

Łódź, dn. 21 lipca 2023 r.

dr hab. Włodzimierz Pawlak, prof. UŁ  
Zakład Meteorologii i Klimatologii  
Instytut Klimatologii i Hydrologii  
Wydział Nauk Geograficznych  
Uniwersytet Łódzki

### **Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Pauliny Dukat**

#### **pt. „Ocena wymiany wody i dwutlenku węgla pomiędzy różnowiekowymi lasami sosnowymi a atmosferą w skali drzewa i ekosystemu”**

Rozprawa doktorska Pani mgr Pauliny Dukat zatytułowana „Ocena wymiany wody i dwutlenku węgla pomiędzy różnowiekowymi lasami sosnowymi a atmosferą w skali drzewa i ekosystemu”, napisana została pod opieką dr hab. inż. Marka Urbaniaka, prof. UPP (promotor) i dr inż. Klaudii Ziemińskiej (promotor pomocnicza) z Pracowni Meteorologii Katedry Budownictwa i Geoinżynierii Wydziału Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu.

Celem nadrzędnym pracy było „przedstawienie znaczenia monitorowania zależności strumieni wymiany węgla i wody od występowania suszy w ekosystemie leśnym różnymi metodami”. Doktorantka sformułowała też cele szczegółowe, zgodnie z którymi zaplanowała określenie trendów w częstości i intensywności suszy w Europie Środkowej, określenie wpływu suszy na istotne z punktu widzenia funkcjonowania badanego ekosystemu procesy takie jak transpiracja, fotosynteza oraz przyrost biomasy wyrażone efektywnością wykorzystania węgla i wody oraz określenie przydatności pomiarów przepływu soków w drzewach w diagnostyce funkcjonowania lasu, zwłaszcza w warunkach suszy. Szeroko zakrojone prace badawcze przeprowadzono w latach 2019-2020 z zastosowaniem nowatorskich, logistycznie i metodologicznie zaawansowanych technik pomiarowych. Podczas prac nad realizacją celu badawczego wykorzystano dane pobrane ze strony Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej jak również, unikalne zestawy danych zebrane przez Doktorantkę podczas realizacji dwóch, szeroko zakrojonych projektów badawczych finansowanych przez Lasy Państwowe, jak również w ramach

projektów w ramach współpracy z Uniwersytetem w Helsinkach oraz środków pozyskanych z Akademii Fińskiej.

Ocena czasowej i przestrzennej intensywności wymiany gazów cieplarnianych między podłożem a atmosferą jest jednym z najważniejszych problemów współczesnej nauki. Sam problem badawczy zawiera się oczywiście w szeroko pojętym nurcie badań przyrodniczych, jednak należy pamiętać, że wyniki badań nad gazami cieplarnianymi wykorzystywane są również w naukach ekonomicznych, politycznych, społecznych itd. Szczególne miejsce w badaniach tego typu zajmują ekosystemy leśne, będące, naturalnym lub antropogenicznym „magazynem” węgla organicznego oraz niezwykle istotnym elementem krajobrazu regulującym wymianę wody z atmosferą. Z dotychczasowych badań wynika, że ekosystemy te intensywnie pochłaniają dwutlenek węgla oraz transpirują wodę, przy czym wiadomo, że tempo tych procesów ściśle zależy od panujących warunków klimatycznych. Wiadomo również, że obserwowana obecnie zmiana klimatu istotnie wpływa na wymianę wody i dwutlenku węgla. Jednym z efektów ocieplenia klimatu, który notowany jest między innymi w Polsce, są pojawiające się coraz częstsze i długotrwałe susze, o których wiadomo, że w skrajnie intensywny sposób wpływają nie tylko na wymianę gazów cieplarnianych ale na „kondycję” ekosystemów leśnych w ogóle. Bezpośrednie, ciągłe pomiary strumieni takich gazów jak para wodna i CO<sub>2</sub>, które w związku z powyższym należy uznać za priorytetowe, prowadzone są na świecie dopiero od kilkunastu lat a liczbę stanowisk pomiarowych należy uznać za wciąż niewystarczającą. Przyczynami tej sytuacji są wysokie koszty stanowisk pomiarowych oraz bardzo rozbudowana logistyka i metodyka, która wciąż nie została do końca ustandaryzowana. W Polsce bezpośrednie pomiary strumieni gazów cieplarnianych (na terenach leśnych, podmokłych, użytkowanych rolniczo czy zurbanizowanych) z podobnych przyczyn prowadzone są przez zaledwie kilka grup badawczych, co należy uznać za wysoce niezadowalające. Wieloletnie, ciągłe pomiary wymiany gazów między ekosystemami leśnymi a atmosferą prowadzone są w Polsce, zgodnie moją wiedzą, jedynie przez grupę badawczą z Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Pomiary te, realizowane w dwóch różnowiekowych lasach sosnowych za pomocą metody kowariancji wirów pozwoliły na pozyskanie unikatowych w skali nie tylko krajowej ale również międzynarodowej baz danych, w czym brała udział Pani mgr Paulina Dukat. Metoda kowariancji wirów uznawana jest za najlepszą i najdokładniejszą metodę pomiaru strumieni masy, lecz mimo niezwykle cennych wyników nie jest pozbawiona ograniczeń. Najważniejszym z nich jest możliwość wyliczania końcowego strumienia jedynie o charakterze netto a zatem bez

