserwacji i wyciągania wniosków wydaje się dość ryzykowne choć dopuszczalne.

Recenzent nie doszukał się też w pracy szczegółowych informacji co do średniej powierzchni analizowanych drzewostanów z przewagą jawora (udział > 80%), ale zakłada, że nie były te drzewostany > 2-3 ha. W Tabeli 1 na stronie 72 autoreferatu, recenzent znajduje jednak informacje na temat reprezentatywności poszczególnych TSL, w których znajdowały się drzewostany jaworowe. W przypadku części z nich o reprezentacji < 10 szt. czy też powierzchni rzędu 1,5 ha trudno jest mówić o analizowaniu związków statystycznych. Należy dodać, iż informacje zawarte w BDL na temat udziału gatunku mogą mieć nawet 9 lat ze względu na 10-letni okres aktualizacji, ale kluczowe jest odrzucenie pikseli znajdujących się na granicy wydzieleń (przy założeniu ich poprawności geometrycznej). Kolejnym problemem jest fakt, iż BDL nie wskazuje, w którym miejscu wydzielenia znajduje się np. 20% domieszka innych gatunków liściastych ani też czy forma zmieszania jest grupowa lub np. pasowa czy też jednostkowa albo kępowa. W takiej sytuacji, bez jednoznacznej pewności poziomu klasyfikacji jawora (Autorzy nie wykonują w zasadzie klasyfikacji gatunku drzewa ale podają jedynie wartości średnie NDVI) - dość ryzykowne jest przeskalowanie lokalnych wskaźnika wartości na skalę całej Polski a co dopiero Europy. Posługiwanie się jedynie progowaniem wartości średniej NDVI dla jednego sezonu wegetacyjnego dla skali Europy (2018) w opinii recenzenta jest to ciekawe ale bardzo ryzykowne. Poza samą wartością NDVI istnieje wiele innych wymagań siedliskowych jaworu takich jak odczyn pH gleby czy obecność części organicznych itp. Zamieszczona w Autoreferacie Tabela 2 (na stronie 73) jest bardzo interesująca i wymaga uznania, choć recenzent chciałby poznać szczegóły jej powstania, a w szczególności jakie były daty akwizycji do wyliczenia średniej wartości oraz jaka była liczba i średnia powierzchnia tych wydzieleń leśnych szczególnie w przypadku rzadkich drzew obcego pochodzenia. Istnieje bowiem bardzo wiele czynników modyfikujących wartość NDVI, nie tylko w pojedynczym sezonie wegetacyjnym ale na przestrzeni kilku lat (ataki szkodników owadzych czy grzybów) czy dekady (pogłębiająca się susza glebowa czy wzrost średniej temperatury). Autorzy prawdopodobnie wykorzystali dane opisujące wilgotność gleby bazując z modelu tworzonoego przez EUMETSAT H-SAF (czujnik ASCAT na satelitach Metop). Recenzent chciałby jedynie przybliżyć innych czytelnikom recenzji, iż pole obliczeniowe w tym modelu wynosi (po *resamplingu*) około 12.5 km, co w sytuacji bardzo niewielkich obszarów zajmowanych przez drzewostany jaworowe (rzędu 0,3 km<sup>2</sup>) jest w zasadzie dużym przybliżeniem, a nie konkretnym pomiarem wilgotności. W pracy doktorskiej nie znalazł recenzent też informacji o walidacji osiągniętych wyników, choćby w skali Polski, tj. weryfikacji wskazanych (na podstawie wyłącznie NDVI) siedlisk, dla których potencjalnie jawor mógłby być gatunkiem głównym a nie tylko domieszką biocenotyczną. Nie jest oczywiście wykluczone, iż w zmieniających się warunkach klimatycznych jawor, ale także inne gatunki bardziej ciepłolubne będą obejmować inne nisze ekologiczne gdyż ma on dość szerokie spektrum siedliskowe. Hipoteza o szybkim ocieplaniu się klimatu i możliwości detekcji drzewostanów w północnych obszarach Europy wymaga jednak bardziej zaawansowanych studiów i weryfikacji terenowej.



