

# Załącznik 2 do wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego

## AUTOREFERAT

**Krzysztof Markowicz**

Instytut Geofizyki, Wydział Fizyki,  
Uniwersytet Warszawski

### Spis treści

1. CURRICULUM VITAE .....	2
2. PRZEBIEG PRACY NAUKOWEJ PRZED UZYSKANIEM STOPNIA DOKTORA .....	5
3. PRZEBIEG PRACY NAUKOWEJ PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA.....	9
3.1 Modelowanie własności optycznych i wymuszania radiacyjnego aerozoli w skali globalnej .....	9
3.2 Badanie własności optycznych aerozoli niesferycznych i wymuszania radiacyjnego .....	11
3.3 Synergia obserwacji własności optycznych aerozoli obejmująca metody in-situ i techniki teledetekcyjne .....	12
3.4 Badanie wpływu kształtu cząstek smug kondensacyjnych na ich własności optyczne i wymuszanie radiacyjne .....	15
3.5 Badanie zasobów energii odnawialnej .....	17
4. OSIĄGNIĘCIA NAUKOWO-BADAWCZE BĘDĄCE WKŁADEM HABILITANTA DO ROZWOJU DZIEDZINY .....	19

---

## 1. CURRICULUM VITAE

### **Krzysztof Mirosław Markowicz**

Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki,  
Instytut Geofizyki

#### **WYKSZTAŁCENIE I STOPNIE NAUKOWE**

- 1993                   matura w Zespole Szkół w Strzyżowie im. Adama Mickiewicza w klasie matematyczno-fizycznej
- 1999                   stopień magistra w dziedzinie fizyki ze specjalności fizyka atmosfery na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego po odbyciu 5,5 letnich studiów dziennych w latach 1993-1999  
praca magisterska pt. „Wpływ ruchów wirowych na ewolucje widma kropel w chmurach”  
promotor dr Konrad Bajer  
praca wyróżniona nagrodą im. Marii Bardadin Otwinowskiej
- 2003                   stopień doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego po odbyciu studiów doktoranckich w latach 1999-2003  
tytuł rozprawy: „Experimental Determination of Aerosol Solar and Infrared Radiative Forcing”  
promotor prof. dr hab. Krzysztof Haman,  
promotor pomocniczy dr Piotr Flatau  
doktorat wyróżniony przez Radę Naukową Wydziału Fizyki

#### **HISTORIA ZATRUDNIENIA**

- 1999-2003            studia doktoranckie, Wydział Fizyki Uniwersytet Warszawski
- od marca 2004      adiunkt w Instytucie Geofizyki na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

**POBYTY NAUKOWE ZA GRANICĄ**

1999-2001	Instytut Oceanografii im. Scripps, Uniwersytet Kalifornijski San Diego, w sumie 5 miesięcy (współpraca w ramach projektów: INDOEX, ACE-Asia, MINOS)
2002	Instytut Oceanografii im. Scripps Uniwersytetu Kalifornijskiego, 5 miesięcy (stypendium Fulbigtha)
2002	Naval Research Laboratory, Monterey USA 4 miesięcy (stypendium Fulbigtha)
2003-2004	Naval Research Laboratory, Monterey USA, staż naukowy, 3 miesiące
2007-2008	Wydział Meteorologii, Uniwersytet w Reading, Wielka Brytania, staż naukowy (4 miesiące)

**WYRÓŻNIENIA WYNIKAJĄCE Z PROWADZONYCH BADAŃ NAUKOWYCH**

1992	Nagroda Polskiej Akademii Nauk w konkursie First Step to Nobel Prize in Physics za prace "Klimat Strzyżowa"
1993	Nagroda Polskiej Akademii Nauk w konkursie First Step to Nobel Prize in Physics za prace „Ekstynkcja promieniowania słonecznego w paśmie widzialnym w dolnej troposferze”.
1997	Stypendium Ministra Edukacji Narodowej
1999	Nagroda im Bardadin Otwinowskiej za pracę magisterską
2001	Stypendium Fulbright Junior w Instytucie Oceanografii im Scripps w San Diego, USA
2004	Stypendium dla młodych naukowców Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej
2005	Stypendium dla młodych naukowców Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej
2006	Stypendium Rektora Uniwersytetu Warszawskiego
2010	Nagroda III stopnia Rektora Uniwersytetu Warszawskiego

**PEŁNIONE FUNKCJE**

2002-2008	członek rady naukowej Instytutu Geofizyki na Wydziale Fizyki UW
2004-2008	członek komisji wyborczej Wydziału Fizyki UW

**UCZESTNICTWO W ORGANIZACJACH**

od 2000                      członek rady programowej projektu edukacyjnego GLOBE  
2011                          członek założyciel stowarzyszenia Instytut Energii Słonecznej

**PUBLIKACJE NAUKOWE OPISANE W BAZIE WEB OF SCIENCE**

(dane z 30 listopada 2011)

Indeks #H 9

Liczba publikacji: 18

Liczba cytowań: 657

Liczba cytowań z wyłączeniem autocytowań: 641

## 2. PRZEBIEG PRACY NAUKOWEJ PRZED UZYSKANIEM STOPNIA DOKTORA

Moje zainteresowania fizyką atmosfery sięgają najmłodszych lat życia. W wieku 11 lat założyłem swoją pierwszą stację meteorologiczną w Strzyżowie, którą prowadziłem do ukończenia szkoły średniej. Wykonywałem tam podstawowe pomiary meteorologiczne oraz obserwacje klimatyczne dla miejscowego Zakładu Kwarantanny Roślin. Na podstawie danych zebranych w ciągu siedmioletniego okresu obserwacji napisałem pracę na temat klimatu Strzyżowa oraz warunków mikroklimatycznych panujących w terenie Pogórza Strzyżowsko-Dynowskiego. W 1992 r. rozpocząłem regularne pomiary promieniowania słonecznego przy pomocy przenośnego luksomierza. Moje obserwacje miały na celu oszacowanie redukcji promieniowania słonecznego w najniższej warstwie powietrza związane z obecnością aerozolu antropogenicznego emitowanego głównie przez gospodarstwa domowe. Głównym wynikiem moim obserwacji było udokumentowanie silnej redukcji promieniowania słonecznego sięgającej 10-15% w warstwie powietrza o grubości ok. 150 metrów. Warunki takie występowały podczas zimowej wyżowej pogody ze słabymi gradientami ciśnienia, które sprzyjały silnej kumulacji zanieczyszczeń powietrza w kotlinie Strzyżowa. Wyniki uzyskane przeze mnie zostały zebrane w pracy pt: „Ekstynkcja promieniowania słonecznego w zakresie widzialnym w dolnej troposferze”. We wrześniu 1992 i 1993 r. odbyłem dwutygodniowy staże w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie, które były nagrodą za dwukrotne zdobycie pierwszego miejsca w konkursie Polskiej Akademii Nauk „Pierwszy krok do nagrody Nobla w fizyce” za wyżej wymienione prace.

W 1993 r. ukończyłem średnią szkołę w Zespole Szkół w Strzyżowie uczęszczając do klasy o profilu matematyczno-fizycznym. W październiku 1993 r. rozpocząłem studia na Międzywydziałowych Studiach Matematyczno-Przyrodniczych Uniwersytetu Warszawskiego. Studia odbywałem głównie na Wydziale Fizyki, na który przenieśliem się będąc na V roku studiów. Ukończyłem je w 1999 r. uzyskując dyplom z wyróżnieniem. Pracę magisterską pt „Wpływ ruchów wirowych na ewolucje widma kropeł w chmurach” wykonywałem pod kierunkiem Konrada Bajera. Głównym wynikiem przeprowadzonych symulacji komputerowych było pokazanie, że turbulencja w chmurach prowadzi do separacji kropeł i pojawiania się klastrów kropeł. Wiry prowadzą również do sortowania kropełek ze

względu na ich wielkość. W obszarach o wysokiej wirowości występuje niższa koncentracja kropek co może prowadzić do przesylenia w przeciwieństwie do regionów o niskiej wirowości.

W 1999 r. rozpocząłem studia doktoranckie na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Tematem moich badań stał się aerozol atmosferyczny i jego bezpośredni wpływ na klimat. Opiekę naukową sprawował nade mną Piotr Flatau z Instytutu Oceanografii im. Scripps w Uniwersytecie Kalifornijskiego w San Diego oraz Krzysztof Haman z IGF.

W czasie studiów doktoranckich uczestniczyłem w trzech dużych eksperymentach badawczych: INDOEX (Indian Ocean Experiment), MINOS (Mediterranean Intensive Oxidant Study) oraz ACE-Asia (Asian Pacific Regional Aerosol Characterization Experiment). Podczas eksperymentu INDOEX w 1999 r. brałem udział w badaniach prowadzonych na statku badawczym NOAA R.H. Brown oraz na lotnisku cywilnym na wyspie Male na Malediwach. Podczas eksperymentu byłem członkiem grupy zajmującej się badaniem koloru oceanu, a moja praca dotyczyła pomiarów refleksyjności oceanu, pomiarów grubości optycznej aerozolu przy użyciu fotometrów słonecznych oraz określania profili współczynnika ekstynkcji aerozolu przy użyciu lidarów mikroimpulsowych MPL. Dwa lata później, na tym samym statku uczestniczyłem w eksperymencie ACE-Asia wykonując obserwacje atmosferyczne w obszarze pomiędzy Hawajami a Japonią. Podczas rejsu prowadziłem pomiary z zakresu bilansu radiacyjnego oraz własności optycznych aerozoli mierzonych technikami zdalnymi oraz metodami in-situ.

