

Modeling particle growth by condensation and deposition in turbulent mixed-phase cloud volumes

A doctoral dissertation by
Daniel G. Albuquerque 

Supervisor: **Prof. Dr. Hab. Hanna Pawłowska** 
Institute of Geophysics, Faculty of Physics, University of Warsaw

Co-supervisor: **Dr. Gustavo C. Abade** 
Institute of Geophysics, Faculty of Physics, University of Warsaw



UNIVERSITY
OF WARSAW

University of Warsaw

Warsaw 2025

Streszczenie

Chmury wielofazowe mają istotny udział w bilansie promieniowania Ziemi oraz w globalnym cyklu hydrologicznym, jednak ich rozwój na poziomie mikrofizycznym stanowi główne źródło niepewności w modelowaniu procesów atmosferycznych. Trudność wynika głównie z oddziaływania pomiędzy fluktuacjami turbulentnymi a procesami przemian fazowych o charakterze nieliniowym, takimi jak mechanizm Wegenera–Bergerona–Findeisena (WBF), które w modelach wielkoskalowych są zazwyczaj parametryzowane przy założeniu jednorodności przestrzennej. Wyniki licznych badań numerycznych i eksperymentalnych wskazują, że pomijanie fluktuacji o skalach mniejszych niż rozmiar siatki prowadzi do błędów systematycznych, w szczególności do sztucznie przyspieszonego zaniku przechłodzonej wody w wyniku procesu WBF. Jednocześnie pomiary dostarczają licznych obserwacji sprzecznych z powyższymi założeniami ukazując istnienie długo utrzymujących się chmur wielofazowych bogatych w wodę w stanie ciekłym.

W niniejszej rozprawie opracowano i zastosowano stochastyczny model parcelowy typu Lagrange’a, mający na celu zbadanie ograniczeń założenia o uśrednionym polu oraz ilościową ocenę wpływu turbulencji na mikrofizykę wielofazową. W tym podejściu pojedyncze krople wody i kryształy lodu są osadzone w modelowanym środowisku turbulentnym, które opisano jako połączenie gaussowskich, stochastycznych fluktuacji prędkości oraz deterministycznego modelu mieszania. W celu wiernego odwzorowania niejednorodności charakterystycznych dla środowiska turbulentnego, każdy element chmury zachowuje własną, niezależną historię fluktuacji prędkości i oddziałuje – poprzez wzrost na skutek kondensacji oraz parowanie utrzymując jednocześnie mikrofizyczne sprzężenie – przede wszystkim ze swoim najbliższym otoczeniem. Właściwości termodynamiczne i mikrofizyczne tych elementów podlegają przekształceniom zgodnym z podstawowymi prawami zachowania. Interakcje pomiędzy różnymi elementami są realizowane za pomocą modelowanego mechanizmu mieszania, opisanego pojedynczą skalą czasową, dobraną w oparciu o prawa skalowania obowiązujące w zakresie bezwładnościowym turbulencji.

Opracowany model stanowi pomost pomiędzy nadmiernie uproszczonymi schematami zbiorczymi, a kosztownymi obliczeniowo symulacjami bezpośrednimi (DNS), oferując narzędzie do modelowania chmur o umiarkowanej złożoności. Dzięki jaw-

nemu odwzorowaniu zjawisk o skali mniejszej niż rozmiar siatki podejście stochastyczne pozwala zaobserwować zjawiska, których tradycyjne, jednorodne modele parcelowe nie są w stanie odtworzyć, takie jak wydłużona obecność przechłodzonej wody w stanie ciekłym, zmodyfikowane tempo wzrostu i aktywacji kryształów lodu, a także odmienna dynamika przesycenia. Choć wyniki te zostały uzyskane w ramach uproszczonego schematu, wykazują one odporność na zmiany warunków początkowych i intensywności turbulencji, co sugeruje, że turbulencja w mniejszej, nie modelowanej skali może odgrywać istotną rolę w rozwoju stanu mikrofizycznego chmur wielofazowych.

Uzyskane rezultaty otwierają nowe możliwości rozwoju modelu oraz jego integracji z wielkoskalowymi schematami. Zaproponowane podejście umożliwia zastąpienie obecnego modelu mieszania turbulentnego bardziej zaawansowanymi rozwiązaniami, przy jednoczesnym zachowaniu niezmienionej struktury pozostałych elementów modelu. Najważniejszą cechą opracowanej metody jest jej zdolność do uchwycenia wpływu fluktuacji na procesy przemian fazowych, co czyni ją obiecującym narzędziem do parametryzacji w skalach mniejszych niż rozmiar siatki w symulacjach metodą dużych wirów (LES) gdzie odwzorowanie mikrofizyki wielofazowej pozostaje jednym z głównych źródeł niepewności. W tym kontekście model przedstawiony w niniejszej pracy stanowi zarówno fizycznie ugruntowane, jak i obliczeniowo efektywne podejście, które może znacząco poprawić wierność odwzorowania modeli chmurowych w szerokim zakresie skal.