

Załącznik 2 do wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego - PL

AUTOREFERAT

podsumowanie dokonań zawodowych

Andrzej Wyszogrodzki

Institut Meteorologii i Gospodarki Wodnej
Państwowy Instytut Badawczy

Kwiecień 2017

Zgodne z
„ROZPORZĄDZENIE MINISTRA NAUKI I SZKOLNICTWA WYŻSZEGO” from 26 September 2016.
„W sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora”, (Dz. U. z 2016 r., poz. 1586)

Spis treści

Spis treści	2
1. Życiorys	3
2. Przebieg pracy naukowej	4
2.1 Przed doktoratem.....	4
2.2 Po uzyskaniu stopnia doktora.....	5
2.2.1 Pracownik naukowo techniczny w IGF UW (01-06 / 2001).....	5
2.2.2 Staż podoktorski w LANL (07/2001 - 08/2004)	5
2.2.3 Staż naukowy w IBM (08/2004 - 09/2005).....	5
2.2.4 Praca naukowa w NCAR (09/2005 - 08/2013).....	6
2.2.5 Stanowisko kierownicze w IMGW-PIB (od 09/2013)	7
2.3 Bibliografia do rozdziału 2.....	7
3. Osiągnięcie będące podstawą ubiegania się o stopień doktora habilitowanego.....	9
3.1 Kontekst i tło naukowe badań	10
3.2 Rozwój anelastycznych metod w modelu numerycznym EULAG.....	11
3.3 Weryfikacja modelu numerycznego EULAG i jego zastosowanie do przepływów geofizycznych o dużej rozpiętości skal.....	13
3.4 Aspekty związane z wysoką wydajnością obliczeniową.....	15
3.5 Popularyzacja modelu i wsparcie dla użytkowników.....	16
3.6 Dodatkowa bibliografia rozdziału 3, znaczących osiągnięć naukowych.....	16
4. Inne osiągnięcia związane z głównym osiągnięciem naukowym.....	17
4.1 Modelowanie transportu i dyspersji w przepływach atmosferycznych.....	17
4.2 Przepływy w miejskich obszarach zabudowanych.....	17
4.3 Badania płytkiej konwekcji cumulusowej i procesów opadu.....	19
4.4 Bibliografia związana z osiągnięciami w rozdziale 4	21

1. Życiorys.

Andrzej Aleksander Wyszogrodzki
Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy
Ul. Podleśna 61, Warszawa, Polska

EDUKACJA

- 1996 Mgr fizyki w zakresie geofizyki, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski.
Praca magisterska: "Numeryczny model przepływu powietrza atmosferycznego w obszarze z topografią. Góry Izerskie". Promotor: dr Szymon P. Malinowski.
- 2001 Dr nauk fizycznych w zakresie fizyki, Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski.
Praca doktorska: "Wpływ procesów falowych w atmosferze na strukturę planetarnej warstwy granicznej". Promotor: dr hab. Szymon P. Malinowski .

HISTORIA ZATRUDNIENIA

- 2013-obecne Kierownik zakładu Numerycznych Prognoz Meteorologicznych COSMO, Centrum Meteorologicznej Osłony Kraju (CMOK), Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (IMGW-PIB), Warszawa, Polska.
- 2005-2013 Project Scientist, National Center for Atmospheric Research (NCAR), Boulder, CO, USA.
- 2008-2011 Researcher, Science and Technology in Atmospheric Research (STAR), Boulder, USA.
- 2004-2005 Postdoctoral Fellowship: Biomolecular Dynamics and Scalable Modeling Research Division at Thomas J. Watson Research Center, IBM, Yorktown Heights, NY, USA.
- 2001-2004 Postdoctoral Fellowship: Institute for Geophysics and Planetary Physics (IGPP)/Earth and Space Sciences Division (EES), Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, USA.
- 2001 Pracownik naukowo-techniczny, Zakład Fizyki Atmosfery, Instytut Geofizyki (IGF), Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, Polska.

WIZYTY NAUKOWE

- 2011 Noveltis, Toulouse, France. Współpraca z dr. Jean-Francois Vinuesa.
- 2010 Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW), Warszawa, Polska.
- 2005 Argonne National Laboratory, Argonne, IL, USA.
- 2000, 2001, 2005 National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA.
DOE/CHAMMP program: "Forward-In-Time Differencing for Shallow Fluid Flows on the Sphere". Współpraca z dr. Piotrem Smolarkiewiczem.
- 2000 ECMWF, Reading, England. Development of parallel version of the model in spherical geometry on Fujitsu Vpp700. Współpraca z dr. Piotrem Smolarkiewiczem.
- 1999 DLR (Institut für Physik der Atmosphäre), Oberpfaffenhofen, Niemcy.
"DLR Wake Vortex Project". Współpraca z dr. Andreasem Dornbrackiem.
- 1999 Physics Department of UMIST, Manchester, UK. Computations of moist airflows over Snowdon Mountain. Współpraca z dr. Anthony Dore.
- 1997-1998 NCAR, Mesoscale and Microscale Meteorology (MMM) Division, Boulder, CO, USA;
DOE/CHAMMP "Forward-In-Time Differencing for Shallow Fluid Flows on the Sphere"

2. Przebieg pracy naukowej

2.1 Przed doktoratem

Moja praca zawodowa rozpoczęła od uzyskania stopnia **magistra** w 1996 roku w Zakładzie Fizyki Atmosfery (ZFA) **Instytutu Geofizyki**, na **Wydziale Fizyki (IGF)**, **Uniwersytetu Warszawskiego (UW)**. W ramach **pracy magisterskiej** pt. "Numeryczny model atmosferycznego powietrza nad topografią: Góry Izerskie" wykonałem symulacje suchych i wilgotnych przepływów orograficznych nad wyidealizowaną topografią oraz realistyczną rzeźbą terenu Gór Izerskich. Badania prowadzone były przy wykorzystaniu numerycznego modelu przepływów geofizycznych o nazwie EULAG. Model ten rozwiązuje zestaw równań Naviera-Stokesa w przybliżeniu anelastycznym (nieelastycznym). Wyniki mojej pracy magisterskiej zostały przedstawione w dwóch warsztatach naukowych: "Klimatyczne aspekty ochrony środowiska w obszarach górskich" w Karpaczu (Polska, 1995) oraz na "Międzynarodowej letniej szkole meteorologicznej, Eta - model" w Krivaja (Jugosławia, 1996). W czasie studiów magisterskich uczestniczyłem w polowych eksperymentach geofizycznych: pomiarach sejsmicznych profilu TTZ (Tessyre'a-Tornquista Zone) trans-europejskiej strefy skorupy ziemskiej [F1] (1993); pomiarach LIDAR-owych rozkładu ozonu nad doliną Kamieńczyka [F2] (Karpacz, 1996); oraz pomiarach temperatury w chmurach cumulus za pomocą superszybkiego termometru oporowego zamontowanego na motoszybowcu [F3] (Kętrzyn, Polska, 1996).

W 1996 r. rozpocząłem **studia doktorskie** w IGF UW. Moja praca magisterska stanowiła wkład w popularyzację modelowania procesów atmosferycznych w Polsce i znalazła uznanie na arenie międzynarodowej. Skutkiem tego było zaproszenie do Narodowego Centrum Badań Atmosfery (NCAR, Boulder, USA) gdzie pracowałem naukowo na stażu w latach 1997-98. Wyjazd odbył się w ramach programu naukowego Departamentu Energii (DOE): "*Forward-In-Time Differencing for Shallow Fluid Flows on the Sphere*", przy współpracy z dr. Piotrem Smolarkiewiczem z NCAR. Wizyta zaowocowała dwoma publikacjami o propagacji i załamaniu się atmosferycznych fal grawitacyjnych w stratosferze [A1, A2]. Po powrocie z tej wizyty naukowej brałem udział w kilku międzynarodowych projektach: w 1999 r. zostałem zaproszony przez dr. Andreasa Dörnbracka do Institut Für Physik Der Atmosphäre (DLR, Niemcy) do pracy nad przepływami turbulentnymi; a w 1999 roku przez dr. Anthonyego Dore do katedry fizyki w Manchester Institute of Science and Technology (UMIST, Manchester, UK) do badań przepływu wilgotnego powietrza przez pasmo górskie Snowdon. W roku 2000 zostałem zaproszony do centrum prognoz średnioterminowych - European Center for Medium Range Weather Forecasting (ECMWF, Reading, UK) do współpracy z dr. Smolarkiewiczem.

W 2001 roku **obroniłem pracę doktorską** poświęconą procesowi wzbudzenia przez konwekcję warstwy granicznej atmosfery (WGA) fal grawitacyjnych w atmosferze powyżej oraz oddziaływaniu pomiędzy komórkami konwekcyjnymi, falami propagującymi się w warstwie inwersji ponad WGA oraz chmurami cumulus w dolnej troposferze [N1]. Mechanizmy sprzężenia zwrotnego pomiędzy falami i konwekcją badałem za pomocą symulacji numerycznych oraz z wykorzystaniem teorii liniowej. Efekty rezonansu fal definiują typ przepływu wewnątrz WGA: komórki konwekcji termicznej lub zorganizowane uliczki chmurowe. Wyniki zostały przedstawione na konferencjach EGU (Nicea, Francja) [K1] oraz ICCP (Reno, USA) [K2].

W trakcie studiów doktoranckich byłem również zaangażowany w wewnętrzne projekty zakładu fizyki atmosfery. We współpracy z dr. Szymonem Malinowskim przygotowałem pierwsze symulacje dotyczące turbulencyjnego mieszania w małej skali na granicy chmury z otoczeniem odpowiadające eksperymentom przeprowadzanym w laboratoryjnej komorze chmurowej. W tym celu uruchomiłem model EULAG na komputerach w Interdyscyplinarnym

Centrum Modelowania (ICM, UW); oraz zaimplementowałem postprocessing oparty na systemach wizualizacji i analizy danych: AVS, Matlab i Vis5D. We współpracy z ICM i Politechniką Warszawską byłem zaangażowany w projekt pt. „*Precision Weather Forecasting System for Multimodal Transport*” (PRESTO) - prognozę warunków atmosferycznych dla pilotów małych statków powietrznych, lotnictwa komercyjnego i balonów. Przeprowadziłem symulacje pola konwekcji chmurowej, w obszarze, w którym warunki brzegowe pochodziły z modelu prognozy pogody Unified Model (UM-PL) działającego operacyjnie w ICM [N2].

