

Warszawa, 28.10.2019

Prof. dr hab. Janusz Wojciech Krzyścin
Zakład Fizyki Atmosfery
Instytut Geofizyki PAN

DZIEKANAT WYDZIAŁU FIZYKI
WPŁYNĘŁO

2019 -11- 04 *JB*

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Justyny Lisok

„Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing over the European Arctic in the Light of Absorbing Particles”

Podstawa opracowania recenzji: pismo prof. dr hab. Dariusza Wasika, Dziekana Wydziału Fizyki, Uniwersytetu Warszawskiego z dnia 5 września 2019 r.

1. Uwagi ogólne

Recenzowana rozprawa dotyczy własności optycznych i mikrofizycznych aerozolu atmosferycznego w rejonie stacji polarnej Ny-Alesund (78.9°N, 11.9°E), Svalbard i jego potencjalnego wpływu na zmiany klimatu poprzez aerozolowe wymuszanie radiacyjne. Analiza obejmuje ocenę zmienności czasowej szeregu parametrów aerozolu, ważnych dla bilansu radiacyjnego atmosfery, w czasie kilku wiosennych kampanii pomiarowych w ramach projektu iAREA w latach 2014-2017. Intensywne i ekstensywne parametry aerozolu mierzone z zastosowaniem unikalnej aparatury, w tym zminiaturyzowanych instrumentów umieszczonych na balonie meteorologicznym na uwięzi, były przedmiotem dogłębnej analizy statystycznej z podziałem na typy aerozolu o specyficznych własnościach absorpcyjnych i higroskopijnych. Szczególnie cenne jest doświadczalne wyznaczenie profilu pionowego szeregu parametrów optycznych i mikrofizycznych, a zwłaszcza współczynnika absorpcji aerozolu i rozkładu wielkości cząstek aerozolu. W celu wyznaczenia sezonowych różnic (wiosna-lato) i sezonowej wieloletniej zmienności dla rejonu Ny-Alesund posłużono się symulacjami numerycznymi z zastosowaniem modelu NAAPS i baz danych (MERRA-2 i ERA-5) uzyskanych z globalnych reanaliz meteorologiczno-chemicznych tj. za pomocą modeli numerycznych zastosowanych do danych początkowych z przeszłości i uzgodnionych z wynikami dostępnych obserwacji. Kombinowane dane z reanalizy MERRA-2 dla lokalizacji odpowiadającego stacji Ny-Alesund i z pomiarów naziemnych aerozolu w czasie kampanii pomiarowych iAREA (2014-2016) zastosowano do wyznaczenia wymuszania radiacyjnego przy powierzchni gruntu, na szczycie atmosfery i w całej kolumnie powietrza. W tym przypadku zastosowano precyzyjny model

transferu promieniowania w atmosferze – MODTRAN, o dużej rozdzielczości spektralnej i czasowej. Symulacje (dzienne przebiegi wymuszania radiacyjnego) wyznaczono dla mieszaniny różnych typów aerozolu i z podziałem na poszczególne frakcje: aerozol soli morskiej, aerozol siarczynowy, pył, aerozol z zawartością tzw. czarnego węgla (z przemysłowego spalania kopalin i biomasy) i organiczny węgiel (ze spalania biomasy i wytworzony naturalnie w wyniku złożonych procesów biologiczno-chemicznych).

Analizowany w dysertacji doktorskiej problem jest interesujący, istotny i aktualny. W ostatnich kilku dziesięcioleciach w Arktyce, a zwłaszcza na Svalbardzie, obserwuje się wysoki trend temperatury powierzchniowej, który jak się wydaje, w znacznej części związany jest ze zmiennością aerozolu atmosferycznego transportowanego do obszarów polarnych z rejonów uprzemysłowionych. Cennym jest także posiadanie informacji o lokalnych własnościach aerozolu ze względu na ubogą bazę danych dot. własności aerozoli w rejonach polarnych. W rozprawie nie ograniczono się do przedstawienia wyników dla rejonu Ny-Alesund, ale otrzymane rezultaty są szeroko dyskutowane i przedstawione na tle wcześniejszych badań dot. struktury i zmienności aerozolu w innych obszarach Arktyki.

