

Prof. dr hab. Dorota Kwiatkowska  
Instytut Biologii, Biotechnologii i Ochrony Środowiska  
Wydział Nauk Przyrodniczych, Uniwersytet Śląski w Katowicach  
ul. Jagiellońska 28, 40-032 Katowice

Katowice, 24.07.2023

**RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ MGR. MIŁOSZA MAKOWSKIEGO  
ZATYTUŁOWANEJ „MULTI-SCALE MATHEMATICAL MODELING OF  
VEGETATION, SOIL AND WEATHER”**

Modelowanie matematyczne jest nieodzownym elementem znacznej części współczesnych badań biologicznych, prowadzonych na wszystkich poziomach organizacji świata żywego – od komórki do ekosystemu. W konsekwencji stało się ono podstawowym elementem badań interdyscyplinarnych prowadzonych na pograniczu informatyki i biologii. Takie interdyscyplinarne podejście wynika ze złożoności i dynamiki struktur i procesów biologicznych oraz potrzeby uwzględniania ilościowych interakcji pomiędzy elementami budującymi złożone sieci oddziaływań, które konieczne jest do poznania mechanizmów zjawisk biologicznych oraz ich przewidywania. Jednocześnie wyzwaniem staje się uzyskanie równowagi pomiędzy poziomem uproszczenia koniecznego w modelowaniu i wynikającego także z luk w naszej wiedzy biologicznej, a stopniem realistycznego oddania tej złożoności, często koniecznym do wyjaśnienia zagadkowych niuansów badanych zjawisk. Z tej perspektywy rozprawa doktorska Pana Mgr. Miłosza Makowskiego, poświęcona wielopoziomowemu, tj. od jednostki podstawowej architektury pędu do zbiorowiska roślinnego, modelowaniu rozwoju roślinności i ekoklimatu, w szczególności ekosystemów z udziałem roślin drzewiastych, stanowi istotny wkład w tworzenie narzędzi modelowania, które mogą być wykorzystane w podstawowych i użytkowych badaniach przyrodniczych.

Ocena merytoryczna i metodologiczna rozprawy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska Pana Mgr. Miłosza Makowskiego mieści się w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych, w zakresie dyscypliny informatyka. Praca została wykonana na Wydziale Matematyki i Informatyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, pod kierunkiem promotora Pana Prof. dr hab. Macieja Wygala oraz Pana Dr. Wojciecha Pałubickiego w roli promotora pomocniczego.

Rozprawa została napisana w języku angielskim. Składa się na nią pięć części. Pierwsza z nich to krótkie wprowadzenie (*Introduction*) do problemów badawczych prezentowanych w kolejnych rozdziałach. Po wprowadzeniu następują trzy rozdziały, w których omówiono wkład Doktoranta w badania prezentowane w trzech publikacjach naukowych. Publikacje te ukazały się latach 2019-2022 w ACM Transactions on Graphics, wiodącym czasopiśmie naukowym

Uniwersytet Śląski w Katowicach  
Wydział Nauk Przyrodniczych  
ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec  
tel. 32 36 89 400, 32 20 09 351, e-mail: [wnp@us.edu.pl](mailto:wnp@us.edu.pl)

poświęconym grafice komputerowej, z czego jedna w ramach prestiżowych *Proceedings of SIGGRAPH*. Znaczący udział Mgr. Makowskiego we wszystkich trzech pracach został jasno określony we wprowadzeniu. Pierwszy rozdział dotyczący wyników, zatytułowany *Synthetic Silviculture: Multi-scale Modeling of Plant Ecosystems*, poświęcony jest wielopoziomowemu modelowaniu ekosystemów z udziałem roślin drzewiastych, wyniki którego przedstawiono w publikacji o takim samym tytule, gdzie pierwszym autorem był Mgr Makowski. W kolejnym rozdziale, zatytułowanym *Towards Modeling Complex Interactions between Weather and Vegetation* (wyniki przedstawiono w publikacji *Stormscapes: Simulating cloud dynamics in the now*), Doktorant omawia modelowanie dynamiki chmur oraz ich wpływu na roślinność. Ostatni rozdział prezentujący oryginalne badania to rozdział *Ecoclimates: Climate-response Modeling of Vegetation* (wyniki przedstawiono w publikacji o takim samym tytule). Mgr Makowski omawia w nim model ekoklimatu, w tym stosunków wodnych w glebie oraz zależności pomiędzy roślinnością a glebą i zachmurzeniem. Ten i poprzedni rozdział dotyczą wyników opublikowanych w pracach, w których Doktorant był drugim z sześciu autorów. W ostatnim, krótkim rozdziale rozprawy, zatytułowanym *Przyszłe badania (Future work)* Mgr Makowski omawia perspektywy badań wynikające z przedstawionych prac.