informacji o składowych strumieniach wpływających na wymianę całkowitą. Tak zwanego rozkładu strumienia netto na składowe najczęściej dokonuje się za pomocą różnego rodzaju rozwiązań statystyczno – modelowych, co nie zawsze jest wystarczające lub odpowiednio dokładne. Pani mgr Paulina Dukat zdecydowała się uzupełnić pomiary prowadzone metodą kowariancji wirów, dodatkowymi, realizowanymi równolegle pomiarami przepływu pary wodnej i dwutlenku węgla przez drzewo (między innymi metoda dendrometryczna oraz przepływu soków przez drzewo). Takie podejście badawcze w polskich lasach zdecydowanie należy do rzadkości. W efekcie, otrzymane wyniki wymiany wody i dwutlenku węgla, pozwoliły na pozyskanie wyników zarówno w skali drzewa jak i ekosystemu. W rezultacie rozprawa Pani mgr Pauliny Dukat stanowi bardzo ważny przyczynek do badań tego typu, a wyniki prezentowane przez Doktorantkę mają szansę być zauważone w międzynarodowym środowisku naukowym.

### **Opis rozprawy**

Rozprawa składa się z 88 stron oraz załącznika. Zasadniczą częścią opracowania są trzy, w mojej ocenie spójne tematycznie, opublikowane w języku angielskim artykuły naukowe. Doktorantka poprzedziła je 21-stronicowym wprowadzeniem streszczającym szczegóły wyników opisanych w wymienionych wyżej artykułach oraz wskazującym na realizację zdefiniowanych celów badawczych w artykułach stanowiących podstawę opracowania. W załączniku umieszczono oświadczenia Doktorantki o oryginalności pracy, jej samodzielnym przygotowaniu i nienaruszeniu praw autorskich oraz oświadczenia współautorów artykułów o zakresie i skali udziału w ich przygotowaniu. Artykuły opublikowano w czasopismach posiadających impact factor o wartości od 2.29 do 3.28 o punktacja 70 pkt (jeden artykuł) oraz 100 punktów (dwa artykuły) według punktacji zawartej na liście Ministra Edukacji i Nauki. Wszystkie artykuły mają charakter wieloautorski (od 4 do 6 autorów) ale na podstawie załączonych oświadczeń można stwierdzić, że udział Pani mgr Pauliny Dukat w każdym z nich sięgał powyżej 60% zatem należy uznać go za wiodący. Układ pracy jest logiczny i spełnia warunki stawiane opracowaniom naukowym. Bibliografia dobrana jest właściwie i umiejętnie wykorzystana we wszystkich rozdziałach rozprawy. Język jakim napisana jest praca (zarówno polskojęzyczne wprowadzenie jak i anglojęzyczne artykuły) należy określić jako poprawny, umożliwiający precyzyjne śledzenie wyводу Doktorantki. Wprowadzająca część opracowania poparta została spisem literatury obejmującym 32 głównie anglojęzyczne artykuły (nie cytowane w tekście), ściśle związane

z tematyką dysertacji. Każdy z trzech artykułów również poparty został bardzo obszernym spisem literatury obejmującym odpowiednio 44 (artykuł nr. 1), 77 (artykuł nr. 2) oraz 111 pozycji (artykuł nr 3).

