

dr hab. Anita Lewandowska prof.UG
Zakład Chemii Morza i Ochrony Środowiska Morskiego
Instytut Oceanografii
Uniwersytet Gdański
Al. Marszałka Piłsudskiego 46
81-378 Gdynia

Gdynia, 31.10.2019

DZIEKANAT WYDZIAŁU FIZYKI
WPŁYNĘŁO

2019 -11- 07 *MB*

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr Justyny Lisok „Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing over the European Arctic in the Light of Absorbing Particles”
w związku z toczącym się postępowaniem o nadanie stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne

Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr Justyny Lisok zatytułowana: „Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing over the European Arctic in the Light of Absorbing Particles” przygotowana w Instytucie Geofizyki, na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem prof. Krzysztofa M. Markowicza oraz w Instytucie Oceanologii Polskiej Akademii Nauk w Sopocie pod kierunkiem prof. Tymona Zielińskiego.

Podstawa wykonania recenzji

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Justyny Lisok została wykonana na podstawie pisma (WF-531-88/2019) z dnia 5 września 2019 roku przesłanego przez Dziekana Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, prof. dr hab. Dariusza Wasika oraz dostarczonego egzemplarza pracy.

Uwagi wstępne

Globalne ocieplenie jest rezultatem zaburzenia bilansu energetycznego Ziemi. Zaburzenie to wymaga zewnętrznych wymuszeń, których rolę mogą pełnić gazy cieplarniane i aerozole. Spośród gazów najważniejsze są dwutlenek węgla i metan. W konsekwencji wzrostu ich emisji do atmosfery, datowanej od początku epoki przemysłowej, średnia temperatura powierzchni Ziemi wzrosła już o ponad 1°C. Oprócz gazów cieplarnianych na klimat znacząco wpływa obecność aerozoli atmosferycznych. Ich bezpośredni wpływ polega na odbijaniu, rozpraszaniu i absorbowaniu promieniowania słonecznego w atmosferze. Aerozole oddziałują na klimat także pośrednio, poprzez ich wpływ na chmury. Dla współczesnej fizyki atmosfery największym wyzwaniem wydają się być aerozole o właściwościach absorbujących, które w skomplikowany sposób oddziałują na system klimatyczny.

W Arktyce wzrost temperatury jest 2-3 krotnie wyższy w stosunku do średniej światowej. Zjawisko to nazwano wzmocnieniem arktycznym i zostało ono w ostatnich latach dość dobrze rozpoznane przez współczesną naukę. Aerozole nad Arktyką, podobnie jak w innych rejonach globu ziemskiego wpływają na klimat bezpośrednio poprzez absorpcję, rozpraszanie i odbijanie promieniowania słonecznego. Jakkolwiek przez większą część roku przyczyniają się one do zatrzymania ciepła wypromieniowywanego przez powierzchnię Ziemi. Tylko przez trzy letnie miesiące aerozole obecne w atmosferze nad Arktyką prowadzą do zmniejszenia ilości promieniowania dochodzącego do powierzchni i w konsekwencji do jej ochłodzenia. Na wiosnę efekty mniej więcej się równoważą. Wówczas najważniejszym zjawiskiem jest obniżanie albedo powierzchni pod wpływem osadzania się aerozoli bogatych w sadzę. Mają one właściwości absorbujące, co przyspiesza topnienie śniegu i lodu. Nanoszone są one z niższych szerokości geograficznych, w których powietrze jest bardziej zanieczyszczone w związku z węglą, siarką czy azotem. W Arktyce w składzie aerozolu dominują sól morską i związki organiczne emitowane z powierzchni morza na skutek pękania pęcherzyków powietrza. Poza tym występują w nim siarczany będące produktem utleniania dimetylosiarczku mającego również morskie pochodzenie oraz pyły mineralne. Najbardziej efektywnym źródłem zanieczyszczeń antropogenicznych dla Arktyki w okresie wiosennym jest Europa oraz w mniejszym stopniu Ameryka Północna. W okresie letnim ważnym źródłem aerozoli bogatych w sadzę nad Arktyką mogą być pożary

lasów i terenów trawiastych oraz wypalanie użytków rolnych w Europie, Ameryce Północnej i Azji. Okresowo nad Arktykę mogą być nanoszone masy powietrza wzbogacane w pyły wulkaniczne czy pył pustylny. Lokalne źródła wprowadzają do atmosfery arktycznej kilkadziesiąt razy mniej zanieczyszczeń w postaci tlenków węgla, azotu czy siarki będących prekursorami aerozoli.

