

dr hab. Bogdan Rosa
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
Państwowy Instytut Badawczy
ul. Podleśna 61
01-673 Warszawa
Tel: 22 56-94-362
e-mail: bogdan.rosa@imgw.pl

Warszawa, 11 styczeń 2023 r.

RECENZJA

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

*„Cloud Microphysical Measurements with Shadowgraph Imaging
Technique”.*

Rozprawa została przygotowana pod kierunkiem
prof. dra hab. Szymona Malinowskiego z Instytutu Geofizyki, Wydziału
Fizyki, Uniwersytetu Warszawskiego

Informacje i uwagi wstępne

Opiniowana rozprawa doktorska dotyczy pomiarów właściwości mikrofizycznych chmur w przepływach atmosferycznych. Praca ma charakter eksperymentalno-obliczeniowy i łączy zagadnienia fizyki atmosfery z elementami przetwarzania danych pomiarowych. Rozprawa składa się z trzech głównych części. Pierwsza część zawiera opis eksperymentów laboratoryjnych, które Doktorant wykonał przy użyciu przyrządu VisiSize D30. Przyrząd ten służy do wizualizacji ośrodków dyspersyjnych metodą obrazowania cieniem (*ang. shadowgraph imaging*). Eksperymenty te mają na celu kalibrację urządzenia przy wykorzystaniu generatora kropeł o identycznych średnicach.

Druga część pracy obejmuje eksperymenty terenowe, które były prowadzone zespołowo w stacji badań atmosferycznych Umweltforschungsstation Schneefernerhaus znajdującej się pod szczytem Zugspitze w niemieckich Alpach. Analiza danych pomiarowych obejmuje wyznaczenie szeregu statystycznych parametrów, które opisują strukturę chmur w różnych warunkach pogodowych. Są to między innymi intensywności grupowania się kropeł, zawartości wody w stanie ciekłym i widma średnic kropeł.

Trzecia część rozprawy to opis eksperymentów polegających na pomiarach opadów. Pomiaru te były prowadzone przy użyciu dwóch różnych przyrządów (VisiSize D30 i disdrometru) zamontowanych na dachu Instytutu Geofizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

Głównym narzędziem badawczym Doktoranta jest komercyjny przyrząd VisiSize D30 dedykowany do zastosowań przemysłowych (np. badanie charakterystyk oprysków rolniczych, pracy wtryskiwaczy paliw w silnikach, atomizacji farb w sprayu etc.). Doktorant dostosowuje parametry pracy tego urządzenia do pomiarów chmurowych. Analiza danych opiera się na wykorzystaniu oryginalnych, dedykowanych algorytmów, które redukują wpływ błędów pomiarowych na wynik. Opisane w rozprawie metody badawcze i wykonane analizy są bardzo rozbudowane. Treść pracy jest dobrze uporządkowana i mimo że dotyczy trzech problemów układa się w spójną całość. Cel pracy został szczegółowo i poprawnie określony.

Rosa

Struktura i zawartość pracy

Praca jest napisana w języku angielskim, a jej główna część liczy 103 strony. Rozprawę poprzedzają streszczenia w języku polskim i angielskim oraz spisy treści, tabel i rysunków, zajmujących łącznie 30 stron. Rozdział 1, *Introduction*, zawiera wstęp ogólny z opisem różnych technik eksperymentalnych stosowanych do pomiarów własności mikrofizycznych chmur. Znajdujemy tu również opis urządzeń pomiarowych, uzasadnienie podjęcia tematu, a także charakterystykę warunków pogodowych w niemieckiej stacji badań atmosferycznych Umweltforschungsstation Schneefernerhaus (UFS).

W rozdziale 2 zatytułowanym *Instrumentation and methodology* Autor przedstawia szczegóły dotyczące działania trzech urządzeń pomiarowych, które zostały użyte w badaniach tj. VisiSize D30, interferometru Dopplera (PDI) i optycznego disdrometru laserowego OTT Parsivel. Dodatkowo omówione są sposoby wyznaczania koncentracji kropel z danych pomiarowych uzyskiwanych z tych urządzeń. Kolejny rozdział *Laboratory experiments with monodisperse droplets* dotyczy badań laboratoryjnych mających na celu określenie dokładności urządzenia VisiSize D30 w detekcji kropel rozpylanych przez generator zawieszin monodispersyjnych.