2. Treść Doktoratu

Dysertacja wraz ze spisem treści, streszczeniem, dodatkiem, listą skrótów i terminów fizycznych oraz spisem literatury liczy łącznie 234 strony. Praca napisana jest w języku angielskim.

Tezy doktoratu przedstawiono w ośmiu rozdziałach, z których ostatni stanowi podsumowanie. W pierwszym rozdziale, mającym charakter wprowadzający, omówiono podstawowe mechanizmy wpływu aerozolu na klimat i specyfikę długookresowych zmienności aerozolu w Arktyce wynikającą z obecności aerozolu transportowanego (w wysokich warstwach atmosfery zwłaszcza w sezonie zimowo-wiosennym) z odległych obszarów w średnich szerokościach geograficznych. Ponadto przedstawiono naukowe hipotezy, których weryfikacja jest nadrzędnym celem przedstawionej dysertacji, a także przedstawiono organizację rozprawy.

W kolejnym rozdziale szczegółowo omówiono wagę badań własności aerozolu w aspekcie zmian klimatu w Arktyce i ich wpływu na wzmocnienie ocieplania się tego rejonu w tempie 2-3 razy większym niż w innych obszarach globu. Przedstawiono poszczególne typy aerozolu obecne w atmosferze arktycznej i ich sezonową zmienność ze szczególnym omówieniem mechanizmów różnicujących wiosenną i letnią strukturę aerozolu. Podkreślono wagę badań własności absorpcji promieniowania krótkofalowego przez niektóre typy aerozolu i

higroskopijnego wzrostu cząstek aerozolu istotnie zmieniającego ekstynkcje promieniowania krótkofalowego. W ostatnim fragmencie rozdziału omówiono obecny stan wiedzy dotyczący długo okresowych zmian (od lat 80-tych XX wieku) w transporcie antropogenicznego aerozolu z niższych szerokości geograficznych do Arktyki i lokalnym składzie aerozolu i jego własnościach optycznych.

Rozdział trzeci prezentuje miejsca obserwacyjne w rejonie Ny-Alesundu, skąd pochodzą dane wykorzystane w dysertacji oraz charakterystykę instrumentów pomiarowych tam działających. Szczegółowo omówiono zakres prac w ramach kampanii pomiarowych iAREA (2014-2016) i iVespa (2017), których organizatorem był Instytut Geofizyki UW. Kampanie dostarczyły oryginalnych danych dot. parametrów optycznych i mikrofizycznych aerozolu w sezonach wiosennych 2014-2017, które stanowią podstawowy materiał obserwacyjny w znacznej mierze decydujący o nowatorskim charakterze dysertacji. Dużo miejsca poświęcono ocenie niepewności pomiarów aerozolu z zastosowaniem: fotometru słonecznego SP1a, nephelometru TSI 3563, aethalometrów A-31 i AE-51, liczników cząstek HandiLaz i OPC-N2, oraz mierników wielkości cząstek TSI 3321, TSI 3034 i DMPS. Ostatni podrozdział rozdziału trzeciego zawiera ogólne informacje o dostępnych danych z modeli reanaliz danych aerozolowych (NAAPS, MERRA-2) i meteorologicznych (Era 5). Do lokalizacji odległych źródeł aerozolu zastosowano powszechnie wykorzystywany w tym celu model Hysplit rozwijany przez NOAA.