Ilość pomiarów, w szczególności rozkładu pionowego cząstek absorbujących jest w literaturze światowej znikoma. Bez wiedzy na ten temat precyzyjne określenie roli aerozoli w wymuszeniach radiacyjnych wydaje się niemożliwe. Biorąc powyższe pod uwagę przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska wpisuje się w najnowsze trendy badawcze na temat znaczenia aerozoli dla zachodzących zmian klimatu. Tematyka jest tym bardziej aktualna, że dotyczy Arktyki. W rejonie tym wzmocniony wpływ zmian klimatu w porównaniu ze średnią globalną prowadzi do poważniejszych konsekwencji środowiskowych niż gdziekolwiek indziej na świecie. Naukowcom do tej pory udało się ustalić, że wzmocnienie arktyczne ma wpływ na przykład na atmosferyczny i oceaniczny transport ciepła do Arktyki, zachmurzenie, zawartość pary wodnej w atmosferze, proces topnienia wiecznej zmarzliny, wiosenną pokrywę śnieżną oraz na stopień pokrycia morza lodem czy jego grubość. Zważywszy, że Arktyka odgrywa kluczowe znaczenie dla cyrkulacji na Ziemi, bilansu energii, a tym samym dla globalnego klimatu koniecznym wydaje się zrozumienie procesów zachodzących w tym rejonie z udziałem aerozoli oraz rozpoznanie ich roli we wzmacnianiu bądź łagodzeniu skutków globalnego ocieplenia.

Merytoryczna ocena rozprawy doktorskiej i dorobku doktorantki

Recenzowana praca została napisana w języku angielskim. Liczy ona 234 strony i ma klasyczny układ. Na pracę składa się 14 tablic, 53 rysunki oraz 4 załączniki, w których zawarte zostały starannie zebrane informacje dodatkowe. Znalazły się między nimi lista symboli i skrótów, które bardzo ułatwiły czytanie rozprawy doktorskiej. Przydatny okazał się także słowniczek, w którym zestawiono najważniejsze definicje i formuły opisujące wybrane zmienne zastosowane w pracy, jak również załącznik z dodatkowymi rysunkami stanowiącymi uzupełnienie do opisywanych w rozprawie zagadnień. W pracy wykorzystano imponującą ilość pozycji literatury (357), poza pojedynczymi przypadkami, anglojęzycznej. Dobór źródeł odpowiada tematowi dysertacji i jest bardzo aktualny jeśli chodzi o stan wiedzy naukowej dotyczącej tematyki poruszanej w rozprawie. Publikacje zostały, poza nielicznymi przypadkami, poprawnie zacytowane. Jedyńm mankamentem jest brak unifikacji w cytowaniu literatury w tekście. Zazwyczaj stosuje się zapis chronologiczny albo alfabetyczny. W niniejszym opracowaniu nie zastosowano żadnego z nich. Na pozytywną uwagę zasługuje natomiast forma prezentacji rysunków zamieszczonych w pracy. Są one wykonane niezwykle starannie oraz poprawnie pod względem statystycznym. Zastrzeżeń nie budzi także zakres i forma przedstawienia tablic. Doktorantka w pracy posługuje się poprawnym językiem polskim, a błędy stylistyczne i interpunkcyjne są nieliczne. Ponadto cała praca prezentuje się w sposób bardzo estetyczny pod względem edytorskim. Zdarzają się drobne uchybienia i sformułowania, np. *particle matter* zamiast *particulate matter* czy *adwekcja* aerozoli zamiast *adwekcja mas powietrza nanoszących aerozole*, ale są one nieliczne i nie wpływają na ogólnie bardzo pozytywny odbiór pracy.

Rozprawa doktorska Pani mgr Justyny Lisok rozpoczyna się zwięzłym abstraktem w języku angielskim, streszczeniem w języku polskim oraz podziękowaniami. Następnie w Przedmowie Pani mgr Lisok omówiła swój wkład w rezultaty uzyskane w rozprawie doktorskiej. Na uwagę zasługuje fakt, że Doktorantka brała czynny udział w trzech kampaniach pomiarowych (lata 2014, 2016 i 2017) oraz w tworzeniu ich koncepcji badawczej. Prowadziła pomiary własności optycznych aerozolu z wykorzystaniem aparatury *in-situ* zawieszanej pod balonem na uwięzi, jak również przyrządów zdalnych. W roku 2017 Pani magister była odpowiedzialna za pozyskiwanie funduszy, zorganizowanie kampanii i jej przeprowadzanie wykazując się niniejszym dobrym warsztatem tak naukowym, jak i organizacyjnym. W ramach powstawania niniejszej rozprawy doktorskiej Doktorantka była także odpowiedzialna między innymi za opracowywanie i wdrażanie nowych algorytmów dotyczących parametrów wejściowych do symulacji transferu radiacyjnego oraz za przeprowadzanie rzeczywistych symulacji transferu radiacyjnego. Ponadto w każdej z kampanii badawczych Pani mgr Lisok odpowiedzialna była za walidację wyników uzyskanych z pomiarów aetalometrami, nefelometrami i optycznymi licznikami cząstek. Wskazuje to na powierzanie jej odpowiedzialnych zadań i zaufanie zespołu badawczego. Wyniki pozyskane w pracy pochodzą między innymi z pomiarów prowadzonych w ramach międzynarodowego projektu Polsko-Norweskiego pt. "Impact of absorbing

aerosols on radiative forcing in the European Arctic". Doktorantka tym samym wykazała umiejętność współpracy w grupie oraz w środowisku międzynarodowym.