Główny cel pracy, podobnie jak cele szczegółowe, zdefiniowane zostały w części wprowadzającej. Doktorantka przedstawiła w niej również trzy hipotezy badawcze, zgodnie z którymi jako rezultatów swoich badań spodziewała się rosnącego trendu występowania i intensywności suszy w ostatnich 50 latach w Europie Środkowo – Wschodniej (hipoteza 1), istotnego wpływu suszy na szeroko pojętą kondycję badanych drzewostanów (hipoteza 2) oraz tego, że transpiracja drzewostanu sosnowego oszacowana metodą przepływu soków jest lepszym wskaźnikiem skutków suszy w porównaniu z tą samą wielkością uzyskaną z pomiarów kowariancji wirów (hipoteza 3).

21-stronicowe wprowadzenie w logiczny i bardzo konkretny sposób wprowadza również w zastosowaną metodykę oraz w wyniki badań zawarte w artykułach i bardzo dobrze spaja całość pracy. W mojej opinii, w tej części Doktorantka udowodniła, że artykuły umieszczone w dalszej części opracowania mają charakter spójnego, monotematycznego opracowania, ponadto w zwięzły sposób opisała w jaki sposób osiągnęła założone cele badawcze, jakie uzyskała wyniki oraz krótko przedyskutowała ich znaczenie. Za zasadniczą część dysertacji uważam jednak trzy artykuły naukowe stanowiące w mojej opinii kolejne rozdziały opracowania.

W pierwszym z nich „*Trends in drought occurrence and severity at mid-latitude European stations (1951–2015) estimated using standardized precipitation (SPI) and precipitation and evapotranspiration (SPEI) indices*”, Doktorantka (wraz ze współautorami) zajęła się szeroko pojętym problemem pojawiania się suszy. W badaniach nie ograniczyła się do rejonu w którym zlokalizowane są badane drzewostany sosnowe a analizy przeprowadziła dla wybranych sześciu stacji w Europie Środkowo-Wschodniej. Analizę trendów intensywności i częstości występowania suszy przeprowadzono za pomocą takich wskaźników jak SPEI (standaryzowany klimatyczny bilans wodny) oraz SPI (znormalizowany wskaźnik opadów) dla wielolecia 1950-2015. Wskaźniki te, mimo, że wymagają jako danych wejściowych typowych zmiennych takich jak, na przykład miesięczne sumy opadów czy średnie miesięczne temperatury powietrza, mają charakter zaawansowany, ze względu chociażby na konieczność dopasowywania odpowiednich rozkładów prawdopodobieństwa do danych historycznych (wskaźnik SPI) czy wyliczania dodatkowej zmiennej takiej jak potencjalna ewapotranspiracja (wskaźnik SPEI).

Zarówno dobór wskaźników, jak również długi okres badawczy (65 lat) jest świadectwem dużej dbałości o prawidłowość uzyskanych wyników i wyciągniętych wniosków. Obliczeń wartości wskaźników Doktorantka dokonała za pomocą odpowiednich „pakietów” środowiska obliczeniowego R. Sprawne posługiwanie się takim narzędziem obliczeniowym uważam za ważną umiejętność Doktorantki z punktu widzenia prowadzenia badań naukowych jako takich. Artykuł zawiera następnie szeroką i szczegółową dyskusję rezultatów, z których wynika, że liczba i intensywność susz w Europie Środkowo-Wschodniej z dużym prawdopodobieństwem będzie rosła oraz, że dotyczy to nie tylko susz meteorologicznych (atmosferycznych) ale również glebowych. Warto wspomnieć, że użyte w artykule wskaźniki wykorzystano również do określenia warunków w latach 2019 i 2020, w których prowadzono pomiary wymiany pary wodnej i dwutlenku węgla w drzewostanach sosnowych. Potwierdziły one wystąpienie rozległej, intensywnej suszy w 2019 roku oraz epizodyczne susze w roku 2020. Z punktu widzenia całości rozprawy oraz jej spójności, uważam umieszczenie powyższego artykułu jako pierwszego za krok za logiczny i bardzo korzystny. W ten sposób Doktorantka, mimo że zasadniczy cel badawczy dysertacji realizowała pracując z raczej krótkimi (głównie dwuletnimi) seriami danych, była uprawniona do prowadzenia szerszego wyводу o wpływie suszy na drzewostany sosnowe bez konieczności ograniczania się do studium przypadku z lat 2019 i 2020. Takie podejście w mojej opinii świadczy o umiejętności prawidłowego planowania szeroko zakrojonych badań naukowych.