W lipcu i sierpniu 2001 r. uczestniczyłem w eksperymencie MINOS na Krecie, gdzie prowadziłem pomiary wpływu aerozolu na bilans radiacyjny. Analizę wyników badań przeprowadziłem w znacznej mierze w Instytucie Oceanografii im. Scripps w San Diego gdzie przebywałem wielokrotnie w latach 1999-2003. W okresie tym powstało 8 publikacji, których byłem współautorem a które okazały się czasopismach z listy filadelfijskiej. Wielokrotnie przedstawiałem wyniki swoich badań na konferencjach zagranicznych. Prace prowadzone w omawianym okresie powstały głównie pod kierunkiem Piotra Flatau, oraz przy współpracy z Veerabhadranem Ramanathanem, Paulem Crutzenem oraz Andrew Vogelmannem z Instytutu Oceanografii Uniwersytetu Kalifornijskiego im Scripps w San Diego.

Najważniejsze wyniki uzyskane podczas wykonywania doktoratu:

- wykazanie, że aerozole w pobliżu uprzemysłowionych obszarów świata (np. nad północną częścią Oceanu Indyjskiego, czy wschodnią część Morza Śródziemnego) posiadają silne właściwości absorpcyjne. Prowadzi to do znacznej redukcji promieniowania słonecznego dochodzącego do powierzchni Ziemi (ok. 5-8%) [A1, A2, A3]
- wykazanie istnienia silnej zależności pomiędzy wilgotnością względną (a także opadem potencjalnym) a grubością optyczną aerozolu. Bazując na obserwacjach prowadzonych na Morzu Japońskim podczas eksperymentu ACE-Asia pokazano istnienie silnej korelacji pomiędzy albedem pojedynczego rozpraszania a wilgotnością względną, co z kolei wskazuje na istnienie zależności pomiędzy wilgotnością względną a wydajnością wymuszenia radiacyjnego aerozolu [A5]
- wykazanie, że wymuszanie radiacyjne przez aerozole w badanych rejonach świata znacznie przewyższa średnią globalną oraz jest wyższe od wymuszenia radiacyjnego związanego z antropogenicznym wzrostem koncentracji gazów cieplarniowych [A5, A7, A8].
- wbrew dotychczasowym poglądom, wpływ aerozolu na bilans promieniowania długofalowego nie może być zanedbywany - zarówno aerozol naturalny (a w szczególności piasek pustylny) jak i antropogeniczny mogą istotnie wpływać na wartość tego bilansu. Pokazano, że wymuszanie radiacyjne aerozolu w dalekiej podczerwieni, w przeciwieństwie do wymuszenia w zakresie krótkofalowym, jest dodatnie zarówno na powierzchni ziemi jak i na górnej granicy atmosfery, i co do wartości bezwzględnej może przyjmować wartość dochodzącą do 20% wartości tego ostatniego [A4, A6].

A1 Markowicz, K. M., P. J. Flatau, M. V. Ramana, P. J. Crutzen, and V. Ramanathan (2002), Absorbing mediterranean aerosols lead to a large reduction in the solar radiation at the surface, *Geophys. Res. Lett.*, 29(20), 1968, doi:10.1029/2002GL015767.

A2 Lelieveld, J., H. Berresheim, S. Borrmann, P.J. Crutzen, F.J. Dentener, H. Fischer, J. Feichter, P.J. Flatau, J. Heland, R. Holzinger, R. Kormann, M.G. Lawrence, Z. Levin, K. Markowicz, N. Mihalopoulos, A. Minikin, V. Ramanathan, M. de Reus, G.J. Roelofs, H.A. Scheeren, J. Sciare, H. Schlager, M. Schultz, P. Siegmund, B. Steil, E.G. Stephanou, P. Stier, M. Traub, C. Warneke, J. Williams, H. Ziereis (2002), Global air pollution crossroads over the Mediterranean, *Science*, 298 (5594), 794-799, doi:10.1126/science.1075457.

A3 Welton, E. J., K. J. Voss, P. K. Quinn, P. J. Flatau, K. Markowicz, J. R. Campbell, J. D. Spinhirne, H. R. Gordon, and J. E. Johnson (2002), Measurements of aerosol vertical

- 
- profiles and optical properties during INDOEX 1999 using micropulse lidars, *J. Geophys. Res.*, 107(D19), 8019, doi:10.1029/2000JD000038.
- A4 Vogelmann, A. M., P. J. Flatau, M. Szczodrak, K. M. Markowicz, and P. J. Minnett (2003), Observations of large aerosol infrared forcing at the surface, *Geophys. Res. Lett.*, 30(12), 1655, doi:10.1029/2002GL016829.
- A5 Markowicz, K. M., P. J. Flatau, P. K. Quinn, C. M. Carrico, M. K. Flatau, A. M. Vogelmann, D. Bates, M. Liu, and M. J. Rood (2003), Influence of relative humidity on aerosol radiative forcing: An ACE-Asia experiment perspective, *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8662, doi:10.1029/2002JD003066.
- A6 Markowicz, K. M., P. J. Flatau, A. M. Vogelmann, P. K. Quinn, E. J. Welton (2003), Clear-sky infrared radiative forcing at the surface and the top of the atmosphere, *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 129, pp. 2927-2947 doi: 10.1256/qj.02.224.
- A7 Conant, W. C., J. H. Seinfeld, J. Wang, G. R. Carmichael, Y. Tang, I. Uno, P. J. Flatau, K. M. Markowicz, and P. K. Quinn (2003), A model for the radiative forcing during ACE-Asia derived from CIRPAS Twin Otter and R/V *Ronald H. Brown* data and comparison with observations, *J. Geophys. Res.*, 108(D23), 8661, doi:10.1029/2002JD003260.
- A8 Seinfeld J, G Carmichael, R Arimoto, W Conant, F Brechtel, T Bates, D Cahill, D Clarke, S Doherty, P Flatau, Huebert J, J Kim, K Markowicz, P Quinn, L Russell, P Russell, A Shimizu, Y Shinozuka, C Song, Y Tang, J Uno, A Vogelmann, R Weber, J Woo, X Zhang (2004), ACE-Asia: Regional Climatic and Atmospheric Chemical Effects of Asian Dust and Pollution, *Bull. Am. Met. Soc.*, 85(3), 367-380.



### **3. PRZEBIEG PRACY NAUKOWEJ PO UZYSKANIU STOPNIA DOKTORA**

Zagadnienia, którymi zajmowałem się po uzyskaniu stopnia naukowego doktora można podzielić na cztery główne grupy badawcze:

- modelowanie własności optycznych i wymuszania radiacyjnego aerozoli w skali globalnej,
- badanie własności optycznych aerozoli niesferycznych i ich wymuszania radiacyjnego,
- synergia obserwacji własności optycznych aerozoli obejmująca metody in-situ i techniki teledetekcyjne,
- badanie wpływu kształtu cząstek smug kondensacyjnych na ich własności optyczne i wymuszanie radiacyjne,

Poza głównym kierunkiem badań zajmowałem się również analizą zasobów energii odnawialnej na terenie Polski.

#### **3.1 Modelowanie własności optycznych i wymuszania radiacyjnego aerozoli w skali globalnej**

Temat badawczy związany był z realizacją grantu Office of Naval Research przy współpracy z Naval Reserach Laboratory (NRL) w Monterey (USA). Będąc kierownikiem tego projektu współpracowałem z Marcinem Witkiem ówczesnym doktorantem w Instytucie Geofizyki UW, Joanną Remiszewską (w tym czasie doktorantką w Instytucie Geofizyki Polskiej Akademii Nauk), magistrantką Anetą Maciszewską oraz naukowcami z NRL.

W ramach projektu zajmowałem się walidacją modelu NAAPS (Navy Aerosol Analysis and Prediction System) w oparciu o naziemną sieć obserwacyjną AERONET (AErosol RObotic NETwork) oraz budową tzw. modelu off-line do wyznaczenia wymuszania radiacyjnego.

W celu wykonania walidacji modelu NAAPS zbudowałem pakiet optyczny, który na podstawie przewidywanych przez model koncentracji masy aerozoli oraz bazy danych OPAC (Optical Properties of Aerosols and Clouds) służy do wyznaczenia grubości optycznej, albedo pojedynczego rozpraszania, parametru asymetrii oraz profili współczynnika ekstynkcji.