Rozprawa doktorska składa się z ośmiu rozdziałów i licznych podrozdziałów. W **pierwszym rozdziale** Doktorantka umiejętnie wprowadziła czytelnika w problematykę roli aerozoli w zmianach klimatu oraz uzasadniła celowość podjętych badań w ramach pracy doktorskiej. Zwróciła także uwagę na problem niedostatecznej wiedzy na temat właściwości aerozoli absorpcyjnych w rejonie Arktyki. Pani mgr Justyna Lisok jako cel rozprawy doktorskiej postawiła sobie charakterystykę właściwości optycznych, mikro-fizycznych i radiacyjnych aerozoli nanoszonych z masami powietrza znad średnich szerokości geograficznych w rejonie Europejskiej części Arktyki w okresie wiosny i lata. Aby zrealizować powyższy cel Doktorantka wyznaczyła liczne zadania badawcze, które konsekwentnie realizowała na etapie prowadzenia pomiarów, analizy statystycznej uzyskanych wyników i ich dyskusji. Podczas badań Pani mgr Justyna Lisok swoją uwagę skupiła na długookresowych zmianach (czasowych i w rozkładzie pionowym) w.w. właściwości aerozoli oraz na zachodzących między nimi zależnościach.

W rozprawie doktorskiej Pani mgr Justyna Lisok postawiła trzy **hipotezy**. W pierwszej z nich założyła, że w erze zmian klimatu w Europejskiej Arktyce występują statystycznie istotne trendy w zakresie właściwości optycznych aerozoli. Na wiosnę, ze względu na ograniczenie emisji zanieczyszczeń w średnich szerokościach geograficznych, zwłaszcza w Ameryce Północnej i w Europie, pochłanianie promieniowania przez cząstki przyjmuje trend negatywny. Z kolei latem według założenia Doktorantki trend ten jest dodatni na skutek napływu nad Arktykę mas powietrza zanieczyszczonych aerozolami pochodzącymi ze spalania biomasy. Ich źródło także znajduje się w średnich szerokościach geograficznych i najczęściej związane jest intensywnymi pożarami. W drugiej hipotezie Pani mgr Lisok założyła, że w arktycznej troposferze długookresowe pomiary profili współczynnika absorpcji odgrywają kluczową rolę dla charakterystyki własności aerozoli. Trzecia hipoteza miała na celu udowodnienie, że obecność w atmosferze Europejskiej części Arktyki silnie higroskopijnych cząstek soli morskiej oddziałuje negatywnie na wymuszenia radiacyjne wywołane przez aerozole absorbujące promieniowanie słoneczne. W rzeczywistości Doktorantce chodziło o ustalenie, jaki wpływ na transfer promieniowania w atmosferze mają inne składniki aerozoli, współistniejące ze związkami odpowiedzialnymi za absorpcje promieniowania. Wymienienie w hipotezie tylko soli morskiej stanowi pewne niedopatrzenie. Ważną rolę w atmosferze nadmorskiej, także regionów polarnych pełnią węgiel organiczny oraz siarczany powstałe w konsekwencji utleniania dimetylosiarczku. Mimo niepełnego ujęcia hipotezy rola w.w. związków w łagodzeniu zjawiska ocieplenia klimatu wywołanego absorpcją promieniowania przez aerozole została omówiona w sposób kompleksowy w kolejnych rozdziałach rozprawy doktorskiej.

Weryfikując hipotezy badawcze Pani mgr Lisok postawiła sobie szereg celów i zadań, które konsekwentnie realizowała w trakcie przygotowywania rozprawy doktorskiej. Dzięki temu udało jej się poprawić stan wiedzy na temat międzyrocznej i długookresowej zmienności właściwości aerozolu w europejskiej Arktyce. Aby powiązać poszczególne rodzaje aerozoli z odnotowywanymi w średnich szerokościach geograficznych trendami zmian w wielkości i rodzaju emisji zanieczyszczeń, Doktorantka swoje badania zaplanowała w dominującej części na okres wiosny i lata. Celem weryfikacji swoich hipotez ustaliła także systematyczne zależności między właściwościami optycznymi i radiacyjnymi aerozoli oraz warunkami termodynamicznymi panującymi wiosną przy powierzchni Ziemi i w pionowej kolumnie atmosfery. Ponadto, za cel postawiła sobie zdiagnozowanie wpływu aerozoli na równowagę radiacyjną systemu klimatycznego w warunkach panujących wiosną nad Arktyką.