Wartość artykułu polega na tym, iż wykazano w nim (choć przy bardzo niskiej próbie statystycznej) przydatność wskaźników teledetekcyjnych dla weryfikacji obszarów, które nie sprzyjają trwania jaworu. Na pewno warto ten kierunek rozwijać przy wykorzystaniu jednak większej liczby zmiennych opisujących warunki siedliskowe. Co ciekawe, autorzy tej pracy znaleźli w bazach BDL 1 szt. drzewostanu jaworowego w północno-wschodniej Polsce (Mapa 3; str. 73), czyli w obszarze, na którym teoretycznie wg prac Boratyńskiego i Szafera znajduje się właśnie strefa „bez-jaworowa”. Wartość NDVI mierzonego na poziomie koron osiągnęła w tym drzewostanie aż 0,89 czyli co ciekawe, więcej niż w przypadku jaworzyn w Karpatach (NDVI=0,87 przy próbie 123 drzewostanów). Jest to w zasadzie dobry przykład wskazujący na potrzebę większej próby badawczej przed wyciąganiem pochopnych wniosków. Spora część wniosków zdefiniowanych w pracy przez autorów jest w zasadzie powtórzeniem wyników obliczeń.

Ciekawym wątkiem pracy, ale niestety dość słabo opisanym, jest podanie wartości NDVI gatunków głównych obcego pochodzenia, ale tworzących zwarte drzewostany. Jest to szczególnie istotne w modelowaniu przyszłości trwałości lasów w Polsce, choć na część tych gatunków patrzemy współcześnie dość negatywnie. Kontynuowanie obserwacji kondycji tych drzewostanów zarówno pod kątem odpowiedzi spektralnej ale też i parametrów biometrycznych wydaje się kluczowe dla przyszłości lasów w Europie. Badania wielu autorów wskazują np. na platan klonolistny (*Platanus acerifolia*) jako drzewo, które w roku 2100 może odgrywać zasadniczą rolę w tworzeniu drzewostanów w środkowo-południowych lasach Europy, jeśli zmiany klimatu nie zostaną spowolnione. Myślę, że dużym uzupełnieniem dla pracy byłoby wykorzystanie algorytmów ML do klasyfikacji gatunków lasotwórczych w Polsce, zarówno tych rodzimych i obcych, a nie tylko wykorzystywanie progowania wartości NDVI, które dla krótkiego okresu mogą być mało wiarygodne.

Przedmiotem badań opisanych w **Artykule nr 3** były analizy wybranych ekotypów sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) występujących w Polsce w aspekcie zróżnicowania cech spektralnego odbicia PEM rejestrowanych na obrazowaniach MSI satelity Sentinel-2 (ESA). Autorzy wykazali zależność wartości wskaźnika NDVI (mediana) z parametrami pośrednio opisującymi troficzność/produkcyjność siedlisk, tj.: wysokość drzew, średnicę pni, smukłość pnia i typ zbiorowiska roślinnego (zespół).

Walorem pracy jest zaproponowanie listy rankingowej analizowanych ekotypów sosny zwyczajnej w Polsce w perspektywie zachowania trwałości drzewostanów sosnowych, w których na przestrzeni wieków wykształciły się lokalne ekotypy gwarantujące utrzymanie wysokich walorów produkcyjnych pod kątem wybranych cech biometrycznych (np. słynna sosna taborska). Co ciekawe Autorzy proponują w zasadzie dwuwymiarowe analizy spektralne bez wykorzystania do tego celu choćby informacji o zróżnicowaniu wysokości drzew, zwarcia poziomego koron (ang. *canopy cover*) czy np. długości koron a analizują jedynie dane z BDL, takie jak wskaźnik smukłości pnia, wysokość (H) oraz pierśnicę ( $D_{1.3}$ ) sosen.

Dane na temat wysokości bardzo cenne do scharakteryzowania struktury przestrzennej drzewostanu jak i cech biometrycznych ekotypów sosny, uzyskać można współcześnie z analiz chmur punktów 3d ALS LiDAR. Dane jakimi posługiwali się Autorzy, są w zasadzie generalizowane do poziomu wydzielenia (pododdziału) leśnego, choć powstają one podczas tworzenia operatu urządzeniowego i zbierane są na kołowych powierzchniach próbnych (kpp)

schematycznie lub losowo rozmieszczanych w grupach stratyfikacyjnych drzewostanów. Aktualność danych z inwentaryzacji leśnej, prowadzonej co 10 lat w lasach pod zarządem PGL LP jest niezwykle ważna w modelowaniu statystycznym. Autorzy publikacji wybrali do badań 7 obszarów choć recenzent nie ma kompletnej wiedzy, co rozumieją oni pod hasłem: „*research plot*”. Czy były to całe wydzielania, czy też tylko fragmenty wydzieleni drzewostanowych i jaka była pewność, że drzewostany te nie miały bujnie rozwiniętych pozostałych pięter złożonych z gatunków liściastych, które w zasadniczy sposób mogą zmieniać wartości wskaźnika NDVI zarówno w okresie wegetacji jak i poza nim. Autorzy skupili się na krótkim okresie obserwacji satelitarnych (tj. lipiec - wrzesień 2020), wykorzystując zobrażenia S-2 (ESA). Co ciekawe, jeden z obszarów badawczych wykazywał zawsze bardzo niskie wartości NDVI (obszar nr 4), co wskazuje albo na silną defoliację lub też niskie zwarcie poziome koron drzew i brak obecności runa (występowanie ścioty) lub też jakieś specyficzne sytuację (np. gradacja borecznika sosnowca). Autorzy tłumaczą, iż w tej sytuacji zastosowali wartość mediany „lepiej” opisującą przestrzenny rozkład NDVI, choć suma opadów atmosferycznych w tym rejonie chyba tego zjawiska nie tłumaczy do końca.