W ramach walidacji modelu badana była grubość optyczna aerozolu na terenie Europy Środkowej oraz koncentracja pyłu pustynnego nad Stanami Zjednoczonym oraz soli morskiej nad Pacyfikiem. Ze względu na fakt, że model NAAPS nie posiadał klasy aerozolu

morskiego, który w skali globu wnosi istotny wkład do grubości optycznej, Marcin Witek opracował i zaimplementował do modelu NAAPS ten rodzaj aerozolu [B1]. Pomimo tego, w wyniku przeprowadzonych analiz stwierdzono, że model NAAPS systematycznie zaniża grubości optyczne aerozolu w porównaniu do obserwacji [B2]. Przyczyną tego stanu rzeczy jest między innymi niewystarczająca reprezentacja aerozoli antropogenicznych w modelu, uproszczona parametryzacja aerozolu (aerozole w danej klasie posiadają monodispersyjny rozkład wielkości), słaba rozdzielczość horyzontalna modelu ( $1^\circ \times 1^\circ$ ) oraz przestarzałe dane o emisjach siarczanów w Europie. Istotnym zadaniem niniejszego projektu było zbudowanie modelu łączącego przewidywane przez NAAPS własności optyczne aerozolu z modelem transferu promieniowania. W celu wykonywania symulacji strumieni radiacyjnych w skali całego globu istotne było wykorzystanie szybkiego ale i relatywnie dokładnego modelu transferu promieniowania. Wybrano do tego zadania dwustrumieniowy model Fu-Liou. Wykonanie obliczeń strumieni radiacyjnych, a następnie wymuszania radiacyjnego aerozolu, wymagało wprowadzenie do modelu nie tylko własności optycznych aerozoli ale również profili termodynamicznych atmosfery, własności optycznych powierzchni ziemi itd. Trójwymiarowe pola meteorologiczne zostały pobrane z modelu NOGAPS (Navy's Operational Global Atmospheric Prediction System). Ze względu na fakt, że wymuszenie radiacyjne aerozolu zależy silnie od albedo podłoża, zbudowany model off-line został wyposażony w moduł podłoża oparty o satelitarne typy podłoża. Zbudowany w ramach tego projektu model był wykorzystywany w kolejnych badaniach prowadzonych w ramach innych grantów.

B1 Witek, M. L., P. J. Flatau, J. Teixeira, **K. M. Markowicz** (2011), Numerical investigation of sea salt aerosol size bin partitioning in global transport models: Implications for mass budget and optical depth, *J. Aerosol Sci.*, 45(3), 401–414.

B2 Maciszewska, A., **K. Markowicz**, M. Witek (2009), A Multiyear Analysis of Aerosol Optical Thickness over Europe and Central Poland Using NAAPS Model Simulation. *Acta Geophysica*, 58(6), 1147-1163.

### 3.2 Badanie własności optycznych aerozoli niesferycznych i wymuszania radiacyjnego

Badania prowadzone w ramach tego zagadnienia rozpocząłem latem 2004 roku podczas eksperymentu UAE<sup>2</sup> (United Arab Emirates Unified Aerosol Experiment) w Zjednoczonych Emiratach Arabskich. Były one kontynuowane wiosną 2005 roku podczas kampanii pomiarowej SAWA (SAharan dust over WARsaw) w Warszawie. Podczas pierwszego z eksperymentów badania własności optycznych aerozoli prowadziłem w mobilnym laboratorium MAARCO (Mobile Atmospheric Aerosol And Radiation Characterization) zlokalizowanym ok. 10 metrów od linii brzegowej (nad Zatoką Perską). Najważniejsze źródła aerozoli stanowiły okoliczne pustynie oraz szyby naftowe zlokalizowane zarówno na lądzie jak i na morzu. Tym samym, własności optyczne aerozoli wykazywały znaczne zróżnicowanie w zależności od kierunku napływu mas powietrza i stratyfikacji dolnej troposfery. Ze względu na okoliczne pustynie znaczny udział w obserwowanych własnościach optycznych aerozoli miały cząstki niesferyczne. Przeprowadziłem symulacje wymuszania radiacyjnego z wykorzystaniem modelu transferu radiacyjnego MODTRAN, oraz własności optycznych aerozoli sferycznych i sferoidalnych uzyskanych na podstawie pomiarów fotometrem słonecznym CIMEL w ramach sieci AERONET. Wyniki tych badań pokazały ok. 10% różnicę pomiędzy efektywnością wymuszania radiacyjnego cząstek sferycznych i sferoidalnych [B3]. Wpływ cząstek niesferycznych na wymuszanie radiacyjne okazał się mniejszy niż cząstek sferycznych. Istotne znaczenie dla własności optycznych cząstek miała silna cyrkulacja bryzowa. W wyniku przeprowadzonych badań opisano wpływ bryzy na własności optyczne cząstek oraz ich wymuszenie radiacyjne [B4].

Badania nad wpływem cząstek niesferycznych prowadzone były podczas eksperymentu SAWA. Kampanię polową SAWA zorganizowałem przy współpracy z Instytutem Oceanografii im. Scripps w San Diego, Instytutem Oceanologii Polskiej Akademii Nauk w Sopocie, Instytutami Fizyki Doświadczalnej Wydziału Fizyki Wolnego Uniwersytetem w Berlinie oraz Uniwersytetu Warszawskiego. Głównym celem badań było określenie własności optycznych oraz wymuszania radiacyjnego niesferycznych cząstek piasku transportowanych nad Polskę z rejonów Sahary. Zadanie to zostało wykonane między innymi dzięki pomiarom depolaryzacji przy użyciu lidarów aerozolowych skonstruowanego

przez Kamila Stelmaszczyka z Wolnego Uniwersytetu w Berlinie. W dniach 13-14 kwietnia 2005 r. zaobserwowano silny napływ pyłu pustynnego pochodzącego z północnowschodniej części Afryki. Charakteryzował się on wysokimi współczynnikami depolaryzacji (0.2-0.25) i współczynnika Ångströma (1.2-1.4), co wskazywało na małe i niesferyczne cząstki [B5]. Oszacowana efektywność wymuszania radiacyjnego była mniejsza o ok. 5-7% w przypadku aerozolu pustynnego w porównaniu do aerozolu pozbawionego znaczących ilości cząstek mineralnych [B6]. Symulacje numeryczne, wykonane przy użyciu metody T-matrix i modelu transferu promieniowania MODTRAN dla cząstek elipsoidalnych wykazały, że cząstki niesferyczne o rozmiarach poniżej 0.5  $\mu\text{m}$  wykazują mniejsze wymuszanie radiacyjne niż cząstki sferyczne co jest zgodne z wynikami uzyskanymi podczas eksperymentu UAE<sup>2</sup>.

**B3 Markowicz, K. M.**, A. E. Kardaś, C. Hochherz, K. Stelmaszczyk, Anna Rozwadowska, Tymon Zieliński, G. Karasiński, J. Remiszewska, M. Witek, Sz. Malinowski, T. Stacewicz, and L. Woeste (2006), Observation of optical properties and Radiative forcing of nonspherical particles over Poland, GRA vol. 8, 06233, EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Vienna, 2006.

**B4 Markowicz, K.M.**, P.J. Flatau, J. Remiszewska, M. Witek, E.A. Reid, J.S. Reid, A. Bucholtz, and B. Holben, 2008: Observations and Modeling of the Surface Aerosol Radiative Forcing during UAE<sup>2</sup>, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65, 2877–2891.

**B5 Kardas, A. E., K. M. Markowicz**, K. Stelmaszczyk, G. Karasinski, S.P. Malinowski, L. Woeste, C. Hochhertz, 2010: Saharan aerosol sensed over Warsaw by depolarization lidar, *Optica Applicata*, 40, 219-237

**B6 Markowicz, K. M.**, A. E. Kardaś, C. Hochherz, K. Stelmaszczyk, A. Rozwadowska, T. Zieliński, G. Karasiński, J. Remiszewska, M. Witek, Sz. Malinowski, T. Stacewicz, L. Woeste (2005), Observation of optical properties and radiative forcing of nonspherical particles over Poland, ACCENT symposium, Urbino.

### **3.3 Synergia obserwacji własności optycznych aerozoli obejmująca metody in-situ i techniki teledetekcyjne**

Kolejnym temat badawczy jest związany z synergią obserwacji in-situ i metod zdalnych, mającą na celu ulepszenie metod wyznaczania parametrów optycznych aerozoli atmosferycznych. W tym celu zaproponowano metodę wyznaczania profilu ekstynkcji

aerozolu na podstawie równoczesnych pomiarów dwoma przyrządami zdalnymi (ceilometrem i fotometrem słonecznym) jak również na podstawie połączenia pomiarów zdalnych ceilometrem i pomiarów in-situ wykonywanych przy użyciu nephelometru i aethalometru [B7]. Badania synergii obserwacji atmosferycznych kontynuowane są przede mną w ramach grantu Narodowego Centrum Nauki pt. „Wyznaczanie własności optycznych aerozoli na podstawie synergii pomiarów teledetekcyjnych”, który dotyczy połączenia pomiarów satelitarnych z satelitarnego radiometru SEVIRI z pomiarami naziemnymi wykonywanymi przy użyciu fotometrów słonecznych, ceilometru oraz nephelometru i aethalometru. Nowatorski aspekt badań prowadzonych w ramach tego grantu polega na wykorzystaniu satelitarnych pomiarów geostacjonarnych, które umożliwiają wyznaczanie własności optycznych z rozdzielczością czasową 15 minut a nie jak w przypadku pomiarów wykonywanych przez satelity polarne 1-2 razy na dobę [B8].

