

Łódź, dn. 25 sierpnia 2019 r.

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

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Marcina Stróżeckiego
pt. „Wpływ zredukowanych sum opadów i podwyższonej temperatury
na wymianę netto strumieni CO₂ i CH₄ na torfowisku w Rzecinie”**

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Marcina Stróżeckiego zatytułowana „Wpływ zredukowanych sum opadów i podwyższonej temperatury na wymianę netto strumieni CO₂ i CH₄ na torfowisku w Rzecinie”, napisana została pod opieką dr. hab. Radosława Juszcza, prof. UPP (promotor) i dr. inż. Marka Urbaniaka (promotor pomocniczy) z Katedry Meteorologii Wydziału Inżynierii Środowiska i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Zgodnie z tytułem celem pracy były badania zmienności strumieni dwutlenku węgla i metanu na torfowisku w Rzecinie w warunkach zredukowanych opadów oraz podwyższonej temperatury. Szeroko zakrojone prace badawcze przeprowadzono w latach 2016-2017 z zastosowaniem nowatorskiego, logistycznie i metodycznie zaawansowanego tzw. eksperymentu manipulacyjnego. W analizie wyników wykorzystano unikalny zestaw danych zebranych przez Doktoranta podczas realizacji trzech projektów Narodowego Centrum Nauki (polsko-norweskiego projektu badawczego WETMAN, projektu OPUS oraz projektu PRELUDIUM, którego Doktorant był kierownikiem).

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 tereny podmokłe o charakterze torfowisk, będące „magazynem” węgla organicznego. Z dotychczasowych badań wynika, że obszary te silnie emitują metan

(uznaje się je za największe naturalne źródło tego gazu dla atmosfery) oraz pochłaniają dwutlenek węgla, przy czym wiadomo, że tempo tych procesów ściśle zależy od panujących warunków klimatycznych. Obserwowane obecnie zmiany klimatu mogą zatem wpłynąć na intensywność wymiany dwutlenku węgla i metanu, jak również, w skrajnych przypadkach, zmienić jej charakter (np. z pochłaniania na emitowanie). Bezpośrednie pomiary strumieni takich gazów jak CO₂ i CH₄, które w związku z powyższym należy uznać za priorytetowe, prowadzone są na świecie dopiero od kilkunastu lat i wciąż, w skali świata, należą do rzadkości, ze względu na wysokie koszty stanowisk pomiarowych oraz bardzo rozbudowaną logistykę i metodykę, która zresztą ciągle znajduje się w fazie rozwoju. W Polsce bezpośrednie pomiary strumieni gazów cieplarnianych (nie tylko na terenach podmokłych, ale również na terenach rolniczych czy zurbanizowanych) z podobnych przyczyn prowadzone są przez zaledwie kilka grup badawczych, co należy uznać za wysoce niezadowalające. Każde opracowanie dostarczające nowych danych, takie właśnie jak oceniana przeze mnie dysertacja, należy przyjąć z satysfakcją. Do rzadkości wciąż należą także tzw. eksperymenty manipulacyjne, podczas których pomiarom strumieni CO₂ i CH₄ towarzyszą próby manipulacji wybranymi elementami pogody, w celu symulacji obserwowanych zmian klimatu na intensywność wymiany gazów cieplarnianych między podłożem a atmosferą. Zdecydowana większość tego typu badań ma jednak charakter krótkotrwałych eksperymentów, dlatego na tym tle wyniki ciągłych, rozbudowanych, dwuletnich pomiarów przeprowadzonych w Rzecinie mają charakter unikatowy w skali Europy. Rozprawa mgr inż. Marcina Stróżeckiego stanowi ważny przyczynek do badań tego typu, a wyniki prezentowane przez Doktoranta mają szansę być zauważone w międzynarodowym środowisku naukowym.

Opis rozprawy

Rozprawa składa się ze 162 stron maszynopisu, zawiera 25 tabel i 105 rysunków (oraz kolejnych 12 w załącznikach 1-12). Treść pracy została podzielona na sześć głównych rozdziałów, dwanaście załączników zawierających materiały uzupełniające oraz obszerny spis literatury obejmujący aż 265 pozycji związanych z tematyką pracy, głównie angielskojęzycznych artykułów w czasopiśmie naukowych o zasięgu światowym. Badania, których wyniki wykorzystano w realizacji rozprawy doktorskiej finansowane były z trzech wspomnianych wcześniej projektów krajowych i międzynarodowych.