Autorzy wykazali (Tab. 5) dodatnią korelację (0.74) pomiędzy wysokością sosen (H) a medianą NDVI oraz korelację (0.70) pomiędzy pierśnicą (D) a wartością NDVI. Jeszcze wyższą korelację (0.89) udowodnili pomiędzy występującym zespołem roślinnym a wartością NDVI. Im bardziej troficzne jest siedlisko (a tym samym bogatsze zbiorowisko), to znajduje to wyraz w wyższych wartościach odbicia PEM w zakresie NIR i większej absorpcji w zakresie RED (fotosynteza). Największa wartość NDVI wykazano w drzewostanach sosnowych na subborealnym borze mieszanym *Serratulo-Pinetum* (J.MAT.1981), tj. zbiorowisku boru mieszanego sosnowo-świerkowo-dębowego (o bardzo bogatym składzie florystycznym). Ujemne korelacje wykazano dla par zmiennych smukłość oraz zespół roślinny oraz smukłość i wartość NDVI. Może to potwierdzać fakt, iż wykształcone ekotypy sosny o wysokiej smukłości wcale nie musiały wzrastać na bardzo żyznych siedliskach a wartość TSC kształtowana była przez różne czynniki środowiskowe (konkurencja o światło) i prowadzone zabiegi przez leśników w ostatnich 200 latach. Wątpliwość recenzenta budzi jedynie brak weryfikacji struktury pionowej (piętra drzewostanu wraz z dominującym gatunkiem) oraz wartości zwarcia poziomego, gdyż drzewostany sosnowe w tym wieku (130-268 lat; Tab.1; str. 90) nie są w stanie utrzymać pełnego zwarcia koron, tak więc wskaźniki roślinności (NDVI) raczej dotyczą nie samych koron sosen a całych drzewostanów (prawdopodobnie są to rezerwaty), w których sosna występuje, być może pojedynczo górując nad pozostałymi piętrami drzewostanu liściastego. Dobrą weryfikacją w pracy, byłaby choćby analiza chmur punktów ALS LiDAR ale i walidacja w terenie.

Uzyskane przez Autorów wyniki zostały wykorzystane do opracowania **zgłoszenia patentowego (poz. 4)** dotyczącego metody określania stopnia uwilgotnienia siedlisk leśnych na podstawie analiz zobrażeń satelitarnych Sentinel-2 (ESA). W zgłoszeniu umieszczono w zasadzie tekst wyłącznie bazujący na publikacji nr 1. Zamieszczone sprawozdanie o stanie techniki wykonane przez UP RP jest pewnego rodzaju urzędową oceną szans na uzyskanie patentu. Dokument został wykonany 10.06.2022, więc prawie 1,5 roku temu i recenzentowi nie są znane dalsze kroki wnioskodawców czy dążą oni do końcowego opatentowania zgłoszonego wynalazku? Tak czy inaczej, jest to dość niekonwencjonalna forma zastrzeżenia

wyłączności do zastosowanej naukowej metody oceny uwilgotnienia siedliska opierająca się na znanym od dziesięcioleci wskaźniku NDVI. Niewątpliwie, dążenie do opatentowania przedstawionej metody jest warte uwagi i podkreśla asertywność badaczy w upowszechnianiu i komercjalizacji wyników prac naukowych, co współcześnie jest dobrze postrzegane choćby w procesie ewaluacji jednostek badawczych.

