

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

Sopot, 16 sierpnia 2019 r.

DZIEKANAT WYDZIAŁU FIZYKI
WPŁYNĘŁO

2019 -08- 21 *JP*

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr Michała T. Chilińskiego

pt.: „Zastosowanie dronów do profilowania aerozoli absorbujących w dolnej troposferze”

Zagadnienie będące tematem recenzowanego doktoratu, pomiary właściwości aerozolu przy pomocy bezzałogowych pojazdów latających, wkroczyło do literatury naukowej z hukiem w 2007 roku gdy grupa Ramanathana z Scripps Institution of Oceanography w La Jolla w Kaliforni opublikowała w Nature (oraz w kilku towarzyszących artykułach w innych czasopismach) wyniki kampanii pomiarów aerozolu absorbującego z kampanii MAC przeprowadzonej na Malewidiach w poprzednim roku. Narzędzie to pozwoliło na oszacowanie wpływu warstw tego aerozolu antropogenicznego na zmiany zachmurzenia w rejonie Oceanu Indyjskiego a także bezpośrednio na lodowce Himalajów. Nie oznacza to jednak, że wszystko w tym temacie zrobiono i należy się cieszyć, że w Polsce powstają prace w tej dynamicznie rozwijającej się tematyce, szczególnie że opisywane w dysertacji pomiary rozpoczęto zaledwie siedem lat po kampanii MAC. Ocena tego co zrobiono i jak to opisano jest właśnie celem niniejszej recenzji.

Recenzowana praca skonstruowana jest w sposób klasyczny, z podziałem na część teoretyczną i opis metodologii, wyniki połączone z dyskusją oraz podsumowanie, łącznie ponad 200 stron właściwego tekstu, jeśli pominąć spisy symboli, skrótów oraz bibliografię. Prawie połowę tekstu stanowią dwa rozdziały teoretyczne, natomiast reszta pracy opisuje uzyskane wyniki podzielone tematycznie na cztery kolejne rozdziały. Nie będę ich streszczał (doktorant robi to sam na obronie), jedynie wspominając o czym są aby móc przedstawić kolejno ich wady i zalety.

Pierwszy z rozdziałów teoretycznych przedstawia podstawowe informacje o metodologii sondowania atmosfery przy pomocy bezzałogowych platform latających (zwanych dalej dronami), ich podziału, praktycznych możliwości itd. Opis uważam za dobry, chociaż zabrakło mi w nim

wspomnienia (i zacytowania) pierwszych eksperymentów z udziałem dronów, czy jak je wówczas nazywano UAV (unmanned aerial vehicles), patrz Ramanathan i inni, 2007, Nature, Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption, doi:10.1038/nature06019, szczególnie że dotyczyły one również aerozolu absorbującego, a zostały wykonane przez zespół z Scripps Institution of Oceanography w La Jolla (Kalifornia), znany dobrze promotorowi pracy jak i mi (pierwszy raz spotkaliśmy się właśnie tam). Nawiasem mówiąc ten brak cytowania nie zmienia mojej bardzo pozytywnej oceny załączonej bibliografii, zawierającej to co potrzebne i nic więcej (w czasach elektronicznego wyszukiwania tekstów to też zaleta!). Na szczególną pochwałę zasługuje podawanie numerów DOI gdzie tylko było to możliwe. W XXI wieku jest to znacznie bardziej przydatne niż tradycyjne numery zeszytu i stron.