Począwszy od rozdziału 4 zostają przedstawione oryginalne wyniki dysertacji. Porównanie wyników pomiarów grubości optycznej dla 550 nm wykonywanych w ramach globalnej sieci AERONET dla ośmiu stacji w Arktyce i z instrumentu SPI1a (Ny-Alesund) z odpowiadającymi modelowanymi wartościami z reanaliz MERRA-2 i NAAPS wskazują, że można użyć danych z reanaliz interpolowanych do rejonu Ny-Alesundu dla wyznaczenia długookresowej zmienności grubości optycznej i przebiegów rocznych (wieloletnich średnich miesięcznych dla okresu 2005-2015). Stosując dane z reanaliz dyskutowano także udział poszczególnych frakcji aerozolowych w grubości optycznej wieloskładnikowej mieszaniny aerozolu. Zgodnie z oczekiwaniami największe grubości optyczne (~ 0.1) pojawiły się w sezonie zimowo-wiosennym, przy znacznym udziale aerozolu soli morskiej, siarczanowego i biogenicznego. Wyznaczone liniowe trendy w grubości optycznej w latach 2005-2015 na podstawie danych NAAPS okazały się być ujemne (na granicy istotności statystycznej) w sezonie wiosennym i dodatnie (istotnie statystycznie) w sezonie letnim. Letni trend w całkowitym aerozolu niemal całkowicie był wynikiem trendu w aerozolu dymowym. Dodatkowo stwierdzono zmniejszenie

(na wiosnę) i zwiększenie (latem) częstotliwości występowania znacznie podwyższonych wartości grubości optycznej w stosunku do wieloletniej normy. Wieloletnie pomiary in situ pozwoliły stwierdzić zwiększoną częstotliwość występowanie aerozolu absorbującego w marcu i kwietniu, co korespondowało ze zwiększeniem ilości małych cząstek (o rozmiarze od 50 nm do 500nm, czyli w tzw. modzie akumulacyjnym). Wyznaczono malejący trend (na granicy istotności statystycznej) współczynnika absorpcji (dla fali 550 nm) w sezonie wiosennym w latach 2005-2015 i brak takiego trendu w sezonie letnim.

W kolejnym rozdziale przedstawiono wyniki pomiarów własności optycznych i mikrofizycznych aerozolu wykonywanych w trakcie wiosennych kampanii iAREA z lat 2014-2017 prowadzonych w Ny-Alesund. Statystyczna analiza dotyczyła wspólnego okresu pomiarowego (7 kwietnia - 3 maja) dla wszystkich lat kampanii pomiarowej. Warunki meteorologiczne i parametry aerozolu wartości okazały się być typowe dla stacji arktycznych znajdujących się w pobliżu otwartego oceanu. Następnie podzielono dane na klasy ze względu na dominujące kierunki wiatru w tym rejonie, co jednak nie doprowadziło do zróżnicowania mierzonych parametrów aerozolowych. Podobnie analizując wsteczne trajektorie uzyskane z symulacji modelem HYSPLIT nie stwierdzono, że kierunek wiatru przyziemnego determinuje napływ powietrza z określonego sektora w wysokich warstwach atmosfery poza Arktyką. Podział danych ze względu na prędkość wiatru (powyżej i poniżej 5ms^{-1}) wskazuje, że dla większych prędkości wiatru przy napływie z kierunku pobliskiego fiordu obserwowane są większe współczynniki ekstynkcji przy mniejszym współczynniku absorpcji i dodatkowo mniejszym współczynniku Angstroma, co jest sygnałem adwekcji aerozolu soli morskiej. W dalszej części tego rozdziału dyskutowane są związki między zmierzonymi parametrami optycznymi i mikrofizycznymi aerozolu. Stwierdzono między innymi brak korelacji między grubością optyczną aerozolu (jest to wielkością reprezentatywną dla całej kolumny atmosfery), a współczynnikiem ekstynkcji mierzonym przy powierzchni ziemi. Brak korelacji między parametrami aerozolu reprezentatywnymi dla całej kolumny i wartościami przypowierzchniowymi sugeruje, że warstwa przyziemna jest silnie odseparowana od wyższych warstw atmosfery. Takiej zależności nie obserwuje się poza Arktyką. Następnie analizowano związki między intensywnymi i ekstensywnymi parametrami aerozolu w przypowierzchniowej warstwie atmosfery. Nieliczne kombinacje par parametrów wskazują na istniejące silne liniowe związki np. wzrost współczynnika ekstynkcji wraz ze wzrostem współczynnika absorpcji (Rys.5.4a), zmniejszenia współczynnika pojedynczego rozpraszania

wraz ze wzrostem współczynnika Angstroma (Rys.5.4d), mniejszy współczynnik pojedynczego rozpraszania dla mniejszych cząstek.