Rozdziały 4 i 5 przedstawiają analizy pomiarów terenowych wykonywanych w Umweltforschungsstation Schneefernerhaus oraz na dachu Instytutu Geofizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Każdy z rozdziału kończy się podsumowaniem i przedstawieniem wniosków z przeprowadzonych badań/analiz. Dodatkowe podsumowanie znajdujemy w rozdziale 6 wraz ze zwięzłym streszczeniem elementów nowości.

Rozprawę uzupełniają 3 załączniki, w których Doktorant omówił odpowiednio działanie algorytmów i filtrów poprawiających techniki analizy danych oraz (załącznik C) dodatkowe dane pomiarowe uzyskane za pomocą interferometru Dopplera w kanale 1. Tekst rozprawy zamyka bibliografia, licząca łącznie 107 pozycji. 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. Struktura pracy jest prawidłowa. Wykresy są czytelne i starannie przygotowane.

Wyniki przedstawione w rozprawie zostały opublikowane w dwóch artykułach naukowych renomowanego czasopisma *Atmospheric Measurement Techniques* (IF 2021: 4,176). Obydwa artykuły są dziełem kilku autorów, co jest typowe w tej dziedzinie. Należy jednak dodać, że mgr Moein Mohammadi jest pierwszym, wiodącym autorem jednego z tych artykułów. Dodatkowo, część wyników będzie opublikowana w artykule konferencyjnym, który został przyjęty do druku, a którego wiodącym autorem jest również mgr Mohammadi.

Aktualność i wybór tematu

Analiza własności mikrofizycznych chmur jest istotna w kontekście opracowania możliwie dokładnych parametryzacji dla numerycznych mezoskalowych prognoz pogody i klimatu. Udoskonalenie parametryzacji ma istotne znaczenie, ponieważ to właśnie reprezentacja numeryczna tych drobnoskalowych procesów jest głównym źródłem niepewności modelowanych prognoz. Badanie procesów chmurowych wiąże się niestety z szeregiem poważnych trudności i ograniczeń. Głównymi problemami są tu: nieliniowość, niejednorodność rozkładów kropel oraz sprzężenia na różnych skalach długości i czasu. Złożoność tych zjawisk wymusza stosowanie zaawansowanych narzędzi badawczych. Symulacje numeryczne mają poważne ograniczenia w zakresie pełnej reprezentacji fizycznej mechanizmów rządzących tymi procesami. Dlatego też podstawowym źródłem wiedzy o mikrofizyce chmur są pomiary. Niestety techniki teledetekcyjne, za pomocą radarów, nie

Rose

pozwalają uzyskać pożądaną dokładności. Z kolei pomiary prowadzone *in-situ* z pokładów samolotów lub balonów mają swoje ograniczenia w zakresie precyzyjnego pomiaru położenia i prędkości kropeł w trójwymiarowej przestrzeni w tym samym czasie. Dlatego też w ostatnich latach prowadzone są intensywne badania zmierzające do udoskonalenia technik pomiarowych. W tym kontekście niniejsza praca jest potrzebnym i ważnym krokiem w kierunku poprawienia dokładności pomiarów chmurowych.

Ocena merytoryczna rozprawy:

W **rozdziale 1** znajdujemy syntetyczny przegląd literatury tematu. Przegląd ten obejmuje zarówno opis ogólnych cech/parametrów różnych urządzeń do pomiarów *in-situ*, jak również nawiązuje do konkretnych eksperymentów i kampanii pomiarowych, w których te urządzenia były stosowane. Opis jest chronologiczny, zawiera najważniejsze wyniki i wnioski z wcześniejszych badań. Doktorant szczegółowo opisuje wady i zalety każdego z urządzeń zwracając uwagę na rodzaj prowadzonych eksperymentów. W oparciu o przegląd literatury Doktorant formułuje cele niniejszej pracy.