Badania wprowadzone w ramach tego grantu prowadzone są w Laboratorium Transferu Radiacyjnego (LTR) w Instytucie Geofizyki Wydziału Fizyki UW oraz stacji badawczej SolarAOT w Strzyżowie nad Podkarpaciu. Laboratorium w Instytucie Geofizyki powstało z mojej inicjatywy w 2005 r. Głównym jego celem było prowadzenie obserwacji własności optycznych atmosfery oraz strumieni radiacyjnych na powierzchni ziemi. Moja praca w Instytucie Geofizyki od samego początku ukierunkowana była na zbudowanie grupy zajmującej się fizyką aerozoli atmosferycznych. Istotnym elementem tego planu miał być rozwój pomiarów in-situ oraz metod teledetekcyjnych w LTR. Od 2005 r. LTR jest systematycznie wyposażany w aparaturę pomiarową zawierającą zarówno sprzęt dostępny komercyjnie jak i aparaturę budowaną w Instytucie Geofizyki. W 2011 r. LTR został znacznie doposażony w nowoczesny sprzęt pomiarowy po uzyskaniu finansowania inwestycji aparaturowej z Funduszu Nauki i Technologii Polskiej. W 2012 r. lista sprzętu zostanie poszerzona o lidar aerozolowo-ramanowsko-depolaryzacyjny, który jest obecnie budowany w Instytucie Badań Troposferycznych w Lipsku (Niemcy) we współpracy z Iwoną Stachlewską (z Instytutu Geofizyki UW).

W 2003 r., po 10 latach przerwy, wznowiłem pomiary meteorologiczne na Podkarpaciu. Zbudowałem prywatną stację badawczą Transferu Radiacyjnego SolarAOT na jednym w najwyższych punktów okolic Strzyżowa na wysokości 443 m.n.p.m. Wybór takiej lokalizacji miał na celu zminimalizowanie lokalnych emisji aerozoli atmosferycznych

umożliwiający tym samym badanie aerozolu transportowanego w skali Europy, z drugiej strony umożliwia niezakłócone przeszkodami terenowymi pomiary strumieni radiacyjnych w terenie Pogórza Podkarpackiego. Stacja została wyposażona w podstawową aparaturę meteorologiczną, 24 metrowy maszt pomiarowy do badania profilu wiatru i temperatury, radiometry do pomiarów promieniowania słonecznego oraz długofalowego, fotometry słoneczne, kamerę nieba oraz amatorskie przyrządy zbudowane przeze mnie takie jak: detektory wyładowań atmosferycznych, detektora pola elektrycznego atmosfery, wskaźnik pokrywy śnieżnej itd. Na stacji wykonuję kalibrację fotometrów słonecznych używanych w LTR w Warszawie czy w Instytucie Oceanologii PAN w Sopocie. W związku z realizacją projektów badawczych czasowo instalowane są tam przyrządy pomiarowe należące do Instytutu Geofizyki. W 2010 r. odbyła się na stacji SolarAOT kampania pomiarowa WRNP (Wymuszanie Radiacyjne Nad Polską) podczas której testowany był między innymi prototypowy lidar mikroimpusowy zbudowany w IGF i Instytucie Fizyki Doświadczanej Wydziału Fizyki UW oraz system do sondowania atmosfery. Dane pomiarowe gromadzone na stacji wykorzystywane są nie tylko przeze mnie, ale również przez osoby niezwiązane z Instytutem Geofizyki czy Instytutem Oceanologii w Sopocie. Zostały one wykorzystane w sumie w 10-ciu pracach licencjackich i magisterskich oraz rozprawach doktorskich i habilitacyjnych z zakresu odnawialnych źródeł energii oraz klimatologii i agrometeorologii.

W październiku 2011 r., między innymi z mojej inicjatywy, powstała sieć pomiarowa PolandAOD. W skład sieci wchodzi obecnie trzy stacje pomiarowe: LTR w Warszawie, stacja w Instytucie Oceanologii PAN w Sopocie oraz moja stacja transferu radiacyjnego SolarAOT w Strzyżowie. Nieformalnie, sieć działała już kilka lat w ramach współpracy badawczej z Instytutem Oceanologii w Sopocie. Od 2005 roku współpracuję z Tymonem Zielińskim, Tomaszem Petelskim, Anną Rozwadowską oraz z kilkoma doktorantami. Głównym celem sieci jest prowadzenie i utrzymanie w trybie ciągłym pomiarów z zakresu teledetekcji własności optycznych aerozoli oraz bilansu radiacyjnego na powierzchni ziemi, ujednolicenia systemu zbierania i przetwarzania danych pomiarowych oraz kalibracji przyrządów pomiarowych. W ramach sieci istnieje pełna wymiana informacji, w tym danych pomiarowych, które przekazywane są w trybie rzeczywistym. Zbudowałem system interaktywnej wymiany, przechowywania i przetwarzania danych w postaci bazy danych.

W przyszłości będzie on rozbudowywany w celu umożliwienia dostępu szerszemu gronu osób w tym do celów popularyzacyjnych. Obecnie, dane zbierane w sieci dostępne są w postaci tzw. quick-looks na stronie internetowej

<http://www.igf.fuw.edu.pl/meteo/stacja/PolandAOD.php>.

B7 **Markowicz, K. M.**, P.J. Flatau, A.E. Kardas, J. Remiszewska, K. Stelmaszczyk, and L. Woeste, 2008: Ceilometer Retrieval of the Boundary Layer Vertical Aerosol Extinction Structure. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25, 928–944.

B8 Zawadzka, O., **K. M. Markowicz** (2011), Wyznaczanie grubości optycznej aerozoli atmosferycznych na podstawie pomiarów teledetekcyjnych, *Przegląd Geofizyczny*, 1-2, 3-26.

### **3.4 Badanie wpływu kształtu cząstek smug kondensacyjnych na ich własności optyczne i wymuszanie radiacyjne**

Badania wpływu kształtu cząstek tworzących smugi kondensacyjnych na ich własności optyczne i wymuszanie radiacyjne było realizowane przeze mnie w ramach międzynarodowego projektu QUANTIFY (Quantify the Climate Impact of Global and European Transport Systems), realizowanego w ramach 6 Programu Ramowego UE w latach 2005-2010. W ramach pierwszej części projektu zajmowałem się porównaniem wymuszania radiacyjnego symulowanego różnymi modelami transferu promieniowania. Zadanie to było związane z szacowaniem błędów w uproszczonych schematach radiacyjnych, które są używane w globalnych modelach klimatu (GCM). Badania, którymi kierowałem w Instytucie Geofizyki, związane były z trzema modelami transferu radiacyjnego: Fu-Liou, Streamer oraz MODTRAN. W skład grupy badawczej wchodził Aleksandra Kardaś z Instytutu Geofizyki, Grzegorz Karasiński z Instytutu Fizyki Doświadczalnej oraz Paulina Wolkenberg z Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk. Badania, które prowadziliśmy związane były nie tylko z wymuszaniem radiacyjnym smug kondensacyjnych, ale również ze zmianami zawartości pary wodnej w górnej troposferze i dolnej stratosferze związane z transportem lotniczym, oraz z parametryzacjami własności optycznych atmosfery i powierzchni Ziemi w modelach transferu promieniowania. W ramach współpracy międzynarodowej przebywałem 4

miesiące na stażu naukowym na Wydziale Meteorologii Uniwersytetu w Reading w Wielkiej Brytanii, gdzie współpracowałem z Keithem Shine, Gaby Rädel, oraz Gunarem Myhre z Wydziału Nauk o Ziemi Uniwersytetu w Oslo czy z Yves Balkanski z Lab. des Sciences du Climat et de l'Environnement. Rezultatem tej współpracy była wspólna publikacja na temat wpływu modeli transferu radiacyjnego na błędy wymuszania radiacyjnego [B9]. W pracy pokazano, że modele transferu radiacyjnego są istotnym źródłem niepewności nawet w przypadku wyznaczenia wymuszania radiacyjnego, co jest przejawem nie tylko różnic w metodach rozwiązywania równania transferu ale również w sposobie parametryzacji własności optycznych atmosfery oraz różnic w sposobie ich definiowania przez użytkowników.