2.2 Po uzyskaniu stopnia doktora.

2.2.1 Pracownik naukowo techniczny w IGF UW (01-06 / 2001)

Tuż przed ukończeniem doktoratu, od stycznia do czerwca 2001 r. zostałem zatrudniony jako pracownik naukowo techniczny w IGF UW, kontynuując współpracę z dr. Szymonem Malinowskim oraz dr. Hanną Pawłowską w projekcie poświęconym numerycznemu badaniu pola konwekcji i chmur stratocumulus. W tym krótkim okresie przygotowałem pierwszą konfigurację symulacji wyidealizowanych chmur stratocumulus, która była dalej rozwinięta przez zespół IGF-UW i pomyślnie wdrożona w kolejnych projektach.

2.2.2 Staż podoktorski w LANL (07/2001 - 08/2004)

Po sześciu miesiącach od obrony pracy doktorskiej otrzymałem propozycję odbycia stażu **podoktorskiego** w **Los Alamos National Laboratory** (LANL, Nowy Meksyk, USA). W ramach stażu pracowałem od lipca 2001 do sierpnia 2004. W tym czasie, we współpracy z dr. Lenem Margolinem (LANL) oraz dr. Smolarkiewiczem (NCAR), badałem właściwości niejawnego modelowania procesów turbulencji (ang. *Implicit Large Eddy Simulations* - ILES) w przepływach o wysokich liczbach Reynoldsa. Ta pionierska praca została opublikowana w [B1] i jej wyniki zostaną opisane bardziej szczegółowo w sekcji 3.2. We współpracy z dr. Balu Nadiga (LANL) pracowałem nad schematami iteracyjnymi algorytmów rozwiązujących eliptyczne równania Poisson'a [N3] na komputerach równoległych. Ważnym osiągnięciem tego projektu była praca z dr. Johnem Reiserem (LANL) i jego współpracownikami nad rozwojem modelu geofizycznego HIGRAD, rozwiązującego ściśle równania Naviera-Stokesa, przy wykorzystaniu metod typu *Jacobian-Free Newton-Krylov* (JFNK) [B3]. Model ten był wykorzystywany do badania ekstremalnych zjawisk atmosferycznych takich jak huragany [B3]. Wersja modelu HIGRAD połączona z modelem chemii (uwzględniającym procesy spalania) - FIRETEC została zaprojektowana do prognozy rozwoju pożarów lasu.

Pracując w LANL byłem także zaangażowany w rozwój metod automatycznej adaptacji siatki obliczeniowej (ang. *Adaptive Mesh Refinement* - AMR) poprzez implementację pakietu PARAMESH w modelu HIGRAD. Celem tego zadania było opracowanie modelu globalnej cyrkulacji atmosfery Marsa. W wyniku tego projektu planowano wykorzystanie solvera JFNK z możliwością lokalnego zagnieżdżenia siatki obliczeniowej, tak aby pokryć interesujące obszary na Marsie. Zagadnieniami fizycznymi, do których planowano wykorzystanie tego modelu były np. kwestie ilości pary wodnej transportowanej przez huragany w skali globu; lub też zmian składu gazu w regionach polarnych pochodzących z zamrożonego dwutlenku węgla. W sierpniu 2004, zanim projekt został zakończony, opuściłem jednak LANL.

2.2.3 Staż naukowy w IBM (08/2004 - 09/2005)

Po zakończeniu stażu podoktorskiego w LANL, zostałem zatrudniony jako pracownik naukowy **T.J. Watson Research Center** - badawczo rozwojowym ośrodkiem należącym do

International Bussines Machines (IBM, Yorktown Heights, NY, USA). Od zarania ery komputerowej firmy rozwijające nowe architektury komputerowe prześcigały się w stworzeniu najszybszego i najbardziej wydajnego komputera na świecie. W roku 1993 uruchomiono projekt o nazwie "Top 500" (www.top500.org), który to śledzi postępy w nowych trendach i wskazuje najnowocześniejsze w danym czasie rozwiązania. W 2004r. IBM (największa na świecie korporacja informatyczna), zbudowała superkomputer o nazwie BlueGene wykorzystujący 64 000 energooszczędnych rdzeni obliczeniowych. System ten zajął w tamtym czasie zaszczytne pierwsze miejsce na liście Top500. W celu wykazania wydajności tego systemu, IBM zatrudnił mnie jako specjalistę dziedzinach: High Performance Computing (HPC) i w fizyce atmosfery. W zakresie moich zadań, we współpracy z NCAR oraz Uniwersytetu Colorado (CU) w Boulder leżał rozwój nowego rdzenia dynamicznego modeli klimatu o nazwie High Order Multi-Scale Modeling Environment (HOMME). W szczególności zajmowałem się dostosowaniem algorytmów modelu HOMME do środowiska superkomputera BlueGene w celu osiągnięcia jak najwyższej wydajności obliczeniowej i skalowalności [B4].

2.2.4 Praca naukowa w NCAR (09/2005 - 08/2013)

Po zakończeniu stażu w IBM, w latach 2005-2012 zostałem zatrudniony na stanowisku naukowym (ang. *project scientist*) w NCAR w dziale **Research Applications Laboratory (RAL)**, sekcji **National Security Applications Program (NSAP)**. W tym czasie byłem także zatrudniony na część etatu w instytucie **Science and Technology in Atmospheric Research (STAR)** w Boulder. We wrześniu 2012 zmieniłem przynależność organizacyjną, przechodząc z RAL do zespołu **Institute for Mathematics Applied to Geophysics (IMAGE)** wchodzącego w skład działu **Computational & Information Systems Laboratory (CISL)**.

Od przybycia do NCAR byłem zaangażowany w projekty związane z aplikacjami oraz w badania podstawowe sponsorowane przez rządowe agencje: *Department of Energy (DOE)*, *Department of Defense (DOD)*, *Defense Treat Reduction Agency (DTRA)*, oraz *Federal Aviation Application (FAA)*. Znaczna część mojej działalności poświęcona była modelowaniu procesów transportu i dyspersji (T&D) pasywnych związków gazowych w stratyfikowanych przepływach WGA oraz weryfikacji wyników modelowania w oparciu teorię i pomiary. Badałem także fizyczne charakterystyki WGA, przepływy powietrza w obszarach miejskich o skomplikowanej geometrii (przy wykorzystaniu metody typu *Immersed Boundary- IMB*), generację i dyssypację wirów powstających na końcach skrzydeł samolotu, cyrkulacje termiczne w obszarach górskich, czy też procesy chmurowe i powstawanie opadów. Dla przykładu w projekcie DTRA6.1 badałem wpływ niejednorodności podłoża na struktury konwekcyjne WGA i związane z nimi procesy chmurowe [K3]. Zaimplementowałem przy tym nowatorskie techniki zadawania turbulencyjnych warunków brzegowych dla przepływu konwekcyjnego WGA [K4]. Dokładniejszy opis powyższych prac został zamieszczony w rozdziałach 3 i 4, które opisują moje **znaczące osiągnięcia naukowe**.

Część mojej działalności była również dedykowana prowadzeniu niezależnej weryfikacji prognoz pogody wykonywanych modelem *Weather Research and Forecasting (WRF)*, takich jak np. instalacja dla rejonu Arabii Saudyjskiej, prognoza wysokiej rozdzielczości dla obszaru Wyoming [N4, N5] oraz ocenie projektu „Airdat”, gdzie wykorzystano pomiary parametrów meteorologicznych z floty samolotów komercyjnych (*Tropospheric Airborne Meteorological Data Reporting - TAMDAR*) w systemie asymilacji danych do modelu WRF (ang. *Real-Time Four-Dimensional Data Assimilation - RTFDDA*) [B5]. W ostatnim roku mojej pracy w NCAR (IMAGE/CISL), byłem zaangażowany w projekt sponsorowany przez *National Science Foundation (NSF)* o nazwie "*A multiscale unified simulation environment for geo-scientific applications*", w którym zajmowałem się rozwojem wersji modelu EULAG na siatkach niestrukturalnych, jego zrównoległaniu, oraz testom sprawdzalności.

2.2.5 Stanowisko kierownicze w IMGW-PIB (od 09/2013)

We wrześniu 2013 r. powróciłem do Polski i rozpocząłem pracę w Instytucie **Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowym Instytucie Badawczym** (IMGW-PIB) jako kierownik **Działu Numerycznych Prognoz Meteorologicznych COSMO**, obecnie będącej w składzie **Centrum Meteorologicznej Osłony Kraju** (CMOK). Jestem odpowiedzialny za rozwój oraz utrzymywanie operacyjnego systemu numerycznych prognoz meteorologicznych COSMO, oraz powiązanych modeli interdyscyplinarnych (np. modele nowcastingu, hydrologiczne, stanu morza i transportu zanieczyszczeń) czy też systemów asymilacji, weryfikacji i analizy danych. Do moich zadań należy zapewnienie wsparcia działalności badawczej i operacyjnej innych komórek instytutu. Borę także regularnie udział w przygotowywaniu nowych projektów naukowych finansowanych przez instytucje zewnętrzne (NCBiR, NCN, Bank Światowy) jak i ze środków własnych instytutu, przygotowaniu i dystrybucji produktów prognostycznych dla użytkowników wewnętrznych i zewnętrznych (ośrodki akademickie i klienci komercyjni).

Od 2014 r., jako oficjalny przedstawiciel IMGW-PIB, jestem członkiem Komitetu Sterującego (STC) konsorcjum COSMO. Uczestniczę w pracach nad planowaniem i zarządzaniem najważniejszymi obszarami działalności konsorcjum. Pod koniec 2016 roku zostałem wybrany na przewodniczącego komitetu sterującego konsorcjum na dwuletnią kadencję na lata 2017-2018. Poza obowiązkami wynikającymi z działań statutowych współpracuję z wewnętrznymi i zewnętrznymi ośrodkami naukowymi w ramach badań podstawowych [B6, K7], rozwijaniu metod numerycznych dla nowoczesnych architektur obliczeniowych [N6], oraz nad aplikacjami modeli numerycznych [K5, K6, K8, N7].