We **wprowadzeniu** Doktorant uzasadnia potrzebę prezentowanego w pracy modelowania i określa ogólnie cel Swoich badań jako stworzenie symulacji roślinności, gleby i pogody z wykorzystaniem nowatorskiego modelowania wielopoziomowego. Ponadto wskazuje, jaki był jego udział w prezentowanych badaniach. Szczegółowe cele badań oraz omówienie literatury, które typowo zamieszcza się we wstępie rozprawy doktorskiej, zostały zamieszczone w rozdziałach poświęconych kolejnym publikacjom. Taka konstrukcja jest jak najbardziej uzasadniona.

**Pierwszy z rozdziałów, w którym omówiono oryginalne badania** Doktoranta i współpracowników, dotyczy modelowania wzrostu drzew w złożonych i rozległych ekosystemach, które uwzględnia wzrost części nadziemnych poszczególnych osobników, foto- i grawitropizm ich organów, interakcje pomiędzy osobnikami i ich organami oraz wpływ warunków klimatycznych i ukształtowania terenu na roślinność. Celem pracy była weryfikacja hipotezy, że modele roślin reprezentowanych jako zbiory połączonych modułów, tzw. „jednostek architektonicznych”, są wystarczające do modelowania rozwoju ekosystemów. W modelowaniu wykorzystano charakterystyczną cechę architektury pędu roślin, szczególnie widoczną w przypadku organizmów długowiecznych takich jak drzewa, których plan budowy sprowadzić można do powtarzających się samopodobnych jednostek tworzących hierarchiczne układy nawiązujące do fraktali. W biologii rozwoju roślin jako jednostki takie wyróżnia się zwykle tzw. fitomery, złożone z liścia, znajdującego się poniżej odcinka łodygi i wyrastającego w kącie liścia pąka pędu bocznego. Jednostka przyjęta w prezentowanym modelu składa się z kilku fitomerów, co pozwala zawrzeć w definicji jednostki dodatkowe informacje dotyczące sposobu rozgałęziania pędu i wzorze ulistnienia, które są różne dla poszczególnych „prototypów” jednostek. Jednostki opisano jako grafy, a na potrzeby wizualizacji odcinkom łączącym węzły grafu nadano grubość i długość zależne od wigoru i wieku jednostki oraz jej położenia w obrębie osobnika. W naturze, podczas rozwoju osobnika ogólny plan budowy podlega modyfikacjom związanym z warunkami klimatycznymi i fazą rozwojową, a jednocześnie lokalnie



dostosowuje się do mikrośrodowiska związanego z sąsiedztwem innych osobników. Wszystkie te czynniki zostały uwzględnione w prezentowanym modelu. Z jednej strony wiernie odzwierciedla on kolejne stadia rozwoju osobników i ich wzajemne oddziaływania w różnych warunkach klimatycznych, w tym efekt wzajemnego zacięcia oraz różnice w wigorze pomiędzy osobnikami gatunków w różnym stopniu przystosowanych do danych warunków klimatycznych. Z drugiej strony model doskonale reprezentuje rozwój ekosystemów, w tym procesy sukcesji od fazy zbiorowiska pionierskiego do osiągnięcia zbiorowiska klimaksowego, proces zarastania pojawiających się gwałtownie wolnych przestrzeni, czy też reakcje zbiorowiska na zmieniające się warunki klimatyczne. W ostatniej części tego rozdziału przeprowadzono ewaluację modelu porównując zmiany czasowe wybranych parametrów symulacji ze znanymi regułami rozwoju drzew i ekosystemów leśnych. Jako biolog muszę zwrócić uwagę na drobne nieścisłości dotyczące terminologii biologicznej: określenia rozgałęzianie sympodialne i monopodialne dotyczą nie liczby pni ale przejmowania lub nie roli wierzchołków głównych przez wierzchołki boczne; zamiast wprowadzania nowego terminu kontrola wierzchołkowa można było użyć terminu dominacja wierzchołkowa.

