

Sopot, 14 czerwca 2018 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 inż. Magdaleny Kossakowskiej
pt.: „Modelowanie wpływu emisji z transportu lotniczego
na procesy dynamiczne w górnej troposferze i dolnej stratosferze”

Największą niewiadomą klimatyczną, rodzajem wymuszenia z efektami klimatycznymi o największych niepewnościach jest jak wiadomo aerozol antropogeniczny. Lotnictwo cywilne jest jednym z jego źródeł, emitującym aerozol od powierzchni Ziemi aż do niższej stratosfery. Jednak aerozol nie jest jedynym zanieczyszczeniem produkowanym przez transport lotniczy. Razem z cząstkami sadzy, silniki odrzutowe emitują parę wodną, dwutlenek węgla i tlenki azotu. Każda z tych substancji wpływa inaczej na atmosferę, a w dodatku oddziałują one ze sobą w skomplikowany sposób, między innymi przez generowanie chmur podobnych do cirrusów, które nazywamy smugami kondensacyjnymi. W wyniku tego określenie sumarycznego wpływu wszystkich tych procesów na klimat jest niezwykle trudne.

Praca doktorska mgr inż Magdaleny Kossakowskiej próbuje dokonać tej trudnej sztuki posługując się wynikami modelu cyrkulacji atmosferycznej, zawierającego procesy dynamiczne, chemiczne i radiacyjne. Jest to moim zdaniem zadanie ambitne i nowatorskie.

Praca zawierająca w swej właściwej części (bez streszczeń spisów rysunków i tabel oraz bibliografii) 113 stron, podzielona jest na sześć rozdziałów. Dwa z nich to „Wprowadzenie” oraz „Podsumowanie i wnioski”. Pozostałe cztery dzielą się na trzy teoretyczne i jeden przedstawiający wyniki modelowania. Jest to zatem klasyczny schemat doktoratu ale z krótszą niż zwykle częścią opisującą wyniki (zaledwie 38 stron) natomiast z dość rozbudowaną częścią teoretyczną (rozdziały

2-4 to łącznie 62 strony). Części te będą omówione kolejno. W tym miejscu wspomnę jednak, że praca napisana jest bardzo dobrym językiem, ułatwiającym jej percepcję. Błędy są nieliczne (wspomnę tylko dwa: „Fourira” ze str 23 i „wacha” ze str. 56). Jedynie w końcowej części pracy wkraść się najwyraźniej pośpiech powodujący wiele literówek, czasem tak łatwych do zauważenia, że dziwi mnie ich przeoczenie.

Praca rozpoczyna się od krótkiego Wprowadzenia, w którym zawarto cel, hipotezę badawczą i zakres badań. Nie mam do tej części pracy większych uwag, oprócz tego, że według specjalistów od zanieczyszczeń z jakimi pracuję zanieczyszczenie jest z definicji antropogeniczne, zatem „antropogeniczne zanieczyszczenie” to redundancja.

Następny rozdział definiuje i opisuje „UTLS” czyli obszar pograniczny między troposferą i stratosferą. Po podaniu historycznych definicji termicznych (pierwotnie tropopauzę definiowano jako minimum temperatury) oraz opisanie zjawiska wielokrotnych tropopauz, autorka przechodzi do opisanie definicji dynamicznych, opartych o wartości wirowości potencjalnej oraz definicje „chemiczne” oparte o zmiany zawartości składników śladowych atmosfery oraz przedstawia metody obserwacji położenia tej strefy (nie wiem tylko czemu przed opisaniem jej definicji chemicznych). Zgadzam się z tezą, iż do celów badań opisanych w pracy doktorskiej, definicje dynamiczne i chemiczne spełniają swoją rolę lepiej niż termiczne. Rozdział ten jest ogólnie dobrze napisany i zawiera wszystkie istotne informacje, opierając się o współczesną, bogato cytowaną literaturę przedmiotu. Zawiera on jednak drobne nieścisłości, z których najważniejsze wymienię:

- Carl-Gustaw Rossby, szwedzki uczony pracujący w USA wprowadził wielkość, którą nazwał wirowością potencjalną w innym artykule niż podano w pracy, nie z 1936, a z 1940 roku („*Planetary flow patterns in the atmosphere*”). Cytowana praca dotyczy oceanu i nie ma w niej wzorów opisujących tą atmosferyczną wielkość. Natomiast Ertel w swoim artykule z 1942 roku wprowadził inną wielkość, wspominając jedynie mimochodem, że jest podobna do badanej przez Rossby’ego. Obecnie używamy wzoru Ertela określając go nazwą jaką Rossby wprowadził dla czego innego. Wynika to wprost z błędu terminologicznego jaki popełnił Charney w swojej pracy z 1948 roku. Historia tego parametru opisana jest pięknie w pracy Thorpe i Volkert, 1997, *Potential vorticity: a short history of its definitions and uses*, Meteorol. Zeitschrift, 6, 275-280.
- Cienka warstwa silnej inwersji nad UTLS (nie jedynie inwersji bo stratosfera w całości jest przecież inwersją!) występuje nie tylko w średnich szerokościach. Nieporozumienie może wynikać z oparcia się o pracę Gettelman i inni 2011, która jest artykułem przeglądowym na

temat UTLS średnich szerokości. Jednak Rys. 5 w tej pracy wyraźnie pokazuje, że podobna inwersja występuje też w tropikach.

- Podana w pracy lista zjawisk powodujących wymianę mas powietrza między troposferą, a stratosferą nie zawiera np. silnych erupcji wulkanicznych.
- Rysunek 2.5 nie przedstawia korelacji. Nieporozumienie wynika z użycia w cytowanym artykule słowa *correlation* w sensie „wzajemnej relacji”, co po angielsku jest nieco przestarzałym znaczeniem tego słowa, a po polsku, dla słowa „korelacja”, po prostu błędnym
- Kategorieczne stwierdzenie (str. 30), że „aerozole mają ujemne wymuszenie radiacyjne” jest prawdziwe na poziomie powierzchni, ale nie w słupie atmosfery, gdzie aerozole absorbujące promieniowanie krótkofalowe ogrzewają otaczającą atmosferę. Proces ten zresztą wpływa na przedstawione w pracy wyniki.

Kolejny (trzeci) rozdział opisuje stan wiedzy na temat wpływu transportu lotniczego na UTLS. Rozdział ten jest dość kompletnym przeglądem wszystkich licznych procesów, za pomocą których lotnictwo wpływa na wymuszenie radiacyjne i zmiany chemiczne w omawianym rejonie atmosfery. Zauważam w opisie pewne uproszczenia (np. „smugi kondensacyjne [...] ze względu na swoją niską temperaturę zatrzymują długofalowe promieniowanie cieplne Ziemi”) ale nie miejsce w tym rozdziale na wykładanie szczegółowo jak i dlaczego wymuszenie radiacyjne zależy od temperatury chmury i od jej grubości optycznej więc akceptuję pewne uproszczenia narracji. Nawiasem mówiąc w tym rozdziale cząstki sadzy grzeją atmosferę (str. 56), w przeciwieństwie do poprzedniego. Oba stwierdzenia są prawdziwe ale trzeba sprecyzować na jakich wysokościach. Są też tu pewne omyłki w cytowaniu literatury. Np. ważna praca Markowicz i Witek (2011) cytowana w tym rozdziale nie znajduje się w spisie literatury. Największym jednak problemem jaki dostrzegłem jest cytowanie wartości wymuszeń bez podania ich niepewności, a nawet tam gdzie zakres ufności jest podany nie jest wytłumaczone o jakiej ufności mowa (np. cytowany zakres całkowitego wymuszenia radiacyjnego spowodowanego przez transport lotniczy, 38 do 139 mWm^{-2} jest przedziałem ufności 90% co ma istotne znaczenie).

Część teoretyczna zakończona jest czwartym rozdziałem pracy opisującym metodykę, a głównie stosowany model cyrkulacji. Nie mam do niego większych zastrzeżeń, z wyjątkiem może drobnych, terminologicznych (podskalowe czy podkrokowe? - oba te terminy, moim zdaniem równoznaczne używane są w pracy).