Głównym zadaniem realizowanym w ramach niniejszego projektu była analiza własności optycznych i wymuszania radiacyjnego smug kondensacyjnych. W tym celu przeprowadziłem wraz z Marcinem Witkiem szereg symulacji numerycznych własności optycznych kryształów lodu przy użyciu metody DDSCAT (Discrete Dipole Approximation for Scattering and Absorption of Light by Irregular Particles) w zakresie długofalowym promieniowania oraz metodę geometryczną ray-tracing w zakresie krótkofalowym promieniowania. Na podstawie obliczeń zbudowałem bazę danych własności optycznych kryształów lodu i przeanalizowałem 10 typów kształtów cząstek obejmujących cząstki sferyczne, płytki i kolumny heksagonalne o różnym stosunku krótszej i dłuższej półosi. Wyniki przeprowadzonych analiz pokazały, że pomimo iż kryształy lodu były losowo zorientowane to kształt kryształów lodu ma istotne znaczenie na własności optyczne (albedo pojedynczego rozpraszania oraz parametru asymetrii). Ostatnim elementem badań była analiza wpływu kształtu kryształów lodu smug kondensacyjnych na niepewność wymuszania radiacyjnego. W tym celu wykorzystałem stworzony w ramach pierwszej grupy zadań badawczych model off-line. Model ten, który w pierwotnej wersji służył do wyznaczenia strumieni radiacyjnych w przypadku bezchmurnego nieboskłonu, został rozbudowany o parametryzację własności optycznych chmur tak aby uwzględniał chmury naturalne oraz smugi kondensacyjne. Informacje o własnościach optycznych chmur, zachmurzeniu i piętrach występowania zostały pobrane z klimatologii satelitarnych chmur ICSSP (International Satellite Cloud Climatology Project). Dane o rozkładzie globalnym zachmurzenia smugami kondensacyjnymi zaczerpnięto z bazy AERO2K będącej połączeniem emisji oraz danych meteorologicznych (re-analiza



ECMWF) i danych satelitarne. Na podstawie stworzonej bazy danych własności optycznych kryształów lodu przeprowadziłem symulacje numeryczne wymuszania radiacyjnego przy użyciu wyżej wspomnianego modelu. Przebadano wpływ zmian poziomu występowania smug kondensacyjnych na wymuszanie radiacyjne w zależności od parametryzacji optycznej kryształów lodu. Symulacje te miały na celu zbadanie w jakim zakresie możliwa jest redukcja efektu radiacyjnego smug kondensacyjnych poprzez zmianę wysokości korytarzy powietrznych dla samolotów pasażerskich. Główne wyniki tych symulacji zostały przedstawione w pracy [B10] oraz [B11].

B9 Myhre, G., M. Kvalevag, G. Rädcl, J. Cook, K. P. Shine, H. Clark, F. Karcher, **K. Markowicz**, A. Kardas, P. Wolkenberg, Y. Balkanski, M. Ponater, P. Forster, A. Rap, R. Rodriguez De Leon (2009), Intercomparison of radiative forcing calculations of stratospheric water vapour and contrails, *METEOROL Z*, 18(6), pp585-596.

B10 **Markowicz, K. M.**, and M. L. Witek (2011), Simulations of Contrail Optical Properties and Radiative Forcing for Various Crystal Shapes, *Journal of Applied Meteorology and climatology*, 50(8), 1740-1755.

B11 **Markowicz, K. M.**, M. Witek, Sensitivity study of the global contrails radiative forcing due to particle shape. *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2011JD016345, in press.

### 3.5 Badanie zasobów energii odnawialnej

W okresie wykonywania doktoratu oraz zaraz po jego zakończeniu, poza głównym nurtem zainteresowań, uczestniczyłem także w badaniach zasobów energii odnawialnej (energia promieniowania słonecznego oraz energia wiatru) na obszarze Polski. Uczestniczyłem w projekcie tworzenia Bazy Danych Odnawialnych Źródeł Energii (<http://www.baza-oze.pl/bazadanych.php>) na Podkarpaciu realizowanym przez Centrum Doradztwa Gospodarczego i Podkarpacką Agencją Energetyczną. W ramach tego projektu przygotowałem dane dotyczące zróżnicowania przestrzennego napromieniowania słonecznego oraz usłonecznienia w rejonie Podkarpacia w oparciu o wyniki badań na swojej stacji SolarAOT w Strzyżowie, danych ze stacji Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Lesku, Przemyślu i Jasionce oraz symulacji numerycznych modelem transferu promieniowania. Równolegle zajmowałem się badaniami z zakresu energetyki wiatrowej.

Wraz z Andrzejem Tomczewskim z Politechniki Poznańskiej opublikowaliśmy artykuł dotyczący analizy danych wiatrowych dla potrzeb energetyki wiatrowej [B12]. Ponadto, prowadziłem wykłady dotyczące wykorzystania potencjału energetycznego wiatru i promieniowania słonecznego na terenie Polski podczas kilku konferencji organizowanych dla jednostek samorządowych.

B12 **Markowicz K.**, A. Tomczewski (2010), Komputerowo wspomagana analiza zasobów energetycznych wiatru, Napędy i sterowanie, nr 2, 80-82.

#### 4. OSIĄGNIĘCIA NAUKOWO-BADAWCZE BĘDĄCE WKŁADEM HABILITANTA DO ROZWOJU DZIEDZINY

Na moje osiągnięcia naukowe składa się jednotematyczny cykl ośmiu publikacji zatytułowany „**Własności optyczne i wymuszanie radiacyjne cząstek niesferycznych**”, w skład którego wchodzi następujące artykuły:

C1 Remiszewska, J., P. J. Flatau, **K. M. Markowicz**, E. A. Reid, J. S. Reid, and M. L. Witek (2007), Modulation of the aerosol absorption and single-scattering albedo due to synoptic scale and sea breeze circulations: United Arab Emirates experiment perspective, *Journal of Geophysical Research*, 112, D05204, doi:10.1029/2006JD007139.

C2 **Markowicz, K.M.**, P.J. Flatau, J. Remiszewska, M. Witek, E.A. Reid, J.S. Reid, A. Bucholtz, and B. Holben, 2008: Observations and Modeling of the Surface Aerosol Radiative Forcing during UAE<sup>2</sup>, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65, 2877–2891.

C3 **Markowicz, K. M.**, P.J. Flatau, A.E. Kardas, J. Remiszewska, K. Stelmaszczyk, and L. Woeste, 2008: Ceilometer Retrieval of the Boundary Layer Vertical Aerosol Extinction Structure. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25, 928–944.

C4 Kardas, A. E., **K. M. Markowicz**, K. Stelmaszczyk, G. Karasinski, S.P. Malinowski, L. Woeste, C. Hochhertz, 2010: Saharan aerosol sensed over Warsaw by depolarization lidar, *Optica Applicata*, 40, 219-237

C5 **Markowicz, K. M.**, T Zielinski, S. Blindheim, M. Gausa, A. K. Jagodnicka, A. Kardas, W. Kumala, S. P. Malinowski, T. Petelski, M. Posyniak, T. Stacewicz (2011), Study of vertical structure of aerosol optical properties by sun photometers and ceilometer during macron campaign in 2007, *Acta Geophysica*, in press.

C6 **Markowicz, K.M.**, T. Zielinski, A. Pietruczuk, M. Posyniak, O. Zawadzka, P. Makuch, I.S. Stachlewska, A.K. Jagodnicka, T. Petelski, W. Kumala, P. Sobolewski, T. Stacewicz, Remote sensing measurements of the volcanic ash plume over Poland in April 2010, *Atmospheric Environment*, In Press, 10.1016/j.atmosenv.2011.07.015.

C7 **Markowicz, K. M.**, and M. L. Witek (2011), Simulations of Contrail Optical Properties and Radiative Forcing for Various Crystal Shapes, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(8), 1740-1755.

C8 **Markowicz, K. M.**, M. Witek, Sensitivity study of the global contrails radiative forcing due to particle shape. *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2011JD016345, in press.

Wszystkie prace są współautorskie, a wkład naukowy współautorów do powstania prac został opisany w dołączonych oświadczeniach. Artykuły opisują wyniki badań własności optycznych i wymuszania radiacyjnego niesferycznych cząstek znajdujących się w atmosferze. Cykl publikacji obejmuje analizę własności optycznych cząstek w oparciu o przeprowadzone pomiary oraz symulacje numeryczne, w których aktywnie uczestniczyłem. Ponadto, opisuje metody wyznaczania własności optycznych cząstek na podstawie pomiarów in-situ i obserwacji teledetekcyjnych. Dwie prace dotyczą smug kondensacyjnych zaś pozostałe związane są z aerozolem atmosferycznym.

Cząstki niesferyczne, będące tematem przewodnim niniejszego cyklu publikacji, to specyficzne rodzaje aerozolu atmosferycznego oraz kryształy lodu. Aerozole niesferyczne to w przeważającej większości cząstki pochodzenia naturalnego: emitowane podczas erupcji wulkanów oraz unoszone z powierzchni pustyń podczas silnego wiatru. Nie są to jedyne przykłady aerozoli niesferycznych, gdyż w atmosferze może dochodzić do koagulacji cząstek pochodzenia antropogenicznego z aerozolem naturalnym wskutek czego powstają cząstki o skomplikowanej budowie geometrycznej. Niesferyczne kryształy lodu występują głównie w chmurach wysokich oraz w smugach kondensacyjnych.