**W drugim rozdziale poświęconym oryginalnym badaniom** Doktoranta i współpracowników omówiono model dynamiki chmur, jako kluczowego czynnika oddziałującego na roślinność a jednocześnie zależnego od roślinności. Celem pracy było stworzenie modelu, który uwzględniałby parowanie wody, tworzenie chmur i opady. W skład modelu wchodzi: model atmosfery opisujący zróżnicowanie temperatury i ciśnienia atmosferycznego w zależności od wysokości; termodynamiczny model zmian fazowych wody opisujący formowanie chmur; model ruchu wilgotnego powietrza w atmosferze oparty na dynamice płynów, uwzględniający turbulencje mas powietrza. W modelowaniu tym, opartym na cząstkowych równaniach różniczkowych, szczególnie uwzględniono podstawy fizyczne dynamiki chmur. Model umożliwia realistyczne symulacje różnych typów chmur i ich dynamicznych przemian oraz opadów atmosferycznych, co samo w sobie jest pozytywną ewaluacją modelowania.

**Trzeci rozdział poświęcony oryginalnym badaniom** to swojego rodzaju zwieńczenie badań prezentowanych w rozprawie doktorskiej. Mgr Makowski przedstawia model ekoklimatu, czyli wzajemnych oddziaływań pomiędzy roślinnością a kształtującym ją klimatem. Celem modelowania ekoklimatu było zwiększenie realizmu modeli ekosystemów roślinnych poprzez symulację interakcji pomiędzy roślinnością, glebą i pogodą oraz uwzględnienie warunków mikroklimatycznych. Model ekoklimatu opiera się na omówionych już modelach ekosystemów z udziałem roślin drzewiastych i dynamiki chmur oraz stworzonym na potrzeby tego modelowania modelu cyklu wodnego gleby. Nowością jest także wprowadzenie niejednorodnych warunków środowiskowych (wodnych i termicznych) do modelowania wzrostu drzew, czyli uwzględnienie mikroklimatu; uwzględnienie wiatru jako dodatkowego elementu modelu pogody; oraz wykorzystanie związanych z obecnością roślin danych dotyczących wody i ciepła w modelowaniu dynamiki chmur. Wzajemne oddziaływania między roślinnością a klimatem są symulowane właśnie za pośrednictwem cyklu wodnego obejmującego losy wody w glebie i atmosferze oraz pobieranie i utratę wody przez rośliny. Warto

podkreślić, że model ekoklimatu ma charakter hybrydowy, łącząc obliczenia oparte na metodzie grafów (np. modelowanie wzrostu roślin) z obliczeniami prowadzonymi z wykorzystaniem cząstkowych równań różniczkowych (np. modelowanie dynamiki chmur). Ponadto w modelach różnych zjawisk wykorzystano różne skale czasowe (cykl wodny i wzrost roślin modelowane są w miesiącach a dynamika chmur w sekundach). Cel prezentowanego modelowania bez wątpienia został osiągnięty a wyniki symulacji są imponujące. Jako przykłady symulacji zaprezentowano modelowanie sukcesji roślinności na terenie o zróżnicowanej geomorfologii, efekt brzegowy pojawiający się na skutek lokalnego odlesienia, wpływ odlesienia na warunki klimatyczne oraz powstawanie wiatrów fenowych. W ostatnich podrozdziałach przedstawiono ewaluację modelu przez porównanie z innymi modelami klimatycznymi i ekologicznymi oraz danymi empirycznymi. Szczególnie ciekawe są analiza długoterminowych zmian wzoru rozmieszczenia roślinności w odpowiedzi na zmiany stosunków wodnych oraz porównanie reakcji roślinności na gwałtowne i powolne zmiany klimatyczne. Na końcu rozdziału znajduje się rzetelny opis ograniczeń modelu, w którym wskazano w szczególności nie uwzględnienie w modelu cykli dobowych, pór roku, kierunków świata i położenia geograficznego, wpływających na kierunek i intensywność oświetlenia. Z obowiązku recenzenta mam do tego rozdziału pracy drobne uwagi krytyczne o charakterze edytorskim: hipotezy sformułowane na stronie 52 rozprawy to raczej założenia przyjęte w modelu; numeracja rycin 38-43 nie jest zgodna z kolejnością odwoływania się do rycin w tekście a legenda ryciny 40 jest praktycznie powtórzona w tekście głównym.