Układ pracy w przeważającej mierze jest logiczny i spełnia warunki stawiane tekstom naukowym. Bibliografia dobrana jest właściwie i umiejętnie wykorzystana we wszystkich rozdziałach rozprawy. Praca została napisana poprawną polszczyzną (z pewnymi wyjątkami opisanymi w krytycznej części recenzji).

Główny cel pracy, w zasadzie tożsamy z tytułem, zdefiniowany został w rozdziale pierwszym. Doktorant przedstawił w nim również dwie hipotezy badawcze, zgodnie z którymi jako rezultatów swoich badań spodziewał się zwiększonej emisji CO₂ oraz zmniejszonej emisji CH₄ do atmosfery (jako bezpośredniego efektu przesuszenia wierzchniej warstw torfu) oraz zmiany bilansu gazów szklarniowych wyrażonego wskaźnikiem Global Warming Potential (GWP).

Rozdział 2, w postaci kolejnych podrozdziałów, stanowi przegląd literatury zawierający informacje dotyczące gazów szklarniowych (oraz ich roli w środowisku, przede wszystkim z punktu widzenia zmian klimatu), klasyfikacji terenów podmokłych i typów torfowisk oraz roli jaką pełnią tereny podmokłe w obiegu węgla. W podrozdziale 2.4 Doktorant charakteryzuje metodykę oraz istotę stosowania aktywnych i pasywnych eksperymentów manipulacyjnych oraz opisuje wybrane dotychczas zrealizowane eksperymenty tego typu. Przegląd literatury został w moim przekonaniu napisany w sposób wyważony, dojrzały i świadczący o dogłębnej znajomości tematyki badań. Podrozdział 2.5 to z kolei wprowadzenie do technik pomiarów strumieni gazów cieplarnianych, przy czym Doktorant nie ogranicza się tylko do wykorzystanej przez siebie techniki komorowej, ale opisuje również technikę kowariancji wirów oraz technikę akumulacji wirów. Również ten rozdział dowodzi, że Doktorant w pełni opanował metodykę stosowanych badań empirycznych obejmujących metody pomiarów strumieni gazów cieplarnianych, ze szczególnym wskazaniem na metodę komorową. Kolejna część pracy (rozdział 3) poświęcona została charakterystyce miejsca badań, czyli torfowiska Rzecin, oraz automatycznemu komorowemu systemowi pomiarowemu strumieni CO₂ i CH₄ wykorzystanemu do realizacji eksperymentalnej części badań. Obszar badań (podrozdział 3.1) opisany został z dużą starannością, uwzględniając cechy samego torfowiska, jak również jego ogólne warunki klimatyczne. Równie starannie (może nawet zbyt szczegółowo) opisany został eksperyment manipulacyjny (podrozdziały 3.2 i 3.3) – umiejscowienie komór, automatyczny system ich opuszczania, oprzyrządowanie na stanowisku kontrolnym oraz na kolejnych stanowiskach, na których manipulowano temperaturą oraz redukowano opad. Cały eksperyment zakładał zatem pomiary na czterech stanowiskach: kontrolnym (bez manipula-

cji), ogrzewanym, ogrzewanym z redukcją opadu oraz z redukcją opadu, ale bez ogrzewania. Doktorant opisał również dodatkowy osprzęt niezbędny do prawidłowego pomiaru strumieni CO_2 i CH_4 oraz analizy uzyskanych danych, taki jak czujniki promieniowania fotosyntetycznie aktywnego PAR, temperatury powietrza i gleby, opadu atmosferycznego, poziomu zwierciadła wody oraz pH i konduktywności gleby. Doktorant szczegółowo przedstawił także metodykę pomiaru ciśnienia atmosferycznego wewnątrz komór oraz ich szczelności, co świadczy o dużej dbałości o prawidłowość prowadzonych pomiarów oraz jakość pozyskiwanych danych. Ostatni podrozdział tej części pracy poświęcony został metodyce obliczania strumieni gazów cieplarnianych w oparciu o dane uzyskane podczas pomiarów przy pomocy automatycznych komór zamkniętych oraz uzupełnianiu luk w szeregach danych. Również ta część pracy jest napisana w sposób bardzo szczegółowy. Wynika z niej, że Doktorant jest świadomy istnienia problemów metodycznych wyliczania strumieni CO_2 i CH_4 , zna i umie zastosować odpowiednie metody, których zadaniem jest te problemy minimalizować, potrafi również, za pomocą odpowiednio dobranych modeli wyliczyć wartości strumieni w celu uzupełnienia luk w szeregach danych. Dobrym przykładem na potwierdzenie powyższych uwag, jest moim zdaniem podrozdział 3.4.1 traktujący o korygowaniu ilości promieniowania PAR docierającego do wnętrza komory. Zamiast przyjmować arbitralnie przezroczystość ścian komory na poziomie znanym z literatury problemu, Doktorant zastosował rozwiązanie bardziej zaawansowane. W napisanym przez siebie skrypcie wyliczającym odpowiednie korekty uwzględnił szereg czynników, takich jak wartość PAR zmierzona poza komorą, kąt padania promieni słonecznych, zachmurzenie czy wzajemne zacienienie przez sąsiadujące ze sobą komory.

