

Recenzja pracy doktorskiej mgr Jakuba Nowaka.

wykonana na zlecenie Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego, na podstawie rozprawy pt.

„Turbulence properties in coupled and decoupled stratocumulus-topped marine boundary layers”

przygotowanej pod kierunkiem Prof. Szymona P. Malinowskiego, prof. IGF-UW.

1. Wprowadzenie

Zasadniczym tematem przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej jest analiza morskiej warstwy granicznej atmosfery przykrytej (zwieńczonej) chmurami stratocumulus w oparciu o pomiary in situ o wysokiej rozdzielczości. Pomiary te wykonane zostały w rejonie północno-wschodniego Atlantyku przy pomocy platformy z aparaturą pomiarową zamontowaną pod śmigłowcem. W szczególności Autor skupia się na badaniu stratyfikacji atmosfery, własności drobnoskalowej turbulencji oraz pola aerozoli w odniesieniu do możliwości wystąpienia w ww. warstwie granicznej tzw. efektu rozprężenia (ang. decoupling).

Generalnie, badanie własności chmur typu stratocumulus w morskich masach powietrza ma kluczowe znaczenie w prognozach zmian klimatu, gdyż niewielkie nawet różnice w pokrywie lub grubości optycznej tych chmur powodują zmiany w bilansie radiacyjnym powierzchni, co ma wpływ na globalne ocieplenie. Mimo, iż prac dotyczących tej tematyki powstało już bardzo dużo to ciągle istnieje wiele nie do końca zbadanych procesów. W szczególności Autor skupił się na własnościach drobnoskalowej turbulencji, ponieważ parametry takie jak lokalne tempo dyssypacji, skale długości zakresu inercyjnego, czy też anizotropia nie były wcześniej badane w kontekście stopnia rozprężenia warstwy granicznej przykrytej chmurami stratocumulus.

Dodatkowym wkładem badawczym Autora były także prace przy budowie i testowaniu ultra szybkiego termometru (UTF), który zamontowany został na platformie podczas kampanii pomiarowej w lipcu 2017 r, w której to Autor także brał czynny udział. Autor współpracował również przy projektowaniu algorytmów i ich wykorzystaniu w procesie przetwarzania zbiorów danych pomiarowych, z których to aktywności powstały do tej pory cztery publikacje.

W dalszej części recenzji przedstawię analizę zawartości pracy, która została przygotowana na poczet obecnej rozprawy doktorskiej pod kierunkiem promotora Profesora Szymona Malinowskiego. Część wyników została już opublikowana w pracy: Nowak i in. „Coupled and decoupled stratocumulus-topped boundary layers: turbulence properties”, w 2011 r w Atmos. Chem. Phys., natomiast prezentowane rezultaty są ich dalszym i pełniejszym rozszerzeniem.

2. Struktura techniczna i zawartość pracy

Przedstawiona rozprawa napisana jest w j. angielskim, zawiera streszczenie w języku polskim, spis pojęć, 7 rozdziałów merytorycznych; apendyks, listę akronimów i symboli. Tekst rozprawy zamyka bibliografia, licząca łącznie 129 pozycji, praca zawiera także 62 rysunki, oraz 20 tabel. Całość pracy wypełnia łącznie 148 stron. Część opisowa pracy jest stosunkowo bogata i wyczerpująca, zaznajamia czytelnika w dostateczny sposób z problematyką i znaczeniem warstwy granicznej atmosfery zwieńczonej chmurami stratocumulus. Dyskusja ukierunkowana jest na opis rozprężenia warstwy granicznej i mechanizmów, które do niego mogą prowadzić.

Rozdział 1 zaznajamia czytelnika z ogólną charakterystyką chmur stratocumulus, ich znaczeniem i klimatologią. Opisuje główne procesy wewnątrz WG przykrytej chmurami tego typu, charakterystykę stratyfikacji termicznej, parametrów turbulencji (budżet TKE, wariacje, strumienie) oraz pionowego rozkładu aerozoli. Przybliża także mechanizmy, które mogą prowadzić do rozprężenia. Dokładniej jest także opisana WG typowa dla północno-wschodniej części Oceanu Atlantyckiego, typowe sytuacje synoptyczne, struktura pól chmurowych, stratyfikacja i zawartość aerozoli. Rozdział ten podaje kompleksowe informacje i generalnie dobrze przygotowuje czytelnika do problematyki omawianej w dalszej części pracy.