Głównym celem artykułu drugiego, „*Estimation of Biomass Increase and CUE at a Young Temperate Scots Pine Stand Concerning Drought Occurrence by Combining Eddy Covariance and Biometric Methods*”, było oszacowanie zmian przyrostu biomasy netto (NPP) 26-letniego sosnowego drzewostanu na stanowisku Mężyk (Nadleśnictwo Potrzebowice) ze szczególnym uwzględnieniem wpływu suszy. Powyższy cel uważam za bardzo ambitny i wymagający zastosowania zaawansowanych metod badawczych, ze względu na brak możliwości wyznaczenia NPP za pomocą pomiaru bezpośredniego. Doktorantka (wraz ze współautorami) zastosowała zatem szereg metod badawczych. Po pierwsze pomiary turbulencyjnych strumieni pary wodnej i dwutlenku węgla (metodą kowariancji wirów z krokiem czasowym 30 minut) umożliwiły pozyskanie wartości NEE strumieni CO<sub>2</sub>. Następnie, zgodnie z ogólnie przyjętą metodyką, wartości NEE rozłożono na podstawowe składowe czyli GPP (przyrost biomasy brutto) oraz Reco (oddychanie ekosystemu). Do osiągnięcia celu badawczego konieczne było zastosowanie pomiarów i metod dodatkowych takich jak pomiary dendrometryczne

(przyrostu pierśnicy drzew) oraz inwentaryzacyjne pomiary biomasy drzewostanów (powyżej i poniżej powierzchni gruntu). Za pomocą równań allometrycznych wyznaczono przyrost suchej biomasy w przeliczeniu na hektar badanego drzewostanu. Ostatnim krokiem było wyznaczenie wartości NPP oraz wskaźnika efektywności wykorzystania węgla CUE (NPP/GPP), który względnie określa ile CO<sub>2</sub> pochłoniętego w procesie fotosyntezy zostało trwale związane w biomase drzew. W artykule wykazano wyraźnie niższą efektywność wykorzystania węgla przez 26-letni las sosnowy w roku z intensywną suszą. Bardzo szczegółowo przedstawione wyniki uzupełnia ich równie szczegółowa, by nie rzec drobiazgowa dyskusja. Tą część dysertacji uważam za duże osiągnięcie Doktorantki – dobór metod badawczych, ich zróżnicowanie, precyzyjne zaplanowanie i dokładne przeprowadzenie świadczy o bardzo dobrych umiejętnościach logistycznych i metodologicznych pani mgr Pauliny Dukat. Z kolei szczegółowa analiza wyników, połączenie ich w spójną całość i szczegółowe przedyskutowanie świadczy o umiejętności syntezy danych pochodzących z różnych źródeł dla osiągnięcia celu badawczego.

Ostatnią część dysertacji stanowi trzeci artykuł „*Scots pine responses to drought investigated with eddy covariance and sap flow methods*”, którego nadrzędnym celem było wyznaczenie transpiracji 26- i 68- letniego drzewostanu sosnowego oraz wykazanie różnic w wynikach związanych ze stosowaniem różnych metod pomiarowych. Również w tym przypadku cel można określić jako trudny do zrealizowania ponieważ transpiracji drzewa sosnowego nie da się zmierzyć bezpośrednio. Podobnie jak w opisanych wcześniej badaniach nad przyrostem biomasy, również w tym przypadku punktem wyjścia były ciągłe pomiary strumieni turbulencyjnych CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>O, zrealizowane za pomocą metody kowariancji wirów w dwóch różnowiekowych drzewostanach sosnowych (26 i 68 lat, odpowiednio stanowisko Mężyk, Nadleśnictwo Potrzebowice oraz Tuczno, Nadleśnictwo Tuczno). Dzięki temu uzyskano szeregi 30 minutowych wartości strumienia ciepła utajonego netto, które po prostych przeliczeniach przekształcono w wartości ewapotranspiracji ET. Transpirację, czyli składową ET będącą efektem uwalniania wody do atmosfery przez aparaty szparkowe drzew, wyznaczono dwoma metodami. Pierwsza zakładała wyizolowanie wartości T z ET znaną z literatury metodą wykorzystującą zależność ET od GPP i niedosytu wilgotności, drugą zrealizowano poprzez pomiary przepływu soków przez drzewa (metoda sap flow) za pomocą techniki propagacji impulsu termicznego w tkance przewodzącej pnia. W ten sposób uzyskano unikatowe w skali krajowej serie wartości transpiracji oraz jej udziału w procesie ewapotranspiracji. Dla pogłębienia analizy wyliczono jeszcze wskaźnik wykorzystania wody (WUE) obrazujący straty wodnej drzewa

