

Łódź, dn. 16 stycznia 2023 r.

prof. dr hab. Krzysztof Fortuniak
Instytut Meteorologii i Hydrologii
Wydział Nauk Geograficznych
Uniwersytet Łódzki

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Marty Kopec
pt. „Porównanie symulacji numerycznych chmur kłębiasto-warstwowych z wynikami
pomiarów in-situ”

Recenzję opracowałem na wniosek Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego prof. dr. hab. Wojciecha Satuły w związku z powołaniem mnie na recenzenta na mocy Uchwały nr 51/2016/2017 Rady Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego z dnia 23 stycznia 2017 r.

Rozprawa doktorska Pani mgr Marty Kopec zatytułowana „Porównanie symulacji numerycznych chmur kłębiasto-warstwowych z wynikami pomiarów in-situ”, napisana została pod kierunkiem prof. dr. hab. Szymona Malinowskiego i dr. Zbigniewa Piotrowskiego w Zakładzie Fizyki Atmosfery Instytutu Geofizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

Recenzowana rozprawa koncentruje się na badaniu procesów fizycznych zachodzących w warstwie granicznej atmosfery przykrytej chmurami kłębiasto-warstwowymi ze szczególnym uwzględnieniem mieszania turbulencyjnego i wychładzania radiacyjnego zachodzącego w okolicy wierzchołków chmury. Rozprawa jest typowym studium przypadku dotyczącym chmury Stratocumulus z dnia 9.08.2008 r. obserwowanej nad Pacyfikiem u wybrzeży Kalifornii. Dla chmury tej przeprowadzono szczegółowe pomiary charakterystyk turbulencji w ramach lotniczej kampanii pomiarowej POST (Physics of Stratocumulus Top). Głównym problemem naukowym podjętym przez Autorkę była charakterystyka oraz poznanie źródeł i transportu pionowego turbulencji w warstwie inwersyjnej rozgraniczającej swobodną troposferę od warstwy granicznej atmosfery. Podjęte badania mają istotną rolę dla lepszego zrozumienia powstawania, ewolucji i właściwości chmur Stratocumulus, a w konsekwencji dla modelowania, zarówno bieżącej pogody, jak i klimatu. W pracy oprócz empirycznych danych dotyczących analizowanego przypadku Stratocumulusa zgromadzonych podczas lotu TO13 kampanii POST wykorzystano wyniki modelowania numerycznego warstwy granicznej atmosfery metodą symulacji wielkich wirów (LES – ang.

Large Eddy Simulation). Wykorzystane dane i metody stanowią kompleksowe podejście do postawionego problemu i pozwalają na realizację celu badań.

Opis i ocena rozprawy pod względem formalnym

Przedstawiona do oceny dysertacja ma formę monografii naukowej i liczy 124 strony zawierające: oświadczenie o oryginalności pracy (str. 3–4), streszczenie w języku angielskim i polskim (str. 5–8), spis treści (str. 9–10), rozdziały 1–6 zawierające główną część merytoryczną pracy (str. 11–101), załączniki A (opis metody wirtualnego samolotu) i B (dodatkowe wzory) (str. 102–110), bibliografię (str. 111–117) oraz spis rysunków (str. 118–124).

Przedstawiony układ pracy jest typowy dla zwartych tekstów naukowych i nie budzi zastrzeżeń. Za właściwe należy również uznać proporcje pomiędzy częścią teoretyczną a analizą badań własnych Autorki. Spis cytowanej literatury, zawierający ponad 60 pozycji, w zasadzie jedynie angielskojęzycznych, lokuje pracę wśród współczesnych trendów badawczych, a umiejętne odwołania w tekście dowodzą dobrego przygotowania merytorycznego Doktorantki.

Praca napisana została poprawną polszczyzną, jednakże czasami pojawiają się żargonowe skróty myślowe skutkujące nieścisłymi czy wręcz literalnie fałszywymi sformułowaniami (np. nazywanie strumienia netto promieniowania długofalowego „wychładzaniem radiacyjnym” – w podpisie rys. 4.3a i w tekście, czy stwierdzenie, że Stratocumulus „w niewielkim stopniu wpływa na długofalowe promieniowanie ziemskie” – str. 15). Należy jednak podkreślić, że nie przeszkadzają one w śledzeniu tekstu a przedstawiona argumentacja przeprowadzona została w sposób jasny i logiczny.