W **sekcji 2** opisany jest eksperyment pomiarowy ACORES, zarówno jego ogólne założenia i cele, jak również strategie pomiarów, przyrządy pomiarowe i charakterystyka sytuacji synoptycznych. Silną stroną pomiarów jest wykorzystanie helikoptera, który dokonuje pionowych sondaży do wysokości 3km jak również pomiarów wewnątrz chmurowych przy użyciu platform pomiarowych zamontowanych 20m i 150m pod helikopterem, co zapewnia niezakłócone pomiary we wnętrzu chmury. W dalszej części rozdziału opisane są przypadki pomiarów dla sprężonej i rozprężonej stabilnej warstwy granicznej atmosfery. Informacja ta przedstawiona jest kompleksowo w przejrzystej postaci. Jedyna uwaga to nieco zbyt mała wielkość rysunków 2.7 oraz 2.10, które w wersji drukowanej nie są zbyt czytelne.

Sekcja 3 opisuje aspekty analizy danych pomiarowych oraz algorytmy pomocne przy wyznaczeniu parametrów termodynamicznych, turbulencji i aerozoli. Parametry związane ze stratyfikacją wykorzystywane są przy kryteriach wyznaczenia stopnia sprężenia WG. Jednym z elementów, który wymagałby dogłębszej analizy jest przyjęta metoda uśredniania danych pomiarowych, grupująca dane w klastry o pionowej rozciągłości 10 m i ich dalszego pięciopunktowego ruchomego wygładzania. Należałoby podać uzasadnienie takiego podejścia albo zbadać czy/lub w jakim stopniu inne parametry uśredniania wpłyną na wyniki. Nie jasne jest dalej przejście tego samego uśredniania dla turbulencji (początek par 3.2) podczas gdy w rozdziale 3.2.2. omawiane są dolne skale dla poszczególnych przyrządów od 2 cm do 1m.

Jednym z czynników, który wydaje się ograniczył analizę był problem z zaburzeniem z nieznanymi do tej pory przyczyn pomiaru poprzecznej składowej prędkości wiatru (v) przy pomocy anemometru podwieszonego pod helikopterem. Spowodowało to przyjęcie pewnych założeń przy wyznaczeniu trójwymiarowego wektora wiatru, oraz wykluczyło składową poprzeczną z analizy własności pola turbulencji. Przyjęcie założenie o horyzontalnej izotropii może obniżać ogólność przeprowadzonej analizy. Nie wynika z niej jasno czy założenie to jest całkowicie poprawne dla wyselekcjonowanych przypadków, gdzie np. na obszarach w bliskiej okolicy pola testowego (Flight#5, Rycina 2.6) widoczne są podłużne struktury chmur mogące mieć związek z wysokoenergetycznymi dwu-wymiarowymi koherentnymi wirami w warstwie granicznej. Warunki, przy których występują takie struktury (oddziaływanie silnej konwekcji z pionowym i kierunkowym gradientem pola wiatru przy wierzchołku warstwy granicznej) są zbieżne ze wskazanymi w sekcji 3.2.4 przypadkami gdzie izotropowość nie jest spełniona.

Sekcja 4 odnosi się do wpływu stratyfikacji atmosfery oraz innych parametrów meteorologicznych na rozprężenie warstwy granicznej, w szczególności opisuje podział WG na podwarstwy, czasową zmienność stratyfikacji i ewolucję pola chmurowego. Analizowane są przy tym nie tylko pomiary z platformy podwieszonej pod helikopterem ale także pomiary na pobliskiej stacji ARM ENA. W przypadku sprężenia WG wyróżniono cztery podwarstwy: SBL – warstwa poniżej podstawy chmury (do 715 m), SCL – warstwa chmurowa, EIL – obszar inwersji temperatury przy wierzchołku chmury, oraz FTL reprezentująca warunki w dolnej troposferze (1005-1385m). Dla przypadku rozprężonego założono dwie dodatkowe dolne warstwy: SML – od powierzchni do poziomu ok. 385 m, powyżej którego temperatura potencjalna ciekłej wody rośnie z wysokością co reprezentuje obszar będący pod wpływem procesów na powierzchni ziemi, TSL – obszary powyżej SML z głównymi gradientami w polu wilgotności i wiatru (615-685m). Powyżej rozpościera się warstwa SBL do podstawy chmury.

Sekcja 5 opisuje charakterystyki turbulencji: budżet TKE, jej wariację, strumienie turbulencyjne, skale długości oraz cechy anizotropowości. Autor analizuje anizotropię pomiędzy pionową i wzdłużną składową prędkości, jednak bez odniesienia się do wcześniejszego założenia o horyzontalnej izotropii. W kilku przypadkach taka dogłębsza analiza mogła by być wskazana, dla przykładu w sekcji 5.4, gdzie Autor wskazuje na dużą wariację anizotropii dla horyzontalnego segmentu wewnątrz chmury w pobliżu jej wierzchołka oraz dalej zauważalne są rozbieżności współczynnika anizotropii wyznaczonego na podstawie funkcji struktury (wartości bliskie jedności) i z widma gęstości mocy PSD (~ 0.6) wskazujące na dominującą rolę fluktuacji horyzontalnych. Zatem interesujące jest czy pierwotne założenie horyzontalnej izotropii może wpływać na obserwowane wyniki.