na przyrost biomasy. Bardzo szczegółowa dyskusja wyników pozwoliła na wyciągnięcie szeregu wniosków, w których wskazano, między innymi, na zalety i wady zastosowanych dwóch metod pomiaru transpiracji oraz podkreślono specyficzną strategię drzew dążącą do minimalizowania strat wody na korzyść sekwestracji węgla prowadzącej do przyrostu biomasy. W mojej ocenie, również ten artykuł należy ocenić bardzo wysoko. Podobnie jak w przypadku artykułu poprzedniego postawiono ambitny cel badawczy a do jego osiągnięcia wykorzystano zaawansowane techniki badawcze. Doktorantka wykazała się zastosowaniem kolejnej metody badawczej, umiejętnością koordynacji badań oraz szczegółowej dyskusji nad wynikami.

### **Ocena merytoryczna rozprawy**

Dokonując merytorycznej oceny rozprawy należy przede wszystkim zwrócić uwagę czy prezentuje ona wyniki oryginalnych badań naukowych, które powinny stanowić podstawę ubiegania się o uzyskanie stopnia naukowego doktora. Przedstawiona do oceny praca zawiera analizę nowatorskich, bardzo szeroko zakrojonych badań empirycznych, co pozwala stwierdzić, że warunek ten został w pełni spełniony. W szczególności:

- 1) Określono trendy i częstotliwości występowania suszy w Europie Środkowo-Wschodniej w latach 1951-2015
- 2) Wyznaczono strumienie pary wodnej i dwutlenku węgla na dwóch stanowiskach w różnowiekowych drzewostanach sosnowych w latach 2019-2020. Regularne długoterminowe pomiary strumieni gazów cieplarnianych w ekosystemach leśnych mają charakter unikatowy nie tylko w Polsce, ale również w skali międzynarodowej.
- 3) Wyznaczono wartości produktywności pierwotnej netto NPP drzewostanu sosnowego, co zdecydowanie stanowi rzadkość w krajowych badaniach nad wymianą masy między terenami pokrytymi roślinnością a atmosferą.
- 4) W celu określenia wpływu suszy na przyrost biomasy w 26-letnim lesie sosnowym zastosowano kombinację zaawansowanych metod badawczych (kowariancji wirów, dendrometryczną oraz inwentaryzacji suchej biomasy). Uzyskane wyniki należy ocenić jako szczególnie unikatowe.
- 5) Za pomocą dwóch zaawansowanych metod wyznaczono wartości transpiracji w dwóch różnowiekowych drzewostanach sosnowych.

- 6) Zbadano stosowalność metody kowariancji wirów oraz pomiaru przepływu soków w drzewie do określania transpiracji ze szczególnym uwzględnieniem suszy.

Godna podkreślenia jest również dbałość Doktorantki o jakość uzyskanych wyników, zarówno w fazie pomiarowej, jak i obliczeniowej. Na podstawie lektury dysertacji można stwierdzić, że Doktorantka dogłębnie poznała zastosowane metody badawcze, zna ich zalety, a jednocześnie nie unika dyskusji nad cechującymi je ograniczeniami. Potrafi ocenić jakość pozyskanych danych, zdaje sobie sprawę z tego jak wiele zależy od prawidłowego doboru metody i jej właściwego zastosowania. Jako przykłady takiego podejścia można wymienić chociażby szczegółową dyskusję nad wyznaczaniem głównych momentów i okresów w procesie przyrostu drzew (artykuł numer 2) czy skalowaniem wyników od pojedynczych drzew do drzewostanu (artykuły 2 i 3). Uwagę zwraca również bardzo szczegółowy opis miejsc w których przeprowadzono badania oraz samych eksperymentów pomiarowych a dbałość o wszelkie szczegóły jest (z niewielkimi wyjątkami, które przedstawię w krytycznej części recenzji) imponująca. Zdecydowanie podkreślić należy również wachlarz dyscyplin, w których mogą być wykorzystane przedstawione w dysertacji wyniki – od leśnictwa i gospodarki leśnej, przez klimatologię i ekologię po wykorzystanie jako dane wejściowe do różnego rodzaju algorytmów modelujących czy parametryzujących procesy zachodzące w ekosystemach leśnych.