Pod względem edytorskim praca jest generalnie poprawna – znaleźć można jedynie kilka literówek czy nieścisłości we wzorach (np. wz. 2.11 – brak g ; wz. 4.16 – uśrednianie całej pochodnej $\partial e / \partial t$; wzór w podpisie rys. 4.8 – brak $1/(\rho c_p)$ po przybliżeniu).

Rozprawa jest bogato ilustrowana, a wykresy stanowią integralną część wyników. Wykresy te są na ogół czytelne, jednak stosowane głównie w rozdziale 5 przeformatowywanie rysunków poprzez proste rozciąganie plików graficznych uznać należy za brak należytej staranności w przygotowaniu ostatecznej wersji manuskryptu. Również podpisy pod rysunkami (zwłaszcza nie pochodzącymi z wcześniejszych prac) nie zawsze są dostatecznie wyczerpujące (np. rys. 5.2). Ponadto, skoro Autorka zdecydowała się przedstawić dysertację w języku polskim, opisy osi, jeśli się pojawiają, również powinny być po polsku.

Z innych uwag technicznych należy zaznaczyć, iż w języku polskim wartości dziesiętne powinny być w zasadzie oddzielane przecinkami, a nie kropkami, a błąd pomiarowy zapisuje się z reguły z użyciem 1–2 cyfr znaczących, a nie 3–4.

Opis i ocena merytoryczna rozprawy

Część merytoryczną dysertacji rozpoczyna wstępny rozdział 1 (str. 11–13), w którym Autorka zdefiniowała cel pracy, uzasadniła znaczenie podjętych badań i przyjętą metodykę oraz krótko scharakteryzowała strukturę rozprawy. W rozdziale tym podkreślono, iż przedstawione studium przypadku jest istotne, gdyż dotyczy tzw. nieklasycznej chmury Stratocumulus charakteryzującej się nietypowym mechanizmem mieszania powietrza chmurowego z powietrzem swobodnej troposfery. Chmury takie choć występują dosyć powszechnie, zostały stosunkowo słabo opisane w literaturze.

Rozdział 2 (str. 12–32) zawiera podstawowe informacje na temat warstwy granicznej atmosfery, chmur rodzaju Stratocumulus oraz charakterystyk turbulencji. Przedstawiony (rozdz. 2.1) opis aktualnego stanu badań stratocumulusów w nawiązaniu do wcześniejszych kampanii pomiarowych dowodzi dobrego rozeznania Doktorantki w podjętej problematyce, natomiast opis turbulencji (rozdz. 2.2) – opanowania przez Doktorantkę odpowiedniego formalizmu matematycznego i zrozumienia mechanizmów ruchu turbulencyjnego. Bazując, zwłaszcza w części 2.2.1–2.2.2 głównie na klasycznym podręczniku Stull’a (1988), Autorka przedstawiła kluczowe dla dalszej analizy równania ruchu turbulencyjnego oraz charakterystyczne liczby bezwymiarowe. Zbędne w tym rozdziale wydaje mi się przytaczanie reguł uśredniania (wz. 2.2 i 2.3) (notabene dotyczących nie tylko uśredniania Reynoldsa) natomiast rys. 2.7 mógłby być nieco szerzej przedyskutowany i opisany (m.in. nie podano co oznacza χ na osi x); zamiast pojęcia „jednorodności horyzontalnej” (str. 26) sugerowałbym „poziomą homogeniczność”. Nie do końca jestem również przekonany czy przy przewadze mechanicznej produkcji nad członem wypornościowym równania TKE mówimy o „konwekcji wymuszonej” (str. 26), czy raczej o turbulencji o charakterze mechanicznym.

W rozdziale 3 (str. 33–47) przedstawiono bazę empiryczną dysertacji oraz uzyskane na podstawie pomiarów charakterystyki turbulencji. W szczególności scharakteryzowano cele i strategię kampanii pomiarowej POST (rozdz. 3.1), jak również szczegółowo omówiono uzyskane podczas lotu TO13 właściwości mikrofizyczne i termodynamiczne badanej chmury Stratocumulus (rozdz. 3.2.1) oraz turbulencje w rejonie wierzchołka chmury (rozdz. 3.2.2). Wyniki zawarte w rozdz. 3.2.1 pochodzą głównie z publikacji Malinowski i in. (2016), natomiast rozdz. 3.2.2 z pracy Jen-La Plante i in. (2016). W artykułach tych, których

