

Dr hab. Piotr M. Korczyk  
Zakład Biosystemów i Miękkiej Materii  
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN  
ul. Pawińskiego 5B  
02-106 Warszawa

Warszawa 16.12.2024

**Recenzja rozprawy doktorskiej autorstwa mgr. Stanisława Króla  
pt. „*Mieszanie turbulencyjne w chmurach – analiza danych doświadczalnych*”,**

**wykonanej pod kierunkiem prof. dr hab. Szymona Malinowskiego  
oraz dr inż. Marty Waławczyk  
na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego**

Rozprawa doktorska mgr. Stanisława Króla została zgłoszona do oceny decyzją Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego.

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. Stanisława Króla podejmuje tematykę mieszania turbulencyjnego w chmurach cumulus, opierając się na analizie danych z kampanii badawczej EUREC<sup>4</sup>A, przeprowadzonej w 2020 roku w rejonie Barbadosu. Problematyka mieszania w chmurach cumulus ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia procesów atmosferycznych, wpływając na modelowanie pogody i klimatu. Autor podjął się zadania wymagającego zarówno głębokiej wiedzy teoretycznej, jak i zaawansowanych umiejętności analizy danych.

Celem pracy było zbadanie właściwości turbulencji w atmosferze, w tym stopnia odchylenia od izotropii oraz równowagi, a także opracowanie metod umożliwiających segmentację obszarów turbulentnych. Rozprawa obejmuje zastosowanie nowoczesnych metod analitycznych, w tym analizy ilościowej rekurencji, zwykle stosowanej w teorii chaosu.

Rozprawa została podzielona na pięć głównych rozdziałów:

**1. Chmury cumulus.** Rozdział ten dostarcza szczegółowego opisu fizycznych i dynamicznych aspektów chmur cumulus. Autor przedstawia ich genezę, mechanizmy ewolucji oraz znaczenie w kontekście procesów atmosferycznych, ukazując je w szerokim kontekście teoretycznym i praktycznym. Rozdział stanowi wprowadzenie do problematyki podjętej w pracy, zwracając uwagę na istotność chmur cumulus jako obiektów badawczych, które odgrywają kluczową rolę w wymianie energii i masy w atmosferze. Autor w sposób skrótowy, ale jednocześnie sprawny i wyczerpujący, opisuje stan wiedzy w temacie podjętym w pracy, uwzględniając najważniejsze dotychczasowe badania oraz ich wnioski. Omówione zostały także mechanizmy mieszania turbulencyjnego w chmurach, z uwzględnieniem specyficznych parametrów, takich jak prądy wznoszące i wymiana masy z otoczeniem, co pozwala na lepsze zrozumienie zjawisk dynamicznych zachodzących w tego typu formacjach chmurowych.

**2. Metody analizy danych.** Rozdział ten skupia się na narzędziach teoretycznych i metodach analizy turbulencji. Autor szczegółowo opisuje dekompozycję Reynoldsa, analizę trójkąta

turbulencji oraz innowacyjne podejście wykorzystujące analizę ilościową rekurencji. Rozdział ten wprowadza czytelnika w problematykę stosowanych narzędzi analitycznych, ukazując ich teoretyczne podstawy oraz praktyczne zastosowanie. Każda z metod została omówiona w kontekście jej zalet, ograniczeń i zastosowania do danych z kampanii EUREC<sup>4</sup>A, co pozwala lepiej zrozumieć, jak narzędzia te przyczyniają się do analizy dynamiki turbulencji.

**3. Dane.** W tym rozdziale przedstawiono szczegółowy opis danych zebranych podczas kampanii pomiarowej EUREC4A, w tym charakterystykę instrumentów, takich jak sondy prędkości powietrza i termometry. Autor omówił także specyfikę zbierania danych w trakcie lotów badawczych oraz wyzwania związane z ograniczoną rozdzielczością przestrzenną i czasową pomiarów.