W ostatnim, krótkim rozdziale rozprawy, dotyczącym **przyszłych badań** (*Future work*) Mgr Makowski określa możliwości wykorzystania stworzonych modeli, w szczególności w planowaniu w leśnictwie i prognozowaniu wpływu zmian klimatu na roślinność, oraz plany dalszego rozwijania modelu ekoklimatu, w którym zadośćuczyniono by wskazanym ograniczeniom.

Chciałabym, by w trakcie publicznej obrony Doktorant odpowiedział na następujące pytania:

1. Czy w modelu można by uwzględnić aspekty mechaniczne, np. związane z reakcją gałęzi i pni na pochylenie (rosnący moment siły związany ze wzrostem ciężaru gałęzi bocznych oraz ich coraz większą długością powoduje tworzenie drewna reakcyjnego, co często wiąże się ze zwiększeniem obwodu gałęzi u jej podstawy; drewno reakcyjne umożliwia także prostowanie pni przechylonych na skutek osuwającego się podłoża lub silnego wiatru) oraz wyginanie gałęzi przez długotrwały jednokierunkowy wiatr?
2. Na generowanych obrazach drzew pojawiają się liście, o których nie wspomniano w tekście pracy. Ponadto przy okazji ewaluacji wyników modelowania ekosystemów wykorzystywano m.in. suchą masę liści. Czy wykorzystywano różne kształty i rozmiary liści dla różnych typów (gatunków) roślin? Miałoby to wpływ np. na dostępność światła dla niższych gałęzi drzewa, czy też rosnących w sąsiedztwie innych osobników.

3. Czy definiując prototypy jednostek architektonicznych uwzględniono różnice w typowych kątach pomiędzy pędem głównym a bocznymi, które charakteryzują wzrost plagiotropowy różnych gatunków drzew?
4. Drzewa różnią się zasadniczo architekturą systemu korzeniowego, co może wpływać m.in. na stosunki wodne w glebie oraz na podatność drzew na przewrócenie pod wpływem silnego wiatru. Czy model może uwzględniać również te aspekty?
5. W początkowych etapach sukcesji w modelu pojawiają się trawy i paprocie. Czy ich wzrost był także modelowany?

Za **szczególnie ważne i cenne wyniki** prezentowane w rozprawie Pana Mgr. Miłosza Makowskiego uważam:

- Stworzenie interaktywnego modelu rozwoju drzew i ekosystemów z udziałem roślin drzewiastych, którego wykorzystanie może mieć istotne znaczenie dla badań z zakresu fizjologii roślin, ekologii i leśnictwa
- Uwzględnienie w modelu ekoklimatu wzajemnych oddziaływań między roślinami oraz warunków mikroklimatycznych, co umożliwi wykorzystanie symulacji w badaniach wpływu człowieka oraz zmian klimatu na roślinność.

#### Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując, chciałabym zwrócić uwagę na wyjątkowy realizm zaprezentowanych symulacji komputerowych i szczególną dbałość ich Autorów o zgodność założeń modelowania z mechanizmami procesów biologicznych oraz morfologią roślin. Należy podkreślić także duże potencjalne znaczenie użytkowe prezentowanych modeli. Dlatego w mojej opinii zaawansowane wielopoziomowe modelowanie przedstawione w rozprawie doktorskiej uzasadnia nadanie Mgr. Miłoszowi Makowskiemu stopnia naukowego doktora w dyscyplinie informatyka.

W związku z powyższym stwierdzam, że przedstawiona do oceny rozprawa spełnia wszystkie warunki stawiane pracom doktorskim zgodnie z *art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U. z 2022r. poz. 574 z późn. zm.) i zwracam się do Rady Naukowej Dyscyplin Matematyka i Informatyka Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu o jej przyjęcie i dopuszczenie Pana Mgr. Miłosza Makowskiego do dalszych etapów postępowania doktorskiego. Biorąc pod uwagę wysoki poziom i nowatorski charakter prezentowanych badań, zwracam się także z wnioskiem o wyróżnienie rozprawy Pana Mgr. Miłosza Makowskiego.