Rozdział drugi rozprawy doktorskiej opisuje obecny stan wiedzy na temat aerozoli w Arktyce. Na podstawie zebranej literatury Doktorantka stworzyła ważne kompendium wiedzy, obejmujące między innymi rolę aerozoli w budżecie radiacyjnym Ziemi i polarnym systemie klimatycznym, omówiła źródła pochodzenia aerozoli arktycznych zależnie od sezonu, jak również zwróciła uwagę na właściwości tych typów aerozoli, które odgrywają najważniejszą rolę w regionie Arktyki. Przybliżyła także problem arktycznego wzmocnienia oraz procesów determinujących zmienność właściwości optycznych i mikrofizycznych aerozoli. Ważnym elementem tej części pracy jest charakterystyka właściwości aerozoli absorpcyjnych, zwłaszcza w odniesieniu do sezonu wiosennego. Ustosunkowując się do tej części pracy należy podkreślić, że jest to rozdział napisany w sposób zwięzły, jak również kompletny pod względem merytorycznym. W tym miejscu proszę jednak Doktorantkę o wyjaśnienie, które z naturalnych procesów prowadzą do obecności węgla organicznego w aerozolach atmosferycznych w rejonie Arktyki? Doktorantka w pracy słusznie wskazała na pierwotne i wtórne pochodzenie tego związku, jakkolwiek nie musi być ono tylko efektem emisji antropogenicznej, wynikającej ze spalania paliw kopalnych czy biomasy. Cytując

słowa Pani mgr Justyny Lisok, w rejonie badań źródło to odpowiada zaledwie za 14-48% emisji OC do atmosfery. Rozumiem, że w hipotezie skupiła się ona na wpływie emisji ze spalania biomasy latem w średnich szerokościach geograficznych na właściwości aerozolu nad Arktyką. Jakkolwiek trzecia hipoteza postawiona przez Panią mgr Justynę Lisok miała na celu zweryfikowanie wpływu na transfer promieniowania w atmosferze innych składników aerozoli, w tym OC, współistniejących ze związkami odpowiedzialnymi za absorpcję promieniowania. Czy zatem właściwości węgla organicznego pochodzącego ze źródeł naturalnych będą inne niż tego, który pochodzi ze źródeł antropogenicznych? Drobnym mankamentem odnotowanym w rozdziale drugim jest także brak unifikacji w zapisie ilości cyfr po przecinku, np. w odniesieniu do grubości warstwy optycznej, wymuszania radiacyjnego itp. Podsumowując drugi rozdział dysertacji pragnę zauważyć, że dogłębna analiza dostępnej literatury pozwoliła Doktorantce wykazać zasadność planowanych badań i sformułowanych hipotez badawczych oraz celu pracy.

Trzeci rozdział dysertacji, zatytułowany *Metodyka badań*, poświęcono tradycyjnie dla tego typu rozpraw charakterystyce stacji pomiarowych i okresów badawczych, zastosowanej aparaturze badawczej, wykorzystanym bazom danych oraz modelom matematycznym. Bardzo dobrym pomysłem okazało się zebranie wykorzystanej aparatury badawczej w formie tablicy (Tab. 3.3), w której scharakteryzowano nie tylko mierzone przez daną aparaturę właściwości aerozoli, ale także jej przynależność do danej instytucji naukowej i okresy wykorzystania w badaniach. Kampanie pomiarowe i dobór lokalizacji stacji zostały zaplanowane w sposób logiczny i uzasadniony dla tego typu badań. Niniejsza rozprawa doktorska miała na celu przede wszystkim charakterystykę właściwości optycznych, mikro-fizycznych oraz radiacyjnych aerozoli atmosferycznych w Europejskiej części Arktyki w okresie wiosennym i letnim. Dlatego badania prowadzono podczas 4 kampanii terenowych w ramach projektu iAREA w latach 2014 - 2017 na stacji Ny-Alesund w Svalbard. Dodatkowo w latach 2015-2017 zebrano zestaw profili pionowych właściwości absorpcyjnych aerozoli, ich rozkładu wielkości i towarzyszących warunków meteorologicznych. Tak zaplanowane badania pozwoliły Doktorantce zebrać unikatowy zestaw danych naziemnych oraz ponad 190 profili pionowych atmosfery. Dane uzupełniono o wyniki z pomiarów in situ jakości powietrza prowadzonych w ramach monitoringu w rejonie Arktyki oraz o wyniki re-analizy globalnych modeli atmosferycznego transportu zanieczyszczeń. Lokalizacja wszystkich stacji, z których pozyskano dane do walidacji przedstawiona została na Rys. 3.1. Rozważania teoretyczne, mające na celu ustalenie wpływu optycznych i mikrofizycznych właściwości mieszaniny aerozolu na lokalny bilans radiacyjny, Pani mgr Justyna Lisok przeprowadziła w formie symulacji z wykorzystaniem modelu transferu radiacyjnego. Jako dane wejściowe do tego modelu wykorzystane zostały dane właściwości optycznych i fizycznych aerozolu, a także dane meteorologiczne pozyskane z re-analizy danych NAAPS, MERRA2 oraz Era 5. Opis zastosowanych modeli jest jasny i wyczerpujący. Ustosunkowując się do części metodycznej pragnę podkreślić, że autorka właściwie opisała zastosowane procedury, a warsztat analityczny nie budzi większych zastrzeżeń recenzenta. Aparatura wykorzystana w pracy była wysokiej klasy. Na uwagę zasługuje szczegółowy opis błędów i niepewności pomiarów wykorzystywanych urządzeń. W tym miejscu mam tylko pytanie o zastosowane w pracy aethalometry, które charakteryzowały się innymi długościami fal w pomiarach współczynnika absorpcji. Inne były także czasy uśredniania wyników, a przepływ był dziesięciokrotnie większy dla aethalometru AE31 w porównaniu z AE51. Czy właściwym jest zatem bezpośrednie porównanie wyników uzyskanych z tych urządzeń? Czy wystarczyło oszacowanie niepewności pomiaru obydwoma urządzeniami? Podobnie w odniesieniu do liczników cząstek wykorzystywanych w pracy, czy zastosowanie różnej aparatury było poprzedzone interkalibracjami i analizą błędów uzyskanych wyników? Nie rozumiem także, jak można szacować błąd nephelometru na podstawie literatury z roku 1996-proszę o wytłumaczenie? Kolejne pytanie dotyczy kalibracji urządzeń. W przypadku fotometru słonecznego wskazano, że jest on kalibrowany co roku. Czy pozostałe urządzenia wykorzystane w badaniach także przechodziły taką procedurę? Prawdopodobnie powyższe pytania wynikają z podejścia chemika do badań atmosfery, który każdorazowo przed analizą musi oszacować błąd pomiaru w laboratorium wykonującym daną analizę. Dodatkowo, moim zdaniem, literatura przedmiotu może być tylko wskazówką dla badacza i tylko w sytuacjach, gdy odnosi się ona do stosowanych aktualnie w laboratorium urządzeń czy metody.