**4. Wyniki.** Ten rozdział stanowi trzon pracy i zawiera kompleksową analizę wyników badań. Autor przedstawił szczegółowe wykresy tempa dyssypacji energii, skal długości turbulencji oraz anizotropii. W rozdziale znajdują się także interpretacje odchyłeń od teorii Kołmogorowa oraz wyniki analiz nierównowagi turbulencji, co dostarcza cennych informacji o mechanizmach zachodzących w chmurach. Autor poświęca szczególną uwagę metodzie analizy ilościowej rekurencji, która została wykorzystana do identyfikacji przejść między różnymi stanami turbulentnymi w czasie i przestrzeni. Podkreśla jednak, że zastosowanie tej metody wiązało się z wyzwaniami, takimi jak rosnąca złożoność obliczeniowa wraz ze wzrostem wielkości macierzy rekurencji, co wymagało optymalizacji algorytmów analizy. Wyniki były również silnie uzależnione od parametrów wejściowych, takich jak wielkość okna czasowego czy rozdzielczość danych, co zostało szczegółowo omówione w pracy. Dodatkowo, wprowadzenie statystyk warunkowych pozwoliło na kwantyfikację powiązań między różnymi skalami turbulencji a ich wpływem na dynamikę chmur. Te analizy, przeprowadzone w oparciu o dane z kampanii EUREC<sup>4</sup>A, umożliwiły autorowi bardziej dogłębne zrozumienie zjawisk mieszania w atmosferze oraz lepsze określenie ról procesów turbulentnych w wymianie energii między chmurami a otaczającą atmosferą.

**5. Podsumowanie.** Rozdział ten zawiera refleksje nad osiągnięciami pracy oraz propozycje przyszłych kierunków badań. Autor zwrócił uwagę na możliwość rozszerzenia zastosowanych metod na inne typy chmur oraz integrację wyników z modelami numerycznymi atmosfery.

Każdy z rozdziałów został starannie opracowany, przy czym szczególną uwagę zwracają rozdziały wstępne, które w dogłębny i przystępny sposób wprowadzają czytelnika w tematykę rozprawy, oraz rozdział poświęcony wynikom, stanowiący trzon dysertacji. Autor zaprezentował wyniki w sposób klarowny, wzbogacając je wykresami i tabelami. Na szczególną pochwałę zasługują logiczna i przejrzysta struktura pracy, jej spójność, płynność oraz umiejętne posługiwanie się przez autora językiem pisany.

Praca dotyczy istotnego zagadnienia w dziedzinie fizyki atmosfery. Procesy turbulencyjne w chmurach mają kluczowe znaczenie dla modelowania pogody i klimatu. Zbadanie ich specyfiki, szczególnie w kontekście takich parametrów jak anizotropia i nierównowaga, wypełnia lukę w dotychczasowych badaniach. Warto zaznaczyć, że wyniki te mają potencjał do zastosowania w

ulepszaniu parametrów modeli numerycznych, co jest szczególnie istotne w obliczu rosnącego zapotrzebowania na dokładniejsze prognozy meteorologiczne i analizy klimatyczne.

Anizotropia turbulencji, czyli zróżnicowanie właściwości turbulentnych w zależności od kierunku, jest jednym z kluczowych parametrów badanych w pracy. Autor szczegółowo przeanalizował, w jaki sposób prądy wznoszące i mieszanie z otoczeniem wpływają na ten parametr w chmurach cumulus. Na podstawie uzyskanych wyników wykazano, że anizotropia jest szczególnie widoczna w strefach przejściowych między obszarami intensywnej turbulencji a spokojniejszymi partiami atmosfery. Tego rodzaju analiza jest nie tylko istotna dla zrozumienia dynamiki chmur, ale także dla poprawy algorytmów wykorzystywanych w modelach numerycznych.

Szczególnie wartościowe są badania nad odchyleniami od teorii Kołmogorowa. W literaturze teoria ta jest powszechnie uznawana za fundament w badaniach turbulencji, jednak w atmosferze, gdzie procesy zachodzą w szerokim spektrum skal czasowych i przestrzennych, jej założenia nie zawsze są spełnione. Autor trafnie skoncentrował się na tych odchyleniach, co stanowi istotny wkład w rozwój wiedzy o mechanizmach mieszania w atmosferze.

Autor wprowadza nowatorskie podejście do analizy turbulencji w chmurach, wykorzystując metody zapożyczone z teorii chaosu i układów dynamicznych. Zastosowanie analizy ilościowej rekurencji do badania zmienności parametrów turbulencji stanowi cenne osiągnięcie. Na przykład, zastosowanie macierzy rekurencji pozwoliło na identyfikację obszarów charakteryzujących się różnymi stanami dynamicznymi. Jest to szczególnie ważne w kontekście analizy chmur cumulus, które są wyjątkowo zmienne i złożone pod względem swoich właściwości fizycznych.

Metoda ta daje możliwość analizy nie tylko w kontekście średnich wartości parametrów, ale także ich zmienności w czasie i przestrzeni. Tego typu podejście może być z powodzeniem wykorzystane w przyszłych badaniach, np. w celu określenia granic turbulentnych obszarów w danych trójwymiarowych czy też w analizie innych zjawisk atmosferycznych.

