

Sopot, 29 kwietnia 2019 r.

Prof. dr hab. Jacek Piskozub
Instytut Oceanologii PAN
ul. Powstańców Warszawy 55
81-712 Sopot
email: piskozub@iopan.gda.pl

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr Stefana Sitarka

pt.: „Lidarowe badania rozkładu rozmiarów
cząstek aerozolu atmosferycznego
w warstwie granicznej”

Temat rozprawy doktorskiej mgr Stefana Sitarka jest mi bliski, gdyż ponad ćwierć wieku temu sam broniłem pracy doktorskiej dowodzącej, czysto teoretycznie, że tego typu analiza, tzw. „odwrócenie problemu lidarowego” dla lidarów wieloczęstotliwościowych jest w ogóle możliwa. Jest to więc zatem dla mnie coś w rodzaju podróży sentymentalnej, dającej poczucie satysfakcji z tego jaki postęp dokonany został od tego czasu dzięki postępowi techniki, zarówno w konstrukcji samych lidarów jak i mocy samych komputerów używanych do obróbki sygnału.

Recenzowana rozprawa, napisana w formie „klasycznej” pracy doktorskiej, ok. 110 stron właściwego tekstu łącznie z wstępem i dodatkami (ale bez abstraktów, skorowidza oznaczeń i spisu literatury) poświęcona jest właśnie odwróceniu tego rodzaju problemu lidarowego i zastosowaniu uzyskanego rozwiązania do badania dynamiki cząstek aerozolu w warstwie granicznej. Omówię kolejno jej części aby ocenić na ile ten cel się udał.

Praca zaczyna się od Wstępu przedstawiającego pokrótce znaczenie wymuszenia aerozolowego dla zmiany klimatu i nadal dużych niepewności z tym związanych. Choć jest to opis bardzo skrócony, jest w zasadzie poprawny z wyjątkiem drobiazgów. Tak zwana stała słoneczna to nie ilość energii docierającej do Ziemi ze Słońca (mierzy się ją ponad atmosferą ziemską), a poszczególne części najnowszego raportu IPCC publikowano w latach 2013-14, a nie w roku 2012. Trzeba też zaznaczyć, że tematyka Wstępu ma jedynie luźny związek z resztą pracy.

Pierwszym numerowanym rozdziałem pracy jest „Część Ogólna” (w istocie teoretyczna), omawiająca definicję i rodzaje aerozolu, rozkłady wielkości jego cząstek, metody jego badania i wreszcie elementy optyki atmosfery (absorpcję i rozpraszanie). Część ta jest napisana ogólnie poprawnie, ale nie idealnie. Można polemizować z podaną definicją aerozolu (tradycyjnie nie uważa się za aerozol opadu atmosferycznego, chmur i mgły) oraz podziałem ze względu na stan skupienia (pomijającym aerozol morski, pochodzący wprost z wody morskiej, będący przecież jednym z obiektów badań w pracy!). Dodam tu, że wyprowadzenie współczynnika rozpraszania za pomocą przekroju czynnych, chociaż poprawne, nie jest najbardziej ogólnym ani eleganckim. Osobiście wolę wyprowadzenie stosujące pojęcie radiacji ale zgadzam się, że w zastosowaniu lidarowym taki wybór ma sens. Zastanawia mnie też czemu autor nie brał pod uwagę stosowania pionowych profili temperatury troposfery z reanaliz (str. 31)? Jedynym ewidentnym błędem w tym rozdziale jest jednak znak we wzorze I-43, który gdyby go potraktować dosłownie oznaczałby wzrost temperatury z wysokością w troposferze, a w konsekwencji (wzór barometryczny I-42) także wzrost ciśnienia. Sądzę jednak, że jest to jedynie błąd redakcyjny¹.