Piąty rozdział, „Analiza wyników” jest odpowiednikiem „Results” w artykułach naukowych. Innymi słowy to tu opisane są wyniki uzyskane w pracy doktorskiej. Wypada zatem skupić się na nim nieco bardziej szczegółowo. Rozdział zaczyna się od porównania wartości stosunków zmieszania pary wodnej i ozonu w profilu pionowym dla wyników modelu puszczonego z zanieczyszczeniami „lotniczymi” i bez nich, dla średnich oraz wysokich szerokości geograficznych. Wyniki porównania opisane są w tekście jako „dobre” ale wymaga to komentarza. Różnice pomiędzy wynikami modelu „z” i „bez” zanieczyszczeń lotniczych są o rząd mniejsze niż między nimi, a pomiarami tych samych składników atmosfery wykonanymi zdalnie. Przydało by się zaznaczenie na wykresach poziomów modelu, a przede wszystkim niepewności wartości pomiarowych (każda wielkość mierzona ma jak wiadomo niepewność). Pozwoliło by to na oszacowanie na ile różnice wartości obserwowanych i modelowanych wynikają z braków modelu. A modele tego typu braki mają zawsze: postęp w modelowaniu to dodawanie nowych procesów i poprawianie parametryzacji już istniejących i jesteśmy daleko od zakończenia tej drogi. Nie znając niepewności pomiarowej, skłonny jestem podejrzewać, że różnice w wartościach i wysokościach gdzie występują minima dla pary wodnej i maksima dla ozonu są skutkiem uproszczeń modelu względem rzeczywistej atmosfery. Muszę tu bardzo wyraźnie powiedzieć, że nie jest to krytyką podejścia modelowego. Modele jakie są takie są, ale jest to najlepsze, a właściwie jedyne narzędzie dla zrozumienia skomplikowanych procesów fizyko-chemicznych w atmosferze. Wszystko co wiemy o procesach chemicznych w stratosferze od czasów Paula J. Crutzena który wprowadził modele do tej dziedziny i otrzymał za to Nagrodę Nobla, jest rezultatem stosowania modeli bo nie ma innego sposobu sprawdzenia łącznego efektu cyrkulacji atmosfery, procesów radiacyjnych i długiej listy reakcji chemicznych wpływających na siebie nawzajem. Podsumowując, zgadzam się z oceną że model dobrze reprezentuje rzeczywistość (znając ograniczenia tego typu modeli) jednak oznacza to, że wyniki przedstawione w dalszej części rozdziału także należy przyjmować z pewną dozą ostrożności.

W dalszej części Rozdziału 5 przedstawiono wyniki modelowania dla szeregu obszarów naszej planety z intensywnym ruchem lotniczym, dla każdej pory roku w dwóch latach: 2006 i 2050. W tabelach 5.2 do 5.11 przedstawiono wyniki porównania wyników modelu z oraz bez efektu transportu lotniczego dla ozonu, HO_x, NO_x, BrO_x i ClO_x. Dane przedstawiono w dość nowatorski sposób, nie jako średnie i ewentualnie odchylenia standardowe, ale jako wartości minimalne i maksymalne. Nie jest wyraźnie napisane w pracy po jakim zbiorze jest to minimum i maksimum (czy jest to zbiór wartości na oczkach siatki modelu w poziomie, pionie czy w obu tych kierunkach), ale po dodatkowych konsultacjach z Doktorantką wiem już, że chodzi o minimalne i

maksymalne uśrednione wartości dla warstw modelu nad danym regionem i taką interpretację przyjmuję oceniając ten rozdział. Wartości skrajne różnic między dwoma realizacjami modelu, podane w tabelach w olbrzymiej ilości przypadków wyników dla każdego rejonu, pory roku i związku sięgają od wartości ujemnych do dodatnich. Czyli jeśli dla rejonu Ameryki Północnej w sezonie zimowym (DJF) w obszarze UTLS różnice w stosunku zmieszania ozonu pomiędzy scenariuszami klimatu bieżącego wahały się w zakresie od -8% do 4% to oznacza, że były tam wysokości, gdzie lotnictwo cywilne spowodowało wzrost stężenia ozonu i inne gdzie spowodowały spadek. Jest to pewną miarą zmienności ale odchylenie standardowe spełnia tę rolę nawet lepiej. A przede wszystkim w tabelach brakuje średniej, która jest najważniejszym wynikiem jeśli chcemy stwierdzić sumaryczny efekt lotnictwa dla ozonu zimą np. w dolnej stratosferze nad Ameryką Północną. Należałoby ją podać nawet jeśli, jak można sądzić, jest w wielu przypadkach bliska zeru. W dodatku tak częste przedziały obejmujące zero świadczą o tym, że „szum” (niepewność statystyczna) może tu być większy od „sygnału”. W przypadku fizyki atmosfery szum to pogoda, a jego długotrwała średnia to klimat (współcześnie używa się też terminu „klimatologia”). Użycie jedynie jednego roku dla oceny odpowiednio współczesnych i przyszłych efektów lotnictwa cywilnego uważam za wadę pracy, gdyż nie jest to okres wystarczający aby pozbyć się efektów „pogody” (czyli w rejonie UTLS zmienności fal planetarnych przejawiających się na powierzchni jako wyży i niży). Moje podejrzenie w tej kwestii wydaje się potwierdzać Rys 5.7 (z następnego podrozdziału), przedstawiający różnice procentowe w stosunku zmieszania pary wodnej w strefowych przekrojach przez atmosferę. Widać, że największe różnice występują w dolnej i średniej troposferze, gdzie lotnictwo ma mały wpływ na ilość pary wodnej, natomiast pogoda (proporcja liczby wyżów i niżów w krótkim badanym okresie 3 miesięcy) ma wpływ olbrzymi. Moje wątpliwości rozwiałoby podanie niepewności i istotności statystycznej wyników. Niestety w pracy tego nie ma i liczba wystąpienia słowa niepewność w mojej recenzji (większa niż w recenzowanej pracy) nie jest przypadkowa, bo uważam ten aspekt za piętę achillesową recenzowanej pracy. Reasumując, wyniki podrozdziału 5.2 są ciekawe ale trudno stwierdzić czy jest to wynik bardziej sygnału czy szumu wobec bardzo krótkiego czasu uśredniania i braku analizy niepewności wyników.