W rozdziale szóstym, według recenzenta stanowiącym najoryginalniejszą część rozprawy, przedstawiono wyniki pionowych sondaży atmosfery w dolnej troposferze (do wysokości około 1,6 km) z zastosowaniem balonu na uwięzi. Uzyskano profile klasycznych elementów meteorologicznych (ciśnienia, wilgotności względnej, temperatury, prędkości wiatru i jego kierunku), a także współczynnika absorpcji dla fali 880 nm i ekwiwalentnej zawartości węgla w aerozolu i koncentracji aerozolu o rozmiarach od 0,38 mikrometra do 7,5 mikrometra. W sumie wykonano 192 sondaży (przeważnie w kwietniu) w ciągu trzech lat. Zebrane dane mają unikalny charakter i znacznie rozszerzają wiedzę o specyfice arktycznego aerozolu w dolnej troposferze. Wszystkie sondaże wskazywały na występowanie stabilnej warstwy granicznej nad Ny-Alesundem, co mogło by sugerować występowanie odizolowanych cienkich warstw aerozolowych ze specyficznymi własnościami, ale analizowane profile wskazują na niewielką pionową zmienność własności aerozolu. Nie zaobserwowano gwałtownego spadku koncentracji węgla w aerozolu ponad warstwą graniczną, co rejestrowano w innych obszarach poza Arktyką ani wyniesionych warstw ze zwiększoną koncentracją węgla w aerozolu, co by mogło świadczyć o transporcie aerozolu antropogenicznego z odległych obszarów źródłowych. Stwierdzono, że uzyskane profile pionowe współczynnika absorpcji można podzielić na trzy klasy na podstawie wartości pionowego gradientu tej wielkości ponad warstwą graniczną. Wyróżniono następujące klasy: bez gradientu, z dodatnim lub ujemnym gradientem. Nikt wcześniej nie podał takiej zależności. Profile z dodatnim pionowym gradientem są związane z występowaniem tzw. mgły arktycznej będącej wynikiem transportu zanieczyszczonych mas powietrza z wybrzeży Europy, Azji i Kanady, o czym świadczyło nie tylko położenie startowe wstecznych trajektorii uzyskanych modelem HYSPLIT, ale i większe wartości grubości optycznej i duże wartości współczynnika Angstroma z pomiarów przy powierzchniowych w Ny-Alesund. Przypadki z brakiem pionowego gradientu odpowiadają sytuacji zalegania lokalnego powietrza lub adwekcji wymieszanego powietrza pochodzącego z czystych arktycznych rejonów.

W rozdziale 7 wyznaczono wartości wymuszania radiacyjnego dla krótkofalowego promieniowania (w zakresie 0,2-4 mikrometra) na dolnej (powierzchnia Ziemi) i górnej granicy atmosfery (~100km od powierzchni), które związane są z bezpośrednim efektem aerozolowym, czyli wpływem aerozolu na bilans radiacyjny Ziemi wyłącznie poprzez absorpcję i rozpraszanie promieniowania. Przeprowadzone numeryczne symulacje z użyciem modelu transferu