Doktorant w swej dysertacji prezentuje zastosowanie praktyczne metody zgłoszonej do urzędu patentowego RP, która znalazła swoje miejsce w opracowaniu (**poz. 5**) Operatu Siedliskowego Nadleśnictwa Karnieszewice realizowanej przez Biuro Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej Oddział w Poznaniu na zlecenie Regionalnej Dyrekcji Lasów Państwowych w Szczecinku, w roku 2023. Na podstawie załączonej dokumentacji bardzo trudno jednak jest ocenić recenzentowi, jaki faktycznie był udział Doktoranta, który zadeklarował 30% swego zaangażowania w pracę Zespołu. Przedstawiona dokumentacja Operatu nie wskazuje w zasadzie w żaden sposób na bezpośrednie prace Zespołu (deklaracje od strony 182 dysertacji) a jedynie na udział samego promotora prof. dr hab. Pawła Rutkowskiego (wsparcie naukowe) jako autora rozdziału (str. 121 dysertacji). Autor rozdziału 7.3.1.1. Operatu (co ciekawe nie jest on ujęty jako członek całego opracowania) rzeczywiście wskazuje w tekście na podjęcie **próby wykorzystania** nowoczesnych metod **opracowanych przez Zespół** i objętych zgłoszeniem patentowym do oceny uwilgotnienia siedlisk leśnych w niewielkim kompleksie składającym się z około 20 oddziałów leśnych nad jeziorem Bukowo (leśnictwo Iwięcino). O ile mógł on wykorzystać opracowaną metodę to nie wskazywani są autorzy rozdziału ale pośrednio są oni twórcami zgłoszenia patentowego. Pan prof. Rutkowski argumentuje potrzebę weryfikacji teledetekcyjnej, decyzji przeklasyfikowania znacznej części siedlisk ze świeżych na wilgotne, podjętych na podstawie prac terenowych zespołów BULiGL. Trudno recenzentowi podjąć dyskusję z zamieszczonymi na stronie 123 dysertacji Ryciną 4, gdyż tak w zasadzie, to recenzuje on chyba promotora a nie doktoranta. Autor rozdziału pisze, iż z ryc. 4 wynika, że w obszarze dominują siedliska wilgotne, ale na ilustracji (ryc. 4) brak jest możliwości oceny wartości NDVI choćby w oparciu o skalę kolorów. Poza tym, podpis „zmiany wskaźnika” pociąga za sobą raczej prezentację zmiany o jakąś wartość, a nie zmienność przestrzenną wskaźnika w poszczególnych latach. Bez zaprezentowania tabelarycznego, czy nastąpiły jakieś zmiany wartości NDVI w grupach stratyfikacyjnych siedlisk, trudno jest ocenić wyniki. Brak jest też informacji o sumie opadów poprzedzających akwizycje obrazowań z lat 2018-2021 czy przebiegu temperatur, co ma podstawowe znaczenie dla tego typu gleb opadowo-glejowych. Warte pochwały jest jednak analizowanie kilku lat, choć warto sięgnąć aż do roku 2015 (jeśli występują bezchmurne obrazowania) co poszerzyło by stan wiedzy na temat fluktuacji związanych ze zmianami klimatycznymi o kolejne 3 lata (plus rok 2022 to już 4 lata).

Wyniki analizy obrazowań satelitarnych S-2 (ESA) niewątpliwie dały uzasadnienie do pojętych decyzji przez klasyfikatorów w zakresie zmiany uwilgotnienia na wyższe co skutkuje w zasadzie na preferowanie dęba szypułkowego jako głównego gatunku lasotwórczego. Bardzo szkoda, że nie zaprezentowano proponowanych typów drzewostanów dla leśnictwa Iwięcino czyli rozdziału 7.3.1. a skopiowano tylko tylko podrozdział 7.3.1.1. (zresztą chyba eksperymentalny w skali całego N-ctwa).

Pochwalić jednak należy (teraz recenzent ma kłopot: czy Promotora czy Doktoranta ale chyba obu) choćby za próbę wdrażania w pracach BULiGL technologii bazujących na teledetekcji satelitarnej, co w konsekwencji może prowadzić do weryfikacji i aktualizacji map glebowo -siedliskowych tak rzadko wykonywanych (okresy 30 letnie) w PGL LP ze względu na kosztochłonność.