2.3 Bibliografia do rozdziału 2.

Publikacje w czasopismach z bazy JCR, przed doktoratem:

A1 Prusa, J.M., P.K. Smolarkiewicz, and A.A. Wyszogrodzki, 1999: Massively parallel computations on gravity wave turbulence in the Earth's atmosphere. *SIAM News*, **32**, 10-13.

A2 Prusa, J.M., P.K. Smolarkiewicz, and A.A. Wyszogrodzki, 2001: Simulations of gravity wave induced turbulence using 512 PE CRAY T3E. *Int. J. Appl. Math. Comp. Sci.*, **11**, No. 4, 101-115.

Publikacje w czasopismach z bazy JCR, po doktoracie:

B1 Margolin, L.G., P.K. Smolarkiewicz, and A.A. Wyszogrodzki, 2002: Implicit turbulence modeling for high Reynolds number flows. *J. Fluid Eng.*, **124** (4), 862-867.

B2 Reisner, J., A. Wyszogrodzki, V. Mousseau, and D. Knoll, 2003: An efficient physics-based preconditioner for the fully implicit solution of small-scale thermally driven atmospheric flows. *J. Computat. Phys.*, **189**, 30-44.

B3 Reisner, J., V. Mousseau, A. Wyszogrodzki, and D. Knoll, 2005: An Implicitly balanced hurricane model with physics-based preconditioning. *Mon. Wea. Rev.*, **133** (4), 1003-1022.

B4 Bhanot G., J.M. Dennis, J. Edwards, W. Grabowski, M. Gupta, K. Jordan, R.D. Loft, J. Sexton, A. St-Cyr, S.J. Thomas, H.M. Tufo, T. Voran, R. Walkup, and A.A. Wyszogrodzki, 2008: Early Experiences with the 360TF IBM BlueGene/L Platform. *Int.J. of Computational Methods*, **5**, 237-253.

B5 Wyszogrodzki A.A., Y. Liu, G. Roux, Y. Zhang, P. Childs, N. Jacobs., and T. T. Warner, 2013: Analysis of the surface temperature and wind forecast errors of the NCAR-AirDat operational CONUS 4km RTFDFA forecasting system. *Meteorol. Atmos. Phys.*, **122** (3), 125-143.

B6 Wyszogrodzki A.A., and L.L. Loboeki, 2016: Towards Parameterization of the Atmospheric Surface Layer over Inclined Terrain for Use in Non-Hydrostatic Models: Reference Tests. *Met. Zeit.*, in review.

Inne publikacje: czasopisma nie będące w bazie JCR, raporty i monografie

N1 Wyszogrodzki, A. A., 2001: "Wpływ procesów falowych w atmosferze na strukturę planetarnej warstwy granicznej. Rozprawa doktorska, Uniwersytet Warszawski, Wydział Fizyki, Instytut Geofizyki, 99 pp.

N2 Wyszogrodzki, A.A., 2002: Numerical simulations of the evolution of a three-dimensional convection field. Research works based on the ICM's UMPL Numerical Weather Prediction System. Warsaw University Print, 35-52.

N3 Wyszogrodzki, A.A. 2003: Parallel iterative methods for solving 2D Poisson equation in a barotropic model. LA-UR-03-4463, 25 pp.

N4 Wyszogrodzki A. 2008: MM5 based RTFDFA system over Arabian Peninsula. "Kingdom of Saudi Arabia Assessment of Rainfall Augmentation" (KSAARA) project. NCAR internal report, 30pp.

N5 Wyszogrodzki A. 2008: Evaluation of the RT-FDDA system for the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP). NCAR internal report ,25pp.

N6 Rosa B., L. Szustak, A. Wyszogrodzki, K. Rojek, D. Wójcik and R. Wyrzykowski, 2015: Adaptation of Multidimensional Positive Definite Advection Transport Algorithm to modern high-performance computing platforms, *International Journal of Modeling and Optimization*, 5 (3), 171-176.

N7. Duniec G., W. Interewicz, A. Mazur, and A. Wyszogrodzki, 2016: Operational Setup of the COSMO-based, Time-lagged Ensemble Prediction System at the IMWM - NRI. MHW, 00057-2016-01, accepted.

Prezentacje i artykuły konferencyjne

K1 Wyszogrodzki, A.A., 2000: The influence of internal gravity waves on convection and clouds in the lower atmosphere. Proceedings of European Geophysical Society, XXV General Assembly, 24-29 April 2000, Nice, France.

K2 Wyszogrodzki, A.A., 2000: The influence of internal gravity waves on convection and clouds in the lower atmosphere. Proceedings 13th International Conference on Clouds and Precipitation 14-18 August 2000, Reno, Nevada, USA.

K3 Hacker, J., and A. Wyszogrodzki, 2006: The Relationship between PBL Winds and Scale-Dependent Uncertainty in Land-Surface Heterogeneity. *Eos Trans. AGU*, 87(52), Suppl., Abstract A32D-06. Fall Meeting, 11-15 December, 2006, San Francisco, California, USA.

K4 Wyszogrodzki, A.A., J.P. Hacker, J.C. Weil, 2008: Turbulent lateral boundary conditions for LES of heterogeneous boundary layers. *Chemical and Biological Defense: Physical Science and Technology Conference*, 17-21 November 2008, 3 pp, New Orleans, LA, USA.

K5 Linkowska, J. A. Mazur, A. Wyszogrodzki, "Verification of COSMO model over Poland", EGU General Assembly 2014, 27April - 2 May, 2014, Vienna, Austria.

K6 Korycki, M., L. Łoboeki, and A.A Wyszogrodzki, "Application of EULAG to the simulation of flow through urban structure in Warsaw", 4th Int. EULAG Workshop, Oct. 20-24, 2014, Mainz, Germany.

K7. Wyszogrodzki A.A., and L. Łobocki "Surface-layer flux-gradient relationships over inclined terrain: implementation in EULAG", 4th EULAG Workshop, October 20-24, 2014, Mainz, Germany.

K8 Starosta K., and A. Wyszogrodzki, "Analiza wiatru w Warszawie pod kątem wykorzystania energii wiatru w przestrzeni miejskiej", V Ogólnopolska Konferencja, "Klimat i bioklimat miast", 21 – 23 września 2015 r. Łódź, Polska.

Publikacje innych autorów podsumowujące eksperymenty polowe, w których uczestniczyłem

F1 Grad M., Janik T., Yliniemi J., Guterch A., Luosto U., Tiira T., Komminaho K., Oeroda P., Höing K., Makris J. And Lund C.-E., 1999: Crustal structure of the Mid-Polish Trough beneath the Teisseyre-Tornquist Zone seismic profile. *Tectonophysics*, **314**, 145–160.

F2 Zwoździak A., J., Zwoździak A., Sówka I., Ernst K., Stacewicz T., Szymański A., Chudzyński S., Czyżewski A., Skubiszak W., Stelmaszczyk K, 2001: Some results on the ozone vertical distribution in atmospheric boundary layer from LIDAR and surface measurements over the Kamińczyk Valley, Poland, *Atmos. Res.*, **58**, 55-70.

F3 Haman, K. E. and Malinowski, S. P., 1996: Temperature measurements in clouds on a centimeter scale – Preliminary results, *Atmos. Res.*, **41**, 161–175.

3. Osiągnięcie będące podstawą ubiegania się o stopień doktora habilitowanego.

Jako osiągnięcie, w rozumieniu art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, wskazuję jednotematyczny cykl czternastu publikacji (oznaczonych poniżej jako C1-C14) zatytułowany:

„Rozwój numerycznych algorytmów dla równań Navier-Stokesa w przybliżeniu nieelastycznym w zastosowaniu do wieloskalowych przepływów geofizycznych”.

C1 Smolarkiewicz, P.K., L.G. Margolin and A.A. Wyszogrodzki, 2001: A class of nonhydrostatic global models. *J Atmos. Sci.*, **58** (4), 349-364.

C2 Margolin, L.G., P.K. Smolarkiewicz, and A.A. Wyszogrodzki, 2006: Dissipation in implicit turbulence models: A computational study. *ASME J. Appl. Mechanics*, **73** (3), 469-473.

C3 Schmidli J., B. J. Billings, R. Burton, F. K. Chow, S. F. J. De Wekker, J. D. Doyle, V. Grubisic, T. R. Holt, Q. Jiang, K. A. Lundquist, A. N. Ross, L. C. Savage, P. Sheridan, S. Vosper, C. D. Whiteman, A.A. Wyszogrodzki, G. Zaengl, and S. Zhong, 2011. Intercomparison of mesoscale model simulations of the daytime valley wind system. *Mon. Wea. Rev.*, **139**, 1389–1409.

C4 Wyszogrodzki A.A., Grabowski W.W., and L-P. Wang, 2011: Activation of cloud droplets in bin-microphysics simulation of shallow convection. *Acta Geophys.*, **59**, 1168-1183.

C5 Wyszogrodzki A.A., M. Shiguang, and F. Chen, 2012: Evaluation of the coupling between mesoscale-WRF and LES-EULAG models for simulation fine-scale urban dispersion. *Atmos. Res.*, **118**, 324-345.

C6 Smolarkiewicz, P.K., J. Szmelter and A.A Wyszogrodzki, 2013: An unstructured-mesh atmospheric model for nonhydrostatic dynamic, *J. Comput. Phys.*, **254**, 184–199.