Drugi z rozdziałów teoretycznych opisuje metodologię. Jest on dłuższy (ponad 50 stron) jednak zawiera wyłącznie materiał potrzebny w dalszej części pracy co także należy zaliczyć doktorantowi na plus. Ogólnie jest on dobrze napisany, z pewnymi wyjątkami, które wymienię. Przede wszystkim dotyczą one analizy błędów. Oczywiście zamieszczenie takiej analizy jest dużym plusem. Jednak nie jest to proste, czego skutki widać. Przede wszystkim w podrozdziale jej poświęconym (3.5.2) nie zdefiniowano o jakiej niepewności mowa. Wspomniane są błędy systematyczne i statystyczne ale dla jakiego poziomu niepewności? Jest to istotne bo wiele z przedstawionych wzorów jest prawdziwa dla każdej niepewności, ale nie wszystkie. Nieco pomaga tu cytowana literatura. Np. Morille i inni stosują symbol sigma sugerując (choć też nie pisząc tego wprost), że są to odchylenie standardowe, czyli pierwiastek z wariancji. Dlatego w pracy tej kwadrat niepewności sygnału proporcjonalny jest do wartości sygnału (czyli zasadniczo wielkości próbki, mówić językiem statystycznym). Niestety w recenzowanej pracy zostało to źle przetłumaczone (?): „poziom szumu sygnału lidarowego jest odwrotnie proporcjonalny do natężenia promieniowania rozproszonego wstecznie na aerozolu”, co nie jest prawdą. Szum, w sensie wariancji, jest proporcjonalny do liczby fotonów jakie zmierzono, przez co błąd (inaczej niepewność) jest proporcjonalny do jej pierwiastka, a dopiero błąd względny (niepewność podzielona przez wartość) do odwrotności pierwiastka sygnału. Podobnie Δ_{sig} z wzoru (3.14) nie jest, jak podano, liczbą zliczonych fotonów, a jedynie jej kwadrat jest do niej proporcjonalny. Ogólnie użyte w tym podrozdziale wzory są prawdziwe (co dobrze wróży ich użyciu), ale ich opis już niekoniecznie. Do niepewności jeszcze (niestety) wrócimy przy opisie uzyskanych wyników.

Mniejszą wadą jest to, że SNR (stosunek sygnału do szumu) jest używany (od strony 78) przed podaniem jego (nieoczywistej) definicji na stronie 82. W dodatku nie jest jasne czy jej akceptowaną

wartością jest 1 (str. 78) czy 2 (st. 80).

Mam też uwagę do trzech metod rekonstrukcji sygnału lidarowego przedstawionych na rys. 3.7 i w tekście na str. 86, a dokładniej do metody „b”. Jest ona inna na rysunku, a inna w tekście. W wersji z tekstu przerzuca ona cały błąd metody (różnicę mierzonej bezpośrednio i wyliczonej z profilu lidarowego grubości optycznej) na obszar najbliższej ziemi! Nie jest to to samo co przedstawiona na rysunku interpolacja między wartością zmierzona na ziemi a najniższą lidarową. Szczerze mówiąc nie wiem jak zrobić to „elegantko” i ciekaw jestem jak naprawdę wyglądało to „skalowanie”.

Natomiast uważam, że pokazany na rys. 3.9 histogram różnic wartości AOD o wschodzie i zachodzie słońca za wynik ciekawy sam w sobie. Wskazuje on, że średnio są one praktycznie identyczne. Nie jest to oczywisty wynik (sądziłbym, że poza okresem grzewczym powinno być więcej aerozolu w dzień niż w nocy) i mam nadzieję, że będzie on jeszcze gdzieś opublikowany.

Druga połowa pracy to cztery rozdziały opisujące wyniki prac doktoranta, kolejno kampanie przy pomocy dronów płatowców i wirnikowców, analizę danych i ich porównanie z wynikami sondowań lidarowych i pomiarów grubości optycznej aerozolu oraz z modelem transferu radiacji w atmosferze. Od razu stwierdzę, że mgr. Chiliński udowodnił tu skuteczność dronów jako platformy pozwalającej uzyskać pionowe profile właściwości optycznych dolnej troposfery z dotychczas nieosiągalną precyzją. Szczególnie wszystkie porównania z sondowaniami lidarowymi pokazują jak bardzo zgrubne są ich wyniki: wartości ekstynkcji, a szczególnie absorpcji aerozolu. Nie będę tu wymieniał wszystkich osiągnięć autora, zostawiając to jemu samemu. Wyliczę jednak kwestie, które wymagające komentarza lub polemiki, zaczynając od spraw drobniejszych, w kolejności ich wystąpienia:

Na stronie 116 autor sugeruje iż podobne wartości koncentracji eBC w Świdrze i w Warszawie pomimo innych typów emisji oznaczają, że lokalne warunki meteorologiczne mają większy wpływ na wyniki niż struktura emisji. Skądinąd jednak wiadomo, że w ostatnich latach pomiary stężenia pyłu zawieszonego (PM₁₀ i PM_{2.5}) w miejscowościach podmiejskich często nawet przekraczają wartości z centrów miast. Czy zatem nie dałoby się tego wyjaśnić podobną wielkością emisji z opalania domów podmiejskich w okresie grzewczym i ruchu samochodowego w metropolii?

