

dr hab. Bogdan Rosa, prof. SGGW
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
Katedra Zastosowań Matematyki
ul. Nowoursynowska 159, bud. 34
02-776 Warszawa
Tel: 22 59 37 340
e-mail: Bogdan_rosa@sggw.edu.pl

Warszawa, 7 stycznia 2026 r.

RECENZJA

pracy doktorskiej **mgra Daniela G. Albuquerque** wykonana na zlecenie
Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego.
Tytuł rozprawy

*„Modeling particle growth by condensation and deposition
in turbulent mixed-phase cloud volumes”.*

Rozprawa została przygotowana pod kierunkiem
prof. dr hab. Hanny Pawłowskiej z Instytutu Geofizyki, Wydziału Fizyki,
Uniwersytetu Warszawskiego
Promotorem pomocniczym jest **dr Gustavo C. Abade** również z Instytutu
Geofizyki, Wydziału Fizyki, Uniwersytetu Warszawskiego

Informacje i uwagi wstępne

Przedmiotem recenzowanej rozprawy doktorskiej są zagadnienia związane z numerycznym modelowaniem mikrofizycznych procesów chmurowych zachodzących w turbulentnych przepływach atmosferycznych. Praca ma charakter teoretyczno-obliczeniowy i łączy elementy fizyki atmosfery z zaawansowanymi technikami numerycznymi. Autor podjął ambitną próbę opracowania stochastycznego, *parcelowego* modelu typu Lagrange’a, który mógłby znaleźć zastosowanie w symulacjach dyfuzyjnego wzrostu cząstek fazy ciekłej i lodowej w środowisku turbulentnym. Podjęcie tej problematyki jest uzasadnione zidentyfikowanymi w literaturze ograniczeniami dostępnych modeli mikrofizyki chmur, opartych na założeniu przestrzennie jednorodnego pola przepływu i uśrednionych charakterystyk turbulentnych. W modelach tych obserwuje się przyspieszony zanik przechłodzonej wody, będący skutkiem działania procesu Wegenera–Bergerona–Findeisena. Tymczasem liczne obserwacje i pomiary wskazują, że rzeczywista dynamika tego procesu może sprzyjać utrzymywaniu się chmur w stanie ciekłym przez znacznie dłuższy czas.

Poszukując alternatywnych podejść do modelowania mikrofizyki chmur, Autor dąży do wypracowania racjonalnego kompromisu pomiędzy wiernością opisu procesów fizycznych a złożonością obliczeniową proponowanych rozwiązań. Dodatkową motywacją do podjęcia tych badań jest potencjalna możliwość implementacji opracowanych metod w modelach wielkoskalowych, takich jak modele typu LES, czy mezoskalowe modele numerycznych prognoz pogody.

Struktura i zawartość pracy

Układ rozprawy jest spójny i logiczny, a poszczególne jej części konsekwentnie podporządkowano trafnie sformułowanemu celowi badawczemu. Narracja prowadzona jest w sposób uporządkowany, tj. od omówienia zagadnień ogólnych oraz podstaw teoretycznych procesów adiabatycznych w atmosferze, przez prezentację modeli referencyjnych, aż po przedstawienie oryginalnego wkładu Autora.

Rozprawa została napisana w języku angielskim, a jej zasadnicza część obejmuje 89 stron. Pracę poprzedzają: strona tytułowa, podziękowania Autora, deklaracja oryginalności, streszczenia w języku angielskim i polskim, a także spisy treści, tabel oraz symboli, które łącznie zajmują 20 stron.

Najważniejsza część pracy została zawarta w rozdziale 5. Materiał ten został także opublikowany w renomowanym czasopiśmie *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. Zgodnie z aktualną listą czasopism punktowanych MNiSW czasopismo to posiada najwyższą możliwą liczbę punktów, tj. 200. Należy jednak odnotować, że publikacja ma dwóch autorów, przy czym doktorant nie występuje w niej ani jako autor wiodący, ani jako autor korespondencyjny.

Rozdział 1 (*Introduction*) przedstawia kontekst naukowy zagadnień związanych z chmurami atmosferycznymi, wskazując na ich kluczowe znaczenie dla bilansu radiacyjnego Ziemi oraz modelowania klimatu. Przegląd literatury jest aktualny i wyczerpujący, a Autor trafnie identyfikuje jedno z zasadniczych ograniczeń szeroko stosowanego paradygmatu tzw. podejścia średniego pola, w szczególności w odniesieniu do opisu mechanizmu Wegenera–Bergerona–Findeisena.

Rozdział 2, zatytułowany *The Adiabatic Parcel Model*, zawiera charakterystykę procesów atmosferycznych związanych z adiabatycznymi przemianami zachodzącymi w określonej objętości powietrza unoszącej się pionowo w atmosferze. Autor definiuje przyjęte założenia fizyczne oraz formułuje równania bilansowe energii (temperatury) i ciśnienia. Zwraca również uwagę, że do pełnego opisu analizowanych procesów niezbędne jest zastosowanie dokładnego modelu mikrofizyki chmur.