- C7 Smolarkiewicz, P.K., L.G. Margolin and A.A. Wyszogrodzki, 2007: Implicit large-eddy simulation in meteorology: from boundary layers to climate. *J. Fluid Eng.* **129** (12), 1533-1539.
- C8 Prusa, J.M., P.K. Smolarkiewicz, and A.A. Wyszogrodzki, 2008: EULAG, a computational model for multiscale flows. *Computers and Fluids*, **37**, 1193–1207.
- C9 Piotrowski, Z.P., P.K. Smolarkiewicz, S.P. Malinowski, A.A. Wyszogrodzki: 2009: On numerical realizability of thermal convection. *J. Computat. Phys.*, **228**, 6268-6290.
- C10 VanZanten, M. C., B. B. Stevens, L. Nuijens, A. P. Siebesma, A. Ackerman, F. Burnet, A. Cheng, F. Couvreux, H. Jiang, M. Khairoutdinov, Y. Kogan, D. C. Lewellen, D. Mechem, K. Nakamura, A. Noda, B. J. Shipway, J. Slawinska, S. Wang and A. Wyszogrodzki, 2011: Controls on precipitation and cloudiness in simulations of trade-wind cumulus as observed during RICO. *J. Adv. Model. Earth Syst.*, **3**, M06001.
- C11 Chen, F., H. Kusaka, R. Bornstein, J. Ching, C.S.B. Grimmond, S. Grossman-Clarke, T. Loridan, K. W. Manning, A. Martilli, S. Miao, D. Sailor, F. P. Salamanca, H. Taha., M. Tewari, X. Wang, A.A. Wyszogrodzki, C. Zhang., 2011: Developing the integrated WRF/urban modeling system and its applications to urban environmental problems. *Int. J. of Climatology*, **31**, 273-288.
- C12 Piotrowski, Z.P., A.A. Wyszogrodzki, and P.K. Smolarkiewicz: 2011: Towards petascale simulation of atmospheric circulations with soundproof equations. *Acta Geophys.*, **59**, 1294-1311
- C13 Wyszogrodzki A.A., Grabowski W.W., and L-P. Wang, and O. Ayala, 2013: Turbulent collision-coalescence in maritime shallow convection.. *Atmos. Chem. Phys.*, **13** (16), 8471-8487
- C14 Korycki, M., L.L. Łobocki, and A.A Wyszogrodzki, 2016: Application of EULAG to the simulation of flow through the urban structure in Warsaw, *Env. Fluid Mechanics*, **16** (6), 1143–1171.

3.1 Kontekst i tło naukowe badań

Dogłębne zrozumienie praw dynamiki i fizyki atmosfery, szczególnie ich zastosowania w szerokim zakresie skal przepływów pochodzi z obserwacji i badań wykorzystujących modele numeryczne, które są w stanie dokładnie i wydajnie rozwiązywać układy równań opisujące właściwości przepływu. Z powodu ogromnej rozpiętości skal przestrzennych i czasowych w przepływach geofizycznych, jawne całkowanie pełnych ściśliwych równań Navier-Stokesa jest przy istniejących zasobach obliczeniowych zbyt kosztowne lub wręcz niemożliwe w większości zastosowań. Aby uwzględnić szeroki zakres skal, trzeba przy konstrukcji modelu numerycznego dokonać przybliżeń analitycznych, które pozwalają m. in. na wydłużenie kroku całkowania równań. W modelach meteorologicznych i modelach dynamiki płynów wykorzystuje się szereg przybliżeń równań Navier-Stokesa (np. hydrostatyczne, anelastyczne, Boussinesq), które skutkują koniecznością wyboru odpowiednich (np. jawnych lub uwikłanych) algorytmów numerycznych rozwiązujących te równania. W ogólności najlepszą wydajność i dokładność rozwiązań uzyskuje się, gdy poszczególne metody i algorytmy stosowane w modelach są odpowiednio dostosowane do skal przestrzennych i czasowych badanych zjawisk. W wyniku tego nastąpił rozwój dedykowanych modeli o różnym stopniu złożoności, np. modele globalnej cyrkulacji atmosfery (ang. *General Circulation Model* - GCM), modele prognozy pogody (ang. *Numerical Weather Prediction* - NWP), modele chmurowe wysokiej rozdzielczości (ang. *Cloud Resolving Model* - CRM), czy też modele wykorzystywane do symulacji zjawisk konwekcyjnych i turbulencji atmosferycznej (ang. *Large Eddy Simulation* - LES, *Direct Numerical Simulation* - DNS).

Największym osiągnięciem w mojej dotychczasowej karierze, które zgłaszam jako temat tejże rozprawy, było opracowanie i zastosowanie metod numerycznych, generujących wysokiej jakości rezultaty dla badań procesów fizycznych w szerokim zakresie skal: od mikro $O(10\text{ m}^2)$ do planetarnej (10 m^4). Metody te oparte są na rozwiązywaniu numerycznym równań Navier-Stokesa w przybliżeniu anelastycznym z wykorzystaniem strukturalnych i niestructuralnych siatek obliczeniowych, za pomocą nieoscylacyjnych algorytmów całkowania równań. Zaimplementowałem je na zaawansowanych równoległych architekturach obliczeniowych.

3.2 Rozwój anelastycznych metod w modelu numerycznym EULAG.

W ramach pracy naukowej uczestniczyłem w rozwoju wielu zaawansowanych modeli numerycznych, rozwiązujących równania Naviera-Stokesa: budowie rdzeni dynamicznych modeli globalnych (HOMME), klasycznych modeli prognozy pogody (WRF, COSMO) oraz wieloskalowych modeli dynamiki atmosfery i procesów geofizycznych (HIGRAD, EULAG). Najbardziej znaczącym osiągnięciem jest w mojej ocenie wkład w rozwój niehydrostatycznego modelu geofizycznego EULAG (Euler/semi-LAGrangian), który uważany jest za numeryczne laboratorium mające zastosowanie w badaniu procesów fizycznych w szerokim zakresie skal przestrzennych i czasowych. Historycznie model ten został opracowany przez dr. Piotra Smolarkiewicza w NCAR na początku lat 90-tych. Powstał jako narzędzie obliczeniowe do testowania zaawansowanych metod numerycznych przy całkowaniu równań dynamiki przepływów w atmosferze i oceanie. W miarę rozwoju model EULAG stał się przydatnym narzędziem do badania szerszej, niż początkowo zakładano, gamy zagadnień dynamiki płynów.

W ogólnych rozwiązaniach równań różniczkowych Navier-Stokesa często obecne są mody szybko propagujących się fal grawitacyjnych lub akustycznych. Jawne metody całkujące te równania okazują się zwykle tak kosztowne obliczeniowo, że ogranicza to ich praktyczne zastosowania. Przybliżenie anelastyczne wykorzystane w modelu EULAG jest uogólnionym przybliżeniem Boussinesqa, w którym wpływ zmian gęstości na bilans masy i pędu jest zaniedbywany w równaniach zachowania masy i pędu, jednak uwzględnione są siły wyporu. Takie podejście prowadzi do sformułowania zagadnienia niejawnego, które wymaga rozwiązania liniowego eliptycznego równania Poissona dla zadanych warunków brzegowych. Efektywne, a zarazem ogólne rozwiązanie tego złożonego systemu eliptycznego zastosowane w modelu EULAG wykorzystuje metody iteracyjne Kryłowa typu gradientów sprzężonych (ang. *Conjugate Gradient* - CG), a w szczególności uogólnionego schematu różnic sprzężonych (ang. *Generalized Conjugate Residual* - GCR). Dokładność zaimplementowanego rozwiązania kontrolowana jest przez zadany z góry poziom redukcji błędu w procesie iteracyjnym. Efektywność obliczeniowa algorytmu w zastosowaniu do problemów o różnym stopniu komplikacji procesów fizycznych oraz wielkości i struktury siatki (począwszy od przepływów mikroskalowych w układzie kartezyjskim do planetarnych w układzie sferycznym) jest gwarantowana przez użycie algorytmu wstępnego uwarunkowania (ang. *preconditioning*). W modelu zaimplementowany jest schemat liniowy o nazwie *Alternate Direction Implicit* (ADI). Sukces przybliżenia anelastycznego w aplikacji do wieloskalowych problemów geofizycznych jest efektem zastosowania nieoscylacyjnych schematów adwekcji (ang. *Non-oscillatory Forward-in-Time* - NFT) spełniających rygorystyczne postulaty matematyczne oraz posiadających odpowiednie właściwości dysypacyjne. Kompletny przegląd algorytmów modelu i ich właściwości numerycznych dostępny jest na liście załączonych publikacji.

Własną przygodę z modelem EULAG rozpocząłem podczas studiów magisterskich w Instytucie Geofizyki na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Pierwszym moim wkładem naukowym do fizyki atmosfery była praca magisterska, w ramach której uruchomiłem model EULAG na lokalnych zasobach komputerowych IGF-UW oraz ICM, a następnie zasymulowałem przepływ powietrza w obszarach górskich. W ramach pracy

stworzyłem dokumentację modelu, która mogła być wykorzystana przez szerszą społeczność naukową. Moja praca magisterska została doceniona przez autorów modelu EULAG, dzięki czemu zostałem zaproszony do odbycia stażu naukowego w NCAR w latach 1997-1998. Moim podstawowym zadaniem podczas tej wizyty był rozwój oprogramowania modelu celem implementacji na masywnie równoległych maszynach obliczeniowych wykorzystujących protokół komunikacji *Message Passing Interface* (MPI).

We współpracy z dr. Smolarkiewiczem i dr. Josephem Prusa (TeraFlux), dokonałem rozszerzenia wersji lokalnej modelu EULAG do współrzędnych sferycznych, tworząc unikalne środowisko obliczeniowe o nazwie EULAS (ang. *EULAG on the Sphere*). Środowisko to charakteryzowało się wysoką wydajnością obliczeniową oraz pozbawione było typowych ograniczeń występujących w modelach geofizycznych opartych na przybliżeniu hydrostatycznym, polegających na dopuszczeniu jedynie łagodnych nachyleń topografii i powolnej rotacji. Wykorzystując klasyczne eksperymenty weryfikacji "rdzeni dynamicznych" modeli klimatu przeprowadziłem wyidealizowane symulacje planetarnych przepływów z uwzględnieniem orografii oraz testy klimatyczne na „wodnej” planecie (ang. *aquaplanet, Held-Suarez test*), reprezentujące niestabilności baroklinowe wymuszane południkowym gradientem termicznym [C1]. Eksperymenty te udokumentowały dokładność rozwiązań i efektywność różnych wariantów numeryki modelu. Porównano matematyczne sformułowania układu równań modelu: Eulera, nieściśliwe, anelastyczne, hydrostatyczne i niehydrostatyczne oraz jawne i niejawne metody ich numerycznego rozwiązania. W pracy tej wykazaliśmy, iż globalne modele niehydrostatyczne w przybliżeniu anelastycznym są w stanie skutecznie i poprawnie rozwiązać szeroki zakres przepływów planetarnych, przy tym efekty niehydrostatyczne nie wymagają dużych nakładów obliczeniowych. Efektywność i uniwersalność tej wersji modelu została pokazana na serii wyidealizowanych symulacji przepływów planetarnych o dowolnej średnicy planet i dowolnej prędkości rotacji [N8].