W rozdziale czwartym omówione zostały sezonowe zmiany optycznych i mikrofizycznych właściwości aerozolu i trendy ich zmian w dekadzie 2005-2015. Wyniki uzyskano na podstawie profili pionowych atmosfery, badań przy powierzchni ziemi oraz z re-analizy danych z globalnych modeli transportu zanieczyszczeń. Ważnym elementem tej części pracy jest porównanie dwóch najbardziej wyróżniających się pod względem dokładności w

regionie arktycznym modeli NAAPS i MERRA z pomiarami z fotometrów słonecznych, prowadzonymi w Ny-Alesund oraz na innych stacjach z regionu Arktyki. Do porównania wybrano te ze stacji, na których ilość dostępnych wyników pomiarów fotometrów słonecznych była największa w omawianej dekadzie. Na podstawie uzyskanych rezultatów Pani mgr Justyna Lisok stwierdziła dobrą zgodność zarówno modelu NAAPS, jak i MERRA z pomiarami fotometrem słonecznym. Zdaniem Doktorantki zapewniają one jednorodną bazę danych i są przydatne do badań czasowych trendów zmian właściwości optycznych aerozolu w rejonach polarnych. Rozdział czwarty dysertacji to przede wszystkim jednak bardzo kompleksowa analiza wielu parametrów, która pozwoliła na ustalenie bardzo zbliżonych zmienności sezonowych i weryfikację pierwszej hipotezy zawartej w pracy. Doktorantka skupiła się na roli soli morskiej, siarczanów, dymu i pyłów dla zmienności właściwości optycznych i mikrofizycznych aerozoli zwłaszcza w okresie wiosny i lata. Na wiosnę wzmacnianie właściwości optycznych aerozolu związane było z obecnością cząstek w modzie akumulacji, które mają niewielki lub umiarkowany udział w absorpcji promieniowania. W tym czasie wyraźnie zaznaczała się rola dymu, pyłów i siarczanów nanoszonych z masami powietrza znad rejonów odległych. Nie bez znaczenia, zwłaszcza wczesną wiosną, było zjawisko Arktycznej Mgły. Źródło pochodzenia zanieczyszczeń w aerozolu nad Arktyką w okresie wiosennym powiązane z procesami spalania i pożarami, zwłaszcza w krajach byłego Związku Radzieckiego oraz z napływem pyłów pustynnych znad Centralnej Azji. W tym miejscu mam pytanie o rolę siarczanów będących konsekwencją emisji DMS z powierzchni morza? Czy możliwym jest oszacowanie ich udziału/roli we wzroście koncentracji aerozoli na wiosnę w rejonie badań? W okresie letnim Doktorantka wykazała, że źródło pochodzenia aerozoli nad Europejską częścią Arktyki było konsekwencją nanoszenia znad lasów borealnych Północnej Ameryki mas powietrza zanieczyszczonych związkami pochodzącymi z pożarów. Dywagacje te zostały wcześniej potwierdzone doniesieniami literatury światowej, nigdy jednak nie były tak kompleksowo potraktowane jak w niniejszej pracy. Doktorantka zwróciła także uwagę, że latem wartości uzyskane dla właściwości optycznych aerozolu były na granicy wykrywalności urządzeń. Mogło to być związane ze wzmocnionymi procesami oczyszczania atmosfery sprzyjającymi usuwaniu większych cząstek (w modzie akumulacji), które mają znacznie większy wpływ na rozpraszanie światła w widmie widzialnym w porównaniu z aerozolami o mniejszych rozmiarach, odpowiedzialnych raczej za właściwości absorpcyjne.