Rolą recenzenta jest też wskazanie słabszych stron pracy, które jak każde dzieło naukowe, posiada przedłożona rozprawa doktorska.

Przede wszystkim Doktorantka nie opisuje jaki był konkretnie jej udział w przeprowadzanych badaniach terenowych. Do dysertacji dołączono wprawdzie oświadczenia wszystkich współautorów artykułów o procentowym udziale w ich powstawaniu oraz zakresie podjętych działań ale na tej podstawie trudno wywnioskować czy Doktorantka brała udział we wszystkich eksperymentach pomiarowych? Czy sama instalowała wszystkie przyrządy i rejestrowała dane? Czy dokonała wszystkich obliczeń czy korzystała z gotowych baz danych? Eksperymenty pomiarowe finansowane były w ramach grantów badawczych, zatem należy się domyślać, że ich instalacją, uruchomieniem, działaniem, konserwacją oraz wyliczaniem np. strumieni gazów cieplarnianych i innych analizowanych w dysertacji parametrów zajmował się zespół/zespoły badawcze a nie tylko sama Doktorantka. Rozprawa doktorska ma przecież udowodnić, że Doktorantka potrafi samodzielnie rozwiązać problem badawczy (pod opieką promotorów). Na



podstawie lektury dysertacji mogę przyjąć, że Doktorantka uczestniczyła we wszystkich eksperymentach pomiarowych, są to jednak tylko moje domysły. Niezbyt precyzyjne wzmianki o prowadzeniu pomiarów w terenie pojawiają się jedynie na pierwszej stronie części wprowadzającej dysertacji zatytułowanej „Podziękowania”.

Po drugie moje wątpliwości budzi nie do końca precyzyjnie sformułowany tytuł rozprawy. Tytuł „Ocena wymiany wody i dwutlenku węgla pomiędzy różnowiekowymi lasami sosnowymi a atmosferą w skali drzewa i ekosystemu” każe spodziewać się ogólnej charakterystyki zmienności strumieni gazów cieplarnianych między lasem a atmosferą. Tymczasem główny akcent w dysertacji położony został na wpływ suszy na wymianę wody i dwutlenku węgla, co zresztą Doktorantka wyraźnie podkreśla zarówno w celu nadrzędnym pracy, jak również w rozdziałach części wprowadzającej dotyczących hipotez, znaczenia podjętych badań, podsumowaniu i innych. Na wpływie suszy na kondycję drzewostanów sosnowych z punktu widzenia wymiany wody i dwutlenku węgla koncentrują się również artykuły numer 2 i 3.

W części dotyczącej oceny merytorycznej rozprawy podkreślałem dbałość Doktorantki o jakość pozyskanych danych i szczegółowy opis zastosowanych metod. Wyjątkiem jest w mojej ocenie metoda kowariancji wirów, w opisie której pominięto kwestię jakości zmierzonych danych strumieni pary wodnej i dwutlenku węgla. W rozbudowanym opisie samej metody, wykorzystanych przyrządów oraz kolejnych kroków tzw. postprocessingu, brakuje dyskusji na temat kontroli jakości danych oraz procedury uzupełniania luk w danych. Doktorantka wspomina jedynie jakich użyła pakietów aplikacji R, natomiast nie podaje jaki był odsetek danych odrzuconych po oznaczeniu ich jako nieprawidłowe, jaka część zbioru została odrzucona ze względu na nie zaliczenie kryterium  $u^*$ , testu na stacjonarność czy też testu na dobrze rozbudowaną turbulencję? Jaką metodą aplikacja R dokonuje procedury gap fillingu (jest ich co najmniej kilka)?