Jako ostatnie opracowanie (**poz. 6**) składające się na pracę doktorską załączono manuskrypt zgłoszony do publikacji (iForest), który jak rozumie recenzent wciąż znajduje się w fazie recenzji wydawniczej. Praca porównuje skuteczności przedstawionej we wcześniejszych artykułach teledetekcyjnej metody predykcji wilgotności siedlisk leśnych w zupełnie odmiennych ekosystemach leśnych w oparciu o zaawansowane metody statystyczne. Umożliwiło to uwzględnienie w analizie dużej liczby zmiennych tj. czynników siedliskowych i opracowanie zaawansowanych modeli do predykcji stopni uwilgotnienia siedlisk leśnych na podstawie wielospektralnych zobrazowań satelitarnych. Praca na ta na tle innych załączonych do dysertacji pozycji jest niewspółmiernie szczegółowo opisana w języku polskim w przewodniku do dysertacji. Autorzy pracy opisywali użycie analizy statystycznej do oceny, które z 38 wybranych parametrów środowiskowych pogrupowanych w 4 grupy: wysokość n.p.m. (model SRTM; 10 klas); typy roślinności (11 klas), typy gleb (9 klas) oraz geologia (8 klas) wykazują korelację z oceną siedlisk pod kątem ich wilgotności (IV grupy g1-g4) wykorzystując zdalne metody wskaźnika NDVI. Jak zaznaczają Autorzy, celem nie było jednak wprost udowodnienie iż NDVI można wykorzystać to określania uwilgotnienia a raczej potwierdzenia ze modelu wilgotności siedlisk bazującego na jego wartościach. Użyto macierzy kowariancji, algorytmów do redukcji dwuwymiarowej (PCA oraz UMAP) i zbudowano klasyfikator uwilgotnienia. Testy przeprowadzono z użyciem algorytmów: LDA QDA, Logistic regression, SVM oraz RF wykorzystując bibliotekę *scikit-learn*. Obliczenia prowadzono w siatce o oczku 1 km. W wyniku prac autorzy sklasyfikowali analizowane siedliska na bazie zobrazowań satelitarnych z okresu 2018-2021 do 4 klas uwilgotnienia g1(mokre) - g4 (suche). Dzięki badaniu zmienności uwilgotnienia w wielu aspektach wpływu zmiennych środowiskowych, wskazano granicę dzielącą dwa ważne biomy w Brazylii tj. Cerrado oraz Mata Atlantica, podkreślając również występującą silną antropopresję prowadzącą do deforestacji żyźniejszych i wilgotniejszych siedlisk.

**Za najważniejsze osiągnięcia badawcze** opisane w pracy doktorskiej Pana mgr Adama Młynarczyka należy wskazać udokumentowanie zależności statystycznych pomiędzy wartościami promieniowania elektromagnetycznego (PEM) odbijanego od powierzchni drzewostanów i rejestrowanego przez sensory MSI zamontowane na satelitach S-2 ESA – czyli wskaźnika NDVI (najistotniejszy spośród wszystkich testowanych indeksów) oraz zawartością wody prawdopodobnie w koronach drzew 1 piętra a pośrednio także w glebie, co w konsekwencji umożliwiło opracowanie metody oceny stanu uwilgotnienia siedlisk leśnych. W podejściu teledetekcyjnym zaproponowano więc nową klasyfikację siedlisk leśnych pod kątem stopnia ich uwilgotnienia. Dzięki tej metodzie możliwe jest wyznaczanie na obrazach satelitarnych homogenicznych obszarów drzewostanów reagujących podobnie na stopień uwilgotnienia wykazując tym samym odpowiednią klasę troficzności siedliska przy uwzględnieniu innych parametrów jak gleba czy podłoże geologiczne. Zastosowanie metody analizy wieloczasowej pozwoliło na potwierdzenie najkorzystniejszego terminu akwizycji satelitarnych obszarów

leśnych a przetestowanie wielu indeksów spektralnych na wskazanie najbardziej efektywnego (najwyższa istotność).

Istotne osiągnięcia naukowe przedstawione w dysertacji mgr Adama Młynarczyka można sformułować w następujących punktach:

- opracowanie zaawansowanych metod modelowania statystycznego dla celów predykcji stopnia uwilgotnienia siedlisk leśnych wykonanych na podstawie analizy wielospektralnych obrazowań satelitarnych S-2 (ESA);
- zweryfikowanie skuteczności metody szacowania wilgotności siedlisk w warunkach innych biomów leśnych (Mata Atlantica) na obszarze Brazylii w Ameryce Południowej;
- wykorzystanie analiz bazujących na obrazowaniach satelitarnych S-2 (ESA) do predykcji potencjalnych kierunków ekspansji zasięgu jaworzyn w Polsce i Europie;
- określenie zależności pomiędzy wartościami spektralnymi rejestrowanymi przez sensor MSI satelity Sentinel-2 (ESA) a wybranymi zmiennymi (cechy biometryczne: H, d, smukłość pnia oraz cecha: zbiorowisko roślinne) reprezentującymi poziom troficzności siedlisk dla drzewostanów sosnowych charakteryzujących się zróżnicowaniem ekotypowym;
- opracowanie metody rangowania drzewostanów złożonych z ekotypów sosny zwyczajnej na tle innych gatunków lasotwórczych pod kątem zachowania trwałości zasobów leśnych z wykorzystaniem metod teledetekcyjnych (wskaźnik NDVI).