Rozdziały 3 i 4 przedstawiają dwa alternatywne podejścia numeryczne do modelowania procesów mikrofizycznych. Pierwsze z nich to tzw. model *bulk*, oparty na założeniu natychmiastowego dostosowania układu do stanu nasycenia. Drugie podejście to model lagranżowski, wykorzystujący metodę super-kropli.

Rozdział piąty stanowi zasadniczą część rozprawy i prezentuje oryginalny wkład Autora. Zawiera on szczegółowy opis opracowanego modelu, a także wyniki licznych testów oraz starannie przeprowadzone analizy poprawności i wrażliwości zaproponowanego podejścia.

Główna część rozprawy kończy się podsumowaniem oraz prezentacją wniosków wynikających z przeprowadzonych badań i analiz.

W mojej ocenie Doktorant wykazał się dużą starannością w zakresie poprawności językowej, w tym składni oraz interpunkcji. Na uwagę zasługuje również wysoki poziom graficznego opracowania materiału. Rysunki są estetyczne, czytelne i skutecznie wspierają przekaz merytoryczny.

Aktualność i wybór tematu

Podjęty temat badawczy, czyli dokładne i wiarygodne modelowanie mikrofizyki chmur dwufazowych w warunkach przepływów turbulentnych, należy bez wątpienia do aktualnych i istotnych problemów współczesnej fizyki atmosfery. Chmury odgrywają kluczową rolę

w bilansie radiacyjnym Ziemi oraz mają istotny wpływ na kształtowanie pogody i klimatu zarówno w skali regionalnej i globalnej. Nadal jednak ich niedostatecznie dokładna reprezentacja w numerycznych modelach prognozy pogody (NWP) pozostaje jednym z głównych źródeł niepewności prognoz meteorologicznych.

Autor trafnie wskazuje na rozbieżności pomiędzy obserwowaną trwałością chmur wielofazowych, w szczególności w odniesieniu do zawartości przechłodzonej wody, a wynikami symulacji numerycznych, które często prowadzą do zbyt szybkiego rozwoju fazy stałej. Choć problem ten jest dobrze udokumentowany w literaturze, wciąż nie doczekał się satysfakcjonującego rozwiązania posiadającego spójne i jednoznaczne podstawy fizyczne. W tym świetle wybór problematyki badawczej należy ocenić jako w pełni uzasadniony i wartościowy, ponieważ może on wnieść istotny wkład w dalszy rozwój modelowania procesów chmurowych. Reasumując wybór tematu świadczy o dobrej orientacji Autora w aktualnym stanie wiedzy oraz o umiejętnym zidentyfikowaniu obszaru, w którym możliwy jest istotny wkład oryginalny.

Ocena merytoryczna rozprawy:

Autor przeprowadził badania na wysokim poziomie merytorycznym oraz skutecznie opracował model umożliwiający wiarygodne odwzorowanie wpływu turbulencji powietrza na dynamikę wzrostu cząstek fazy ciekłej i lodowej. W zaproponowanym modelu turbulencja reprezentowana jest w sposób statystyczny, poprzez stochastyczne fluktuacje pionowej prędkości cząstek (super-kropelek) względem średniego ruchu rozważanego układu. Dodatkowo uwzględnia się skończony czas mieszania turbulentnego skalarów (temperatury i pary wodnej), przy czym intensywność oraz skale czasowe tych procesów wyznaczone są na podstawie skalowania Kolmogorowa. Tak sformułowany model umożliwia analizę wpływu lokalnej zmienności turbulentnej na dynamikę wzrostu cząstek i stanowi istotną przewagę nad tradycyjnymi podejściami opartymi na uśrednionych polach.

Za pomocą opracowanego modelu Autor przeprowadził rozbudowaną analizę wpływu fluktuacji pola turbulencji na mikrofizykę chmur z fazą ciekłą i stałą. Testy zostały starannie zaplanowane i obejmują szereg istotnych aspektów działania modelu. Autor przeanalizował wyniki symulacji dla różnych warunków dynamicznych między innymi dla unoszenia powietrza z jednostajną prędkością (w szerokim zakresie wartości prędkości), w warunkach ruchu oscylacyjnego powyżej podstawy chmury oraz dla różnych wartości intensywności turbulencji. Wyniki uzyskane za pomocą nowego modelu są rzetelnie porównywane z wynikami modeli, których konstrukcja opiera się na założeniu uśrednionego pola. Takie podejście umożliwia jednoznaczne wskazanie, które założenia modelowe odpowiadają za obserwowane różnice w zachowaniu układu i stanowi mocną stronę rozprawy.

Interpretacja wyników jest bardzo rozbudowana, dobrze uzasadniona, ale i ostrożna. Autor poprawnie identyfikuje zakres stosowności uzyskanych rezultatów i jasno wskazuje ograniczenia wynikające z przyjętych uproszczeń, takich jak pominięcie procesów zderzeniowych, koalescencji czy sedymentacji.