Rola aerozoli oraz chmur naturalnych i sztucznych w systemie klimatycznym od wielu lat budzi duże zainteresowania naukowców. Pomimo niewątpliwego postępu w rozumieniu procesów fizycznych związanych z aerozolami i chmurami obecny stan wiedzy na temat ich wpływu na obserwowane zmiany klimatyczne pozostawia wiele do życzenia. Z raportu IPCC z 2007<sup>1</sup> roku wynika, że wpływ aerozolu i chmur na klimat obarczony jest dużym zakresem niepewności. W znacznej mierze wynika to z niedostatecznego stanu wiedzy na temat procesów rozpraszania oraz absorpcji promieniowania na cząstkach niesferycznych. O ile w przypadku cząstek sferycznych modelowanie własności optycznych w oparciu o teorię Lorenza-Mie<sup>2</sup> przynosi zamierzone rezultaty, o tyle brak efektywnej metody rozwiązywania zagadnień rozpraszania na cząstkach niesferycznych i trudności obserwacyjne z szacowaniem kształtu cząstek stanowią poważny problem w badaniach transferu radiacyjnego. Metody stosowane obecnie do rozwiązywania problemów rozpraszania na cząstkach niesferycznych

---

<sup>1</sup> Intergovernmental Panel on Climate Change (2007), The physical science basis: working group I contribution to the Fourth Assessment Report of the IPCC, *Cambridge University Press*, London.

<sup>2</sup> Bohren, C. F. and D. R. Huffman (1983), Absorption and scattering of light by small particles. *Wiley-Interscience*, New York.

konstruowane są dla konkretnych kształtów, np. T-matrix<sup>3</sup> dla sferoid obrotowych. Są też bardzo kosztowne obliczeniowo metody które można zastosować dla dowolnych geometrii np. Finite-Difference Time Domain (FDTD)<sup>4</sup> czy Discrete Dipole Approximation (DDA)<sup>5</sup>, szczególnie w wypadku obliczania własności optycznych cząstek o różnych orientacjach przestrzennych. Dla przykładu można podać, że obecne komputery pozwalają efektywnie rozwiązywać problemy rozpraszania dla cząstek o parametrze wielkości mniejszych niż ok. 20. Oznacza to, że wyznaczanie własności optycznych w zakresie widzialnym dla cząstek o efektywnym promieniu powyżej 1  $\mu\text{m}$ , jest znacznie utrudnione, jeśli w ogóle jest możliwe.

O ile w przypadku aerozoli niesferycznych, których rozmiary na ogół nie przekraczają 10  $\mu\text{m}$ , stosowanie metody FDTD lub DDA jest jeszcze możliwe to dla kryształów lodu, których rozmiary niejednokrotnie sięgają 100  $\mu\text{m}$ , nie ma takiej możliwości. W zamian stosuje się metody geometryczne, które z kolei ograniczone są do cząstek, których parametr wielkości wynosi co najmniej 100. Tym samym w zakresie środkowej podczerwieni (3-7  $\mu\text{m}$ ) nie dysponujemy żadną metodą pozwalającą efektywnie wyznaczać własności optyczne dużych kryształów lodu. W efekcie własności optyczne kryształów lodu smug kondensacyjnych wyznaczane są w oparciu o niespójne założenia. Wyznaczając własności optyczne kryształów w zakresie długofalowym zakłada się, że mają one sferyczny kształt. Te same kryształy dla potrzeby obliczeń w zakresie krótkofalowym przybierają kształt płytek lub kolumn heksagonalnych. Niedostatek studiów na temat własności optycznych różnych kształtów cząstek smug kondensacyjnych oraz znaczące uproszczenia w parametryzacji ich własności optycznych stały się jedną z głównych motywacji przeprowadzonych przeze mnie badań.

Inną motywacją była niedostateczna ilość i jakość pomiarów, która w znacznej mierze decyduje o dużych niepewnościach wpływu niesferycznych cząstek na klimat. Wynika ona m.in. z metodyki samych obserwacji, które w przeważającej większości są pomiarami teledetekcyjnymi. Wyznaczanie własności fizycznych cząstek sferycznych jak i

---

<sup>3</sup> Mishchenko M.I., Travis L.D., Capabilities and limitations of a current FORTRAN implementation of the T-matrix method for randomly oriented rotationally symmetric scatterers, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer* 60(3), 1998, pp. 309–324.

<sup>4</sup> Yang P, Liou KN. Finite-time domain method for light scattering by small ice crystals in three-dimensional space. *J Opt Soc Am A* 1996;13:2072–85

<sup>5</sup> Purcell, E.M. and C. R. Pennypacker. Scattering and absorption of light by nonspherical dielectric grains. *Astrophysical Journal*, 186:705, 1973.

niesferycznych wymaga w tym przypadku stosowania tzw. metod odwrotnych. Problemy odwrotne w teledetekcji atmosferycznej są często źle uwarunkowane, co niejednokrotnie uniemożliwia uzyskanie jednoznacznego rozwiązania. Znaczną poprawę tego stanu rzeczy można osiągnąć poprzez synergię danych pomiarowych pochodzących z różnych przyrządów badawczych obejmujących metody in-situ oraz techniki zdalne. Dodatkowo, tego typu metody używane do przetwarzania danych pomiarowych umożliwiają szacowanie innych (nieoptycznych) wielkości fizycznych np. parametrów opisujących kształt cząstek, rozkłady wielkości cząstek. Problemy obserwacyjne związane z cząstkami niesferycznymi dotyczą również pomiarów in-situ. W tym przypadku przyrządy pomiarowe są na ogół kalibrowane uwzględniając jedynie cząstki sferyczne. Na przykład dla nephelometrów całkujących korekcja współczynnika rozpraszania, wynikająca z braku możliwości technicznych rejestracji promieniowania rozproszonego w pewnych kierunkach, ograniczona jest jedynie do aerozoli sferycznych.

Badania wpływu aerozolu na klimat, ze względu na silne zróżnicowanie czasoprzestrzenne źródeł emisji, wymagają dobrze rozwiniętego systemu monitoringu. Pomimo obserwowanego w ostatnich latach rozwoju naziemnych sieci pomiarowych oraz metod satelitarnych ilość danych pomiarowych okazuje się nie wystarczająca. Pokazuje to dobitnie sytuacja z kwietnia 2010 r. kiedy to nad Europę napłynęła chmura pyłu wulkanicznego. Decyzje o zamykaniu przestrzeni powietrznej nad Europą zapadały jedynie na podstawie wyników z bardzo niedokładnych modeli dyspersji zanieczyszczeń. W ramach przedstawionego cyklu publikacji zaproponowano wykorzystanie istniejących i działających operacyjnie, ceilometrów (prostych lidarów do obserwacji zachmurzenia) do monitoringu własności optycznych aerozolu. Pokazano, że tego typu przyrządy są dobrym źródłem jakościowych danych o własnościach optycznych aerozoli i odpowiednie włączenie ich do sieci pomiarowych pozwoliłoby na niskonakładowe rozszerzenie zakresu monitoringu aerozolu atmosferycznego.

Prace zawarte w cyklu monotematycznych publikacji dotyczą roli aerozoli i smug kondensacyjnych. Pominięto rolę naturalnych chmur zawierających niesferyczne kryształki lodu. Niemniej jednak wyznaczone na podstawie symulacji numerycznych własności optycznych kryształków lodu dotyczą również chmur wysokich, których kryształki mają długość która nie przekracza  $\sim 100 \mu\text{m}$ . Pomimo, że rola naturalnych chmur piętra wysokiego

w systemie klimatycznym jest ważna, to jednak obecny stan wiedzy nie pozwala jednoznacznie stwierdzać czy mamy do czynienia w ostatnich dziesięcioleciach z trendem stopnia zachmurzenia lub innego parametru opisującego własności optyczno-radiacyjne chmur. Tym samym nie wiemy czy wymuszanie radiacyjne związane z chmurami wysokimi (określone względem referencyjnego okresu czasu) ma niezerową wartość. Sytuację dodatkowo komplikuje oddziaływanie smug kondensacyjnych na chmury naturalne. Smugi kondensacyjnej rozwijają się w atmosferze tylko w warunkach (odpowiednio niska temperatura i wysoka wilgotność względna) które sprzyjają powstawaniu wysokich chmur. Aspekt ten nie jest przedmiotem badań w ramach niniejszego cyklu publikacji. Inaczej rzecz się ma ze smugami kondensacyjnymi, których sama obecność w atmosferze prowadzi do dodatniego antropogenicznego wymuszania radiacyjnego. Rozwój transportu lotniczego obserwowany w ostatnich latach, przyczynia się do wzrostu pokrycia nieboskłonu smugami kondensacyjnymi oraz ich wymuszania radiacyjnego.

Poniżej zamieszczony został krótki opis artykułów charakteryzujących wkład danej pracy w rozwój wiedzy o własnościach optycznych i wymuszaniu radiacyjnym niesferycznych cząstek.