W **rozdziale 2** przedstawiony jest szczegółowy opis techniki obrazowania cieniem za pomocą urządzenia VisiSize D30 oraz metodologia obliczania koncentracji kropeł. Dodatkowo znajdujemy tu szczegółową charakterystykę budowy i działania 2 innych urządzeń tj. interferometru Dopplera i disdrometru. To właśnie te 2 urządzenia będą źródłem danych pomiarowych do walidacji pomiarów wykonywanych za pomocą VisiSize D30.

Rozdział 3 zawiera pierwsze wyniki i analizy danych pomiarowych z eksperymentów laboratoryjnych. Eksperymenty te były prowadzone dla zawieszin monodispersyjnych z użyciem VisiSize D30 wyposażonym w trzy różne obiektywy powiększające ($\times 1$, $\times 2$ i $\times 4$). Doświadczenia przeprowadzono dla trzech różnych średnic kropeł (20.13, 39.25 i 57.55 μm). Analizy ograniczają się głównie do porównań widm kropeł przy różnych konfiguracjach urządzenia. Doktorant podaje interpretacje fizyczne obserwowanych rozbieżności. Są to między innymi efekt parowania i koalescencji kropeł. Warto podkreślić, że eksperymenty te były wykonane samodzielnie przez Doktoranta.

Najwięcej analiz, wniosków a przede wszystkim danych pomiarowych znajdujemy w **rozdziale 4**. Dane te pochodzą z pomiarów chmur w ich środowisku naturalnym i były pozyskane w stacji badań atmosferycznych (UFS). Opis eksperymentów jest bardzo szczegółowy i obejmuje zarówno sposób montażu urządzeń, warunki pogodowe oraz topografię samego miejsca. Praca badawcza miała charakter zespołowy, a Doktorant był odpowiedzialny za przetwarzanie danych pomiarowych. Dane te były pozyskiwane z dwóch urządzeń tj. VisiSize D30 i interferometru Dopplera PDI-FPDR. W rozdziale znajdujemy porównanie różnych parametrów wyznaczonych przy pomocy tych urządzeń. Rozbieżności Doktorant koryguje przez stosowanie różnych filtrów i algorytmów przetwarzających. Ten rozdział posiada istotny walor nowości.

Rozdział 5 stanowi pewne uzupełnienie rozdziału 4. Jednakże tym razem pomiary nie dotyczą chmur atmosferycznych, ale opadów. Doktorant demonstruje, że w pewnym zakresie parametrów i warunków pogodowych widmo kropeł uzyskane za pomocą VisiSize D30 i disdrometru są w zgodności ilościowej. To ważny wynik, który otwiera nowe możliwości wykorzystania VisiSize D30.

Rose

Uwagi merytoryczne

1. W Streszczeniu str. (IX) Doktorant używa określenia „polidispersyjnych i monodispersyjnych kroplach wody”. Pojedyncze krople nie są ani polidispersyjne ani monodispersyjne. Poli- lub monodispersyjne mogą być grupy kropeł lub zawiesiny.
2. Również w Streszczeniu str. (IX) i *Introduction* znajdujemy stwierdzenie „Chmury składają się przede wszystkim z kropeł wody”. To jest zbyt dalekie uproszczenie. Nawet w tropikach istotny komponent chmur stanowią kryształki lodu.
3. Na rysunku 4.9 do danych pomiarowych dopasowano funkcję $y=a/(x+b)$. W pracy brak jest jednak szczegółowego uzasadnienia wyboru takiej funkcji.
4. Chociaż praca ma charakter eksperymentalny brakuje pewnego nawiązania do technik numerycznych (symulacji komputerowych).
5. Parametry statystyczne chmur, które analizuje doktorant to widmo kropeł, zawartości wody w stanie ciekłym i koncentracja kropeł. Tymczasem kluczowym parametrem wykorzystywanym w konstrukcji numerycznych modeli pogody jest jądro zderzeniowe, które wymaga określenia lokalnej koncentracji i prędkości względnej kropeł. Czy pomiary za pomocą VisiSize D30 mogą dostarczyć informacji o jadrach zderzeniowych?
6. Mikrofizyczne procesy chmurowe są czułe na wartość dyssypacji energii kinetycznej. Pośrednio i do pewnego stopnia Doktorant uwzględnia ten fakt, analizując wyniki dla różnych wartości odchyłeń standardowych prędkości kropeł (rys 4.15). Zależność od dyssypacji energii może stanowi potencjalnie ważny kierunek przyszłych badań eksperymentalnych w tym temacie.