promieniowania słonecznego w atmosferze dla warunków bezchmurnych, stosując powszechnie używany pakiet MODTRAN. Obliczenia wymagały między innymi zadania profili pionowych i rozkładów spektralnych współczynników ekstynkcji, absorpcji i parametru asymetrii aerozolu, a także kolumnowych wartości takich jak grubość optyczna aerozolu i współczynnik Angstroma. Dane doświadczalne dot. własności aerozolu przy powierzchni gruntu, które uzyskano podczas kampanii pomiarowych iAREA, wykorzystano jako dane wejściowe do modelu MODTRAN. Podstawowe dane wejściowe modelu wzięto z reanaliz MERRA-2 i obejmują one przede wszystkim pionowy rozkład masowego stosunku zmieszania aerozolu i rozkład wielkości cząstek aerozolu dla różnych frakcji aerozolowych. W obliczeniach uwzględniono higroskopijny wzrost rozmiaru cząstek aerozolu, który zależy od wilgotności względnej i typu aerozolu (największy wzrost dla aerozolu soli morskiej i brak wzrostu dla aerozolu pyłowego) według Ziegeera i inni (2010). Zastosowano szereg upraszczających założeń np. przyjęto stałą w pionie wartość albedo pojedynczego rozpraszanie w suchych warunkach (tj. przy wilgotności względnej poniżej 40%) i arbitralnie zadano wartości albedo powierzchni. Rozważono dwa przypadki: śnieg z albedo około 0.7, co opowiadało sytuacji na lądzie w okolicach Ny-Alesundu w kwietniu i wolną od lodu wodę morską (pobliski fiord) ze znacznie mniejszymi wartościami albedo. Biorąc pod uwagę uproszczenia w wejściowych danych do modelu, oceniono niepewność szacowań wymuszania radiacyjnego na 20% i 51 %, odpowiednio przy powierzchni gruntu i na szczycie atmosfery. Przedyskutowano zależność wymuszania radiacyjnego i odpowiadającego wymuszania radiacyjnego na jednostkę grubości optycznej (dla 550 nm) od typu mieszaniny aerozolowej i stwierdzono między innymi, stałość tej drugiej wielkości nad śniegiem i coraz bardziej ujemne wartości przy zmniejszającej się frakcji aerozolu soli morskiej i wzrastającej frakcji absorpcyjnego aerozolu. Uzyskano wyniki ważne z punktu widzenia obserwowanych i przewidywanych zmian klimatycznych w tym rejonie. Stosując wyznaczone w tym rozdziale wartości wymuszania radiacyjnego na jednostkę grubości optycznej aerozolu i długookresowe zmiany grubości optycznej aerozolu na podstawie danych z reanalizy MERRA-2 (ujemny trend w latach 1980-2019) i NAAPS (ujemny trend w latach 2005-2015) oszacowano wzrost wymuszania radiacyjnego na szczycie atmosfery w kwietniu o $+0.9 \text{ W/m}^2$ nad śniegiem i $+5.5 \text{ W/m}^2$ nad oceanem w ostatnich 40 latach, co związane było z mniejszym schładzaniem powierzchni ziemi przez aerozol w ostatnich latach. W latach 2005-2015 ta tendencja nie zmieniła się i zmniejszenie grubości optycznej aerozolu prowadziło w tym okresie do wzrostu wymuszania radiacyjnego na szczycie atmosfery o $+0.4 \text{ W/m}^2$ i $+2.2 \text{ W/m}^2$, odpowiednio nad śniegiem i oceanem. Przewidywane uwolnienie Arktyki od lodu w sytuacji wydajnego

chłodzenia atmosfery przez aerozole soli morskiej nad wolnymi od lodu i śniegu powierzchniami może mieć istotny wpływ na globalne zmiany klimatu.