C1 Remiszewska, J., P. J. Flatau, **K. M. Markowicz**, E. A. Reid, J. S. Reid, and M. L. Witek (2007), Modulation of the aerosol absorption and single-scattering albedo due to synoptic scale and sea breeze circulations: United Arab Emirates experiment perspective, *Journal of Geophysical Research*, 112, D05204, doi:10.1029/2006JD007139.

W publikacji wykorzystano nową metodę wyznaczania albedo pojedynczego rozpraszania aerozolu na podstawie równoczesnych pomiarów wielokanałowym nephelometrem oraz aethalometrem. Główny problem w tego typu pomiarach stanowi określenie rozpraszania światła na aerozolu osadzonym na filtrze aethalometru. Przy zastosowaniu dwuwarstwowego modelu optycznego filtra z osadzonym aerozolem wyznaczono parametry optyczne uwzględniając pomiar rozpraszania aerozolu z nephelometru. Na podstawie zbudowanego algorytmu przeanalizowano zależność albeda pojedynczego rozpraszania aerozoli od nocnej i dziennej cyrkulacji bryzowej podczas eksperymentu UAE<sup>2</sup> (United Arab Emirates Unified Aerosol Experiment). Wyniki ponad miesięcznych pomiarów udokumentowały znaczący wpływ cyrkulacji bryzowej na własności optyczne aerozolu będących odzwierciedleniem zmian w transporcie aerozoli oraz procesów emisji i depozycji aerozolu w pobliżu

powierzchni oceanu. Pokazano między innymi, że najwyższe współczynniki absorpcji aerozolu występują w okresie nocnym i w godzinach rannych. Po zmianie cyrkulacji (w godzinach przedpołudniowych) aerozol wykazuje znacząco mniejsze własności absorpcyjne.

C2 Markowicz, K. M., P.J. Flatau, J. Remiszewska, M. Witek, E.A. Reid, J.S. Reid, A. Bucholtz, and B. Holben, 2008: Observations and Modeling of the Surface Aerosol Radiative Forcing during UAE<sup>2</sup>, *Journal of the Atmospheric Sciences*, 65, 2877–2891.

W pracy przedstawiono badania zmienności bezpośredniego wymuszania radiacyjnego aerozoli w rejonie Zatoki Perskiej podczas eksperymentu UAE<sup>2</sup> (United Arab Emirates Unified Aerosol Experiment) w 2005 r. Wykazano wpływ cyrkulacji bryzowej nie tylko na zmienności własności optycznych ale również na wartości wymuszania radiacyjnego. Wyniki obserwacji i symulacji numerycznych pokazały, że wymuszanie radiacyjne podczas bryzy lądowej jest większe (w sensie wartości bezwzględnej) niż podczas bryzy morskiej, co jest związane z niższym albedem pojedynczego rozpraszania. Przyczynia się do tego transport aerozolu pustynnego wykazującego relatywnie niewielkie własności absorpcyjne oraz silnie absorbującego aerozolu antropogenicznego emitowanego z pobliskich szybów naftowych. Pomimo, że redukcja promieniowania słonecznego związana z obecnością aerozolu w tym rejonie świata sięgała 9% to jednak efektywność wymuszania radiacyjnego została odnotowana jako względnie niska ( $-53 \text{ W/m}^2/\tau_{500}$ ) w porównaniu do wartości uzyskanych w innych silnie zanieczyszczonych rejonach świata. Przyczyną tego stanu rzeczy jest wysoka średnia grubość optyczna (0.45 dla 500 nm) i nieliniowa zależność wymuszania radiacyjnego od grubości optycznej.

C3 Markowicz, K. M., P.J. Flatau, A.E. Kardas, J. Remiszewska, K. Stelmaszczyk, and L. Woeste, 2008: Ceilometer Retrieval of the Boundary Layer Vertical Aerosol Extinction Structure. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 25, 928–944.

W pracy tej zaproponowałem nową metodę wyznaczania profilu ekstynkcji aerozolu w oparciu o synergię pomiarów wykonanych ceilometrem i fotometrem słonecznym lub ceilometrem i aethelometrem oraz nephelometrem. Na podstawie przeprowadzonych badań, podczas dwóch międzynarodowych eksperymentów badawczych pokazano, że ceilometr,



pomimo że jest urządzeniem skonstruowanym do monitoringu zachmurzenia, z powodzeniem może być stosowany do pomiarów własności optycznych aerozoli w warstwie granicznej.

W godzinach nocnych ceilometr umożliwia również detekcję aerozoli znajdujących się w środkowej troposferze (np. pyłu pustynnego czy wulkanicznego). Głównym ograniczeniem w wykorzystanym ceilometrze (Vaisala CT25K) była długość fali ok. 905 nm znajdująca się relatywnie blisko szerokiego pasma absorpcji pary wodnej. W związku z tym zaproponowano metodę korekcji sygnału w oparciu o pomiary radiosondażowe. W ramach pracy przeanalizowane zostały trzy metody wyznaczania profilu współczynnika ekstynkcji. Pokazano, że wyznaczony profil ekstynkcji zależy od kształtu cząstek, co jest związane z zmiennością ilorazu lidarowego.

C4 Kardas, A. E., K. M. Markowicz, K. Stelmaszczyk, G. Karasinski, S.P. Malinowski, L. Woeste, C. Hochhertz, 2010: Saharan aerosol sensed over Warsaw by depolarization lidar, *Optica Applicata*, 40, 219-237

Praca zawiera analizę własności optycznych pyłu saharyjskiego obserwowanego nad Warszawę w dniach 13 i 14 kwietnia 2005 roku podczas eksperymentu SAWA (SAharan Dust over Warsaw). Zaproponowano nową metodę wyznaczania profili współczynnika ekstynkcji aerozolu w oparciu o podział atmosfery na trzy lub cztery warstwy. W obrębie każdej z nich iloraz lidarowy jest stały ale może zmieniać się z przejściem do kolejnej warstwy. Dopasowanie ilorazu lidarowego w każdej warstwie jest możliwe na podstawie pomiarów grubości optycznej mierzonej fotometrem słonecznym. Metoda ta jest rozszerzeniem techniki Kletta-Fernalda-Sasano, która zakłada stałość ilorazu lidarowego z wysokością. W przypadku napływu aerozolu pustynnego w środkowej troposferze, który ma znacząco inne własności optyczne od aerozolu znajdującego się w warstwie granicznej, stosowanie klasycznej techniki prowadzi to większych błędów.

W pracy podjęto próbę oszacowania rozmiaru cząstek oraz ich kształtu na podstawie pomiarów stopnia depolaryzacji promieniowania rozproszonego wstecznie oraz spektralnej zmienności współczynnika ekstynkcji. Relatywnie wysokie wartości wykładnika Ångströma dla aerozolu pustynnego świadczą o obecności cząstek o niewielkich rozmiarach w zakresie od 0.15 do 0.3  $\mu\text{m}$ . Niewielkie rozmiary cząstek pyłu saharyjskiego obserwowane w Polsce są związane z efektywną sedymentacją podczas długiego transportu aerozolu o średnicy

większej od jednego mikrometra. Oszacowany, przy założeniu modelu sferoidalnych cząstek piasku, stosunek półosi elipsoid mieścił się w zakresie 0.6-0.8 lub 1.3-2.2. Każdy z tych zakresów generuje podobny współczynnik depolaryzacji i bez dodatkowych informacji nie ma możliwości wyboru właściwego wyniku.

C5 Markowicz, K. M., T Zielinski, S. Blindheim, M. Gausa, A. K. Jagodnicka, A. Kardas, W. Kumala, S. P. Malinowski, T. Petelski, M. Posyniak, T. Stacewicz (2011), Study of vertical structure of aerosol optical properties by sun photometers and ceilometer during macron campaign in 2007, *Acta Geophysica, in press.*

W pracy przedstawiono wyniki uzyskane podczas kampanii pomiarowej MACRON (Maritime Aerosol, Clouds and Radiation Observations in Norway) odbywającej się lipcu i sierpniu 2007 roku w północnej Norwegii. Szczegółowo dyskutowane są dwa przypadki obejmujące napływ aerozolu z rejonów północnej Afryki i Europy oraz oceanicznej masy powietrza. Obserwacje wykonane w dniach 7-8 sierpnia 2007 r. przy użyciu ceilometru wsparte analizą wyników symulacji numerycznych modelem transportu zanieczyszczeń NAAPS (Navy Aerosol Analysis and Prediction System) oraz modelem trajektorii wstecznych HYSPLIT potwierdziły transport pyłu saharyjskiego oraz siarczanów z Europy Zachodniej. W tym okresie zarejestrowano bardzo wysokie jak na Arktykę wartości grubości optycznej aerozolu przekraczające 0.4 (dla długości fali 500 nm), (to wartości wysokie nawet w Europie Środkowej). Najwyższe wartości współczynnika ekstynkcji  $0.05-0.08 \text{ km}^{-1}$  (1064 nm) odnotowano na wysokości 1.5 km. Pomiary grubości optycznej aerozolu prowadzone tuż nad powierzchnią morza oraz na wysokości stacji Alomar (380 m) pozwoliły na oszacowanie zmian w rozkładzie wielkości cząstek. W najniższej warstwie dominował aerozol mikrometrowy (coarse mode, mod gruby), zaś w kolumnowym rozkładzie wielkości dominował aerozol w modzie akumulacyjnym. Małe rozmiary aerozolu w kolumnowym rozkładzie świadczą o sedymentacji dużych cząstek podczas bardzo długiego transportu aerozolu z północnej Afryki i Europy Zachodniej. Poza tym epizodem, gdy dominował napływu oceanicznej masy powietrza obserwowano znacząco inne własności optyczne aerozolu. Wartości grubości optycznej wynosiły ok. 0.06-0.08 (500 nm), zaś aerozol powyżej warstwy granicznej obecny był w ilościach śladowych. Efektywny promień rozkładu wielkości aerozolu w najniższej warstwie (0-380 m) zmieniał się od 0.4 do 1.7  $\mu\text{m}$  podczas gdy ten sam parametr liczony na podstawie kolumnowego rozkładu wielkości znajdował się

w przedziale 0.17-0.27  $\mu\text{m}$ . Znaczne różnice w obu wielkościach świadczą o produkcji aerozolu morskiego co potwierdzają również dane meteorologiczne o prędkości wiatru.