Praca jest napisana starannie, poprawnie językowo i z zachowaniem zasad stylistycznych. Doktorant nie ustrzegł się kilku drobnych błędów redakcyjnych, które są zestawione poniżej

Błędy drukarskie, stylistyczne i niedoskonałości językowe

Strona X „interferometer dopplerowski” w języku polskim interferometr

Strony IX-X Brak polskich znaków diakrytycznych

Strona X Zbędny odstęp po zdaniu kończącym się „cząstek opadowych.”

Strona X „...w przypadku małych rozmiarów kropli” W tym kontekście lepiej brzmi „kropeł”.

Strony 3 i 4 Dwa nieodległe paragrafy zaczynają się od „*On the other hand, the remote sensing...*”

Strona 26 Różne formaty zapisu jednostek np. $m\ s^{-2}$ i $m\cdot s^{-1}$

Strona 38 Brak kropki po równaniu 2.4

Strona 44 Podpis pod rysunkiem 2.6 – panel (d). Panele są oznaczone małymi literami

Dwa różne znaczenia skrótu SV. W niektórych miejscach oznacza to *swept volume*, w innych *sample volume*.

Strona 46 “*Later, the 2-Dimensional Video Disdrometers (2DVD) Kruger and Krajewski (2002) and optical disdrometers Hauser et al. (1984); Löffler-Mang and Joss (2000) were developed.*” Taki sposób przywoływania referencji utrudnia czytanie tekstu.

Strona 48 „*Size spectrum*” *size* powinno być małą literą

Strona 50 „*VisiSize sample Volume (SV)*” Brak konsekwencji w używaniu wielkich/małych liter.

Strona 55 „*velocity also increases*” lub “*velocities also increase*”

Strona 82 „*was below $1\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$* ”. LWC wyrażamy w jednostkach $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

Rose

Strona 110 Zbędny odstęp przed „where A_h ”

Strony 112 – 113 Zasadne byłoby stosowanie przecinków po równaniach A3-A11

Spis literatury nie ma jednolitego formatu. Na przykład, w niektórych miejscach Doktorant podaje tylko inicjały imion autorów (z kropką lub bez), a w innych pełne imiona. Do pisania skrótów miesięcy w języku angielskim używa się wielkich liter z kropką na końcu. W referencji Lawson et al. (2006) skrót 2d-s powinien być napisany wielką literą tj. 2D-S.

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 dojrzałe opracowanie naukowe, które dotyczy ważnej, złożonej, ale również aktualnej problematyki. Pomiar mikrofizycznych procesów chmurowych to kluczowe źródło danych dla modeli prognoz pogody, a także walidacji symulacji numerycznych. Doktorant wykazał się kompetencją w przetwarzaniu danych pomiarowych oraz udowodnił, że potrafi prowadzić skomplikowane badania naukowe. Uwagi sformułowane w niniejszej recenzji nie wpływają na pozytywną ocenę dysertacji. Fakt opublikowania wyników w renomowanych czasopismach naukowych jest dodatkową, pozytywną weryfikacją jakości przeprowadzonych badań. Podsumowując recenzję, stwierdzam, że rozprawa mgr. Moeina Mohammadiego zatytułowana „*Cloud Microphysical Measurements with Shadowgraph Imaging Technique*” spełnia warunki określone w ustawie o stopniach i o tytule naukowym. Wnoszę zatem o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Bogdan Róse
11. 01. 2023