Właściwy cel pracy zrealizowany został w rozdziałach 4 i 5, w których zaprezentowano, a następnie przedyskutowano wyniki badań. Podrozdział 4.1 poświęcono charakterystyce warunków klimatycznych i hydrometeorologicznych oraz ocenie efektywności systemu grzewczego podwyższającego temperaturę powierzchniowej warstwy torfu oraz kurtyny redukującej opad w godzinach nocnych. W kolejnych dwóch podrozdziałach opisano wyniki oceny szczelności komór oraz przezroczystości ich ścian. Podrozdziały 4.4 oraz 4.5 z kolei zawierają wyniki obliczeń strumieni metanu oraz dwutlenku węgla na stanowisku kontrolnym oraz na stanowiskach z podwyższoną temperaturą oraz zredukowanym opadem. W obu przypadkach analizie poddano dwuletnie serie strumieni CH_4 i CO_2 z uzupełnionymi lukami, które następnie skumulowano jako strumienie roczne. Oceniono wyniki modelowania strumieni CH_4 i CO_2 , przeanalizowano również wpływ manipulacji temperaturą i opadem na uży-

skane wartości strumieni. W obu przypadkach przeanalizowano ponadto wpływ czynników decydujących o intensywności wymiany CH_4 i CO_2 na terenach podmokłych, takich jak temperatura podłoża i powietrza, poziomu wód gruntowych czy promieniowania fotosyntetycznie aktywnego PAR. Należy podkreślić, że Doktorant nie ograniczył się do strumieni netto, opisane wyżej analizy przeprowadził również dla składowych decydujących o wymianie, a więc oddychaniu i produkcji pierwotnej (w przypadku strumienia CO_2) oraz dyfuzji i bąblowania (strumień CH_4). W podrozdziale 4.6 z kolei, Doktorant, na podstawie przeprowadzonych badań, dokonał próby oceny wpływu manipulacji temperaturą i opadem na bilans netto wymiany CH_4 i CO_2 na torfowisku w Rzecinie.

Ostatni, 6 rozdział pracy zawiera wnioski ujęte w formie zwięzłej, 8-punktowej listy, w której Autor przywołuje najważniejsze ustalenia dysertacji.

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 skumulowaną roczną wymianę CO_2 i CH_4 na torfowisku w Rzecinie w latach 2016-2017. Regularne długoterminowe pomiary strumieni gazów cieplarnianych mają charakter unikatowy nie tylko w Polsce, ale i na świecie.
- 2) Zbadano wpływ podwyższonej temperatury oraz zredukowanych opadów na zmienność strumieni CO_2 i CH_4 .
- 3) W celu określenia wpływu podwyższonej temperatury i zredukowanych opadów po raz pierwszy w Polsce zastosowano eksperyment manipulacyjny. Systemy automatycznych komór wykorzystuje stosunkowo niewiele grup badawczych na świecie, a tak zaawansowany logistycznie i metodycznie jak używany w Rzecinie należy do szczególnie unikatowych.
- 4) Określono wpływ podwyższonej temperatury i zredukowanych opadów na bilans węgla torfowiska w Rzecinie w latach 2016 i 2017.

Godna podkreślenia jest również dbałość Doktoranta o jakość uzyskanych wyników, zarówno w fazie pomiarowej, jak i obliczeniowej. Świadczy to dogłębnym poznaniu skomplikowanej metodyki pomiarów strumieni oraz krytycznym podejściu do uzyskanych wyników. Doktorant przy pomocy różnego rodzaju metod statystycznych starał się uzyskać jak najwięcej informacji o jakości uzyskanych wyników. W ostatnich latach coraz częściej zdarza się, że grupy badawcze pomijają tę część pomiarów strumieni gazów cieplarnianych, całkowicie ufając standardowym formułom umożliwiającym ich obliczanie. Podejście zaprezentowane przez mgr. inż. Marcina Stróżeckiego uważam za godne podkreślenia.