Za znaczące osiągnięcie Doktorantki, zaprezentowane w tej części pracy uważam ustalenie na podstawie przeprowadzonych przez nią analiz oraz dokonanego przeglądu literatury, że występowanie epizodów wysokiej koncentracji aerozolu w ciągu ostatnich 2 dekad zmalało dwukrotnie na wiosnę, podczas gdy latem kilkakrotnie wzrosło (z około 5% w latach 90-tych XX wieku do nawet 44% w latach 2005–2015). Potwierdza to postawioną w pracy hipotezę o ujemnym trendzie aerozolowej grubości optycznej wiosną na skutek redukcji emisji siarczanów do atmosfery w średnich szerokościach geograficznych. Doniesienia literaturowe wskazują także na zachodzące zmiany cyrkulacji atmosferycznej i w konsekwencji zmiany w ścieżkach napływu zanieczyszczeń. Uzyskany przez Doktorantkę dodatni trend aerozolowej grubości optycznej w okresie letnim odnosi się tylko do danych uśrednionych w kolumnie pionowej i wynika z obecności aerozoli pochodzących ze spalania biomasy w średnich szerokościach geograficznych. Badania Doktorantki nie potwierdziły takiego trendu przy powierzchni ziemi. Może to wynikać z pionowej zmienności koncentracji dymu, który zwykle występuje w wolnej troposferze i jest rzadki w planetarnej warstwie granicznej (PBL).

Piąty rozdział dysertacji został poświęcony charakterystyce właściwości optycznych i mikrofizycznych aerozolu w warstwie przyziemnej podczas wiosennych kampanii prowadzonych w Ny-Alesund w ramach projektu iAREA w latach 2014-2017. Doktorantka skupiła się na przeglądzie średnich wartości wyżej wymienionych właściwości w okresie wiosny i ustaliła, że są one porównywalne z europejskimi stacjami na dużych wysokościach. Ny-Alesund wykazywało znaczne podobieństwa do stacji w Wysokiej Arktyce, które są umiarkowanie odizolowane od antropogenicznych źródeł zanieczyszczeń. W rozdziale tym Doktorantka wykazała związek między właściwościami optycznymi aerozoli i panującymi warunkami meteorologicznymi. Ustaliła, że północno-zachodnia adwekcja odpowiedzialna była za nanoszenie aerozoli zarówno o właściwościach rozpraszania, jak i absorpcji promieniowania. Jakkolwiek wpływ większych cząstek, bardziej wydajnych w rozpraszaniu światła okazał się większy, gdy siła wiatru wzrastała powyżej 5 m/s. Z kolei większy udział aerozoli absorbujących w mieszaninie cząstek stwierdzono w warunkach słabego wiatru, o sile poniżej 5 m/s. Zmierzone właściwości optyczne aerozolu były również przedmiotem szczegółowych badań Doktorantki nad ich wzajemną zależnością w odniesieniu do zmiennych intensywnych i ekstensywnych. Na podstawie średnich intensywnych właściwości aerozolu Pani mgr

Justyna Lisok ustaliła, że wiosną rządzą raczej niewielkie cząstki, o średnim wpływie na absorpcję promieniowania. Intensywne właściwości aerozolu były zbliżone do właściwości aerozolu mierzonych na innych stacjach arktycznych umiarkowanie odizolowanych od źródeł zanieczyszczeń. Jednocześnie ustalono, że optyczne właściwości aerozolu przy powierzchni ziemi i zdefiniowane w pionowej kolumnie atmosfery były ze sobą słabo skorelowane. Wynika to prawdopodobnie ze skomplikowanej struktury pionowej warstw aerozolu w rejonie Arktyki (słabe mieszanie pionowe oraz stabilność atmosfery). Poza zagadnieniami opisanymi powyżej w piątym rozdziale dysertacji na uwagę zasługuje fakt bardzo szczegółowej analizy zakłóceń, tj. rola pyłów wulkanicznych, braki w danych, późniejsze rozpoczęcie czy zakończenie pomiarów itp., które mogłyby mieć wpływ na wielkość błędów otrzymanych wyników oraz rozbieżności względem danych literaturowych. Podejście Doktorantki świadczy o dużej staranności w obróbce statystycznej wyników i zwiększa ich wartość.

