

Warszawa, 15. 05. 2018

Prof. dr hab. Tadeusz Stacewicz
Instytut Fizyki Doświadczalnej
Wydział Fizyki
Uniwersytetu Warszawskiego
02-093 Warszawa, ul. Pasteura 5

Recenzja pracy doktorskiej mgr Pauliny Pakszys pt.

Horyzontalna zmienność własności optycznych aerozoli w Arktyce Europejskiej

Wpływ działalności człowieka na klimat ziemski jest dzisiaj zagadnieniem powszechnie rozważanym. Klimat jest skutkiem wielu złożonych i nawzajem na siebie wpływających procesów, zachodzących przede wszystkim w atmosferze ziemskiej. Określa go bilans między promieniowaniem słonecznym, akumulacją energii w atmosferze i na powierzchni Ziemi, oddziaływaniem z wodami (oceanem), biosferą, a także zjawiskami wynikającymi z transportu mas powietrza i aerozolu, transportu energii w wodach oceanu (prądy morskie) i innych procesów. Zjawiska tworzące klimat tworzą skomplikowany układ wzajemnych powiązań i sprzężeń, zazwyczaj tłumiących reakcję na zmiany natężenia promieniowania słonecznego. Działalność człowieka powodująca intensywną emisję różnych substancji wskutek z działalności przemysłowej, rolniczej i innej, a także następująca później ich emisja, mają dzisiaj istotny wpływ na te zjawiska. Obszar Północnego Atlantyku należy do miejsc, w którym szybkie zmiany klimatu są najsilniej odczuwalne, a klimat Arktyki jest bardzo czułym indykatorem globalnych zmian klimatycznych

Główny cel, jaki postawiony został w pracy doktorskiej mgr Pauliny Pakszys, to rozpoznanie potencjalnych zmian w atmosferze arktycznej poprzez określenie horyzontalnej struktury własności zawartego w niej aerozolu na przykładzie atmosfery nad archipelagiem Svalbard. Badania opisane w tej pracy przeprowadzone zostały w Horsundzie, w Ny-Alesund i w Longyearbyen w archipelagu Svalbard, a także na morzu, jako że w tych miejscach wpływ lokalnych źródeł aerozolu antropogenicznego jest zaniedbywalny.

Praca składa się z 11 rozdziałów. Pierwsze 3 z nich dotyczą podstaw fizyki aerozolu atmosferycznego, jego własności, propagacji światła przez atmosferę z aerozolem. W rozdziale 4 opisano podstawy technik pomiarowych służących do wyznaczania własności aerozolu. W rozdziale 5 przedstawiono metody modelowania atmosfery z aerozolem, podczas gdy w rozdziale 6-tym – opisano arktyczne stacje pomiarowe. Rozdział 7-my dotyczy różnych technik procesowania danych. Zebrane dane – przedstawiono rozdziałach 8 – 10.

Rozprawa w wersji wydrukowanej liczy 254 strony. Jednak 53 strony to materiały „pomocnicze”, zawierające spisy treści, tabel, rysunków i wzorów. W wersji przedstawionej na dołączonej płytce CD praca liczy 577 stron, gdyż zamieszczono tam 6 dodatków, ze wstecznymi trajektoriami uzyskanymi za pomocą modelu HYSPLIT, warunkami meteorologicznymi oraz rocznymi i miesięcznymi statystykami własności aerozolu. Taki układ dysertacji jest korzystny. Dzięki niemu, choć rozprawa zawiera bogaty materiał, nie zmusza się czytelnika do operowania wiadomościami, które są mu niepotrzebne.

Autorka wykonała całościową analizę rozkładu aerozolu wywołaną lokalnymi warunkami: wiatrem i topografią terenu. Przyczyniło się to do poszerzenia bazy danych o czasowej i horyzontalnej zmienności arktycznego aerozolu atmosferycznego w latach 2000 – 2015. Zebrane i przeanalizowane zostały informacje dostarczane przez fotometry słoneczne i gwiazdowe, dane satelitarne, a także wyniki pomiarów lidarowych. Dane te powiązała z rezultatami pochodzącymi z pomiarów meteorologicznych i modelowania atmosferycznego. Aby lepiej określić wpływ różnych źródeł aerozolu na atmosferę w archipelagu Svalbard określała wsteczne trajektorie mas powietrza używając modelu HYSPLIT.