Kolejny rozdział, zatytułowany „Analiza sygnałów lidarowych – podstawy teoretyczne” jest moim zdaniem najważniejszy w tej pracy. Mimo iż praktyczne zastosowanie algorytmu opracowanego przez doktoranta przedstawione jest w następnym rozdziale, to tu właśnie poznajemy stosowane przez niego zaawansowane metody „odwracania” sygnału lidarowego, problemu matematycznie bardzo trudnego (tzw. „źle postawionego”), wymagającego dla otrzymania fizycznie sensownych rozwiązań zastosowania dodatkowych warunków brzegowych. W dużym skrócie sygnał lidarowy koryguje się ze względu na dystans (już tu czyhają pułapki), wykorzystuje się informację uzyskaną dzięki użyciu większej niż jednej linii laserowej dla obliczenia profili własności optycznych aerozolu przy pomocy założeń o spektralnym charakterze własności optycznych aerozolu, następnie z teorii Mie wyznacza się rozkłady wielkości cząstek pasujące do tych własności optycznych (to jest właśnie ta „źle postawiona” część). Mgr Sitarek bardzo dobrze czuje się w tematyce tego rozdziału, przedstawiając zarówno przegląd metod stosowanych dotychczas jak i nową metodę którą ostrożnie nazywa „opracowan[ą] w Zakładzie Optyki IFD UW” (doktorant nie był współautorem pierwszej pracy opisującej wczesną wersję metody w 2009 roku). W metodzie tej, zamieniającej profile sygnału na profile ilorazów kolejnych jego wartości (co usuwa konieczność

1 Nawiasem mówiąc wzoru I-41 nie ma explicite w pracy [39] chociaż zapewne da się go wyprowadzić z podanych tam zależności. Nie sądzę jednak aby Bodhaine i współautorzy byli za używaniem tak prymitywnego wzoru barometrycznego, gdzie ciśnienie zależy wyłącznie od temperatury, w dodatku z pionowym gradientem dla wilgotnej atmosfery i stałą gazową dla suchej!

oszacowania zazwyczaj nieznanej wartości tzw. stałej lidarowej) dodatkowymi warunkami brzegowymi jest założona postać funkcji rozkładu wielkości cząstek aerozolu. Osiągnięciem doktoranta jest stworzenie programu komputerowego będącego implementacją tej metody. Dodam tu, także z własnego doświadczenia, że napisanie działającego programu o takim stopniu skomplikowania jest osiągnięciem nietrywialnym. Dodatek V.1 pokazuje bardzo zaawansowany interface użytkownika ale nadal pozostawia pewien niedosyt co do szczegółów implementacji. Dobrze byłoby aby na obonie mgr Sitarek powiedział coś więcej o przewagach swojego programu nad wcześniejszymi implementacjami.

Jak już wspomniałem rozdział II jest napisany bardzo dobrze. Z drobnych uwag jaki mi się nasuwają wymieniałbym to, że współczynnik załamania cząstek aerozolu trzeba rzeczywistsze założyć we wszystkich tego typu metodach jak wspomniano na str. 65., gdyż doświadczenie uczy, że „odwrócenie” (czyli odzyskanie) także jego wartości jest praktycznie niemożliwe. Jednak dodałbym że należy w tym celu stosować dodatkowe informacje np. z sondowań atmosfery czy modeli cyrkulacji, więc nie jest to, a przynajmniej nie powinno być to jedynie „założenie”. Drugą uwagę jaką mam do tego rozdziału byłoby poprawienie stwierdzenie ze strony 57, przy opisie wcześniej stosowanych metod, że większość z nich zmuszona była stosować iloraz lidarowy dla jednoczesnego odzyskania ekstynkcji i rozpraszania do tyłu. Czy większość - nie wiem. Być może. Były jednak metody rozwiązujące problem lidarowy jednocześnie dla obu, jak ta którą zastosowałem w swoim doktoracie używając wartości rozkładu wielkości cząstek wyliczonych z wartości spektralnych rozpraszania do tyłu (z użyciem metody Tikhonova) do wyznaczenia ekstynkcji posuwając się po profilu oddalając się od lidar. I też nie byłem pierwszy gdyż implementowałem, najlepiej jak umiałem, teorię „odwracania” sygnału lidarowego opisaną w książce Zueva i Naatsa. Jest to dobre miejsce aby jeszcze raz podkreślić, że mimo dużego podobieństwa na poziomie ogólnego opisu metod, każda ich implementacja wymaga wielu nieoczywistych wyborów i każda (o ile działa), jest nietrywialna i nowatorska.