W rozdziale szóstym Doktorantka omówiła zmienność pionową właściwości optycznych aerozolu i warunków meteorologicznych w dolnej troposferze podczas kampanii wiosennych prowadzonych w Ny-Alesund w ramach projektu iAREA w latach 2015 - 2017. Pani mgr Justyna Lisok wykorzystwała w tym celu 192 profile wykonane z wykorzystaniem balonów na uwięzi. Uzyskane na ich podstawie wyniki poprawiły ogólny stan wiedzy w odniesieniu do właściwości aerozoli uśrednionych w pionowej kolumnie atmosfery w okresie wiosennym. Doktorantka wykazała, że w rejonie Arktyki wraz z wysokością nie odnotowuje się znacznej redukcji parametrów ekstensywnych, co wynika z braku silnych zanieczyszczeń w atmosferze rejonów polarnych. Brak różnic odnosił się tak do właściwości aerozoli, jak prędkości wiatru i wilgotności względnej powietrza. Takie rezultaty są odmienne od charakterystycznych dla średnich szerokości geograficznych. Na ich podstawie można założyć, że w wysokich szerokościach geograficznych aerozole są obecne głównie na skutek transportu dalekiego zasięgu. Tylko wiosną i zimą, podczas dni z umiarkowanymi i wysokimi prędkościami wiatru na właściwości optyczne aerozoli dodatkowy wpływ wywierała lokalna emisja, zwłaszcza soli morskiej.

Siódmy rozdział dysertacji dotyczył wpływu mieszaniny aerozolu i jej właściwości, mierzonych podczas wiosennych kampanii w ramach projektu iAREA (2014–2016) na budżet radiacyjny systemu klimatycznego. Dyskusja w niniejszym rozdziale obejmuje badania modelowe, w których jako dane wejściowe wykorzystywane były najważniejsze optyczne i mikrofizyczne właściwości aerozoli. Rola Doktorantki polegała na weryfikacji poprawności wyników uzyskanych z modelu względem pomiarów radiometrycznych oraz oszacowaniu niepewności pomiaru wymuszeń radiacyjnych wynikających z błędów wybranych parametrów wejściowych. Najważniejsze osiągnięcia niniejszego rozdziału pracy są wynikiem prowadzonych przez Doktorantkę symulacji wymuszeń radiacyjnych. Na ich podstawie Pani mgr Justyna Lisok ustaliła istnienie znaczących różnic między wymuszeniami radiacyjnymi dla terenów pokrytych śniegiem oraz wolnych od lodu akwenów wodnych. Nad śniegiem wymuszenie radiacyjne było na poziomie $-1,4 \text{ W/m}^2$, podczas gdy nad akwenem wyniosło aż -9 W/m^2 . Na uwagę zasługuje stwierdzenie, że w rejonach polarnych nad jasną powierzchnią ziemi wymuszenia radiacyjne przyjmują wartości ujemne. Doktorantka tłumaczy je niską efektywnością cząstek do pochłaniania promieniowania. Jednocześnie na podstawie wieloletnich wyników obejmujących okres od 1980 do 2018 roku ustalono, że zmiany wymuszeń radiacyjnych górnej granicy atmosfery nad terenem pokrytym śniegiem przyjmują wartość $+0,9 \text{ W/m}^2$, a nad obszarami wodnymi aż $+5,5 \text{ W/m}^2$. W tej części pracy niezwykle ważne jest stwierdzenie, że ogrzewanie klimatu w rejonie Arktyki wywołane jest zmniejszaniem się ujemnego wymuszenia radiacyjnego aerozolu w okresie wiosennym na skutek ujemnego trendu grubości optycznej aerozolu w tej części globu ziemskiego.

Praca kończy się **Podsumowaniem (rozdział 8)**, w którym Doktorantka stwierdziła, że wyniki analiz wykazały w warstwie granicznej atmosfery oraz powyżej niej małą zmienność pionową współczynnika absorpcji oraz całkowitej koncentracji aerozolu. Może to sugerować niewielki wpływ lokalnych źródeł emisji zanieczyszczeń w czasie prowadzonych badań. Aerozole w Arktyce pochodzą przede wszystkim ze średnich szerokości geograficznych, a ich transport odbywa się głównie w wolnej troposferze. Na uwagę zasługuje stwierdzenie, że w ostatnich 10 latach zmieniła się wydajność źródeł aerozolu oraz podstawowe korytarze ich transportu. Zdaniem doktorantki to konsekwencja zachodzących zmian klimatu, modyfikacji w cyrkulacji atmosferycznej, ale także przeobrażeń ekonomicznych. Wnioski te wynikają z przeprowadzonej przez mgr Justynę Lisok analizy czasowej zmienności optycznych parametrów ekstensywnych aerozolu. Doktorantka wskazała na istotny statystycznie ujemny trend aerozolowej grubości optycznej wiosną ($-0,02 \pm 0,01$ na dekadę) oraz dodatni trend latem ($0,02 \pm 0,01$ na dekadę). Przeprowadzone przez Doktorantkę podczas kampanii iAREA teoretyczne rozważania nad wpływem

aerozolu na transfer promieniowania w Arktyce wykazały, że badana w tym czasie mieszanina cząstek ma negatywny efekt na lokalną równowagę bilansu radiacyjnego atmosfery. Za ważne osiągnięcie Doktorantki uważam ustalenie, że wymuszenie radiacyjne na górnej granicy atmosfery nad obszarami pokrytymi śniegiem było prawie sześciokrotnie mniejsze niż nad powierzchnią oceanu wolną od lodu. Ujemne wartości wymuszeń radiacyjnych wynikały z faktu, że podczas transportu nad obszary polarne aerozole podlegały procesom starzenia. W efekcie prowadziło to do znaczącego zmniejszenia zdolności mieszaniny aerozoli do absorpcji promieniowania słonecznego.