Kluczem do tego, że zaimplementowane w modelu EULAG równania można efektywnie zastosować do symulacji przepływów atmosferycznych jest zastosowanie odpowiednich do badanych zagadnień schematów całkujących równania ruchu. W szczególności, do rozwiązania zagadnień eliptycznych użyto solidnych i skutecznych algorytmów zapewniających właściwy kompromis pomiędzy dokładnością rozwiązań oraz kosztem obliczeniowym. Podczas mojej pracy w NCAR jednym z tematów badań była poprawa wydajności algorytmu eliptycznego opartego na iteracyjnej metodzie GCR, w szczególności algorytmu wstępnego uwarunkowania przyspieszającego konwergencję metody iteracyjnej. We współpracy z dr. Smolarkiewiczem opracowałem *preconditioner* wykorzystujący jednowymiarowe transformaty spektralne [N8], który dla określonych zastosowań (np. przepływy orograficzne, czy też drobnoskalowa turbulencja rozwiązywana w układzie kartezyjskim) stanowi użyteczną alternatywę w stosunku do tradycyjnie stosowanych metod liniowych ADI.

W pionierskiej pracy prowadzonej we współpracy z dr. Smolarkiewiczem i dr. Margolinem badałem własności dyssypacyjne schematu adwekcyjnego MPDATA (ang. *Multidimensional Positive Defined Advection Transport Algorithm*) należącego do wspomnianej wcześniej rodziny schematów NFT. W tym bardzo stabilnym schemacie zaimplementowano korektę numerycznych błędów w polu adwekcji, przy zachowaniu monotoniczności. Poprawiono tym samym dokładność rozwiązań unikając błędów związanych z nie fizycznymi oscylacjami znaku pól skalarnych. Właściwości schematu badane były na przypadku dyssypacji struktur turbulencyjnych powietrza w sześciennym kostce z cyklicznymi warunkami brzegowymi [B1]. Wyniki wykazały, iż MPDATA dobrze odtwarza dyssypację turbulencji w przepływach o wysokich liczbach Reynoldsa bez użycia podskalowej parametryzacji turbulencji. Takie własności znane są pod nazwą ang. *Implicit Large Eddy Simulation* (ILES). Wyniki symulacji konwekcyjnej warstwy granicznej atmosfery [C2] potwierdziły, że adaptująca się do przepływu

dyssypacja MPDATA pozwala na efektywne symulacje ILES przy zachowaniu stabilności obliczeń i dokładności rozwiązań w szerokim spektrum skal.

Poza rozwojem algorytmów numerycznych w modelu EULAG, duża część moich badań dotyczyła parametryzacji procesów fizycznych opisujących m.in. przepływy w warstwie przyziemnej atmosfery (ang. *Surface Layer* - SL) oraz procesów podskalowych (ang. *Sub-Grid Scale* - SGS). Do schematów turbulencji podskalowej działających w modelu wprowadziłem uogólnioną transformację współrzędnych. Pozwoliło to na przeprowadzenie realistycznych symulacji w dowolnych pionowych układach współrzędnych, np. zgodnych z tymi, jakie wykorzystuje się w klasycznych modelach numerycznej prognozy pogody (NWP). Dodatkowo wprowadzona przeze mnie do modelu parametryzacja SL, oparta na klasycznej teorii Monina-Obuhova, pozwala na uwzględnienie efektów topograficznych, parametrów glebowych oraz bilansu termicznego powierzchni. Parametryzacje te wykorzystano w projekcie porównawczym współczesnych modeli NWP polegającym na trójwymiarowych symulacjach wiatrów dolinnych z dziennym wymuszeniem termicznym na powierzchni ziemi [C3].

Dwa kolejne obszary mojej aktywności naukowej związanej z pobytami w NCAR to badania nad mikrofizyką chmur (w co wchodzi rozwój odpowiednich parametryzacji procesów mikrofizycznych [C4]), oraz rozwój metod IMB (ang. *Immersed Boundary*) dla zagadnień transportu i dyspersji (T&D) (do np. zastosowań w modelowaniu przepływów powietrza w obszarach zabudowanych [C5]). Zostaną one przedstawione szerzej w rozdziale 4. W ostatnim roku mojej pracy w NCAR byłem zaangażowany w projekcie NSF pt. "*A multiscale unified simulation environment for geo-scientific applications*" poświęconemu budowie nowego modelu na siatkach niestrukturalnych, co daje nowe możliwości aplikacyjne [C6].

3.3 Weryfikacja modelu numerycznego EULAG i jego zastosowanie do przepływów geofizycznych o dużej rozpiętości skal.

Dzięki unikalnym właściwościom model EULAG w przybliżeniu anelastycznym może być stosowany do badania wielu złożonych problemów fizycznych, obejmujących szeroki zakres skal przestrzennych i czasowych: począwszy od kanonicznej turbulencji drobnoskalowej, poprzez ewolucję konwekcyjnej warstwy granicznej atmosfery i załamywanie się troposferycznych fal grawitacyjnych, do problemów dynamiki globalnej cyrkulacji atmosfery ziemskiej i przepływów planetarnych. Przegląd tych zagadnień opisano w publikacjach [C1, C7, C8].

Badania mikroskalowej dyssypacji struktur turbulencyjnych opisane w pracach [B1, C2] zakładały układ jednorodny termodynamicznie i brak efektów brzegowych. Wyniki tych prac stanowiły podstawę do dalszych badań nad procesami drobnoskalowego mieszania wewnątrz chmur oraz na granicy chmury z otoczeniem, które to badania były prowadzone przez zespół naukowy Zakładu Fizyki Atmosfery IGF UW. Na drugim końcu skal czasowo-przestrzennych są symulacje globalne dla przepływów uwzględniających topografię oraz symulacje typu Held-Suarez cyrkulacji globalnej atmosfery [C1]. Ich wyniki podkreślają znaczenie efektów niehydrostatycznych w wielkoskalowej dynamice przepływów atmosferycznych. Tradycyjnie modele prognozy pogody działające na rzadkich siatkach przestrzennych wykorzystują okrojone przez przybliżenie hydrostatyczne i uproszczoną reprezentację siły Coriolisa formę równań Naviera-Stokesa (równań pierwotnych, ang. *primitive equations*). Wzrost rozdzielczości modeli (osiągany dzięki dostępowi do coraz efektywniejszych zasobów obliczeniowych) powoduje, iż uwzględnienie efektów niehydrostatycznych staje się konieczne. Wyniki naszych badań pokazały, iż jawne uwzględnienie tych efektów w równaniach poprawia dokładność rozwiązań numerycznych przy niewiele wyższych, w stosunku do modeli hydrostatycznych, kosztach obliczeniowych. [C1].

W praktyce symulacji naukowych atmosferycznych przepływów turbulentnych wykorzystuje się standardowe podejście w postaci *symulacji wielkich wirów* (ang. *Large Eddy Simulation* - LES). Polega ono na numerycznym całkowaniu równań Navier-Stokesa, takim, że wszystkie skale ruchu większe od skali przestrzennej oczka siatki obliczeniowej są rozwiązane jawnie, natomiast elementy przepływu o skalach mniejszych od rozmiaru oczka siatki są odpowiednio parametryzowane. Możliwość zastosowania algorytmu adwekcji MPDATA, właściwości dyssypacyjne adaptują się do rozmiaru oczka siatki zastępuje parametryzację podskalową. Ta własność, czyli możliwość wykonania symulacji ILES, jest korzystna nie tylko z powodu wydajności numerycznej, ale także dzięki wyeliminowaniu konieczności jawnej definicji tensora naprężeń w przypadku uogólnionych współrzędnych krzywoliniowych. Symulacje niektórych zjawisk, np. tych związanych z klimatem Ziemi, wymagają uwzględnienia efektów czy wymuszeń wykraczających poza klasyczną dynamikę płynów, co wymaga praktycznego zastosowania podejścia hybrydowego LES/ILES (parametryzacja jednych czynników, wykorzystanie właściwości numerycznych modelu w wypadku innych). Podobne podejście hybrydowe było wykorzystane do zbadania wpływu anizotropowej lepkości w procesie rozwoju struktur konwekcyjnych w warstwie granicznej atmosfery (WGA).

W pracy [C9] wykazano, iż rozwiązania numeryczne tego zagadnienia są wrażliwe na anizotropię efektywnej lepkości (w szczególności będącej efektem transportu podskalowego), czy to zadanej a priori poprzez uwzględnienie w równaniach wyrazów pochodzących od turbulencji podskalowej, czy też generowanej pośrednio przez algorytmy modelu obliczeniowego. W szczególności anizotropia lepkości może prowadzić do powstania regularnych struktur konwekcyjnych (nierealistycznych dla określonego zakresu parametrów) w postaci komórek Rayleigha – Bernarda. Komórki te przypominają obserwowane w naturze, realizowanie rozwiązania, ale przy odbiegających od naturalnych parametrach przepływu. Sposób, w jaki efekty lepkości są wprowadzane do modelu, odgrywa przy tym drugoplanową rolę. Podobne struktury obserwujemy w wynikach symulacji dla lepkości zadanej jawnie, jak i w postaci parametryzacji podskalowej turbulencji, filtrów numerycznych czy też niejawniej dyssypacji pochodzącej z algorytmów numerycznych. Oznacza to potrzebę starannej selekcji algorytmów i metod użytych dla symulacji procesów konwekcji.

Znaczna część moich badań poświęcona była rygorystycznej ocenie algorytmów numerycznych i parametryzacji procesów fizycznych. Dla wersji modelu EULAG na siatkach niestrukturalnych zostały przeprowadzone symulacje kanonicznej konwekcyjnej warstwy granicznej oraz stratyfikowanych stabilnie przepływów orograficznych [C6]. Wyniki eksperymentów numerycznych porównano z równoważnymi rozwiązaniami na siatkach strukturalnych oraz z obserwacjami. W zastosowaniu do przepływów miejskich porównano rozwiązania modelu niestrukturalnego z analogicznymi rozwiązaniami uzyskanymi metodami IMB na siatce strukturalnej [K10]. Z kolei wersja modelu na siatce strukturalnej wykorzystana była w pracach porównawczych z innymi modelami tego samego typu. Dla przykładu parametryzacja warstwy przyziemnej testowana była w modelowaniu struktury WGA w obecności lokalnych cyrkulacji termicznych w dolinach górskich [C3]. W porównaniu tym uczestniczyło dziewięć współczesnych niehydrostatycznych modeli NWP. Wyniki pokazują, iż zastosowane w modelu EULAG parametryzacje SL oraz SGS dają możliwość uzyskania podobnej jakości rezultatów co typowe modele NWP wykorzystywane w pracy operacyjnej.