Pozostaje zatem tylko kwestia czy opisana implementacja rzeczywiście działa. Odpowiedź na nie daje trzeci rozdział pracy pt. „Analiza rzeczywistych sygnałów lidarowych”. Opisuje on dwie kampanie pomiarowe, w których sygnał lidarowy opracowano przy pomocy wcześniej przedstawionego algorytmu, a uzyskane wyniki przedyskutowano w kontekście znanych procesów fizycznych produkcji i transformacji aerosolu. Rozdział ten jednak zaczyna się niespodziewanie od części teoretycznej, niejako kontynuacji Rozdziału I („Części ogólnej”). Moim zdaniem doktorant czuje się na tym polu mniej pewnie niż gdy opisuje działanie lidar i metody opracowywania

sygnału lidarowego. Nie jest to zaskakujące gdyż większość „lidarowców” poznaje te zagadnienia („co, jak i po co”) dokładnie w tej kolejności. Muszę jednak wymienić zauważone błędy i nieścisłości w tej części teoretycznej:

- Warstwa graniczna latem może mieć znacznie większą miąższość niż 2,5 km (str. 67).
- *Wartość stałej Avogadro ma 2, a nie 3 na czwartym miejscu znaczącym (str. 68) – jej wartość to $6.022140857(74) \times 10^{23}$.*²
- *Wzór III-15 nie tyle opisuje, a definiuje supersaturację (inaczej przesylenie), a i to nie do końca bo trzeba by jeszcze dodać, że występuje ona gdy $s > 0$.*
- Opis zjawiska Kelvina (str. 72) nie jest najbardziej klarowny. Trudno się z tego tekstu zorientować, że zjawisko Kelvina utrudnia, a nie ułatwia powstawanie kropeł bez jąder kondensacji. Ciśnienie nasycenie nie tyle jest większe nad zakrzywioną powierzchnią, ale raczej musi być większe aby zachować ją w równowadze termodynamicznej.
- Wysokość kondensacji Z_c występująca na str. 77 i rys. III-6 jest opisana jedynie zdawkowo w przypisie. Zdefiniowana jest jedynie w jednym z dodatków, co pokazuje, że może powinien on być jednak częścią integralną tekstu. *Opis „Rys. III-5” na poprzedniej stronie dotyczy chyba tego właśnie rysunku.*
- Sucha depozycja (str. 78) to nie tylko efekt grawitacji, ale także mieszania turbulentnego. Dlatego prędkość depozycji nie jest równa prędkości opadania cząstek (*terminal velocity*) pod wpływem grawitacji określonej prawem Stokesa.
- *W Tabeli III.2-1 nie wyjaśniono nazw kolumn, a na Rys III-7 iż krzywe to punkt rosy i zmierzona temperatura.*
- *Podobnie na Rys III-12 trzeba zajrzeć do cytowanej prac, z której pochodzi aby dowiedzieć się, że $T_w - T$ to różnica temperatury cząsteczek oraz powietrza.*

Celem tej części teoretycznej było podanie metody przy pomocy której wyliczono rozkłady wielkości cząstek aerozolu podczas ich aktywacji pod chmurą konwekcyjną, których badanie było celem pierwszej z dwu kampanii pomiarowych opisanych w pracy. Wynik tych obliczeń, rozkłady wielkości od wysokości aktywacji aż poza wysokość kondensacji, przedstawiono na Rys. III-18. Rozkłady te przetestowano generując przy ich pomocy symulowany sygnał lidarowy (metodą analogiczną jak w opisanym w poprzednim rozdziale algorytmie, ale w „prostszej” stronę, gdzie problem jest dobrze określony). Porównanie ze zmierzonym sygnałem (Rys. III-19) wypadło nadspodziewanie dobrze co jest sukcesem metody pomiarów lidarowych ale jeszcze bardziej teorii aktywacji cząstek aerozolu zwanej w pracy „Metodą Arabasa”. Problem w tym, że w przeciwną

² Uwag pisanych kursywą nie zamierzam odczytywać, nie wymagają one zatem odpowiedzi na obronie.

stronę, przy „odwracaniu” sygnału lidarowego, dany sygnał lidar wieloczęstotliwościowego odpowiada wielu różnym rozkładom wielkości cząstek i dlatego, jak należy rozumieć, nie udało się odtworzyć, dość zresztą skomplikowanych, rozkładów z Rys. III-18 z danych dla jedynie trzech długości fali światła. Szkoda, że nie pokazano co dla każdej wysokości uzyskano z algorytmu „odwracania” sygnału. Mimo to, uważam, ten sprawdzian metody za udany gdyż trudno spodziewać się po algorytmie rzeczy niemożliwych. Natomiast bardzo imponująco wyglądają uzyskane profile promieni efektywnych (parametru realnie wyliczanego z danych lidarowych mierzonych na trzech długościach fali światła). Wyniki te są w mojej opinii potwierdzeniem prawidłowego działania algorytmu „odwracającego”.