Na uwagę zasługuje również przeprowadzona analiza wrażliwości modelu na szereg parametrów, w tym m.in. tempo dysypacji energii, koncentrację cząstek lodowych oraz prędkości unoszenia. Wykonanie tych dodatkowych prac świadczy o dojrzałości badawczej Autora i umożliwia lepsze zrozumienie mechanizmów fizycznych leżących u podstaw obserwowanych efektów.

Uwagi merytoryczne

Przeprowadzone analizy cechują się starannością oraz wysokim poziomem szczegółowości. Pewne kwestie poruszone w rozprawie mogłyby jednak zostać dodatkowo doprecyzowane i uzupełnione o bardziej pogłębioną dyskusję.

- W opracowanym modelu stochastycznej turbulencji doktorant przyjmuje założenie, że fluktuacje prędkości przepływu turbulentnego mają cechy rozkładu normalnego. Na potrzeby przeprowadzonych analiz przyjęte uproszczenie można uznać za uzasadnione. Warto jednak zauważyć, że liczne badania eksperymentalne oraz wyniki symulacji numerycznych dostępne w literaturze wskazują, iż rozkład fluktuacji prędkości w turbulencji nie jest idealnie gaussowski. W szczególności homogeniczna izotropowa turbulencja charakteryzuje się ujemnym współczynnikiem skośności oraz *nadmiarową* kurtozą. Z tego względu celowe byłoby uzupełnienie rozprawy o dyskusję dotyczącą potencjalnego wpływu tych odchyleń (od rozkładu normalnego) na uzyskane wyniki oraz wrażliwość modelu na przyjęte założenia.
- W rozdziale 5.5.1 doktorant podejmuje próbę analizy długoterminowego zachowania opracowanego stochastycznego modelu mikrofizyki w warunkach okresowego wymuszania. Uzyskane rezultaty, zaprezentowane m.in. na rysunkach 5.8 oraz 5.10, stanowią wartościowe uzupełnienie wcześniejszych analiz i pozwalają lepiej zrozumieć własności proponowanego podejścia modelowego. Jednocześnie warto zauważyć, że tak zaprojektowany eksperyment numeryczny opiera się na istotnych założeniach upraszczających i w ograniczonym stopniu odzwierciedla rzeczywiste procesy zachodzące w chmurach atmosferycznych. W analizowanym horyzoncie czasowym rzędu 4–8 godzin coraz większego znaczenia nabierają inne mechanizmy fizyczne, w szczególności wzrost kropel poprzez koalescencję, które nie są uwzględnione w rozważanym eksperymencie. Z tego względu przedstawione wyniki należy interpretować przede wszystkim jako analizę o charakterze testowym i metodologicznym, a nie jako bezpośrednie odwzorowanie rzeczywistych procesów mikrofizycznych.
- Pewien niedosyt może budzić ograniczony zakres dyskusji dotyczącej roli czynnika krotności w metodzie super-kropelek. W rozprawie wskazano, że przyjęto jednakową wartość krotności dla wszystkich cząstek oraz że wyniki modelu wykazują niewielką wrażliwość na zmianę tego parametru. Z przedstawionego opisu nie wynika jednak jednoznacznie, w jaki sposób parametr ten został zdefiniowany i zaimplementowany numerycznie. Przy większych wartościach czynnika krotności zasadne wydaje się rozważenie, czy zaniedbanie efektów grawitacyjnego opadania cząstek pozostaje uzasadnione, a także czy zastosowane przybliżenie Stokesa do opisu siły oporu jest nadal adekwatne.
- Opis zamieszczony na stronie 48 rozprawy może rodzić pewne trudności interpretacyjne. Doktorant wskazuje tam, że efekty opadania cząstek są pomijane, podczas gdy w równaniu (5.9) pojawia się człon związany z działaniem siły grawitacji. Warto byłoby już na początku doprecyzować przyjęte założenia oraz jednoznacznie wskazać, w jakim zakresie oddziaływanie grawitacji jest uwzględniane w sformułowaniu równań ruchu.

Rekomendacja

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska stanowi staranne i oryginalne opracowanie naukowe, dotyczące ważnej, złożonej, a zarazem aktualnej problematyki badawczej. Przygotowanie dokładniejszych i bardziej realistycznych modeli numerycznych mikrofizyki chmur jest niezbędne w kontekście rozwoju narzędzi obliczeniowych wykorzystywanych w modelowaniu klimatu oraz poprawy wiarygodności numerycznych prognoz pogody. Doktorant wykazał się wysokimi kompetencjami w zakresie prowadzenia złożonych analiz fizycznych oraz budowy zaawansowanych modeli numerycznych.

Podsumowując recenzję, stwierdzam, że rozprawa mgr. Daniela G. Albuquerque pt. „*Modeling particle growth by condensation and deposition in turbulent mixed-phase cloud volumes*” zdecydowanie spełnia warunki określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. z 2024 r. poz. 1571 z późn. zm.). Wnoszę zatem o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Bogdan
Józef Rosa

Elektronicznie
podpisany przez
Bogdan Józef Rosa
Data: 2026.01.07
18:32:49 +01'00'