Na stronie 122 pada stwierdzenie, że obserwowany podczas jednej z kampanii „spadek wartości wykładnika Angstroma do poziomu ≈ 1.5 jest charakterystyczny dla aerozolu kontynentalnego”.

Stwierdzenie to poparte jest cytatem z pracy Toledano i inni (2012). Jak wiadomo im niższa wartość wykładnika Angstroma (AE), tym większe cząstki aerozolu. Nie bardzo pasowały mi te duże cząstki do aerozolu kontynentalnego, w którym dominują drobny pył i sadza (fine mode) i sprawdziłem cytowaną pracę, gdzie AE był wyższy dla aerozolu kontynentalnego niż morskiego, z tym że w przypadku Skandynawii, właśnie ten wyższy kontynentalny miał wartość $AE=1.5$, skąd zapewne to nieporozumienie.

Na stronie 140 przy porównaniu wyniku z kilku lidarów i celiometrów zamieniono słowa „najniższy” i „najwyższy”. Przy okazji stwierdzę, że właśnie to porównanie licznych przyrządów (choć to raczej zasługa promotora, który zorganizował tę kampanię) jest dodatkową wartością recenzowanej pracy. Pokazuje ono, np. na Rys. 5.3, jak duże niepewności nadal wiążą się pomiarami lidarowymi, a w szczególności (co dla mnie było zaskakujące), jak niewiarygodne są pomiary ekstynkcji przy pomocy lidarów ramanowskiego, biorąc pod uwagę, że w teorii powinien on mierzyć tę właśnie wielkość lepiej niż „klasyczne” lidary. Również porównanie wyników różnych stosowanych przez doktoranta metod uzyskania grubości optycznej absorpcji AAOD z Rys. 6.11, silnie sugerujące oglądającemu go słowo „porażka”, należy zaliczyć (paradoksalnie) do sukcesów pracy. Ten negatywny wynik pokazuje nam, jak wiele jest jeszcze do zrobienia w dziedzinie zdalnych pomiarów parametrów optycznych atmosfery.

Coś jest nie tak z Rys. 6.7, na którym (zarówno w wersji papierowej jak i dostarczonym mi pliku PDF) nie widać obiecanych w podpisie przedziałów ufności dla pomiarów naziemnych ani linii kropkowanych oznaczających wysokość warstwy granicznej z przedziałami ufności.

W tabeli 6.3 nie pokazano wartości korelacji w przypadkach gdy była ona nieistotna statystycznie. Wykorzystam tę okazję aby zaapelować gorąco o to aby (jak radzi najnowsza literatura) nie ukrywać nieistotnych statystycznie korelacji ani w tabelach ani na mapach, a co najwyżej oznaczać je odpowiednio kursywą lub innym kolorem, kreską itp. Wartość korelacji bliska zeru (czyli „nieistotna statystycznie” co nie oznacza nic ponadto niemożliwości odrzucenia hipotezy zerowej o braku korelacji) jest równie dobrą wartością jak każda inna. Informacja o braku korelacji to też ważny wynik.

Mam także pytanie do Rys. 6.9 dlaczego korelacja absorpcji mierzonej na ziemi z ekstynkcją mierzoną lidarem jest większa niż z absorpcją mierzoną z drona? Czy rzeczywiście jest to tylko efekt dłuższego uśredniania sygnału lidarowego?