Drugą kampanią pomiarową, wykorzystana do sprawdzenia opracowanego algorytmu były pomiary aerozolu morskiego, mierzonego z brzegu we Władysławowie lidarem sondującym pod kątem. Tu muszę zaznaczyć, że pomimo iż pomiarów dokonywali moi koledzy z pracowni, a tę metodę sondowania w eksperymentach brzegowych sam zapoczątkowałem w latach 1990-ch, nie miałem z tymi pomiarami nic wspólnego. Także w tej części rozdziału istnieje podrozdział teoretyczny i tu też mam uwagi:

- Nie mogę się zgodzić, że „Powietrze poruszające się nad wodami charakteryzuje się w znacznym stopniu warstwowością, gdyż powierzchnie mórz mają względnie małe tarcie” (str. 93). Warstwa graniczna charakteryzuje się turbulencją także nad morzem, z tym iż jest ona zwykle płytsza, z powodu o którym pisze Doktorant, a także w wyniku mniejszej różnicy temperatury powierzchni morza i powietrza nad nim w dzień niż w wypadku lądu. Mowa jest tu zatem o powietrzu ponad warstwą graniczną ale nie jest to jasno napisane.
- Dziwne jest też stwierdzenie (str. 96), że „przy napływie znad lądu mamy do czynienia ze sturbulowanym powietrzem, które zawiera słabo wymieszany aerozol” i to nie tylko przez nowe dla mnie słowo „sturbowany”. Jak pogodzić to „sturbowanie” ze słabym wymieszaniem? Czy chodzi o bliskość źródła aerozolu do miejsca pomiaru?
- Określenie „górną granicą wysokości warstwy niesturbulowanej,, (str. 98) pochodzi chyba z tego samego nieporozumienia. Warstwa strumieni turbulentnych to właśnie warstwa graniczna. Poleciałbym tu doktorantowi wykład prof. Szymona Malinowskiego https://www.igf.fuw.edu.pl/m/documents/39/6d/396da294-4320-45c4-adf1-1eaa130cc02e/wyklad06_ang.pdf
- Natomiast monotoniczne zmniejszanie się promienia efektywnego aerozolu morskiego z wysokością (str. 97) jest typowe dla morskiej warstwy granicznej. Aerozol produkowany jest lokalnie na powierzchni morza i mieszanie turbulentne łącznie z różną prędkością

depozycji dla różnej wielkości cząstek będą miały taki właśnie rezultat. Wykorzystujemy to od lat do mierzenia strumienia produkcji aerozolu morskiego metoda gradientową. Także większy promień efektywny na wysokości 500 m przy większej prędkości wiatru zgodny jest z tym mechanizmem.

Pomimo powyższych potknięć terminologicznych, mgr Sitarek wykazał, że jego algorytm pozwala na uzyskanie realistycznych wartości promieni efektywnych aerozolu, dla całego sondowanego profilu, pozwalając odróżnić aerozol lądowy od morskiego.

Podsumowując, Doktorant stworzył zaawansowany algorytm odwracania sygnału lidarowego dla lidarów wieloczęstotliwościowych oraz wykazał wykorzystując dane lidarowe z dwóch kampanii pomiarowych, że algorytm ten realistycznie odtwarza wartości promienia efektywnego aerozolu, a także daje informacje o rozkładzie wielkości cząstek aerozolu w stopniu jaki umożliwia stosowanie trzech długości fali światła. Na uwagę zasługuje potwierdzenie przy jego pomocy modelu aktywacji cząstek aerozolu poniżej chmury kłębiastej. Recenzowana praca doktorska, pomimo wykazanych powyżej drobnych wad jej tekstu, stanowi bez wątpienia ustawowe „oryginalne rozwiązanie problemu naukowego”.

To stwierdziwszy, mogę przejść do oficjalnej konkluzji:

Rozprawa przedstawiona do recenzji spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim w świetle obowiązujących przepisów. Stawiam zatem wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Na zakończenie chciałbym życzyć mgr Stefanowi Sitarkowi dalszych sukcesów w prowadzonych badaniach i karierze zawodowej.

Z poważaniem