Doktorantka jest współautorką, analizowane były rezultaty kampanii POST, a w rozprawie doktorskiej wykonana została poszerzona interpretacja wyselekcjonowanych z obu prac wyników dla lotu TO13. Pokazano, że zaproponowany w pierwszej z prac, podział warstwy inwersyjnej (tu rozumianej jako warstwa wymiany pomiędzy warstwą graniczną atmosfery a swobodną troposferą, EIL – ang. entrainment interface layer) na dwie podwarstwy TISL (ang. Turbulent Inversion Sub-Layer) i CTMSL (ang. Cloud-Top Mixing Sub-layer) jest uzasadniony w świetle otrzymanych charakterystyk turbulencji. Jednocześnie turbulencja w tych warstwach różni się od turbulencji w swobodnej troposferze i znajdującej się pod CTMSL górnej warstwie chmur (CTL – ang. cloud top layer). Wykazano, że najbardziej intensywna turbulencja występowała w warstwie CTMSL. Przedstawiono hipotezę, iż mieszanie powietrza pomiędzy chmurą a swobodną troposferą nie występuje bezpośrednio, lecz etapami pomiędzy kolejnymi warstwami. Są to niewątpliwie bardzo interesujące, nowatorskie ustalenia. W ramach uwag dyskusyjnych, dotyczących tego rozdziału, wspomnieć należy, iż w przypadku różnicowej liczby Richardsona warunek $Ri_b > 1$ nie musi oznaczać braku turbulencji (str. 40); przedstawione na rys. 3.5 profile dotyczą nie stosunku zmieszania jak sugeruje podpis, lecz zawartości wody ciekłej, a ich jednostka to g/m^3 ; prawidłowe zakresy w podpisie do rys. 3.12 to $[0,3-5]$ Hz oraz $[11-183]$ m.

Rozdział 4 (str. 48–74) prezentuje wyniki numerycznego modelowania metodą symulacji wielkich wirów przykrytej Stratocumulusem warstwy granicznej atmosfery w warunkach podobnych do obserwowanych w czasie lotu TO13. Z wyjątkiem części wstępnej przedstawiającej podstawy wykorzystanego modelu EULAG rozdział ten przytacza wyniki artykułu Kopeć i in. (2016). Zgodnie z deklaracją na str. 3 wszelkie symulacje numeryczne i analizy wyników stanowiły samodzielną pracę Doktorantki, a pozostali autorzy (prof. Malinowski i dr Piotrowski) sprawowali jedynie opiekę nad tymi badaniami. Głównym celem tej części pracy było przeanalizowanie roli wychładzania radiacyjnego i ścinania wiatru w rejonie wierzchołka chmur na ewolucję chmur rodzaju Stratocumulus. Przeprowadzono 4 eksperymenty numeryczne: referencyjny, z uwzględnieniem jedynie wychładzania radiacyjnego, z uwzględnieniem jedynie ścinania wiatru oraz z uwzględnieniem obu procesów. Wyniki pokazują, że wychładzanie radiacyjne wierzchołków chmur intensyfikuje konwekcję w całej warstwie granicznej tego typu. Podobnie ścinanie wiatru w warstwie inwersyjnej wpływa na całą warstwę graniczną, powodując jednocześnie zwiększenie grubości warstwy inwersyjnej. Za istotne należy uznać również ustalenia dotyczące transportu turbulencji w rejonie wierzchołków chmur w szczególności w warstwach TISL i CTMSL. Złożoność i zaawansowanie przeprowadzonej w tym rozdziale analizy świadczy o dużej

dojrzałości naukowej Doktorantki, a publikacja w renomowanym *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* jest dodatkowym gwarantem wysokiego poziomu merytorycznego.