Czytając pracę miałem duży problem z podawanymi w niej jednostkami absorpcji (i nie tylko), bardzo często podawanymi jako Mm^{-1} (nigdzie nie podano wyjaśnienia skrótu). Na rysunkach 3.2 i 3.3 jednostkę tę ma również atenuacja (do której niestety trzeba będzie jeszcze wrócić), a w Tabeli 4.1 także rozpraszanie. Natomiast na Rys. 6.6 nie podano w ogóle jednostki absorpcji (choć jest to chyba jednak km^{-1}). Dopiero Rys. 5.5 i jego opis stanowi coś w rodzaju kamienia z Rosetty tej jednostki gdyż maksimum absorpcji na wysokości 700 m podano w tekście pracy jako 9.5 Mm^{-1} , natomiast na rysunku jednostką jest km^{-1} i widoczna wartość tego maksimum to ok. 0.01 km^{-1} . Wynikałoby z tego, że Mm to jednak „megametr”. Jednak dlaczego należy to zgadywać? Domyślam się, że autor miał za mało kontaktu z morzem aby wiedzieć, że Mm (tak właśnie pisany) to w Polsce skrót „zaklepany” dla mili morskiej, jednostki nadal używanej w nawigacji na morzu. Ja natomiast miałem i zgadnięcie, że jest to coś innego sprawiło mi wiele kłopotu. Pewnie nie tylko mi i dlatego Wikipedia podaje, że Mm jako megametr stosowany jest głównie w... literaturze SF.

Wróćmy zatem do atenuacji. W recenzowanej pracy są kłopoty z tym pojęciem. Zdefiniowana jest dla pomiarów na filtrze równaniem (3.1), w którym zapomniano podać co oznacza I oraz I_0 . Nie w tym jednak problem, i nawet nie w użyciu tej wielkości już pięć stron wcześniej (st. 59). Problem natomiast w tym, że używane w tekście wartości atenuacji są procentowe (100 razy większe niż wyliczone z podanej definicji), bo tak je używa cytowany Schmid i inni (2006) – wystarczy porównać z ich wzorami (5). Jednak to jeszcze nie wszystko. Dotychczas była mowa o bezwymiarowej atenuacji. W pracy występuje jednak również niezdefiniowana atenuacja posiadająca słynny wymiar Mm^{-1} , np. na Rys. 3.2 i 3.3. Pochodzi ona, podobnie jak współczynnik absorpcji z etalometru AE-31. Mogę jedynie zgadywać, że prawdopodobnie ta „atenuacja” to wartość uzyskana z wzoru podobnego do (3.2) ale bez korekcji na wielokrotne rozpraszanie. Innymi słowy jest to zapewne dość zgrubny pomiar ekstynkcji. Potwierdzałby to fakt, że na Rys. 3.3 ma ona wartość o ponad pięć razy większą od absorpcji, co odpowiada realistycznym wartościom SSA (natomiast oznaczenia dla obu tych wielkości σ są na tym rysunku identyczne, co jest na pewno błędem). I nie jest to zaskakujące bo angielskojęzyczny termin „*attenuation*” w optyce morza ale i często atmosfery jest po prostu synonimem... ekstynkcji.

W tym miejscu muszę niestety wrócić jeszcze dalej, czyli do kwestii niepewności, moim zdaniem największego problemu recenzowanej pracy. W część teoretycznej przedstawiono skomplikowane wzory na jej wyznaczanie, a w doświadczalnej mowa o 95% ufności. Czy należy rozumieć, że w Tabelach 4.1, 5.2 i gdzie indziej przedziały te są po prostu podwójnymi odchyleniami

standardowymi, czy zawierają one coś więcej niż tylko niepewność statystyczną? Jak się one mają do niepewności opisanych w części teoretycznej? W dodatku kilku miejscach, np. w Tabeli 5.1 nie podano w ogóle czym są podane niepewności. Jeszcze ciekawiej jest w Tabeli 6.2 gdzie podano zarówno „95% przedziały ufności” jak i odchylenia standardowe, i co niezbyt dla mnie zrozumiałe te pierwsze są 2 do 4 razy mniejsze od tych drugich. Jak je liczone i czy nie zaszła tu jakaś fundamentalna pomyłka czy też niepewność i odchylenie standardowe dotyczą innych parametrów statystycznych? Niestety nie zostało to opisane w pracy i liczę na wyjaśnienia doktoranta na obronie.