Parametryzacje mikrofizyki (opisujące procesy opadowe z płytkich chmur typu cumulus) były weryfikowane w pracy porównawczej [C10], zostaną one dokładniej przedstawione w rozdziale 4.3. Duży nacisk został położony na weryfikację transportu i dyspersji (T&D) emisji skażeń w obszarach otwartych, jak i w środowisku miejskim [C5]. Do tego celu model EULAG został połączony z systemem numerycznych prognoz pogody WRF [C11]. Prace te były prowadzone przez dłuższy czas i zostaną szczegółowo opisane w rozdziałach 4.1, 4.2.

Przedstawię obecnie dwa przykłady ekstremalnych zastosowań modelu w przepływach geofizycznych, które to testują efektywność wprowadzonych rozwiązań. W projekcie finansowanym przez FAA badałem proces wzbudzenia i dyssypacji wirów generowanych na końcach skrzydeł samolotów pasażerskich poruszających się na wysokościach przelotowych w górnej troposferze i niższych warstwach stratosfery (ang. *Upper Troposphere Lower Stratosphere* - UTLS). W obszarach tych samoloty pasażerskie spędzają większość czasu przelotu. Do badania koherentnych struktur wirowych za skrzydłami zastosowano zarówno metody ILES, jak i jawną parametryzację turbulencji. Pokazano, iż wiry zależnie od warunków stabilności, mogą opadać w dół znacznie poniżej poziomu wzbudzenia i utrzymywać swoją strukturę przez kilka minut. Dokonałem oceny charakterystyki wirów w zależności od stabilności atmosfery, ścinania wiatru i intensywności turbulencji. Obiecujące wyniki z tego projektu zostały przedstawione na warsztatach użytkowników model EULAG [K9], jednakże projekt został wstrzymany z powodu problemów finansowych sponsora.

Najnowsze prace (prowadzone we współpracy z Wydziałem Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej) z wykorzystaniem metody IMB dotyczą badania stratyfikowanych przepływów miejskich wokół wyizolowanego obiektu na przykładzie Pałacu Kultury i Nauki (PKiN) w Warszawie [C14]. Badania te skupiały się na identyfikacji charakterystycznych cech przepływu dla różnych zakresów liczby Froude'a, kontrolowanej przez zadany parametr stabilności atmosfery. Analiza przepływu w obszarze zawietrznym pokazała interesujące struktury w postaci stacjonarnych fal grawitacyjnych oraz związanych z nimi symetrycznymi parami wirów rozwijających się w płaszczyźnie normalnej do kierunku przepływu.

3.4 Aspekty związane z wysoką wydajnością obliczeniową.

Jednym z wymagań stawianych współczesnym modelom numerycznym jest przenośność algorytmów obliczeniowych pomiędzy maszynami obliczeniowymi o różnych architekturach przy zachowaniu właściwości numerycznych i wydajności. Od początku mojej pracy z modelem EULAG aktywnie angażowałem się w rozwój metod zrównoleglania algorytmów numerycznych i ich aplikacji do wysokowydajnych systemów obliczeniowych. Podczas mojej wizyty naukowej w NCAR w 1997 roku opracowałem wersję modelu EULAG na architektury równoległe z wykorzystaniem pakietu MPI. Wersja ta charakteryzowała się dwuwymiarowym rozkładem obszaru obliczeniowego (2P) w kierunku horyzontalnym. Przeprowadziłem obliczenia równoległe na systemie CRAY T3D (NERSC, USA) przy wykorzystaniu 512 rdzeni obliczeniowych, oraz dokonałem implementacji modelu na wielu innych platformach równoległych, wektorowych i szeregowych [A1, A2]. Prace te przyczyniły się do zwiększenia atrakcyjności modelu i wykorzystania go w szerszym gronie środowisk naukowych.

W dalszych latach brałem udział w pracach nad testowaniem i poprawą wydajności modelu na dostępnych w tym czasie architekturach obliczeniowych o wydajności TeraSkalowej (np. systemy IBM BlueGene/L/W, Cray T3E/XD). Przeprowadzone testy wykazały uniwersalną skalowalność modelu do $O(10^4)$ rdzeni obliczeniowych dla zagadnień anelastycznych przepływów atmosferycznych w skalach od mikro do planetarnej [C11]. Wraz z pojawieniem się komputerów o wydajności PetaSkalowej, dla dalszej poprawy wydajności i skalowalności, dekompozycja domeny obliczeniowej modelu EULAG została rozszerzona do trzech wymiarów (3P) [C12]. W zadaniu tym współpracowałem z dr. Zbigniewem Piotrowskim, który w 2009 roku rozpoczął staż doktorski w NCAR. Model wykorzystujący dekompozycję 3P był zastosowany do serii problemów takich jak idealistyczne przepływy mikrofizyczne, oraz realistyczne przepływy (eksperyment BOMEX) z płytką konwekcją chmurową i opadem [C13]. Testy wydajnościowe na systemach Cray XT4 i Cray XE6 w NERSC wykazały bardzo dobrą skalowalność modelu do $O(10^5-10^6)$ rdzeni obliczeniowych [N9]. W zakończonym w roku 2015 projekcie NCN („*Methods and algorithms for organization of computations in the class*

of anelastic numerical models for geophysical flows on modern computer architectures with realization in the EULAG model”) brałem udział w pracach mających na celu adaptację modelu do nowoczesnych akceleratorów GPU (ang. *Graphical Processing Unit*) oraz MIC (ang. *Many Integrated Cores*) [N6]. Obecnie koordynuję prace komponentu projektu Horyzont2020 ESCAPE (ang. *Energy-efficient Scalable Algorithms for Weather Prediction at Exascale*) dotyczącego rozwoju nowych wysoko wydajnych metod całkowania równań Navier-Stokesa.

3.5 Popularyzacja modelu i wsparcie dla użytkowników.

Wraz z rozwojem modelu EULAG, który stawał się coraz bardziej popularnym narzędziem modelowania w środowiskach naukowych zajmujących się badaniami fizyki atmosfery, prowadziłem działalność związaną z dystrybucją modelu wśród nowych użytkowników i ich konsultacjami. Byłem twórcą i do tej pory służę ciągle jako administrator oficjalnej strony internetowej modelu EULAG (www2.mmm.ucar.edu/eulag/). Prowadziłem szkolenia w zakresie obsługi modelu dla nowych użytkowników zewnętrznych i studentów wykorzystujących model do własnych prac naukowych (magisterskich i doktoranckich), na uczelniach wyższych w Warszawie, Arizonie, Monachium i Montrealu. Byłem członkiem komitetu organizacyjnego pierwszych trzech edycji międzynarodowych warsztatów naukowych użytkowników EULAG, które odbyły się w Kolberbrau (Niemcy), Sopocie (Polska) i Loughborough (UK). Moje działania obejmowały przygotowanie sesji plenarnych, warsztatów dla nowych użytkowników, tworzenie i utrzymywanie stron internetowych dedykowanych konferencjom i publikację materiałów pokonferencyjnych. Byłem także redaktorem specjalnego wydania czasopisma *Acta Geophysica*, dedykowanego pseudo-nieściśliwym przepływowi geofizycznym.

3.6 Dodatkowa bibliografia rozdziału 3, znaczących osiągnięć naukowych.

N8 Smolarkiewicz, P. K., C. Temperton, S. J. Thomas, and A. A. Wyszogrodzki, 2004: Spectral preconditioners for nonhydrostatic atmospheric models: Extreme applications. *Proceedings of The ECMWF Seminar Series on Recent developments in numerical methods for atmospheric and ocean modelling*, pp. 203-220, 6-10 September 2004, Reading, UK,.

N9 Wyszogrodzki, A.A. Z.P. Piotrowski, and W.W. Grabowski, 2012: Parallel implementation and scalability of cloud resolving EULAG model. *PPAM 2011, Part II, Lec. Not. Comp. Sci.*, Springer, **7204**, 252-261.

K9 Wyszogrodzki A.A., P.K. Smolarkiewicz and R. Sharman, 2012: En route wake vortex dynamics; a computational study. 3rd International EULAG Workshop on Eulerian/Lagrangian methods for fluids. 25-28 June, 2012, Loughborough UK

K10. Wyszogrodzki A.A., P.K. Smolarkiewicz, and J. Szmelter, 2013: An application of the continuous feedback forcing immersed boundary and edge-based unstructured mesh models to the atmospheric flow problems. *Joint EUROMECH / ERCOFTAC Colloquium 549, “Immersed Boundary Methods: Current Status and Future Research Directions”*, Leiden, The Netherlands, 17-19 June 2013

4. Inne osiągnięcia związane z głównym osiągnięciem naukowym.

4.1 Modelowanie transportu i dyspersji w przepływach atmosferycznych.

Podczas pobytu w NCAR do moich podstawowych zadań należały prace nad projektami związanymi z bezpieczeństwem publicznym. Brałem udział w projektach finansowanych przez organizacje rządowe takie jak Defense Treat Reduction Agency (DTRA), Department of Defense (DOD), Department of Energy (DOE), czy Federal Aviation Administration (FAA), byłem także zatrudniony w instytucie Science and Technology in Atmospheric Research (STAR). Kluczową rolę w realizacji tych zadań odgrywały możliwości badania procesów transportu i dyspersji (T&D) za pomocą modelu EULAG. Dotyczyło to w szczególności rozprzestrzeniania pasywnych substancji gazowych dla konwekcyjnych i stratyfikowanych przepływów w warstwie granicznej atmosfery. Symulacje tego typu są efektywnym narzędziem do oceny konsekwencji wynikających z emisji zanieczyszczeń przemysłowych, czy też przypadkowej lub celowej emisji niebezpiecznych związków chemicznych, biologicznych i radiologicznych [K11, K12].