Nie jest łatwo w recenzji, która powinna być krótka i nienudząca, przedstawić wszystkie osiągnięcia tej rozprawy. Z tych najważniejszych: jak wspomniano, główną hipotezą testowaną w tej pracy jest, że optyczne własności aerozolu atmosferycznego w rejonie archipelagu Svalbard są przede wszystkim określone przez napływające masy powietrza, których własności intensywnie zmieniają się o ostatnim okresie, także i wskutek działalności ludzkiej. Własności tych mas zależą od pory roku. Autorka pokazała, że widoczny jest wzrost grubości optycznej atmosfery w ciągu ostatnich 16-tu lat z wartości 0,07 do 0,11, a w pewnych przypadkach jeszcze większy. W niektórych latach można to powiązać ze zjawiskiem *arctic haze*, wynikającym z antropogenicznego zanieczyszczenia atmosfery, z rozległymi pożarami lasów na półkuli północnej i z silnymi erupcjami wulkanów. Określone zostały pory roku o zwiększonej ilości aerozolu w atmosferze. Analiza współczynnika Ångströma pokazała większą jego wartość, a więc większy udział małych cząstek w masach aerozolu wiosną i latem. W latach „czystych” (2003 i 2014) w składzie aerozolu dominowały sól morską i sulfaty, a więc aerozol był głównie pochodzenia morską. W pozostałych latach skład chemiczny aerozolu był odmienny, świadczący o jego napływie z odległych źródeł.

Rezultaty posłużyły też do oceny przydatności modeli atmosferycznych i stwierdzenia, które z nich i jak odtwarzają sytuację klimatyczną, gdyż wśród czynników wpływających na

niepewność modelowania należy wymienić niepewność spowodowaną przez aerozole atmosferyczne i wynikające stąd niepewności wymuszenia radiacyjnego.

Jeszcze innym celem tej pracy było powiązanie własności atmosfery z aerozolem w całej kolumnie powietrza – od podstawy do stratosfery, gdyż znaczące ilości drobnego aerozolu mogą być obecne w powietrzu na dużych wysokościach nawet miesiącami, choć główne masy aerozolu są usuwane w krótkim okresie czasu.

Praca napisano dobrym językiem i poddano ją starannej redakcji. Mimo to autorka nie uniknęła błędów. Recenzent pomija drobne usterki językowe. Z poważniejszych niedociągnięć redakcyjnych zauważa się jednak, że wiele wzorów napisanych zostało z użyciem uproszczonego edytora równań, przez co niekiedy niezachowane zostało następstwo nawiasów lub nie dopasowano ich wielkości do wielkości wzoru. W równaniach (59 – 61) użycie nawiasów jest wręcz błędne. Dlaczego we wzorze (2) stosowany jest symbol całki okrężnej, kiedy wykonuje się tutaj zwykłą całkę z rozkładu rozmiarów aerozolu w jednowymiarowej przestrzeni wielkości cząstek?

Praca zawiera 69 rysunków, na ogół dobrze opracowanych. Jednak w rozdziale 6.1, na kilku stronach przedstawiono bogaty opis geografii rejonu, którego dotyczyły badania. Próżno szukać tu mapki, która uczyniłaby ten opis przejrzystym i nienużącym.

W rozdziale 2.2.2 nie ujednociono funkcji rozkładów rozmiarów cząstek aerozolu. Raz, jako zmienna, stosowana jest tu średnica cząstek (D_p), raz ich promień (r), a raz wzór jest nawet przemieszany, tzn. rozkład zależy od promienia, a pomnożony jest przez logarytm ze średnicy (przy czym powinna być tu względna wartość średnicy). Uwaga, że $D_p = 2r$, nie ułatwia sprawy. Warto bowiem podkreślić, że postać rozkładu zależy od użytej zmiennej, gdyż powinno się brać pod uwagę także i różniczkę rozmiaru, która nadaje sens fizyczny funkcji rozkładu. Nieściśle jest więc stwierdzenie, zawarte tutaj, że $n(r)(\log D_p)$ opisuje liczbę cząstek o rozmiarze D_p . Wielkość ta opisuje liczbę cząstek w przedziale wielkości określonym odpowiednią różniczką, przy czym różniczka ta nie została podana. Wynikiem wspomnianej niekonsekwencji, t.j. użycia raz promienia, a raz średnicy cząstek, jest niespójność w następujących wzorach: średnie standardowe odchylenie rozkładu przedstawiono jako funkcję promienia cząstek, a jego medianę jako funkcję ich średnicy.

Wiele błędów zawartych jest w rozdziale 3.1. Nie wiedzieć, czemu w zdaniu zawierającym słowa *...the local concentration of the particles scattered back...*, wyróżniono proces rozpraszania światła do tyłu, choć liczy się tu jakiegokolwiek rozpraszanie. (w dodatku powinno być *scattering*). Bardzo ważne wielkości opisane równaniami (6 i 7)

nazywają się współczynnikami rozpraszania i absorpcji (o czym autorka tutaj nie pisze, a szkoda, bo wykorzystuje się je w teorii lidar, rozdz. 4.2). Niewłaściwie podane zostały (poniżej wzoru 6) definicje wydajności rozpraszania i absorpcji, jako stosunek energii promieniowania odpowiednio rozproszonego lub zaabsorbowanego przez cząstkę do energii przez nią „przejętej” (*intercepted*). Tymczasem jest to stosunek efektywnego przekroju czynnego na dany proces do przekroju geometrycznego cząstki (πr^2), na co warto zwrócić uwagę, bo np. wydajności rozpraszania mogą być większe od jedności. A *albedo pojedynczego rozpraszania* określa prawdopodobieństwo, że foton, podlegający ekstynkcji (będącej na ogół złożeniem kilku procesów), został rozproszony – a nie – jak podano w pracy (str. 80, ostatnia linia) - prawdopodobieństwo rozproszenia fotonu w wiązce przechodzącej przez ośrodek.