Dowodem wprost, że coś jest nie tak z niepewnościami podawanymi w pracy jest to, że wykresy wartości SSA wraz z niepewnościami (Rys. 5.3, 5.6 czy 5.8) pokazujące różnice pomiędzy danymi z różnych przyrządów znacznie większe niż ich sumy niepewności. Nawiasem mówiąc wartości niepewności z Tabeli 5.4 i 5.5 wydają się znacznie większe niż pokazane na wykresach SSA, a jej wartości procentowe z kolei niezrozumiale mniejsze niż wartości ekstynkcji i absorpcji. Możliwe, że ma to wszystko dobre wytłumaczenie i jest tylko skutkiem bardzo złego opisanie co w danym miejscu rozumiane jest jako niepewność, jednak nie da się tego stwierdzić bez dodatkowych wyjaśnień.

Powyższe uwagi dotyczyły trzech rozdziałów opisujących kampanie pomiarowe. Osobno skomentuję wyniki modelu przenoszenia radiacji – temat mi bliski ze względu na lata pracy z podobnymi modelami. Zacznę od ogólnej uwagi, że stosowanie wyłącznie promieniowania rozproszonego (zamiast całkowitego) to wybór nie najszcześniejszy, a przy liczeniu wymuszeń radiacyjnych przy powierzchni Ziemi wręcz błędny. Jeśli, dla przykładu, strumień rozproszony na powierzchni Ziemi zwiększy się o 5 W/m^2 , a bezpośredni zmniejszy o 6 W/m^2 to wymuszenie radiacyjne wyniesie 1 W/m^2 , a nie 5 W/m^2 . Większość rozpraszania to rozpraszanie pod bardzo małym kątem, które praktycznie nie wpływa na całkowite oświetlenie. Foton rozproszony pod kątem 1° zmniejsza oświetlenie bezpośrednie, zwiększa rozproszone ale... praktycznie nie zmienia oświetlenia całkowitego. Dotyczy to np. Rys. 7.6, dotyczącej zmian strumienia rozproszonego na powierzchni. Oczywiście nie ma to znaczenia na szczycie atmosfery gdzie praktycznie całe oświetlenie oddolne jest rozproszone (wyjątkiem są wschody i zachody słońca gdy świeci ono na szczycie atmosfery „od dołu”).

Mam też pytanie: dlaczego efekt zmian SSA na wielkość promieniowania rozproszonego zależy od długości fali podczas gdy profile SSA są niespektralne (str. 197)? Czy dlatego, że model

uwzględnia (spektralne) rozpraszanie Rayleigha? Jeśli tak to trzeba to było zaznaczyć.

Nie zdefiniowano używanego pojęcia wymuszenia radiacyjnego, które w literaturze oznacza różne rzeczy w różnych kontekstach. Zapewne jest to zmiana oświetlenia wektorowego netto (tzn. odgórne minus oddolne), jak definiuje to np. cytowany w pracy Meloni i inni 2005, prowadzący podobne analizy. Trzeba to było jednak podać w opisie. Może jednak jest to coś innego, gdyż w takim razie nie rozumiem czym różnią się wartości z Rys. 7.5 i 7.7 („względne różnice w strumieniu promieniowania rozproszonego na górnej granicy atmosfery” oraz „względne różnice wymuszenia radiacyjnego na górnej granicy atmosfery”), wobec stałej wartości bezpośredniego promieniowania słonecznego.

Cieężko się czyta także podrozdział o ogrzewaniu radiacyjnym. To także termin używany przed podaniem definicji. Podane są dwie jego jednostki: K (błędnie, pierwszy raz już we wstępie na st. 3) oraz K/dzień. Ta druga od razu tłumaczy o co tu chodzi, a mianowicie o prędkość ogrzewania (*heating rate*, a dokładniej *instantaneous heating rate*). Niżej zresztą jest ona zdefiniowana ale jako "tempo ogrzewania radiacyjnego" (co jest poprawniejszą nazwą). Nie zgodziłbym się też ze stwierdzeniem ze str. 13, że „dolna atmosfera wychładza się radiacyjnie na poziomie ok 1K/dobę”, a także z podaną tego przyczyną „braku silnie pochłaniających gazów troposferze w zakresie widzialnym”. W wilgotnej atmosferze może to być 2 K/dobę i więcej (Curry, 1983). Ze względu na temperaturę troposfery, wychładzanie spowodowane jest emisją nie w zakresie widzialnym, a w bliskiej podczerwieni, a zatem istnieniem gazów absorbujących w tym zakresie (gazów cieplarnianych).