Sekcja 6 opisuje własności pola aerozoli, jego koncentrację i rozkład zarówno w warstwie granicznej jak i swobodnej atmosferze powyżej, oraz w zależności od napływu mas powietrza. Zawansowana analiza przypadków pomiarowych wskazywała na różnice w poziomie jednorodności dla przypadku sprężonej i rozprężonej warstwy granicznej.

Sekcja 7 dyskutuje wyniki dla przypadków testowych i odnosi się do literatury.

W **podrozdziale 7.1** przedstawiono w sposób dość przejrzysty i komplementarny podobieństwa i rozbieżności pomiędzy sprężoną i rozprężoną WG w zakresie struktury pola chmurowego, stratyfikacji atmosfery, zawartości aerozoli, produkcji i dysypacji TKE, strumieni ciepła, turbulencyjnych fluktuacji, anizotropii oraz skali długości całkowania.

Rozdział 7.2 zawiera odnośniki obecnych wyników do literatury. O ile wydaje że się liczba referencji jest bogata to zaprezentowana analiza jest jednak w niektórych miejscach zbyt pobieżna. Pokazywana jest albo zbieżność albo rozbieżność z wynikami innych autorów ale bez głębszej analizy przyczyn i implikacji. Dla przykładu: „Profile of $\langle w'^2 \rangle$ is somewhat different than the upside down convective similarity scaling (Lenschow et al., 1980). It rather exhibits maxima in the cloud and in the middle of the SBL while a minimum below the cloud, in contrast to Duynkerke et al. (1995), Stevens et al. (2005), Kopec et al. (2016) and Mellado et al. (2018)”, „The separation between the SBL and the conditionally unstable TSL is indicated by the gradients in q_v and LCL, in accordance to Nicholls and Leighton (1986) and Jones et al. (2011). On the other hand, the separation between the TSL and the SML is not as clear in the thermodynamic profiles, similarly to Lambert et al. (1999) but in contrast to Nicholls and Leighton (1986) and Tjernstrom and Rogers (1996)”. Nie wiadomo z tych porównań w jakim dokładnie zakresie cytowane prace się różnią od obecnych wyników i co z tych różnic wynika. Wymaga to od czytelnika szczegółowego przestudiowania zacytowanych prac i podjęcia próby odtworzenie myśli przewodniej, która tym porównaniom przyświecała.

Rozdział 7.3 zwraca uwagę na oryginalność i znaczenie obecnych badań w odniesieniu do lokalnych cyrkulacji atmosfery i turbulencji oraz ich wpływu na rozprężenie warstwy granicznej, obszary przejściowe i warstwę cumulusową. Autor nie znalazł w literaturze innych prac, które analizowały by te parametry dla założonego typu warstwy granicznej. Ponadto, mimo, iż podobne analizy były już wykonywane przy wykorzystaniu danych pomiarowych z przelotów lotniczych to dane takie są dość jednorodne horyzontalnie. Natomiast w przypadku obecnej pracy pionowe pomiary przy wykorzystaniu helikoptera pozwoliły na lepsze zobrazowanie lokalnej struktury pola turbulencji oraz własności pola aerozoli: np. ostre gradienty w polach koncentracji N_p oraz N_{cen} w połowie wysokości rozprężonej WG.

Rozdział 7.4 odnosi się do potencjalnych mechanizmów odpowiedzialnych za obserwowane rozwarstwienie WGA, w których dominuje osłabienie termicznego mieszania prowadzącego do powstania warstwy wymuszanej przy powierzchni ziemi i pod chmurą. Analiza ta wskazuje na związki z dostępnymi w literaturze teoriami, przedstawionymi w rozdziałach 1.3.1.1-1.3.1.5.

Rozdział 7.5 opisuje kluczowe procesy dla utrzymywaniu stabilnej warstwy stratocumulusa, które decydują o pionowym transporcie ciepła i wilgotności. W przypadku rozprężonym transport turbulencyjny poprzez warstwę przejściową jest dość ograniczony i może być realizowany głównie przez małą liczbę silnych prądów wstępujących penetrujących warunkowo niestabilne obszary

TSL, co jest kluczowe do powstania chmur konwekcyjnych. Zarówno obszary TSL jak i warstwy z silnymi gradientami kontrolującymi transport pomiędzy warstwami SML oraz SBL nie były do tej pory systematycznie badane z powodu niedostatecznej liczby obserwacji wysokiej rozdzielczości (zarówno sondaże aerologiczne jak i pomiary lotnicze nie spełniają tu swojej roli). To wskazuje na potrzebę dalszych badań przy wykorzystaniu modeli numerycznych wysokiej rozdzielczości.