Podsumowując ocenę merytoryczną pracy, należy stwierdzić, iż pomimo opisanych uwag czy wątpliwości zgłoszonych przez recenzenta (a taka jest jego rola), wyniki uzyskane w badaniach opisanych w przedłożonej rozprawie doktorskiej - **są cenne zarówno z powodów naukowych jak i wdrożeniowych**. Opracowana na ich podstawie metoda weryfikacji prac terenowych czy teledetekcyjnego wyznaczania stopnia uwilgotnienia siedlisk leśnych została zgłoszona w Urzędzie Patentowym RP, a o jej pierwszej przydatności praktycznej świadczy jej wykorzystanie w procesie przygotowania Operatu siedliskowego przez BULiGL w Poznaniu dla Nadleśnictwa Karnieszewice.

Należy podkreślić, że wyniki zaprezentowane w przedłożonej pracy doktorskiej były rezultatem badań mających charakter interdyscyplinarny i przez ten fakt praca doktorska mgr Adama Młynarczyka wnosi duży wkład w rozwój wiedzy w zakresie badań nad charakterystykami spektralnymi drzewostanów i praktycznego ich wykorzystania w monitorowaniu i zarządzaniu obszarami leśnymi.

### **Uwagi szczegółowe**

1. Bardzo ważnym zagadnieniem wartym przedyskutowania podczas obrony publicznej doktoranta będzie jego podejście do pojęcia zastosowanego w tytule dysertacji, czyli „troficzność siedliska leśnego”. Recenzent ma wrażenie, że zaprezentowane opublikowane prace w zasadzie pomijają ocenę troficzności samej gleby mającej ogromny wpływ na kształtowanie się siedliskowego typu lasu. Doktorant postrzega chyba troficzność siedliska leśnego jedynie poprzez jego uwilgotnienie i to w zasadzie warstwy koron drzew (rejestrowane na obrazowaniach), a nie bezpośrednio wilgotność samej gleby. Zresztą na stronie 13 w pierwszym akapicie, Doktorant uznaje wodę (nie pisze czy jest ona dostępna dla systemów korzeniowych drzew czy innych roślin zielnych runa) za najistotniejszy czynnik

różnicujący troficzność siedlisk. Według przyjętych powszechnie metodyk, do oceny troficzności gleby, tj. sumy biogennych kationów i anionów wpływających na jej stan, a tym samym uziarnienie, kwasowość czy zawartość azotu (ściśle związane z rozkładem materii organicznej) stosuje się tzw. Siedliskowy Indeks Glebowy (SIG). Został on wprowadzony jako narzędzie wspierające diagnozę troficzności siedliska leśnego opartą na waloryzacji ilościowej zastępującą mniej obiektywną diagnozę opartą na typie i podtypie gleby. Wskaźnik SIG, wyliczany na podstawie wybranych właściwości gleby, odzwierciedla jej żyzność w długofalowym ujęciu odpowiednim dla gospodarki leśnej, ale w pewnym stopniu uwzględnia też on modyfikacje troficzności gleby powodowane jej nawożeniem lub wapnowaniem czy niedopasowaniem do siedliska leśnego składu gatunkowego drzewostanu. Trzymając się definicji wg. Instrukcji Urządzania Lasu - **typ siedliskowy lasu** (TSL; typ siedliska leśnego) jest podstawową jednostką w systemie klasyfikacji siedlisk leśnych, obejmującą powierzchnie leśne o **zbliżonych warunkach siedliskowych wynikających z żyzności i wilgotności gleb**, podobieństwa cech klimatu oraz ukształtowania terenu i jego budowy geologicznej; - obszary należące do tego samego typu siedliskowego lasu wykazują podobne zdolności produkcyjne i przydatność dla hodowli lasu; - typy siedliskowe lasu określa się oddzielnie dla terenów nizinnych, wyżynnych i podgórskich oraz górskich. Oczywiście niepodważalny wpływ na trofizm, a w zasadzie na produktywność siedliska ma jego uwilgotnienie (wilgotność), gdyż w pewnych sytuacjach pomimo wysokiego trofizmu gleb, roślinność może nie być w stanie wykorzystać substancji biogennych ze względu na czynnik ograniczający jakim może być brak dostępnej wody w glebie (np. obniżenie lustra wód gruntowych). Przedstawione założenia na stronie nr 12 dysertacji jest w zasadzie tożsame z hipotezą badawczą, choć jest ona definiowana po przytoczeniu kilku założeń. Autor dysertacji pisze, iż „trofizm siedlisk leśnych wpływa na różnorodność szaty roślinnej i ilość zielonej biomasy wytwarzanej przez rośliny”. Według recenzenta wcale tak być nie musi, bo bywają przypadki, kiedy przy wysokiej troficzności siedliska mamy do czynienia z monokulturą charakteryzującą ubogą różnorodnością. Owszem trofizm jest silnie związany z produktywnością siedlisk i biomasą ale niekoniecznie zieloną biomasą. Dalej Doktorant pisze, iż „różnorodność szaty roślinnej związana z troficznością siedlisk znajduje odzwierciedlenie w różnicach, które mogą być uchwytnie przez wskaźniki spektralne”. To zdanie ma formę oznajmującą, a powinno być hipotezą wymagającą udowodnienia. Poza tym Autor w tym miejscu pracy naukowej stosuje żargon i uproszczenia, gdyż wskaźniki roślinne niczego nie „chwytają” ale to sensor i jego charakterystyka (np. rozdzielczość spektralna i radiometryczna) decyduje o czułości w zakresie detekcji różnic w rejestracji sygnału PEM odbitego od roślinności lub bezpośrednio od gleby. Tym samym zdefiniowana poniżej hipoteza nie do końca musi być poprawnie postawiona, a w zasadzie jest ona od początku trochę zbyt oczywista jak na badania naukowe i oparta jest na tzw. **odwróconej implikacji**. Autor dysertacji pisze bowiem stawiając hipotezę: „... *jeśli zróżnicowanie troficzne siedlisk leśnych wpływa poprzez zróżnicowaną szatę roślinną na różnice w zobrazeniach satelitarnych, to odwrotnie, na podstawie różnic w jasności pikseli na zobrazeniach można wykazać zróżnicowanie troficzne siedlisk leśnych*”. Dla przykładu recenzent zaprezentuje tutaj podobnie fałszywą hipotezę: *Jeśli dużo ludzi będzie jeździło samochodami w Krakowie, to powietrze w mieście będzie bardzo zanieczyszczone. Powietrze w mieście jest bardzo zanieczyszczone, więc samochody jeżdżą po Krakowie*. To wnioskowanie **jest niepoprawne** bo powietrze może być zanieczyszczone z całkiem innego powodu niż