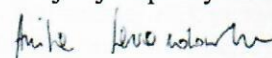
Na koniec proszę Doktorantkę o wyjaśnienie, które spośród jej osiągnięć uważa za ona najważniejsze dla badań nad własnościami optycznymi i mikrofizycznymi w rejonach polarnych? Czy badania te mogą mieć potwierdzenie także w rejonie Antarktydy?

Ocena pozostałego dorobku naukowego doktorantki

Pani mgr Justyna Lisok jest współautorką 11 publikacji o zasięgu międzynarodowym, z listy WoS. Pierwszym autorem jest w 2 pracach, cytowanych łącznie 13 razy. Wszystkie publikacje, w których Pani mgr Lisok jest współautorką do końca października 2019 roku były cytowane 72 razy. Stanowi to imponującą liczbę, zważywszy, że praca doktorska ma charakter klasyczny. Indeks Hirscha Pani mgr Justyny Lisok ustaliłam na 5, co również nie odbiega od średniej krajowej dla prac doktorskich realizowanych w takim trybie.

Wniosek końcowy

Problematyka przedstawiona przez Panią mgr Justynę Lisok jest niezwykle istotna, aktualna i atrakcyjna dla naukowców na całym świecie. Po zapoznaniu się z dysertacją stwierdzam, że Doktorantka wykazała się dużą ogólną wiedzą teoretyczną w opisywanym temacie oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Program badawczy został przez Doktorantkę zaplanowany poprawnie i logicznie, a jego realizację należy uznać za staranną i kompleksową. Przeprowadzony przez nią zakres badań jest znaczący, a uzyskane wyniki poddano wnikliwej interpretacji. Metody badawcze zostały dobrze dobrane i umożliwiły zrealizowanie zamierzonego celu pracy. W rezultacie badań, prowadzonych w latach 2014-2017 w europejskiej części Arktyki podczas 4 wiosennych eksperymentów naukowych, pozyskano imponujące dane na temat pionowej oraz czasowej zmienności własności optycznych i mikro-fizycznych aerozolu atmosferycznego. Wzbogacenie danych o informacje pochodzące z re-analiz globalnych modeli transportu zanieczyszczeń, uzupełnienie ich o wyniki ze stacji monitoringu jakości powietrza oraz przeprowadzenie teoretycznych badań nad własnościami fizycznymi mieszaniny aerozolu na lokalny bilans radiacyjny można uznać za kluczowe i uzupełniające dla dotychczasowych badań nad zmianami klimatu obszarów polarnych. Doktorantka zrealizowała założony cel pracy i zweryfikowała postawione w niej hipotezy. Wskazane powyżej argumenty świadczą o dojrzałości naukowej Pani mgr Justyny Lisok oraz o jej dobrym warsztacie badawczym. W związku z powyższym uznaję, że przedstawiona do oceny rozprawa doktorska pt. „Aerosol Optical Properties and Radiative Forcing over the European Arctic in the Light of Absorbing Particles” spełnia wymogi formalne i merytoryczne stawiane przez Ustawę z dnia 14 marca 2003 r. „O stopniach i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki” (Dz. U. nr 65 z 2003 r, poz. 595) z późniejszymi zmianami (Dz. U. Nr 164, poz. 1365 z 27 lipca 2005 oraz Dz. U. Nr 253, poz. 2125 z 27 lipca 2005 r, Dz. U. 2011 nr 84 poz. 455 z 21 kwietnia 2011, Dz.U. 2017 nr 0, poz. 859) i przedkładam wniosek Wysockiej Radzie Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego o dopuszczenie Pani mgr Justyny Lisok do publicznej obrony. Jednocześnie wnioskuję o wyróżnienie przedstawionej do oceny rozprawy doktorskiej. Moim zdaniem wnosi ona istotne elementy nowości naukowej w dziedzinie badań aerozolowych w rejonach polarnych, bazuje na bardzo bogatej bazie danych zarówno in situ, jak i pochodzącej z re-analizy najważniejszych modeli wykorzystywanych dla rejonów Arktyki pozwalających na określenie międzyrocznych trendów zmian właściwości optycznych i mikrofizycznych aerozoli. Rezultaty pracy doktorskiej po opublikowaniu przez doktorantkę w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym posłużą w przyszłości innym naukowcom, co wskazuje na użyteczny charakter niniejszej rozprawy doktorskiej.



dr hab. Anita Lewandowska prof. UG