Należy podkreślić dobrą organizację rozprawy, jasność sformułowań i przejrzyste graficzne przedstawienie złożonych związków między optycznymi i mikrofizycznymi parametrami aerozolu atmosferycznego. Na początku dysertacji sformułowano hipotezy naukowe wyznaczające podstawowe kierunki rozważań w kolejnych rozdziałach pracy, a następnie konsekwentnie dążono do ich weryfikacji. Zebrany materiał doświadczalny był wynikiem szeroko zakrojonej międzynarodowej współpracy. Do autora dysertacji należała jednak ostateczna obróbka „surowych” danych, włączenie ich do symulacji numerycznych z zastosowaniem modelu transferu promieniowania MODTRAN oraz interpretacja wyników. Na każdym etapie analizy danych szeroko dyskutowano zakres niepewności estymowanych parametrów i porównywano uzyskane wyniki z rezultatami wcześniejszych prac. W przypadku zaistniałych rozbieżności starano się (jak to było np. w przypadku pionowego profilu współczynnika absorpcji i braku korelacji między współczynnikiem rozpraszania z pomiarów przy powierzchniowych i kolumnową grubością optyczną) wyjaśnić przyczyny pojawienia się nieoczekiwanych własności parametrów aerozolu w atmosferze nad Ny-Alesundem. Znacznym osiągnięciem naukowym jest stwierdzenie istotnego wpływu aerozolu soli morskiej nad obszarami z małym albedo na bilans radiacyjny Ziemi i jego rola w zmianach klimatu w sytuacji zmniejszenia zalodzenia Arktyki. Dotychczas zwracano głównie uwagę na obecność w atmosferze absorbującego antropogenicznego aerozolu transportowanego z zanieczyszczonych obszarów Europy i Azji, który nad powierzchniami o dużym albedo powodował grzanie górnej granicy atmosfery. Efekt ten jest nieznaczny w przypadku aerozolu antropogenicznego pojawiającego się nad Ny-Alesundem i przyszłe badania powinny być skierowane na głębsze poznanie procesów generacji aerozolu morskiego i własności rozpraszających tego aerozolu w Arktyce.

3. Uwagi krytyczne i zagadnienia wymagające uzupełnienia lub wyjaśnienia

W rozdziale 4.1 stwierdzono, że reanaliza NAAPS odtwarza całkowitą (bez podziału na frakcje) grubość optyczną aerozolu. Takie stwierdzenie nie dotyczy jednak poszczególnych frakcji aerozolowych. W tej sytuacji rozkłady sezonowe frakcji aerozolowych (Rys.4.3.b-e; odpowiednio dla aerozolu siarczanowego, dymowego, pyłowego i soli morskiej) należy traktować z dużą ostrożnością.

Nie jest jasne w jaki sposób wyznaczono błąd oszacowania wartości trendu. Czy analizowano własności rozkładu odchylek od linii prostej? Na przykład, w sytuacji, gdy istnieje autokorelacja wartości rocznych zmniejsza się liczba stopni swobody i tym samym zwiększa się zakres niepewności szacowania trendu.

Widoczne jest znaczne zróżnicowanie w wartościach odchyleń standardowych od średniej rocznej w poszczególnych latach (np. Rys 4.9.a, lata 2005 i 2006 w porównaniu z 2013 i 2014), co wymagało by zastosowania regresji z zastosowaniem wag dla poszczególnych lat i prawdopodobnie wartości trendu i jego błędu uległyby zmianie.

Zwykle w analizach statystycznych przyjmuje się próg 5% dla istotności statystycznej, natomiast w rozprawie zastosowano próg 10%, powołując się na pracę Quinn et al. (2007). Recenzentowi wydaje się, że w tym przypadku, czyli dla krótkiej serii czasowej (w rozprawie jest to 11 lat), należy mówić o trendzie, jeśli poziom krytyczny jest ustalony co najwyżej na 5%, a nawet na 1%. Istotą trendu jest jego niezmiennosc w ciągu następnych kilku lat, czyli jego stabilność, tak że dodanie wyników w następnych kilku latach zasadniczo nie zmienia kierunku trendu. Dlaczego nie zastosowano dłuższych okresów z reanaliz? Wtedy zmienność wieloletnia byłaby lepiej opisana i okres 2005-2015 mieściłby się wewnątrz serii danych.