Appendix prezentuje szczegółową analizę systematycznych i losowych błędów czasu próbkowania danych przy wyznaczaniu kluczowych parametrów: turbulencyjnych momentów i strumieni, skal długości całkowania (L_u , L_w , L_{uw}) i współczynnika korelacji (R_{uw}) potrzebnych przy analizie anizotropii. Z prezentowanej analizy wynika, iż średnie odchyłki standardowe pomiędzy segmentami pomiarów są tego samego rzędu wielkości lub nieco większe niż błędy losowe, natomiast błędy systematyczne są znacząco mniejsze.

3. Końcowa ocena rozprawy.

Przedmiotem rozprawy doktorskiej było wykorzystanie oryginalnych wyników badań naukowych Autora do analizy warstwy granicznej przykrytej stratocumulusem, w odniesieniu do anizotropii pola drobnoskalowej turbulencji, profili termodynamicznych, oraz pola aerozoli. Analiza dotyczy w szczególności obserwowanych przypadków rozprężenia granicznej warstwy atmosfery. Trzeba podkreślić, iż prezentowany w materiał jest bardzo bogaty i stanowi istotny wkład naukowy Doktoranta do lepszego poznania zachodzących procesów fizycznych.

Rozprawa napisana jest w ogólności komunikatywnie i przejrzysto, choć jakość niektórych prezentacji graficznych jest nieco obniżona przez rysunki o zbyt małym rozmiarze np. 1.5, 1.8, 1.12, 1.14, 1.15, 1.18, 1.19, 1.21, 1.23, 3.1, 3.2 lub też niezbyt dobrze dobraną kolorystykę, np. 1.6, 2.4, co w niektórych przypadkach utrudnia ich analizę.

Rozprawa nie zawiera jawnie z góry postawionej hipotezy badawczej, którą w trakcie pracy Autor mógł by wykazać. Temat pracy jest dość ogólny i wydawać by się mogło, że jest to zachowawcze podejście ukierunkowane na analizę wybranych danych pomiarowych pod kontem określonych własności fizycznych. Przeprowadzona analiza umożliwiła jednakże sformułowanie ad hoc kilku koncepcji hipotez badawczych, które są w zgodzie z założonym tytułem pracy.

Pierwszą z tych hipotez przedstawioną w paragrafie 7.3 jest założenie, iż turbulencja wytworzona w chmurze lub w pobliżu powierzchni ziemi jest rozprowadzana w całej sprężonej WGZS, natomiast w przypadku rozprężonym, głównie wewnątrz podwarstwy, w której została wygenerowana. Skutkiem czego w przypadku rozprężonym poszczególne warstwy mogą charakteryzować się innymi parametrami szybkości dyssypacji, skalowania oraz anizotropii (rycina 7.1). Obserwuje się także charakterystyczne koncentracje aerozoli w każdym z przypadków. Kolejną hipotezą jest założenie dotyczące mechanizmu prowadzącego do rozprężenia, w którym to istotną rolę mogą odgrywać chmury cumulus, tworzące się poniżej podstawy stratocumulusa i osłabiające procesy termicznego mieszania we wnętrzu warstwy granicznej.

Zaprezentowana rozprawa udowadnia, iż Autor posiada ugruntowaną wiedzę teoretyczną w Dyscyplinie Nauk Fizycznych oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Autor wykazał się w szczególności znajomością procesów fizycznych warstwy granicznej atmosfery, turbulencji oraz mikrofizyki chmurowej. Posiada biegłość zarówno w sferze przygotowania narzędzi pomiarowych jak i wykorzystania technik matematycznych do przeprowadzenia zaawansowanej analizy danych pomiarowych.

Uwagi sformułowane w niniejszej recenzji nie obniżają pozytywnej końcowej oceny pracy, mają na celu wskazanie obszarów, w których możliwe jest pogłębienie zrozumienia fizycznych zależności i wskazują potencjalne kierunki dla dalszej kontynuacji pracy naukowej.

Uważam iż recenzowana praca spełnia wymagania formalne i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę zatem o dopuszczenie rozprawy mgr Jakuba Nowaka do dalszej części przewodu doktorskiego i publicznej obrony.

Andrzej Wysocki