W ramach dyskusji naukowej z Autorką można jednak zastanowić się nad reprezentatywnością przyjętej parametryzacji promieniowania długofalowego, F_{rad} , odpowiedzialnego za wychładzanie radiacyjne. W pracy przyjęto zmodyfikowany model bazujący na pracy Stevensona i in. (2005). Kluczowe dla modelu są wartości 3 parametrów: F_0 , C , k . O ile wartość F_0 sugeruje skok wartości F_{rad} przedstawiony na rys. 4.3, o tyle nie wiadomo w jaki sposób dobrano pozostałe parametry. Z rysunku 4.3 można jednak zauważyć, że przyjęty model: 1) wykazuje zbyt duże gradienty F_{rad} na górnej granicy chmury, 2) nie uwzględnia ujemnych wartości F_{rad} w chmurze, przez co zaniża różnicę między F_{rad} w chmurze a w swobodnej atmosferze. Czemu Autorka nie spróbowała zmodyfikować tego modelu (np. przyjęcie $F_0 = 90 \text{ W/m}^2$, a nie 80 W/m^2 , plus stała -10 W/m^2)? Dalsza dyskusja i wnioski dotyczące roli wychładzania radiacyjnego mogłaby wyglądać inaczej przy innej parametryzacji strumienia netto promieniowania długofalowego. W mojej ocenie, aby stwierdzić, że wyniki rzeczywiście poprawnie kwantyfikują wpływ wychładzania radiacyjnego, a nie jedynie wybranej parametryzacji tego wychładzania, należałoby przetestować kilka wersji parametryzacji F_{rad} i pokazać, że ich wybór nie ma większego wpływu na wyniki. Znacznie podniosłoby to wagę wyników, gdyż obecnie dowodzą one, że wychładzanie radiacyjne wierzchołków Sc intensyfikuje turbulencję, co samo w sobie nie jest wynikiem zaskakującym, natomiast proponowane porównanie pozwoliłoby ocenić niepewność (przynajmniej ze względu na parametryzację) otrzymanych wartości. Podsumowując rozdz. 4 Autorka stwierdza, że chłodzenie radiacyjne powoduje wzrost energii kinetycznej turbulencji w rejonie wierzchołka (o około 30%) oraz wyższe wartości wariancji pionowej składowej prędkości (o $\sim 70\%$) w połowie wysokości warstwy granicznej – w jakim stopniu podane wartości są czułe na wybór parametryzacji F_{rad} ?

Innym elementem dyskusji może być występowanie drugiego lokalnego maksimum wariancji na poziomie inwersji (rys. 4.10). Autorka podkreśla (str. 62), że również w danych eksperymentalnych zaobserwowano wystąpienie turbulencji powyżej wierzchołka chmur. W pracy wystąpienie tego maksimum przypisano turbulencji generowanej mechanicznie przez ścinanie wiatru (str. 62, 64) – w przypadku wyników modelowania jasno wynika to m.in. z rys. 4.10 czy 4.11. Jeśli jednak spojrzymy na pomiarowy profil temperatury potencjalnej (rys. 4.2) to na wysokościach tych mamy obszar równowagi chwiejnej, a więc warstwę turbulencji o charakterze termicznym (konwekcyjnym). Czy nie jest zatem

prawdopodobne, że chociaż, zarówno model, jak i dane empiryczne pokazują efekt wzmożonej turbulencji, to rzeczywiste przyczyny tego efektu są inne niż sugeruje model?

Rozdział 5 (str. 75–93) poświęcony został porównaniu wyników pomiarów i symulacji numerycznych. Bardzo interesującym, nowatorskim podejściem jest zastosowanie metody wirtualnego samolotu, w której próbkę z wyników modelowania dla całej domeny pobrano w sposób przypominający przelot samolotu przez rzeczywistą atmosferę. Przetestowano w ten sposób 3 strategie pomiarowe: przypominającą rzeczywisty lot TO13 serię krótkich przelotów w okolicy wierzchołka chmur połączonych przelotami na stałych wysokościach (trajektoria POD) oraz głębokie profile pionowe wzdłuż (trajektoria S1) i w poprzek (trajektoria S2) średniego kierunku wiatru. W toku dalszych analiz porównano wyniki otrzymane z trzech ww. strategii pomiarowych samolotu wirtualnego, wszystkich kolumn modelu oraz pomiarów rzeczywistych w ramach lotu TO13. Autorka wykazała, że modelowanie numeryczne z zastosowaniem wirtualnego samolotu poprawnie odzwierciedla strukturę warstwy inwersyjnej, w tym podział na podwarstwy TISL i CTMSL i ich właściwości. W przypadku charakterystyk turbulencji znaczący wpływ miała rozdzielczość modelu – zdecydowanie lepiej odtwarzane były charakterystyki dla ruchu pionowego, dla którego rozdzielczość modelu wynosiła 2,5 m niż dla ruchu poziomego o rozdzielczości siatki 20 m. Istotną zaletą metody wirtualnego samolotu jest możliwość przetestowania strategii pomiarowej przed rozpoczęciem kampanii pomiarowej – Autorka wykazała bowiem, że wyniki są wrażliwe na wybór trajektorii lotu.

