

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, 11 lipca 2025 r.

RECENZJA

pracy doktorskiej **mgra Roberta Grosza** wykonana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego. Tytuł rozprawy

„Small-scale temperature fluctuations in atmospheric flows”.

Rozprawa została przygotowana pod kierunkiem
prof. dra hab. Szymona Malinowskiego z Instytutu Geofizyki, Wydziału Fizyki, Uniwersytetu Warszawskiego
Promotorem pomocniczym jest **prof. Raymond A. Shaw** z Uniwersytetu Technicznego w Michigan, USA

Informacje i uwagi wstępne

Opiniowana rozprawa doktorska dotyczy analizy fluktuacji pola temperatury w turbulentnych przepływach atmosferycznych o zróżnicowanej charakterystyce dynamicznej. Zakres tematyczny pracy osadzony jest w kontekście procesów chmurowych, które mają istotny wpływ na pogodę i kształtują klimat danego regionu. Przygotowana rozprawa pogłębia dotychczasową wiedzę o mechanizmach mikroskalowej zmienności pola temperatury w atmosferze i ich związkach z procesami konwekcyjnymi.

Praca ma charakter eksperymentalno-obliczeniowy i łączy zagadnienia fizyki atmosfery z elementami przetwarzania danych pomiarowych. Autor dąży do uzupełnienia luk zidentyfikowanych w literaturze przedmiotu poprzez analizę danych z eksperymentów laboratoryjnych prowadzonych w tunelu aerodynamicznym (LACIS-T) i komorze chmurowej (II chamber) oraz kampanii terenowej EUREC⁴A. Do pomiarów temperatury Doktorant wykorzystał innowacyjne narzędzie pomiarowe, jakim jest superszybki termometr UFT (*UltraFast Thermometer*). Urządzenie to umożliwia rejestrację fluktuacji temperatury z wysoką rozdzielczością czasową i przestrzenną.

Analiza danych polega na użyciu dedykowanych narzędzi i algorytmów, które redukują wpływ błędów pomiarowych na wyniki analiz. Opisane w rozprawie metody badawcze i wykonane obliczenia są raczej standardowe, ale dostosowane do specyfiki oraz jakości danych eksperymentalnych. Walidacja wyników (parametrów statystycznych) odbywa się przez porównanie z danymi dostępnymi w literaturze, wynikami z wcześniej prowadzonych eksperymentów oraz wynikami z symulacji DNS (*Direct Numerical Simulations*).

Rosa

Struktura i zawartość pracy

Struktura pracy odbiega od klasycznego układu rozprawy, gdyż jej istotnym elementem jest załączona publikacja. Jednakże w mojej ocenie Doktorantowi udało się uzyskać spójną tematycznie logiczną całość.

Praca jest napisana w języku angielskim, a jej główna część liczy 79 stron. Rozprawę poprzedzają: strona tytułowa, podziękowania, deklaracja oryginalności streszczenia w języku angielskim i polskim oraz spis treści, zajmujących łącznie 14 stron. Rozprawę uzupełniają 3 załączniki. Dwa z nich (A i B) zawierają dodatkowe serie danych pomiarowych z kampanii EUREC⁴A oraz obliczone na ich podstawie wartości unormowanej dyssypacji temperatury. Trzecim a zarazem najważniejszym załącznikiem (C) jest manuskrypt artykułu, który został opublikowany w renomowanym czasopiśmie *Atmospheric Measurement Techniques*. Czasopismo to ma wysoką punktację na liście MNIŚW, wynoszącą aż 140 pkt. Artykuł został przygotowany przez 6 autorów, przy czym Doktorant jest wiodącym i korespondencyjnym autorem tej publikacji.

Oprócz załączników w rozprawie znajdujemy spis symboli, także greckich, wraz z wyjaśnieniami. Tekst rozprawy zamyka bibliografia, licząca aż 37 stron. Wykaz literatury jest dość obszerny i obejmuje w większości prace opublikowane w ostatnich latach. Można zatem przyjąć, że prowadzone przez Doktoranta badania naukowe opierają się na współczesnym stanie wiedzy.

Rozdział 1, *Introduction*, składa się z 4 części. W pierwszej znajdujemy podstawowe informacje o procesach chmurowych w atmosferze i roli chmur w kształtowaniu klimatu. Druga część to wprowadzenie do zagadnień związanych z wpływem turbulencji na pole temperatury. Następnie Doktorant opisuje aspekty fizyczne związane z dyssypacją temperatury i zwięźle przedstawia zakres rozprawy.