Umieszczony w rozdziale 3.1 rysunek 11 uważam wręcz za szkodliwy. Sugeruje on, że cząstki aerozolu mniejsze niż 0,1 μm nie mają wpływu na transmisję promieniowania słonecznego, co jest oczywistą nieprawdą, bo pominięto choćby rozpraszanie Rayleigha. Duże cząstki, o rozmiarze większym od 2 μm , miałyby nie rozpraszać do tyłu, co kłóci się z obserwacją codzienną – patrz chmury i mgły. Cząstki o rozmiarze pośrednim – od 0,1 do 2 μm – miałyby rozpraszać najsilniej (patrz – poprzednie zdanie) dzięki wewnętrznemu odbiciu. Niestety, pomija się tutaj dominujące rozpraszanie Miego, które jest procesem znacznie bardziej złożonym, niż zasugerowany na rysunku mechanizm odbicia promieniowania w kropli, podobny do kartezjuszowskiego opisu powstawania tęczy. Przy czym występowanie (lub nie) tych procesów uzależniono sztywno od rozmiaru cząstki (promienia r ?), a nie związane przy tym z długością fali promieniowania (λ), czyli z parametrem $2\pi r/\lambda$, o którym zresztą autorka pisze na innych stronach. Nie wzięto też pod uwagę, że promieniowanie słoneczne przenosi znaczące ilości energii w szerokim zakresie długości fal – od ultrafioletu do podczerwieni, więc ściśle podawanie wartości promieni cząstek przy różnych procesach jest bezsensowne. Ten, zacytowany za popularnonaukowym źródłem www.eoearth.org, rysunek, nie powinien znaleźć się żadnej pracy naukowej, a wręcz należałoby wystąpić o jego usunięcie ze strony o wyżej wymienionym adresie.

Współczynnik ekstynkcji α (na ogół z indeksami górnym i dolnym), użyty w rozdziale opisującym teorię lidar (4.2.1.1), to ten sam współczynnik, który został wprowadzony w rozdziale 3.1 jako σ^{ext} w równaniu (6)¹. A zamieszczone na końcu rozdziału 4.2.1

¹ Daje tutaj o sobie znać brak w pracy skorowidza oznaczeń matematycznych, bo np. w innych miejscach literą m oznacza się zarówno część rzeczywistą współczynnika załamania jak i wielkość zwaną *air mass*.

stwierdzenie: *Temperature profiles are obtained via change of rotational energy level of molecules* jest niewłaściwie sformułowane. Temperaturę ośrodka rozpraszającego otrzymuje się wnioskując z sygnałów ramanowskich o obsadzeniach rotacyjnych poziomów energetycznych.

Warto jednak zauważyć, że wymienione usterki, błędy i niedoskonałości znalazły się przede wszystkim we wstępnej części dysertacji, w której opisano pojęcia odnoszące się do aerozolu atmosferycznego lub też aparatury czy metod pomiarowych. Nie dotyczą natomiast *meritum* rozprawy, t.j. wyników pomiarów i ich interpretacji, a w związku z tym nie obniżają wartości pracy. Poza tym lista ta jest niewielka, biorąc pod uwagę ogólną objętość dysertacji, sięgającą blisko 600 stron.

Praca zasługuje na wysoką ocenę, gdyż zawiera bardzo bogaty materiał, który, jak sądzę, będzie przez dłuższy czas przydatny dla innych naukowców. Do takich dysertacji zwykle niejednokrotnie się wraca, gdy potrzebne są konkretne dane, które są w niej ujęte, z komentarzem *zobaczmy, jak to wygląda u Pakszys*. Uznanie budzi bogate odniesienie się do licznych źródeł. W spisie literatury autorka cytuje ponad 360 prac.

Mgr Paulina Pakszys jest autorką/współautorką 12-tu publikacji, z których 8 to artykuły naukowe wydrukowane w recenzowanych czasopismach, a pozostałe – to rozdziały w książkach. Jeden z rozdziałów jest sygnowany tylko jej nazwiskiem, co potwierdza naukową samodzielność autorki.

Podsumowując stwierdzam, że dysertacja mgr Pauliny Pakszys jest ciekawa, pożyteczna i ma dużą wartość naukową. Dotyczy współczesnych problemów nauk o Ziemi. Wymienione powyżej drobne uchybienia i błędy nie obniżają mojej bardzo dobrej oceny. Uważam, że rozprawa pt. *Horyzontalna zmienność własności optycznych aerozoli w Arktyce Europejskiej* spełnia warunki określone w odpowiednich ustawach. Wnioskuje o dopuszczenie tej pracy do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Tadeusz Stacewicz