Ostatni podrozdział przedstawia wyniki badań „wpływu emisji z transportu lotniczego na procesy dynamiczne” przez co autorka rozumie efekt na pola temperatur, prędkości wiatru oraz ilości pary wodnej. W tym wypadku prezentacja podoba mi się bardziej bo otrzymujemy wykresy przekrojów przez atmosferę średnich różnic między oboma modelami dla danego parametru (z wyjątkiem prędkości wiatru, a szkoda bo to ciekawy wynik!). I tu jednak nie ma analizy istotności

statystycznej wyniku. Mimo to wyniki uważam za ciekawe, szczególnie ocieplenie rejonu UTLS i zmiany wiatrów strefowych (tym bardziej boli brak ilustracji tego wyniku).

Pracę kończy podsumowanie, zawierające również plany przyszłych badań Autorki. W sumie zmierzają one w tym samym kierunku co moje uwagi: planowana „analiza klimatologiczna” to przecież nic innego niż uzyskanie wyników z danych o długości w których pogoda (szum) przestanie mieć znaczenie. Jest to też dla mnie właściwy moment na ostateczne wnioski recenzji, a mianowicie wady i zalety pracy.

Podstawową wadą pracy jest moim zdaniem zbyt mały materiał badawczy (długość okresu modelowania, względnie liczba realizacji dla wybranego okresu). Spowodowało to niekorzystny stosunek „szumu” meteorologicznego do poszukiwanego sygnału i zapewne przyczyniło się to do szukania pomysłu na „innovacyjny” sposób prezentacji części wyników oraz być może przyczyniło się do niechęci Autorki do badania niepewności statystycznej uzyskanych wyników.

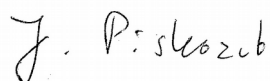
Zaletami pracy jest jednak poważenie się na jeden z najtrudniejszych zagadnień związanych z trwającą zmianą klimatu: skomplikowanym splotem procesów wywoływanych przez emisje związane z transportem lotniczym. Badania wykonano za pomocą najnowocześniejszego (i właściwie jedyne) narzędzia do badania tego typu zjawisk: atmosferycznego modelu cyrkulacji z wbudowanymi procesami radiacyjnymi i kinetyką chemiczną. Sposób przygotowania danych do modelowania i samo modelowanie uważam za przeprowadzone poprawnie i nie mam wątpliwości, że braki o jakich wcześniej pisałem, nie wynikają ze złej metodologii, a jedynie ze zbyt małej ilości obliczeń. Przyczyny dla których nie udało się zebrać więcej materiału Autorka zapewne przedstawi podczas obrony pracy. Recenzowana praca doktorska, pomimo pewnych niedociągnięć, spełnia zatem wymóg ustawy stanowiąc „oryginalne rozwiązanie problemu naukowego”. Trudny problem z samego pogranicza współczesnej nauki został zasadniczo rozwiązany, za pomocą modelu dającego realistyczne odwzorowanie badanych parametrów, który użyto do zbadania tytułowego problemu. Efekty tego pokazano w pracy na wynikach będących w pewnym sensie próbką tego co da się uzyskać przeprowadzając dłuższe kampanie obliczeniowe. Jednak to co przedstawiono w pracy samo w sobie jest nowością w skali światowej.

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 inż. Magdalenie Kossakowskiej dalszych sukcesów w prowadzonych badaniach i karierze zawodowej.

Z poważaniem

Handwritten signature in black ink, reading "J. Piskozub". The signature is written in a cursive style with a large initial "J".