Rozdział 2 zatytułowany *Measurements* zawiera szczegóły dotyczące konstrukcji i działania termometru UFT. Najważniejszą częścią tego rozdziału jest opis trzech środowisk pomiarowych, tj. tunelu aerodynamicznego LACIS-T (Leibniz Institute for Tropospheric Research), komory chmurowej tzw. II *chamber* oraz kampanii terenowej EUREC⁴A.

Rozdziały 3 i 4 przedstawiają analizy pomiarów prowadzonych w warunkach laboratoryjnych oraz pomiarów terenowych.

Główna część rozprawy kończy się podsumowaniem i przedstawieniem wniosków z przeprowadzonych badań i analiz. Dodatkowe podsumowanie znajdujemy także w załączonym artykule wraz ze zwięzłym streszczeniem elementów nowości.

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

Dokładna analiza procesów atmosferycznych towarzyszących powstawaniu i dynamice chmur, wraz z ilościowym opisem kluczowych mechanizmów mających wpływ na ich przebieg to ważne zdanie badawcze. Podpierając się raportem ICCP z 2021 r. Doktorant słusznie twierdzi, że procesy chmurowe pozostają głównym źródłem niepewności modelowanych prognoz pogody i klimatu. Warto również podkreślić, że natura i dynamika tych procesów nieustannie się zmienia wskutek coraz większego wpływu czynników pochodzenia antropogenicznego. Wiarygodne prognozy pogody stanowią podstawowe źródło informacji dla wielu sektorów gospodarki, stąd też w ostatnich latach włożono ogromny wysiłek, aby

Rosie

poprawić ich dokładność. Jednym z kierunków rozwoju jest udoskonalenie reprezentacji statystycznej procesów podskalowych. Dowodem mnogości prowadzonych badań jest bogata literatura naukowa, którą Doktorant przywołuje w swojej rozprawie. Pomimo licznych analiz i wniosków, kluczowym wyzwaniem pozostaje dokładniejszy opis fizyczny drobnoskalowych procesów termodynamicznych. Podstawowym źródłem wiedzy o roli fluktuacji temperatury pozostają pomiary. Należy jednak podkreślić, że techniki teledetekcyjne, za pomocą radarów, nie pozwalają uzyskać pożądanej dokładności. Bazowanie wyłącznie na pomiarach *in-situ* wykonywanych z pokładów samolotów lub balonów również ma swoje ograniczenia wynikające z niskiej rozdzielczości przestrzennej pozyskiwanych danych.

W niniejszej rozprawie Doktorant zaprezentował kompleksowe podejście do badania drobnoskalowych fluktuacji temperatury w przepływach turbulentnych poprzez wykonanie eksperymentów w tunelu aerodynamicznym oraz komorze chmurowej, a także analizę danych pochodzący z kampanii terenowej. Dane z eksperymentów laboratoryjnych cechują się wysoką rozdzielczością przestrzenną i dokładnością, z kolei dane z *in-situ* z kampanii EUREC⁴A to rzeczywisty obraz tych złożonych procesów. Przyjęta metodologia pozwoliła wykazać spójność zachowania pewnych cech statystycznych pola temperatury w tych trzech analizowanych przypadkach. W mojej ocenie praca jest potrzebnym i ważnym krokiem w kierunku pełniejszego opisu fizycznego tych zjawisk.

Ocena merytoryczna rozprawy:

W rozprawie Doktorant nie formułuje hipotez w klasycznej postaci tj. jako numerowanych założeń do zweryfikowania. To utrudnia ocenę wkładu doktoranta i elementów nowości jego badań. Niemniej jednak główne cele i domniemane hipotezy badawcze będące rdzeniem pracy można wyodrębnić z treści.

Rozdział 1 zawiera obszerny przegląd literatury przedmiotu. Doktorant opisuje proces powstawania chmur oraz rolę różnych czynników wpływających na jego dynamikę. W nawiązaniu do konwekcji Rayleigha-Bénarda znajdujemy uzasadnienie potrzeby prowadzenia badań eksperymentalnych oraz ograniczenia metod numerycznych. Zasadniczą część rozdziału jest formalny opis matematyczny, obejmujący podstawowe równania dynamiki płynów oraz charakterystyczne skale, pozwalające na ilościowy opis procesów atmosferycznych. Doktorant wprowadza także pojęcia funkcji struktury dla pola prędkości oraz pól skalarnych, opierając się na klasycznych teoriach turbulencji. Dodatkowo omawiana jest postać widma energii pola skalarnego dla różnych wartości liczby Schmidta. Część teoretyczna kończy się opisem aktualnego stanu wiedzy w zakresie dyssypacji temperatury w różnych reżimach przepływu. Sformułowane w tym rozdziale wielkości fizyczne Doktorant wyznacza (przy użyciu danych pomiarowych) i analizuje w dalszej części rozprawy.