W rozdziale 4 wielokrotnie stosuje się rozkład normalny (np. na Rys.4.5 i dla wyznaczenia progu dla wysokiego poziomu grubości optycznej), gdy tymczasem rozkład grubości aerozolu jest prawdopodobnie logarytmiczno-normalny. Łatwo to sprawdzić stosując klasyczne testy statystyczne. Przyjęcie innego rozkładu, prawdopodobnie zmieni wartości progowe dla oszacowania częstotliwości występowania wysokich wartości grubości optycznej aerozolu i w konsekwencji roczne częstotliwości przedstawione na Rys.4.7 i Rys. 4.8.

W porównaniach sezonowej zmienności (np. Rys. 4.4) należało by zastosować testy statystyczne do sprawdzenia czy różnice sezonowe są istotne statystycznie np. dla albedo pojedynczego rozpraszania (Rys. 4.4.f). Także rozkłady zimowy i wiosenny gęstości prawdopodobieństwa dla grubości optycznej wydają się być bardzo podobne i istotnie różne od letnio-jesiennego. Testy statystyczne istotności różnic pomiędzy średnimi należało by stosować nie tylko w tym rozdziale, ale każdorazowo, kiedy dyskutowana jest istotność różnic pomiędzy średnimi wartościami np. w rozdziale 5, kiedy omawiane są wyniki prezentowane na Rys.5.2 (patrz ostatnie zdanie na stronie 85).

Związki między intensywnymi i ekstensywnymi parametrami aerozolu w przypowierzchniowej warstwie atmosfery prezentowane na Rys.5.4, są dyskutowane „wizualnie” bez podania na ile

istotne są liniowe zależności sugerowane przez przebiegi na rysunkach. Znacząca monotoniczna zależność między zmiennymi powinna być potwierdzona testem statystycznym np. stosując współczynnik korelacji rang Spearmana. Niewłaściwa wydaje się dyskusja tendencji zmian zależności między parametrami aerozolu na podstawie tylko kilku ostatnich punktów obserwacyjnych przy dużej niepewności pomiaru np. brak zależności między współczynnikiem absorpcji i współczynnikiem rozpraszania dla dużych wartości współczynnika rozpraszania (3 ostatnie punkty na Rys5.4a). Takie stwierdzenia nie powinny pojawić się w podsumowaniu rozdziału (str.95).

Ze względu na szerokie zainteresowanie tzw. wzmocnieniem arktycznym interesujące może być oszacowanie, jak dyskutowane w dysertacji zmiany w strukturze aerozolu mogły wpłynąć na zmiany temperatury powierzchniowej i jaki jest ich udział w obserwowanym trendzie temperatury w Ny-Alesundzie?

W rozdziale siódmym stwierdzono wagę albedo powierzchni w wyznaczaniu wymuszania radiacyjnego dla różnych frakcji aerozolowych. Albedo jest arbitralnie zadane w symulacjach MODTRAN (np. dla śniegu przyjęto około 0.7), natomiast wydaje się, że w tekście nie podano odpowiedniej wartości dla oceanu? Czy wybrane wartości albedo są realistyczne? np. czy można przyjąć takie same wartości dla początku i końca kwietnia (starzenie śniegu?), kiedy zanika pokrywa śnieżna? Problem sezonowej zmienności albedo w okolicach Ny-Alesund powinien być chociaż skrótowo przedstawiony w dysertacji.

Wyszczególnione przez recenzenta uwagi krytyczne, nie mają wpływu na istotę formułowanych w dysertacji wniosków końcowych oraz na ostateczną wysoce pozytywną ocenę recenzowanej rozprawy.

4. Wniosek końcowy

Uważam, że oceniana rozprawa doktorska **spełnia wymogi ustawy o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym** (Dz.U. z 2003 r. nr 65, poz.595) z późniejszymi zmianami i **wnioskuje o dopuszczenie mgr Justyny Lisok do publicznej obrony rozprawy doktorskiej pt. „Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing over the European Arctic in the Light of Absorbing Particles”**