Aby efektywnie symulować zagadnienia transportu i dyfuzji połączyłem model EULAG z lagranżowskim modelem dyspersji cząstek (ang. *Lagrange Particle Dispersion Model* - LPDM) opracowanym przez dr. Jeffa Weila (NCAR). Znalazło to zastosowanie w projektach finansowanych przez DOD mających na celu poprawienie charakterystyki źródeł emisji: *Sensor Data Fusion* (SDF), *Virtual Threat Response Emulation Testbed* (VTHREAT) [K13, K14]. W projekcie VTHREAT zestaw danych pomiarowych z eksperymentów polowych jest uzupełniony przez wygenerowanie syntetycznych modelowych warunków meteorologicznych na obszarach, do których nie ma fizycznego dostępu. VTHREAT ma na celu kompleksowe naśladowanie procesu polegającego na detekcji, scharakteryzowaniu i reakcji na zagrożenie chemiczne w dowolnych lokalizacjach (włączając w to obszary zabudowane) podczas realnych warunków meteorologicznych [K15]. Praktyczne wykorzystanie VTHREAT w ocenie zagrożenia skażeniami zweryfikowano za pomocą wojskowych eksperymentów polowych (np. DTRA-DPG, FFT-07) jak i klasycznych zbiorów danych pomiarowych (*Prairie Grass*, CONDORS) oraz pomiarów tunelowych [K16].

Dla wykorzystania zmiennych warunków meteorologicznych generowanych przez mezoskalowy model prognozy pogody (np. WRF/MM5) lub tych pochodzących bezpośrednio z pomiarów, wdrożyłem system asymilacji danych wysokiej rozdzielczości wykorzystujący metodę zanurzania (ang. „nudging”) pozwalającą na przyswojenie przez model szybko zmiennych w czasie i przestrzeni warunków atmosferycznych. Rozszerzyłem także algorytmy śledzenia pasywnych składników powietrza przez uwzględnienie efektów wypornościowych, co pozwoliło na modelowanie zachowania tzw. ciężkich gazów. Część wyników z tych projektów została zaprezentowana podczas dedykowanych konferencji, jednak ze względu na szczególnie charakter projektów, powstała niewielka liczba publikacji w ogólnodostępnych czasopismach [C15].

4.2 Przepływy w miejskich obszarach zabudowanych.

Kolejnym aspektem pracy w NCAR był rozwój i zastosowanie metod IMB do badań nad procesami transportu i dyspersji pasywnych emisji oraz struktur przepływu powietrza w obszarach zabudowanych [K17]. Metoda IMB jest powszechnie stosowana w obliczeniowej dynamice płynów (CFD), pozwala na jawne uwzględnienie na siatce obliczeniowej skomplikowanego kształtu obiektów w polu przepływu (w tym przypadku budynków) poprzez wprowadzenie członów wymuszających w równaniach ruchu oraz zadania bez-tarciowych warunków brzegowych na ścianach obiektów. Metoda IMB została po raz pierwszy

wprowadzona do EULAGa dla symulacji przepływu powietrza wokół Pentagonu (projekt „*Pentagon Shield*”) i weryfikowana na podstawie pomiarów polowych i badań przepływów stratyfikowanych w tunelu aerodynamicznym. Początkowo metoda ta była przede wszystkim wykorzystywana do oceny i korekcji błędów pomiarowych wiatromierzy montowanych na dachach budynków [K18]. Pomiarzy te mają znaczenie dla określenia pola wiatru zarówno w bliskim sąsiedztwie budynku, jak i w skali całego miasta. Jakość tych pomiarów jest kluczowa dla ich przydatności do asymilacji w modelach mezoskalowych NWP oraz modelach dyspersji. Efekt korekcji pomiarów przebadano w eksperymentach dla obszaru Waszyngtonu, DC przy użyciu modeli T&D (EULAG oraz SCIPUFF), dla których warunki brzegowe i początkowe pobrano z numerycznych prognoz pogody. W kolejnym kroku dokonałem połączenia modelu EULAG z systemem globalnej klimatologii GCAT (ang. *Global Climatology Analysis Tool*) wykorzystującym model MM5 do symulacji rozprzestrzeniania się emisji związków gazowych w obszarach zabudowanych. Wynik tych prac testowano w symulacjach wysokiej rozdzielczości (2 m) emisji pasywnego składnika w gęstej zabudowie Oklahoma City [K19].

W celu przeprowadzenia bardziej realistycznych symulacji w obszarach miejskich (takich jak w Oklahoma City czy Waszyngton, DC) podłączyłem model EULAG do systemu WRF [K20], generującego mezoskalowe prognozy pogody o wysokiej rozdzielczości. Przyczyną tych działań był fakt, iż warunki meteorologiczne w obszarach miejskich są silnie modyfikowane przez lokalne efekty miejskiej wyspy ciepła, cyrkulacje termiczne, czy też strefy konwergencji a dane pomiarowe są ograniczone i pochodzą z nieregularnych sieci pomiarowych, często niereprezentatywnych dla badanego obszaru [C16]. Z tego powodu ważnym aspektem modelowania w obszarach miejskich jest wykorzystanie danych meteorologicznych pochodzących z systemów NWP wysokiej rozdzielczości, które uwzględniają różny stopień złożoności zabudowy. Model WRF ma zaimplementowane jedno- lub wielopoziomowe parametryzacje efektów miejskich (ang. *urban canopy model* - UCM) [C8]. Połączony system modeli został zweryfikowany na podstawie wyników kampanii pomiarowej w Oklahoma City (URBAN 2003). Wygenerowane przez WRF warunki meteorologiczne (pole wiatru, temperatury i turbulencji w rozdzielczości przestrzennej 500 m) zostały zredukowane do siatki modelu EULAG (o rozdzielczości 3m) i wykorzystane przy wyznaczeniu warunków początkowych i brzegowych symulacji T&D pasywnego składnika, poprawiając przy tym dokładność rozwiązań w skali całego miasta [C5].

Kolejnym projektem związanym z tą tematyką była analiza przepływów miejskich w sposób analogiczny do badania mikroskopowych przepływów cieczy w ośrodkach porowatych. Uwzględniono w niej efekty porowatości obszarów zabudowanych (cechy morfologii topologicznej opartej na geometrycznym rozkładzie budynków) oraz fizyczne charakterystyki przepływu takie jak przepuszczalność i krętość (ang. *permeability* i *tortuosity*). Realistyczne przepływy w obszarach gęsto zabudowanego centrum Oklahoma City, były analizowane w kategoriach statystycznych opisujących klasyczne ośrodki porowate, a celem było poszukiwanie relacji pomiędzy strumieniem pędu i makroskopowym gradientem ciśnienia – odpowiednik prawa Darcy dla przepływów w wysokich liczbach Reynoldsa [K21]. W pracy tej wskazano użyteczność analogii do ośrodków porowatych przy konstrukcji parametryzacji efektów miejskich w mezoskalowych modelach prognoz pogody.

Najnowsze prace z wykorzystaniem metody IMB dotyczą wcześniej wspomnianych w rozdziale 3.3 badań nad przepływami stratyfikowanymi wokół Pałacu Kultury i Nauki (PKiN) w Warszawie [C14]. Prace te są obecnie kontynuowane we współpracy z pracownikami Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej i stanowią temat przewodni do otwartej w 2016 roku rozprawy doktorskiej, w której jestem promotorem pomocniczym.

4.3 Badania płytkiej konwekcji cumulusowej i procesów opadu.

Ze względu na ograniczone zasoby obliczeniowe, wpływ mikro- i makroskopowych procesów chmurowych na powstanie i rozwój pola opadu może być uwzględniony tylko poprzez odpowiednie parametryzacje opisujące w sposób przybliżony zachodzące w małych skalach procesy fizyczne. Moje pierwsze kroki w modelowaniu procesów chmurowych stawałem jeszcze podczas studiów doktoranckich (sekcja 2), w których przeprowadziłem symulacje konwekcji płytkich chmur cumulus. Skonfigurowałem także wstępne ustawienia dla symulacji rozwoju chmur warstwowych typu stratocumulus oraz mikroskalowej turbulencji chmurowej dla eksperymentów w rzeczywistej komorze chmurowej. Zagadnienia te były później badane przez zespół naukowy IGF-UW. W późniejszym czasie, w trakcie pobytu w NCAR, szczególną uwagę poświęciłem badaniu chmur konwekcyjnych typu stratocumulus oraz cumulus, występujących typowo w obszarach tropikalnych i subtropikalnych stref pasatowych. Systemy te odgrywają dużą rolę w zmianach klimatu Ziemi poprzez swoje właściwości radiacyjne i wpływ na wielkoskalowe pola opadu. Badania te prowadzone były w międzynarodowym zespole naukowym, w którego skład wchodził z pracownicy NCAR (dr Wojciech Grabowski), Uniwersytetu Warszawskiego (prof. Szymon Malinowski i prof. Hanna Pawłowska wraz z grupą studentów) oraz Uniwersytetu Delaware (dr Lian-Ping Wang i współpracownicy). Zespoły badawcze, w których pracy uczestniczyłem, zaimplementowały w modelu EULAG trzy warianty parametryzacji mikrofizyki:

- Parametryzacja masowa (ang. *bulk*) ciepłego deszczu - zakłada, że para wodna jest nasycona w obecności wody chmurowej oraz woda chmurowa paruje natychmiast w obszarze gdzie powietrze jest nienasycone; ciekła woda jest rozdzielona pomiędzy wodę chmurową i deszczową.
- Dwumomentowa (lub dwu-modowa) parametryzacja ciepłego deszczu - pozwala na badanie wpływu wtórnej aktywacji kropelek chmurowych na średnie własności mikrofizyczne i optyczne pola chmurowego.
- Parametryzacja ciepłego deszczu z histogramem rozmiaru kropelek (ang. *bin microphysics*) reprezentuje całe spektrum kropelek chmurowych i uwzględnia efekty turbulencji w procesie powstania opadu (efekty zderzenia/koalescencji). Ważnym elementem tej parametryzacji są współczynniki wychwytu kropelek stosujące teoretyczny model zderzeń kropelek opadających w polu turbulencyjnego przepływu. Efekty te były weryfikowane w symulacjach wysokiej rozdzielczości typu DNS.