spaliny samochodów (np. awaria filtrów w elektrociepłowni Łęg). Podobnie może być w przypadku teledetekcji, której wynik trzeba dobrze zweryfikować (zwalidować).

2. Recenzent nie znajduje szczegółowego zdefiniowania w tym miejscu co Doktorant rozumie pod pojęciem wskaźników pozwalających na ocenę troficzności siedliska leśnego. Proszę o udzielenie szczegółowej odpowiedzi w tym zakresie podczas publicznej obrony pracy. W opinii recenzenta, praca byłaby pełniejsza gdyby do analiz włączono w szerszym zakresie inne zmienne jak np. właściwości fizyko-chemiczne gleb leśnych.

3. Recenzent nie rozumie pojęcia „zielona biomasa” używanego wielokrotnie przez Doktoranta i prosi o uszczegółowienie czy chodzi wyłącznie o masę aparatu asymilacyjnego czy o biomasę części nadziemnej drzew (AGB).

4. W opinii recenzenta zabrakło we Wstępie przedstawienia aspektu wykorzystania fuzji danych z zakresu termalnego (pomimo, iż sensor S-2 go nie rejestruje a rejestruje np. L-8 NASA) czy bardziej szczegółowych opisów zastosowań sensorów hiperspektralnych czy mikrofalowych.

5. Autor nie dyskutuje w zasadzie w dysertacji trudności wykorzystania teledetekcji w obszarach leśnych do oceny troficzności siedlisk poprzez detekcję składu gatunkowego runa - czyli roślin wskaźnikowych bądź różnicujących. Typologia siedlisk leśnych nie opiera się bowiem wyłącznie na analizie stopnia uwilgotnienia gleby czy składu gatunkowego drzewostanu głównego, ale wykorzystuje między innymi obecność roślin wskaźnikowych do procesu decyzyjnego klasyfikacji. W warunkach obserwacji satelitarnych pozostają one w zasadzie poza możliwościami ich detekcji i nie tylko ze względu na bardzo małe ich rozmiary, ale przede wszystkim ich przesłonięcie przez korony drzewostanu głównego. Autorzy wskazują na wykorzystanie w swojej metodzie rejestracji satelitarnych w okresie pełnej wegetacji, kiedy drzewa posiadają w pełni rozwinięty aparat asymilacyjny, co najczęściej skutecznie blokuje rejestrację PEM odbijanego od warstwy runa. Warto wziąć ten aspekt pod uwagę.