Innym mankamentem jest, w mojej opinii, nieco zbyt kategoryczna opinia o zdecydowanie lepszej czułości metody pomiaru przepływu soków w porównaniu z metodą kowariancji wirów dla oceny transpiracji. Są to metody, które w istotny sposób różnią się do siebie, zatem tak zdecydowana opinia na podstawie dwuletniej serii pomiarowej wydaje mi się nie do końca uprawniona.

Tekst dysertacji nie budzi wątpliwości pod względem językowym, dotyczy to zarówno części pisanej po polsku, jak również napisanych po angielsku artykułów (które na pewno w

trakcie procesu publikacji były wielokrotnie sprawdzane pod tym względem). Odnotowałem jedynie kilka literówek, pomyłek czy nieścisłości merytorycznych:

- w hipotezie numer 2 (strona 9 dysertacji) Doktorantka pisze, że spodziewa się „istotnego wpływu suszy na transpirację”. Istotnego ale jakiego, pozytywnego czy negatywnego?

- w podsumowaniu (strona 19) Doktorantka pisze, że „susza występująca w ciepłej porze roku wiąże się z podwyższoną temperaturą i przedłużającym się okresem bezopadowym, a tym samym większą ilością docierającego promieniowania słonecznego”. Ze zdania tego trudno wnioskować o przyczynie i skutku, należało wyraźnie podkreślić, że konsekwencją podwyższonej temperatury powietrza i braku opadów jest mniej lub bardziej intensywna susza.

- w części 2.4 („Cele”, strona 8) Doktorantka pisze, że „nadrzędnym celem pracy było przedstawienie znaczenia monitorowania zależności strumieni wymiany węgla i wody od...”. Moim zdaniem sformułowanie „strumień wymiany” jest nieprawidłowe. Strumień to wielkość fizyczna opisująca intensywności i kierunek wymiany masy, energii lub pędu, zatem w powyższym zdaniu należało napisać „... zależności strumieni węgla i wody od...” lub „... zależności wymiany węgla i wody od...”.

- we wprowadzeniu (strona 5) znajduje się niejasne sformułowanie „uwalniając parę wodną w procesie zwanym ewapotranspiracją (ET), lasy mogą przyczyniać się do dalszego „ochładzania” atmosfery”.

- w części 2.2 (strona 6) znajduje się niejasne sformułowanie „... ponieważ cykle węgla i wody są sprzężone poprzez aktywność aparatów szparkowych...”

- w tytule części 3.1 (strona 12) słowo „częstotliwości” należałoby zamienić na „częstość”.

- na rysunku 2 (strona 11) użyto słowa „kowarjancji” a powinno być „kowariancji”.

- w artykule nr. 2 (strona 2, Introduction) wskaźnik CUE został zdefiniowany jako GPP/NPP a powinno być odwrotnie.

Wspomniane wyżej uwagi krytyczne nie wpływają na ogólnie bardzo pozytywną ocenę pracy. Ilość zgromadzonego materiału badawczego i wyraźnie widoczne w tekście bardzo dobre opanowanie przez Doktorantkę tematyki badawczej powoduje, że jest to jedna z ciekawszych dysertacji doktorskich z jakimi miałem okazję się zapoznać. Uważam również, że dysertacja w pełni zasługuje na to by zostać nagrodzoną, o co niniejszym wnioskuje.

## Wniosek końcowy

Podsumowując, przedstawioną do oceny pracę oceniam zdecydowanie pozytywnie. Rozprawa ta posiada oryginalne wartości poznawcze i stanowi rozwiązanie aktualnego problemu naukowego. Treść pracy dowodzi, że Pani mgr Paulina Dukat posiada wiedzę z zakresu problematyki badawczej, której dotyczy praca, a także umiejętność definiowania problemów badawczych, prowadzenia badań naukowych, analizy wyników i formułowania wniosków.

Uważam, że rozprawa doktorska Pani mgr Pauliny Dukat „Ocena wymiany wody i dwutlenku węgla pomiędzy różnowiekowymi lasami sosnowymi a atmosferą w skali drzewa i ekosystemu” spełnia zarówno merytoryczne, jak i formalne wymagania określone w art. 187 ust. ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce” (tekst jednolity Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późniejszymi zmianami). Wnioskuje o przyjęcie pracy jako rozprawy na stopień doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, dyscyplinie: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz dopuszczenie jej Autorki do dalszych etapów procedury doktorskiej, w tym do publicznej obrony.



dr hab. Włodzimierz Pawlak, prof. UŁ