W **rozdziale 2** przedstawiony jest opis urządzania do pomiaru temperatury – termometru UFT. Użycie tego narzędzia umożliwiło pozyskanie wysokorozdzielczych danych, co miało kluczowe znaczenie dla przeprowadzenia oryginalnych analiz. W dalszej części rozdziału znajdujemy opis obiektów eksperymentalnych, w których prowadzone były pomiary. Autor szczegółowo uzasadnia wybór tych obiektów i warunki prowadzonych eksperymentów. W tunelu aerodynamicznym uzyskano pożądane warunki do analizy turbulentnego mieszania dwóch strumieni powietrza o różnych temperaturach. Z kolei eksperymenty prowadzone w komorze chmurowej były ukierunkowane na analizę procesów konwekcji. W mojej ocenie zakres parametrów, w których prowadzone były badania został poprawnie dobrany. Ostatnia część rozdziału poświęcona jest kampanii pomiarowej EUREC⁴A. Przedstawiono w niej

Rose

charakterystykę warunków atmosferycznych, różnorodność zastosowanych narzędzi pomiarowych oraz szczegóły dotyczące organizacji i realizacji pomiarów w trakcie kampanii.

Rozdział 3 zawiera pierwsze wyniki i opracowania danych pomiarowych z eksperymentów laboratoryjnych. Dane z tunelu aerodynamicznego (LACIS-T) posłużyły do analizy fluktuacji temperatury w różnych lokalizacjach sensora. Doktorant badał między innymi standardowe odchylenie i skośność zarejestrowanych wartości temperatury. Następnie wykonał rozbudowaną analizę fourierowską, która doprowadziła do identyfikacji 4 reżimów spektralnych. Istotnym elementem tych analiz było porównanie unormowanego widma z zakresu dyssypacji z analitycznymi formułami znanymi z literatury (Pope i Pao). Porównanie to wskazuje na dobrą zgodność teorii z danymi eksperymentalnymi.

Analogiczne analizy spektralne Doktorant przeprowadził także dla danych z komory chmurowej. W tym przypadku zidentyfikowano 3 nieco inne reżimy spektralne, co jest skutkiem specyfiki przepływu. W odróżnieniu do tunelu aerodynamicznego, w którym mieszane są 2 strumienie o różnych temperaturach w komorze chmurowej przepływ turbulentny jest konsekwencją wymuszonej konwekcji. Więcej analiz dotyczących eksperymentów w komorze chmurowej jest przedstawionych w załączonym artykule.

W **rozdziale 4** Doktorant przedstawił dane zebrane w trakcie pomiarów lotniczych podczas kampanii EUREC⁴A. Pomiary te były prowadzone na 3 różnych wysokościach, tzn. w warstwie granicznej, na wysokości chmur i powyżej poziomu chmur. Bazując na tych danych Doktorant obliczył unormowane wartości dyssypacji temperatury i wykonał histogramy dla każdego segmentu. Do kształtu tych histogramów dopasował funkcję wykładniczą i zaproponował odpowiednie relacje analityczne pomiędzy współczynnikami dopasowania. W ostatniej części znajdujemy porównanie histogramów wykonanych przy użyciu danych z kampanii EUREC⁴A z tymi opracowanymi na podstawie danych z pomiarów laboratoryjnych (w tunelu LACIS-T i komorze chmurowej). Warto zaznaczyć, że kształt tych histogramów jest w zgodności jakościowej. Doktorant sugeruje, że może to być uniwersalna cecha przepływów atmosferycznych.

Dalsze, bardziej szczegółowe analizy danych z komory chmurowej zostały przedstawione w załączonym artykule. Znajdujemy tam między innymi standardowe odchylenia fluktuacji temperatury i skośność przy różnych położeniach sensora. Analiza ta pozwala na uchwycenie zmian charakteru turbulencji w różnych miejscach komory. W artykule opisano również zależność okresu wielkoskalowej konwekcji od gradientu temperatury, co pozwala lepiej zrozumieć mechanizmy organizacji przepływu w układzie konwekcyjnym. Całość uzupełnia analiza spektralna, w której Doktorant identyfikuje zakresy dominujących częstości oraz charakterystyki widmowe fluktuacji temperatury. Opracowanie kończy porównanie wyników eksperymentalnych z wynikami symulacji DNS, co stanowi istotny element walidacji uzyskanych obserwacji i umożliwia ocenę zgodności modelowania numerycznego z danymi empirycznymi.