6. Poważnym brakiem rozprawy jest pominięcie w badaniach stanu zdrowotnego drzew opisywanego np. stopniem defoliacji oraz określania zwarcia poziomego drzew. Te dwa parametry decydują o przenikaniu PEM w głąb drzewostanu od koron drzew aż do warstwy runa lub ściółki leśnej. Może zaistnieć bowiem sytuacja, iż analizowane są właściwości spektralne promieniowania elektromagnetycznego rejestrowanego teoretycznie na poziomie koron drzew a w rzeczywistości zamiast „czystej” odpowiedzi spektralnej zapisanej w obszarze piksela obrazu mamy do czynienia z tzw. „mikselem”, na który składa się też frakcja energii odbitej od warstwy runa (np. gęstych skupisk orlicy pospolitej) niemal swobodnie wędrująca do sensora S-2 przez ażurowe korony sosen o dużym uszkodzeniu rosnących w niewielkim zwarcu. Są to zasadnicze czynniki, których pomijać nie można szczególnie w analizie drzewostanów sosnowych, które w Polsce porastają około 60% lasów a duża ich część znajduje się w zaawansowanych klasach defoliacji.

7. Doktorant stosuje nazewnictwo „zdjęcie satelitarne”, kiedy powinien on unikać żargonu i precyzyjnie wyrażać treści naukowe czyli stosować pojęcie „zobrazowanie satelitarne”. Owszem pojęcie „zdjęcia” w teledetekcji istnieje ale raczej stosuje się go do przypadku zdjęć lotniczych czy analogowych zdjęć satelitarnych np. z misji CORONA (np. KH-4) czy wykonywanych przez rosyjski system satelitarny SPIN-2 (KVR-1000 czy TK-350).

8. Wydaje się zbędnym umieszczenie w rozdziale Wyniki rycin oraz tabel, które znajdują się w załączonych publikacjach, szczególnie wszystkich niemal z ostatniej publikacji (iForest).

9. W artykule nr. 1 nie podano końcowej liczby zobrazowań satelity Sentinel-2 (ESA), które wykorzystano w badaniach. W tym samym artykule (poz. 1) przydatna byłaby analiza wpływu warunków atmosferycznych na zmienność danych spektralnych w trzech analizowanych sezonach.

10. Wnioski płynące z przedłożonej pracy doktorskiej są zbyt skąpe i w zasadzie odnoszą się tylko do badań opisanych w artykule poz. 1.

11. Uwagi edytorskie: Tabela nr 1 (str. 14) – użyto określenia światło „widzialne” zielone a przy kanale niebieskim brak już słowa „widzialne” (zresztą zbędnego całkowicie). W przypadku kanału B8 powinno zastosować się opis „w zakresie bliskiej podczerwieni NIR).

### **Konkluzja**

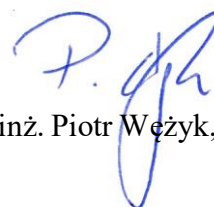
Rozprawę doktorską mgr inż. Adama Młynarczyka oceniam dobrze i stwierdzam, że stanowi ona oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a załączone w niej opublikowane oraz artykuły przedłożone do recenzji prace, a także udokumentowane zgłoszenie patentowe i jego pierwsze praktyczne wdrożenie - są powiązane tematycznie i **stanowią znaczący wkład doktoranta w nauki o Ziemi i środowisku.**

Wyniki uzyskane przez doktoranta i sposób w jaki zostały przedstawione w przedłożonej rozprawie pozwalają stwierdzić, że **posiada on dużą znajomość podjętego tematu**, zarówno w zakresie **teoretycznym teledetekcji** jak i w **praktycznym stosowaniu metod analiz statystycznych**, co przyczyniło się do osiągnięcia założonego celu badań.

**Przedstawiona rozprawa doktorska Pana mgr Adama Młynarczyka jest oryginalnym rozwiązaniem istotnego problemu naukowych badań** możliwości implementacji coraz dokładniejszych i bardziej efektywnych metodyk opartych na technologiach teledetekcyjnych wykorzystujących zobrazowania satelitarne w procesach monitorowania i zarządzania lasami.

**Wątpliwości recenzenta nie budzi wiedza Doktoranta oraz jego samodzielność prowadzenia badań naukowych** z zakresu przetwarzania zobrazowań satelitarnych z wykorzystaniem zaawansowanych metod statycznej analizy w tym uczenia maszynowego.

**Tym samym stwierdzam, iż recenzowana przeze mnie rozprawa doktorska Pana mgr Adama Młynarczyka, przygotowana pod opieką jego promotora - Pana prof. dr hab. inż. Pawła Rutkowskiego oraz dr hab. inż. Jana Piekarczyka, prof. UAM - w świetle kryteriów przewidzianych w art. 187 ust.1 i 2 ustawy z dnia 20.07.2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2021 r. poz. 478 z póź. zmianami) - spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim, stąd wnioskuję do Rady Dyscypliny Nauki o Ziemi i środowisku UAM o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**



dr hab. inż. Piotr Weżyk, prof. URK