W artykule przedstawiono metodę wyznaczania współczynnika ekstynkcji aerozolu w oparciu o pomiary fotometrem słonecznym prowadzone na różnych wysokościach (0-380 m.n.p.m). Metoda ta zastosowana do pomiarów profilu grubości optycznej aerozolu fotometrem Microtops oraz do stacjonarnych pomiarów współczynnika absorpcji przyrządem Particle Soot/Absorption Photometer (PSAP) pozwoliła na wyznaczenie albedo pojedynczego rozpraszania ze stosunkowo niewielkim błędem. Wyznaczone w ten sposób albedo pojedynczego rozpraszania było o kilka procent mniejsze podczas epizodów transportu aerozolu z daleka w porównaniu do typowego napływu morskiej masy powietrza.

C6 Markowicz, K. M. ,T. Zielinski, A. Pietruczuk, M. Posyniak, O. Zawadzka, P. Makuch, I.S. Stachlewska, A.K. Jagodnicka, T. Petelski, W. Kumala, P. Sobolewski, T. Stacewicz, Remote sensing measurements of the volcanic ash plume over Poland in April 2010, *Atmospheric Environment*, In Press, 10.1016/j.atmosenv.2011.07.015.

W pracy przedstawiono wyniki obserwacji własności optycznych aerozolu wulkanicznego nad Polską po wybuchu wulkanu Eyjafjöll na Islandii w kwietniu 2010 r. Przeprowadzono analizę wyników pomiarów przeprowadzonych w Laboratorium Transferu Radiacyjnego Instytutu Geofizyki UW w Warszawie, w Laboratorium Mobilnym Instytutu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk w Sopocie, w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym Polskiej Akademii Nauk w Belsku oraz w prywatnej stacji badawczej SolarAOT w Strzyżowie. Jednym z głównym wyników było stwierdzenie, że koncentracja pyłu wulkanicznego nad Polską tych lokalizacjach była ok. rząd wielkości mniejsza niż  $2 \text{ mg/m}^3$ , którą uznaje się za wartość powyżej której ruch lotniczy powinien być wstrzymany. Oszacowana grubość optyczna aerozolu wulkanicznego osiągała maksymalnie 0.05 dla 500 nm i 0.03 dla 1064 nm. Ekstynkcja aerosolu na wysokości 4-5.5 km sięgała wartości ok.  $0.06\text{-}0.08 \text{ km}^{-1}$  dla długości fali 532 nm.

W artykule krytycznie odniesiono się do wyników badań Ansmann i in., (2010) opublikowanych w renomowanym czasopiśmie [Geophysical Research Letters](#). W publikacji tej zastosowano błędną metodologię przetwarzania danych z fotometru słonecznego oraz lidar. Wykorzystano dane fotometryczne z sieci AERONET z tzw. poziomu 1.0 bez odrzucenia przypadków chmurowych. Skutkiem tego były wyniki świadczące o wielokrotnie

wyższej zawartości pyłów wulkanicznych nad południowo-wschodnimi Niemcami (Monachium i Lipsk) w niż te obserwowane w Polsce. Błędy potwierdziły się gdy w bazie danych sieci AERONET zostały opublikowane ostateczne dane o grubości optycznej aerozolu (poziom 2.0), których wartości zbliżone są do naszych rezultatów z terenu Polski.

C7 Markowicz, K. M., and M. L. Witek (2011), Simulations of Contrail Optical Properties and Radiative Forcing for Various Crystal Shapes, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 50(8), 1740-1755.

Artykuł jest poświęcony badaniom własności optycznych kryształów lodu w smugach kondensacyjnych. Podstawowe własności optyczne kryształów lodu zostały wyznaczone przy użyciu metody geometrycznej ray-tracing w zakresie promieniowania krótkofalowego oraz metody dyskretnych dipoli DDSCAT (Discrete Dipole Approximation for Scattering and Absorption of Light by Irregular Particles) w zakresie długofalowym. Pokazano dobrą zgodność obu metod w zakresie środkowej podczerwieni (3-8  $\mu\text{m}$ ), co umożliwiło zszycie wyników z obu metod i zdefiniowanie własności optycznych kryształów z całym zakresie promieniowania krótkofalowego i długofalowego. Uzyskane rezultaty pokazały, że pomimo losowego zorientowania kryształów, różnice w ich własnościach optycznych sięgają wartości 0.1 dla parametru asymetrii i albedo pojedynczego rozpraszania co jest równoznaczne z różnicami na poziomie od kilku do kilkunastu procent. Konsekwencją tego faktu są różnice w wymuszaniu radiacyjnym smug kondensacyjnych sięgające 50%. Obserwacje kryształów lodu podczas rozwoju smug kondensacyjnych pokazują ich ewolucje kształtu. Smugi w początkowej fazie rozwoju składają się z kryształów zbliżonych do kształtu sferycznego, zaś w późniejszej fazie dominują kryształy heksagonalne, stąd powszechnie stosowane uproszczenia w parametryzacji własności optycznych smug kondensacyjnych są zbyt daleko idące i prowadzą do znacznych błędów podczas wyznaczania wymuszania radiacyjnego.

C8 Markowicz, K. M., M. Witek, Sensitivity study of the global contrails radiative forcing due to particle shape. *Journal of Geophysical Research*, doi:10.1029/2011JD016345, in press.

Publikacja jest nieformalnie drugą częścią artykułu C7 i dotyczy szacowania niepewności wymuszania radiacyjnego smug kondensacyjnych w skali globu. W pracy C7 analizowano jedynie lokalne wymuszanie radiacyjne smug dla wybranych położeń słońca i albedo podłoża,

zaś w omawianej publikacji wykorzystano skonstruowany wcześniej model off-line do symulacji rozkładów strumieni radiacyjnych dla całej Ziemi. Przeanalizowano wpływ kształtu kryształów lodu, grubości optycznej, wysokości występowania smug kondensacyjnych oraz naturalnego zachmurzenia na wymuszanie radiacyjne. Znajomość dwóch pierwszych parametrów jest słaba ze względu na niewielką ilość wiarygodnych obserwacji co prowadzi do znacznej niepewności. Oszacowano, że niepewność grubości optycznej smug kondensacyjnych na poziomie 0.1 względem wartości 0.3 ( $0.3 \pm 0.1$ ) prowadzi do błędów w wymuszaniu radiacyjnym na poziomie 25-28%. Podobnie rzecz się ma z kształtem kryształków lodu. Stosunek odchylenia standardowego obliczonego dla 10ciu różnych kształtów w stosunku do wartości średniej wynosi 0.2, 0.14 oraz 0.23 odpowiednio dla promieniowania krótkofalowego, długofalowego oraz ich sumy. W skrajnych przypadkach wymuszanie radiacyjne pomiędzy kryształami sięgało ponad 50% dla sumy promieniowania krótkofalowego i długofalowego. Pokazano również, że chmury naturalne w skali całego globu mają niewielki wpływ na sumaryczne wymuszanie radiacyjne związane z promieniowaniem krótkofalowym i długofalowym. Jest to jednak fakt dość przypadkowy i wynika z wartości grubości optycznej smug kondensacyjnych oraz rozkładu pionowego zachmurzenia. W rejonach świata, gdzie dominuje niskie bądź wysokie zachmurzenie wpływ chmur nie jest już tak dobrze zbilansowany.

Średnie globalne wymuszanie radiacyjne smug kondensacyjnych oszacowane na podstawie symulacji wyniosło  $11.1 \pm 2.1 \text{ mW/m}^2$ . Jest to wartość stosunkowo niewielka, w szczególności jeśli porówna się ją do maksymalnego wymuszania radiacyjnego, które w niektórych rejonach Stanów Zjednoczonych czy Europy Zachodniej może sięgać 300-400  $\text{mW/m}^2$ .

Warszawa, dnia 1 grudnia 2011

Krzysztof Markowicz  
*Krzysztof Markowicz*