Przeprowadzone analizy, w tym obliczenia parametrów turbulencji, zostały wykonane samodzielnie przez autora z użyciem zaawansowanego oprogramowania MATLAB. Na uwagę zasługuje fakt, że autor nie tylko przeprowadził analizy zgodnie z ustalonymi standardami, ale również twórczo poszerzył ich zakres. Na szczególną uwagę zasługuje interpretacja kluczowych parametrów turbulencji, które umożliwiły szczegółową charakterystykę badanych zjawisk.

Wyniki zostały przedstawione w sposób klarowny, z wykorzystaniem odpowiednich narzędzi wizualizacji, takich jak wykresy czasowe i histogramy. Interpretacja wyników jest logiczna i dobrze uzasadniona.

## **Uwagi**

Pomimo zasadniczo pozytywnej oceny pracy mam również kilka pomniejszych uwag:

- Autor zarysował potencjalne zastosowania wyników w modelowaniu atmosferycznym, jednak mogłaby zostać bardziej szczegółowo omówiona ich implementacja w istniejących modelach numerycznych. Rozszerzenie tej części mogłoby podkreślić praktyczną wartość pracy, szczególnie w kontekście modelowania chmur stratocumulus czy bardziej złożonych układów konwekcyjnych.

- Choć zastosowane metody analizy zostały szczegółowo opisane, dobrze byłoby przeprowadzić bardziej wnikliwą walidację ich wyników. Na przykład, analiza ilościowa rekurencji, mimo swojej innowacyjności, mogłaby zostać porównana z innymi metodami stosowanymi w badaniach turbulencji, takimi jak analiza spektralna czy metoda wieloskalowego rozkładu (multiscale decomposition).
- Rozprawa zawiera jedynie krótką wzmiankę na temat niepewności związanych z pomiarami. Głębsza analiza tego aspektu pozwoliłaby lepiej ocenić jakość danych użytych w pracy.
- Na stronie 21 Autor komentuje Rysunek 2.1.2 przedstawiający trójkąt turbulencji. Omawia trzy punkty pomiędzy którymi trójkąt jest rozciągnięty. Jednak przytoczone współrzędne dla punktu 1. i 2. nie mają odniesienia do współrzędnych punktów na wykresie.
- W oświadczeniu o autorstwie, znajdującym się bezpośrednio po stronie tytułowej, cytowane są publikacje zawierające wyniki powstałe w trakcie przygotowywania rozprawy. Brak jest jednak informacji o autorach tych publikacji, lub choćby wskazania pierwszego autora.

## Podsumowanie i wniosek

Przedstawiona do recenzji praca doktorska mgr. Stanisława Króla podejmuje istotny temat dynamiki turbulencji w chmurach, który ma kluczowe znaczenie dla rozwoju modelowania atmosferycznego oraz prognozowania klimatycznego. Zastosowanie analizy ilościowej rekurencji i interpretacja anizotropii turbulencji w kontekście danych doświadczalnych to wkład, który łączy teorię z praktycznym użyciem nowoczesnych metod badawczych. Praca obejmuje zarówno szczegółowy opis teoretyczny, jak i skrupulatną analizę empiryczną, uwzględniając bogatą literaturę przedmiotu. Wyniki zostały przedstawione w sposób klarowny i logiczny, z użyciem czytelnych wykresów i tabel, co czyni je przystępnymi dla odbiorców. Autor wykazał się znakomitą znajomością metod analitycznych, tworząc nie tylko analizy, ale również rozwijając podejście autorskie w interpretacji danych. Wyniki badań zostały już opublikowane w dwóch artykułach naukowych zamieszczonych w renomowanych czasopismach z dziedziny fizyki atmosfery, co dodatkowo potwierdza ich jakość i znaczenie dla środowiska naukowego.

Podsumowując, rozprawa mgr. Stanisława Króla spełnia wszystkie wymogi określone w uchwale nr 157 Senatu Uniwersytetu Warszawskiego dotyczącej nadania stopnia doktora. Praca prezentuje wysoki poziom merytoryczny i metodologiczny, wnosi oryginalny wkład w badania nad turbulencją w chmurach, a przedstawione wyniki mają potencjał praktycznego zastosowania. Zidentyfikowane niedociągnięcia nie obniżają całości wartości naukowej pracy.

W związku z przedstawioną wyżej pozytywną oceną całej pracy doktorskiej wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego o dopuszczenie mgr. Stanisława Króla do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

*PM Korczyński*