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

Przede wszystkim Doktorant nie opisuje jaki konkretnie był jego udział w eksperymencie manipulacyjnym w Rzecinie. Czy brał udział we wszystkich etapach eksperymentu, czy pracował na gotowych danych? Sam dokonał wszystkich obliczeń czy korzystał z gotowych algorytmów lub obliczonych szeregów danych? Eksperyment finansowany był z trzech różnych projektów badawczych, zatem należy się domyślać, że jego budową, uruchomieniem, działaniem, konserwacją oraz wyliczaniem strumieni zajmował się zespół badawczy, a nie tylko sam Doktorant. Rozprawa doktorska ma przecież udowodnić, że Doktorant umie samodzielnie (pod opieką promotora) rozwiązać problem badawczy. Sytuacji nie poprawia często stosowana w rozprawie liczba mnoga: „w naszym systemie” (str. 60), „dla naszych analiz” (str. 80), „wynikał z naszych doświadczeń” (str. 122), zakładaliśmy” (str. 43), „przez nas” (str. 55) itd. Na podstawie lektury dysertacji mogę przyjąć, że Doktorant uczestniczył we wszystkich etapach pracy eksperymentu manipulacyjnego w Rzecinie, są to jednak tylko moje domysły.

Drugim istotnym mankamentem pracy jest nieco ograniczona dyskusja wyników w rozdziale 4 oraz, przede wszystkim, w rozdziale 5, która w mojej opinii w niepełny sposób wyjaśnia dlaczego hipotezy badawcze postawione przez Doktoranta częściowo nie zostały potwierdzone. Doktorant skoncentrował się na skumulowanych rocznych strumieniach CO₂ i CH₄, zarówno netto, jak i ich składowych (oddychanie i produkcja pierwotna w przypadku strumienia CO₂, oraz dyfuzja i bąblowanie w przypadku strumienia CH₄). Jak podkreślałem już wcześniej, uważam to za duże osiągnięcie naukowe, jednak dyskusja wyników wydaje się być niepełna, a w niektórych miejscach wewnętrznie sprzeczna. Przede wszystkim, w mojej oce-

nie, brakuje dyskusji wyników z podziałem na sezony (na przykład w podrozdziałach 4.4.2, 4.4.3, 4.5.2-6), co pokazałoby czy jakość dopasowania modeli jest różna w kolejnych porach roku oraz czy siła związku korelacyjnego między strumieniami CO₂ i CH₄ z temperaturą torfu i głębokością zalegania wody gruntowej zmienia swoją wartość. Brakuje również nieco szerszej dyskusji na temat efektywności samego eksperymentu, poprzez porównanie z wynikami uzyskanymi przez innych autorów na innych stanowiskach bagiennych. Szkoda również, że Doktorant jedynie wspomina, że wartości strumieni zmierzone przez siebie na stanowisku kontrolnym są porównywalne z tymi z lat 2012-2013, a nie robi takiego porównania dla lat 2016 i 2017, co stanowiłoby dodatkową kontrolę jakości wyników.

Doktorant, w mojej ocenie zbyt mało uwagi poświęcił w dyskusji specyfice torfowiska rzecińskiego z punktu widzenia niewielkiej zmienności poziomu wód gruntowych. Na stronie 94, Doktorant pisze że „Skumulowane roczne emisje metanu na stanowiskach eksperymentu WETMAN były wyższe w 2017 roku niż w 2016. Z całą pewnością jest to efektem wyższych sum opadów w 2017 roku i wyższych poziomów wód gruntowych (choć nie wykazano istotnego wzrostu wielkości strumieni CH₄ wraz z poziomem wód gruntowych).” Nie mogę zgodzić się z tym stwierdzeniem. Zgodnie z opisem stanowiska zawartym w dysertacji oraz wykresem na stronie 79, poziom wody gruntowej w miejscu badań zmieniał nieznacznie, zatem warstwa beztlenowa zmieniała swoją miąższość w niewielkim stopniu i parametr ten trudno uznać za zmienną decydującą o wyższej wartości rocznego strumienia CH₄ w 2017 roku (zmienną decydującą była raczej wyższa temperatura podłoża, sprzyjająca bardziej intensywnej metanogenezie w mocno uwilgotnionym podłożu). Zagadnienie to powinno być szerzej przedyskutowane, ponieważ wynika bezpośrednio z budowy torfowiska rzecińskiego, które ma charakter torfowego „kożucha” pływającego po wodzie, a zatem nasyconego wodą. Na torfowiskach położonych bezpośrednio na podłożu mineralnym przesuszanie torfu wywołuje spadek poziomu wód gruntowych o 100 i więcej centymetrów, co w istotny sposób redukuje warstwę beztlenową, a w konsekwencji strumień CH₄. Dlatego właśnie częściowo nie sprawdziła się pierwsza hipoteza badawcza – redukcja opadów i przesuszanie wierzchniej warstwy torfu nie wpłynęło na miąższość warstwy beztlenowej (strumień CH₄) oraz na dostęp roślin do wody (strumień CO₂).