Na koniec mam jeszcze pytanie co do kątów zenitalnych Słońca do analizy wpływu profilów SSA na poprawkę atmosferyczną dla podłoża trawiastego oaz śniegu. Analizy wykonano w pracy dla kątów zenitalnych Słońca między 0 a 30 stopni. Problem w tym, że nawet 30 stopni w Polsce się nie wszędzie zdarza nawet w najdłuższe letnie dni, a w okresie gdy jest śnieg w ogóle nigdzie. Najmniejszy kąt zenitalny słońca (czyli najwyższy liczony od horyzontu) w Polsce w południe najdłuższego dnia w roku to od 26,5 stopnia w Krakowie do 31 stopni w Gdańsku. Natomiast śnieg występuje jak wiadomo zimą gdy kąt zenitalny w południe 20 marca to w Polsce ponad 50 stopni, a 21 grudnia ponad 70 stopni! Zasadniczo użyte wartości mogą mieć zastosowanie jedynie dla (nielicznych) lodowców górskich w rejonach tropików i subtropików.

Z drobniejszych uwag, które nie wymagają moim zdaniem odpowiedzi wymieniałbym jeszcze

„inwersję” metody, termin który w fizyce atmosfery jest już zajęty i dlatego mówimy zwykle o „odwracaniu” metody; „czarny węgiel” (s. 13), który zwykle nazywamy „sadzą”; błędne oznaczenie kilograma siły, jednostki ciągu (st. 35) jako kg zamiast np. kG (są też inne konwencje). Znalazłem też kilka literówek: użycie 1 km zamiast 1 kg (str. 33) jako nośności drona, oraz „stany” zamiast „stanu” (s. 16), „na podejmuje” zamiast „nie podejmuje” (s. 34), „lidara” zamiast „lidaru” (s. 55), „cielometr” s. 132, i „metrologiczne” (nomen omen) zamiast „meteorologiczne” (p. 183).

Po wymienieniu znalezionych wad pracy trzeba jednak koniecznie dodać, że żadna z nich nie wpłynęła na konkluzje. Tzn. cel pracy, pokazanie iż sondowanie aerozolu absorbującego przy pomocy aparatury umieszczonej na dronach dostarcza informacji niemożliwych do uzyskania przy pomocy metod zdalnych został w pełni wykonany. Doktorant w Podsumowaniu jest nawet zbyt skromny pisząc, że metoda ta została zweryfikowana metodami teledetekcyjnymi. Moim zdaniem jest wręcz odwrotnie: pomiary z dronów weryfikują wyniki sondowań lidarowych i to często dość brutalnie. Należy też docenić ogrom pracy jaka musiała zostać wykonana dla opanowania tej trudnej i nowej techniki pomiarowej oraz opracowania dużej ilości zebranych danych. Nie mam wątpliwości, iż stanowi to ustawowe „oryginalne rozwiązanie problemu naukowego”. Nie jest to w praktyce metoda łatwa i dlatego nie bardzo wierzę w jej powszechne stosowanie np. w monitoringu w dającej się przewidzieć przyszłości. Jednak nie ma wątpliwości że w eksperymentach mających na celu poznanie procesów fizycznych dolnej troposfery, szczególnie związanych z aerozolem i chmurami, metoda ta jest wręcz niezbędna i ma przed sobą świetlaną przyszłość.

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 Michałowi Chilińskiemu dalszych sukcesów w prowadzonych badaniach i karierze zawodowej.

Z poważaniem

J. Piśkoźub

J. Piśkoźub