Uwagi merytoryczne

Wybór metodologii badawczej należy uznać za przemyślany i adekwatny do realizowanych celów. Przeprowadzone analizy cechują się starannością oraz odpowiednim poziomem szczegółowości. Niemniej jednak, pewne aspekty rozprawy wymagają doprecyzowania oraz pogłębionej dyskusji.

Rosa

- Choć kontekst pracy odnosi się do procesów chmurowych, badania laboratoryjne zostały przeprowadzone w warunkach powietrza suchego. Można zasadnie przypuszczać, że obecność pary wodnej znacząco wpłynie na charakterystykę drobnoskalowych fluktuacji temperatury, co może ograniczać możliwość bezpośredniego odniesienia uzyskanych wyników do warunków atmosferycznych typowych dla procesów chmurowych.
- Doktorant zwraca uwagę na wpływ niedostatecznej izolacji termicznej w tunelu aerodynamicznym na uzyskane dane eksperymentalne. Zważywszy, że celem pracy było sformułowanie uogólnionych wniosków dotyczących zjawisk atmosferycznych, pojawia się uzasadniona wątpliwość co do stopnia reprezentatywności uzyskanych wyników względem rzeczywistych warunków panujących w atmosferze.
- Jednym z elementów, które Doktorant uznaje za nowatorskie, jest wskazanie braku korelacji między strukturami wielkoskalowymi a drobnoskalową turbulencją. Warto jednak zauważyć, że brak takiej zależności wynika bezpośrednio z klasycznej teorii turbulencji (np. koncepcji kaskady energetycznej), co podważa zasadność traktowania tej obserwacji jako oryginalnego wkładu.
- Do oryginalnych wyników pracy należy zaliczyć wykazanie liniowej zależności (w skali log-log) pomiędzy unormowaną dyssypacją temperatury a liczbą próbek (np. rys. 4.6). Choć obserwacja ta jest interesująca z punktu widzenia statystyki pomiarowej, jej znaczenie dla lepszego zrozumienia dynamiki procesów chmurowych wydaje się ograniczone. Sam Doktorant również przyznaje, że interpretacja fizyczna tego wyniku nie jest łatwa.
- W podsumowaniu (str. 67) Doktorant sugeruje, że asymetria nachylenia rozkładu temperatury może być wynikiem obecności struktur przypominających fale. Jednakże na stronie 69 stwierdza, iż w pobliżu ścianek tunelu aerodynamicznego nie zaobserwowano cech falowych. Ten fragment pracy pozostaje nie do końca jasny i rodzi pytanie, czy obserwacja (bądź jej brak) falowych struktur jest uzależniona od lokalizacji punktu pomiarowego w tunelu. Wymaga to dodatkowego komentarza lub doprecyzowania.

Chociaż rozprawa została napisana bardzo starannie, Doktorant nie ustrzegł się drobnych błędów redakcyjnych. Kilka z nich zestawilem poniżej:

- problemy z małą i wielką literą w tytułach artykułów w spisie literatury np. „The local structure of turbulence in incompressible viscous fluid for very large reynolds numbers”
- strona 41 przy informacji o prędkości w – zbędny przecinek przed „s”
- strona 41 (ostatnia linia) nadmiarowe „s” przed „small Taylor-Reynolds”
- strona 43 „non-dimensional” functions f_s ” a nie f_l .

W całej pracy jest bardzo dużo skrótów, które utrudniają czytanie tekstu. Pewnym ułatwieniem byłoby zestawienie ich w tabeli na początku rozprawy.

Rekomendacja

Przedstawiona od recenzji rozprawa doktorska to staranne opracowanie naukowe, które dotyczy ważnej, złożonej, ale również aktualnej problematyki. Pomiar drobnoskalowych fluktuacji temperatury i ich wpływ na mikrofizyczne procesy chmurowe to potrzebne źródło danych dla modeli prognoz pogody, a także walidacji symulacji numerycznych. Doktorant wykazał się kompetencją w prowadzeniu eksperymentów i przetwarzaniu danych pomiarowych. Podsumowując recenzję, stwierdzam, że rozprawa mgr. Roberta Grosza

Rosa

zatytułowana „*Small-scale temperature fluctuations in atmospheric flows*” 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 Rose