Innym mankamentem pracy są pojawiające się w rozdziale 5 pt. „Dyskusja” sprzeczności w wywodzie. Doktorant pisze na przykład (str. 126), że „przeciwnie do naszych hipotez, przesuszenie wierzchniej warstwy torfu będące następstwem redukcji opadów w obu latach

nie wpłynęło na zwiększenie emisji CO₂ do atmosfery”, by na stronie kolejnej napisać „Z powyższych analiz wynika, że zastosowane manipulacje temperaturą i opadem miały wpływ na strumienie netto i bilans wymiany CO₂ netto torfowiska”. Podobne sprzeczności pojawiają się również w kilku innych miejscach. Wnioski w rozdziale 6 w większości sformułowane są prawidłowo, z wyjątkiem punktu 3, który brzmi jak sformułowany dla bagien w ogóle, a odnosi się do specyficznego przypadku torfowiska w Rzecinie.

Strona edytorska rozprawy na ogół nie budzi zastrzeżeń, z wyjątkiem nielicznych literówek. W przypadku publikacji w formie monografii sugerowałbym przeniesienie wykresów z załączników do głównego tekstu (oraz dopisanie stosownej dyskusji) oraz umieszczenie w załączniku całego opisu konstrukcji automatycznego systemu komór, który ma charakter techniczny, a nie naukowy (podrozdziały 3.2 i 3.4). Praca została napisana poprawną polszczyzną, niedociągnięcia stylistyczne zdarzają się sporadycznie, chociaż nadużywanie określeń o charakterze mowy potocznej, takich jak „pomierzyć”, „wymodelować” czy „policzyć” trochę razi. Moje zdziwienie wzbudziło również używane przez Doktoranta tłumaczenie angielskiego „ebullition” jako bomblowanie, zamiast bąblowanie, co jest oczywistym błędem ortograficznym. W pracy zdarzają się też pewne nieścisłości i pomyłki o charakterze merytorycznym. Do najważniejszych należy zamienne stosowanie określeń „promieniowanie PAR” oraz „promieniowanie słoneczne” (str. 43) oraz określanie organizmów produkujących metan w warstwie anaerobowej jako metanotrofów, gdy w rzeczywistości są to metanogeny (str. 20). Nieuprawnione wydaje się również zamienne używanie sformułowań „manipulacja składnikami klimatu” oraz „manipulacja klimatem”. W opisie metod komorowych pominięto również zasadniczą wadę tego typu rozwiązań, jaką jest pomijanie naturalnej turbulencji rozwijającej się nad miejscem obserwacji (str. 29). Moje wątpliwości budzi także tytuł dysertacji. W pracy opisane są badania nad wymianą CO₂ i CH₄ między podłożem a atmosferą, natomiast strumień jest wielkością charakteryzującą tę wymianę. Wymianie podlegają zatem gazy cieplarniane, a nie strumienie, więc tytuł, moim zdaniem, powinien być skorygowany na „wpływ ... na wymianę netto CO₂ i CH₄, itd.” lub „wpływ ... na zmienność strumieni netto CO₂ i CH₄...”.

Wspomniane wyżej uwagi krytyczne nie wpływają na ogólnie pozytywną ocenę pracy. Ilość zgromadzonego materiału badawczego i wyraźnie widoczne w tekście bardzo dobre opanowanie przez Doktoranta tematyki badawczej powoduje, że jest to jedna z ciekawszych dysertacji doktorskich z jakimi miałem okazję się zapoznać.

Wniosek końcowy

Podsumowując, przedstawioną do oceny pracę oceniam pozytywnie. Rozprawa ta posiada oryginalne wartości poznawcze i stanowi rozwiązanie aktualnego problemu naukowego. Treść pracy dowodzi, że mgr inż. Marcin Stróżecki 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 Pana mgr inż. Marcina Stróżeckiego „Wpływ zredukowanych sum opadów i podwyższonej temperatury na wymianę netto strumieni CO₂ i CH₄ na torfowisku w Rzecinie” spełnia zarówno merytoryczne, jak i formalne wymagania określone w art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, 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 Autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym do publicznej obrony.

dr hab. Włodzimierz Pawlak, prof. UŁ