Pewne zastrzeżenia budzi dyskusja (str. 90) przedstawionej na rys. 5.11 strumieniowej liczby Richardsona, R_f . W odniesieniu do wartości powyżej wierzchołka chmur wydaje mi się ona częściowo błędna, gdyż w niektórych przypadkach błędnie policzono R_f . Zgodnie z definicją R_f otrzymano poprzez podzielenie przedstawionych na rysunku 5.10 profili wypornościowego i mechanicznego (ścięcia wiatru) członu równania ewolucji TKE. Jednakże, ponieważ wiatr nie może powodować tłumienia turbulencji, składnik mechaniczny musi być nieujemny. Natomiast na rys. 5.10b jego wartości powyżej wierzchołków chmur przyjmują dla rzeczywistych profili pomiarowych POW1 i POW3 również wartości ujemne, co jest zapewne wynikiem niedokładności pomiarowych. W przypadkach, gdy wyliczony na podstawie danych człon mechaniczny był ujemny, dzieląc oba składniki otrzymano R_f o znaku przeciwnym niż wynikałby on ze znaku składnika wypornościowego i nieujemnej (z definicji) wartości składnika mechanicznego. Dlatego na przykład wartości R_f dla warstwy 0–20 m powyżej chmur powinny być w przypadku POD1 ujemne, co przeczy postulowanej

tezie o laminarnym przepływie. Również silnie ujemna wartość R_f dla wysokości 25 m nad chmurami w przypadku POD3 jest wynikiem błędnego znaku składnika mechanicznego.

Niestety, warstwy o ujemnych wartościach członu produkcji mechanicznej równania TKE pojawiają się również w przypadku symulacji numerycznych i to nie tylko dla metody samolotu wirtualnego (rys. 5.8b, 5.9b), lecz nawet przy uśrednianiu po całej domenie (rys. 4.12b). Nasuwa się zatem pytanie, jak, zwłaszcza w drugim przypadku, powinny być interpretowane te wyniki i, jeśli jest to rezultat niedokładności „pomiarowych”, na ile wiarygodne są inne podobnie subtelne różnice dyskutowane w tekście?

Z uwag bardziej technicznych, nieco dziwnie wyglądają wyniki grubości warstwy TISL zapisane na przykład w postaci 4.41 ± 5.05 m (Tab. 5.2), gdyż sugerują pojawianie się ujemnych wartości grubości. W tym wypadku niepewność pomiarową bardziej elegancko byłoby przedstawić w postaci odpowiednich przedziałów ufności.

Rozdział 6 (str. 94–101) zawiera podsumowanie i wnioski. Pozytywnie należy przyjąć fakt, iż w rozdziale tym Autorka nie przedstawia jedynie streszczeń kolejnych rozdziałów, jak to często ma miejsce w tego typu opracowaniach, lecz na podstawie wyników przeprowadza merytoryczną dyskusję na temat struktury warstwy granicznej atmosfery przykrytej Stratocumulusem i wskazuje kierunki dalszych badań. Taki układ podsumowania stanowi kolejny dowód dojrzałości badawczej Doktorantki. Z powodów omówionych powyżej, w rozdziale tym nie mogę się jedynie zgodzić ze stwierdzeniem dotyczącym przyczyn wzrostu turbulencji mówiącym, iż ścinanie wiatru „działało wręcz w przeciwną stronę” (str. 98 – ostatni akapit rozdz. 6.2).

Wnioski końcowe

Oceniana rozprawa dotyczy zaawansowanych problemów warstwy granicznej atmosfery i stanowi rozwiązanie oryginalnego problemu badawczego dotyczącego charakterystyki turbulencji w okolicach wierzchołka chmur Stratocumulus. Przedstawione badania charakteryzuje wysoki poziom merytoryczny, a sformułowane powyżej uwagi dotyczą głównie kwestii technicznych bądź mają charakter dyskusji merytorycznej z Autorką, a nie uwag krytycznych. Dlatego jestem w pełni przekonany, iż przedłożona dysertacja dowodzi umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Panią mgr Martę Kopeć, w tym formułowania problemu naukowego oraz prowadzenia procesu badawczego dla jego efektywnego rozwiązania, wraz z analizą i prezentacją wyników, jak również prezentuje Jej ogólną wiedzę teoretyczną w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych

w obszarze stanowiącym część wspólną dyscyplin nauki fizyczne (fizyka atmosfery) oraz nauki o Ziemi i środowisku (meteorologia).

Wobec powyższego stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr Marty Kopeć „Porównanie symulacji numerycznych chmur kłębiasto-warstwowych z wynikami pomiarów in-situ” spełnia zarówno merytoryczne, jak i formalne wymagania określone w Ustawie i wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego o przyjęcie pracy jako rozprawy na stopień doktora oraz o dopuszczenie Pani mgr Mary Kopeć do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora, w tym do publicznej obrony.

prof. dr hab. Krzysztof Fortuniak