W kilku pierwszych publikacjach, w szczególności dotyczących parametryzacji typu masowej [C10, C17] i dwu-modowej [C18, C19, C21] moja rola polegała na zapewnieniu wsparcia nad przygotowywaniem eksperymentów, prowadzonych głównie przez studentów i pracowników naukowych przyjeżdżających na staże do NCAR. Udzielałem także wsparcia w tematach prac magisterskich i doktorskich studentom IGF-UW (dr Joanne Sławińskiej, dr Dorocie Jareckiej, dr Marcinowi Kurowskiemu, mgr Marcie Kopec) przy przygotowywaniu eksperymentów numerycznych, kontroli i weryfikacji wyników symulacji, oraz redagowaniu rękopisów. W późniejszym etapie przy wykorzystaniu parametryzacji dopuszczającej pełne spektrum kropelek chmurowych brałem już wiodącą rolę w pracach badawczych [C4, C12, C13]. Szczegółowa tematyka tych prac przedstawiona jest w kolejnych podrozdziałach.

a) Eksperymenty numeryczne z parametryzacją masową

W artykule [C17] zastosowano model EULAG do symulacji typu LES płytkiej konwekcji bezdeszczowej opartej na obserwacjach pochodzących z eksperymentu polowego *Barbados Oceanographic and Meteorological Experiment* (BOMEX). Skonfigurowałem w tym celu model na superkomputerze IBM BG/L z wykorzystaniem 8000 rdzeni obliczeniowych w celu

umożliwienia prowadzenia symulacji wysokiej rozdzielczości. W pracy tej badano stan równowagi konwekcyjno – radiacyjnej z uwzględnieniem pośredniego wpływu aerozoli. Własności mikrofizyczne chmur w tych symulacjach są określane przez koncentrację jąder kondensacji (ang. *cloud condensation nuclei* - CCN), prędkość prądów wstępujących przy podstawie chmury, oraz efekt wciągania nienasyconego powietrza z otoczenia chmur i przebiegu procesów mieszania, mających wpływ na niejednorodność chmur i wtórną aktywację kropelek. Symulowano koncentrację kropelek chmurowych dla powietrza czystego (ang. „*pristine*”) o niskiej koncentracji jąder kondensacji, oraz zanieczyszczonego (ang. „*polluted*”) o wysokiej koncentracji. Analizując zmienność w przestrzeni promienia efektywnego r_e zauważyliśmy, że parametryzacja „*bulk*” niedostatecznie uwzględnia efekty przemian związane z mieszaniem pomiędzy chmurą i jej otoczeniem. Obserwowane zmiany parametrów termodynamicznych zależą przy tym od nukleacji nowych kropelek powyżej podstawy chmur zachodzącej przy silnych prądach wstępujących oraz wciąganiu suchego powietrza z otoczenia.

Przed zastosowaniem bardziej zaawansowanej parametryzacji, wyniki osiągnięte przy użyciu mikrofizyki masowej zostały porównane z wynikami jedenastu innych modeli chmurowych [C10]. Przeprowadzono w tym celu symulacje oparte na danych z eksperymentu polowego RICO (ang. *Rain In Cumulus over Ocean*). Wyniki publikacji dokumentują pewne różnice między modelami widoczne w statystykach własności mikrofizycznych chmur i natężenia opadów na powierzchni ziemi. Jednak średnie z całego zespołu symulacji dobrze odtwarzają wiele zależności obserwowanych podczas pomiarów, łącznie z pionową strukturą pola chmur, profili wody chmurowej i deszczowej. Dzięki tym wynikom pokazano, iż parametryzacja „*bulk*” nadają się do realistycznych zastosowań.

b) Wpływ parametryzacji dwumomentowej na rozwój pola opadowego

Wykorzystując doświadczenia z pracy [C17] opracowano dwumomentową parametryzację ciepłego deszczu, opisującą koncentrację kropelek chmurowych i stosunek zmieszania wody chmurowej. Wielkości te pozwalają na śledzenie transformacji mikrofizycznych zależnie od efektów wciągania masy i turbulencyjnego mieszania chmur z otoczeniem. Parametryzację zastosowano do badania własności płytkich chmur konwekcyjnych, w szczególności przesylenia i nukleacji wewnątrzchmurowej oraz procesu formowania mżawki/deszczu [C18]. Pokazano, że mieszanie w wyższych partiach chmury jest coraz bardziej jednorodne wskutek wzrostu intensywności turbulencji i obecności w tych obszarach kropelek większego rozmiaru.

W pracy [C19] ponownie wykorzystano dane pomiarowe RICO z zastosowaniem parametryzacji dwumomentowej dla dwóch różnych mas powietrza (zanieczyszczonego – o wysokiej koncentracji aerosolu, oraz czystego) oraz dwóch kontrastujących scenariuszy mieszania turbulencyjnego (jednorodnego i bardzo niejednorodnego). W kontraście do wyników symulacji z parametryzacją „*bulk*”, zaobserwowano stopniowe pogłębianie się pola chmurowego oraz stosunkowo ostrą inwersję temperatury i wilgotności w dolnej troposferze. Mimo iż przypadki powietrza czystego i zanieczyszczonego aerozolem charakteryzują się różną koncentracją kropelek chmurowych i dużymi zmianami w polu opadów, to cechy makroskopowe chmur są podobne, niezależnie od typu aerozoli oraz rodzaju mieszania.

Mikrofizyka z dwumomentowa była następnie wykorzystana w badaniach makro- i mikroskopowych właściwości pola chmurowego na podstawie danych pochodzące z lotniczych obserwacji warstwy chmur nad Morzem Północnym podczas kampanii EUCAARI-IMPACT [C21]. Symulowane przez model efekty mieszania były w tych eksperymentach dość niejednorodne przestrzennie, z dobrze zdefiniowaną wartością średnią w całej głębokości chmury, dopuszczającą lokalne zmiany u podstawy i przy wierzchołku chmury. Wyniki symulacji z parametryzacją dwu-modową poprawnie odtworzyły skomplikowaną strukturę pola chmur: formacje typu stratocumulus leżące ponad polem chmur cumulus.

c) Parametryzacja ciepłego deszczu z podziałami na klasy rozmiaru kropeł

Kolejnym udoskonaleniem, we wdrożeniu którego aktywie uczestniczyłem była implementacja parametryzacji mikrofizyki ciepłego deszczu z podziałem na klasy wielkości kropeł (ang. *bin microphysics*) z uwzględnieniem jądra turbulencyjnego w procesie zderzeń kropeł. Parametryzacja ta stanowi znaczne wyzwanie w praktycznym zastosowaniu z powodu dużych kosztów obliczeniowych i wymaga opracowania wydajnych algorytmów zdolnych do implementacji na nowoczesnych architekturach komputerowych [C12, N9]. Rozwój parametryzacji był tematem projektu NSF, w którym to współpracowałem z partnerami na Uniwersytecie Delaware (m.in. prof. Lian-Ping Wang, dr Orlando Ayala [N10]). Projekt ten został dedykowany badaniu efektów sprzężenia zwrotnego pomiędzy dynamiką chmur i mikrofizyką w dużym zakresie skal przestrzennych $O(1-1000m)$ oraz dostarczeniu ilościowej oceny wpływu turbulencji wewnątrzchmurowej na proces powstania opadu w płytkich chmurach konwekcyjnych. Pierwszym efektem, który został poddany badaniu była aktywacja kropełek chmurowych powyżej poziomu podstawy chmury w oparciu o obserwacje BOMEX [C4]. W przypadku wcześniejszych prac z parametryzacją dwu-modową [C19] efekty aktywacji miały znaczący wpływ na parametry mikrofizyczne i optyczne właściwości pola chmurowego. W przypadku mikrofizyki typu bin, udało się wykazać że włączenie procesów aktywacji w chmurze ma ilościowo mniejszy efekt, tj. powoduje słabszy spadek stężenia kropełek chmurowych z wysokością niż bez włączonej aktywacji. Wyniki te zostały opublikowane w specjalnym wydaniu *Acta Geophysica* poświęconemu pseudo-nieściśliwym przepływowi geofizycznym [C20], gdzie uczestniczyłem jako redaktor tego wydania

Efekty turbulencji wykorzystane do poprawy opisu jądra wyłapywania kropełek deszczowych były oparte na wynikach symulacji typu DNS wysokiej rozdzielczości przeprowadzonych przez zespół prof. Wanga [N10]. Zaimplementowany schemat porównałem z wynikami standardowych parametryzacji dla jądra grawitacyjnego. Symulacje dla dużego zakresu stężeń kondensacji jąder chmurowych (CCN) pokazują, że dochodzi (zwłaszcza przy wysokiej wartości CCN) do wzmocnienia efektów mikrofizyki poprzez wcześniejsze powstawanie i wypadanie opadu spowodowane szybszą autokonwersją wody chmurowej [C13]. W przypadku niskich CCN dominują efekty dynamicznego wzrostu chmury, która sięga wyższych poziomów, dochodzi przy tym do powiększenia pola zachmurzenia i nasilenia konwekcji. W rezultacie uwzględnienia turbulencyjnego jądra wychwytu następuje efektywne usuwanie kondensatów i obserwuje się znaczny wzrost powierzchniowej akumulacji opadu. Jedną z nierozwiązanych kwestii dotychczasowych badań jest wpływ ewolucji (dynamiki wzrostu) chmury na makroskopowe własności pól opadowych takich jak liczba kolumn z podwyższonym opadem, oraz analiza mechanizmu sprzężenia pomiędzy procesami chmurowymi w mikroskali i średnimi własnościami termodynamicznymi w otoczeniu chmury.

4.4 Bibliografia związana z osiągnięciami w rozdziale 4

Publikacje w czasopismach z bazy JCR

C15 Platt N., D. DeRiggi, S. Warner, P. Bieringer, G. Bieberbach, A. Wyszogrodzki and J. Weil, 2012: Method for Comparison of Large Eddy Simulation Generated Wind Fluctuations with Short-Range Observations. *Int. J. of Environment and Pollution.*, **48**, 22-30.

C16 Tewari M., H. Kusaka, F. Chen, W.J. Coirier, S. Kim, A.A. Wyszogrodzki, T.T. Warner, 2010: Impact of Coupling a microscale Computational Fluid Dynamics model with a mesoscale model on Urban Scale Contaminant Transport and Dispersion. *Atmos. Research*, **96**, 656-664. ISSN 0169-8095.

C17 Sławińska, J., W. W. Grabowski, H. Pawłowska, and A. A. Wyszogrodzki, 2008: Optical properties of shallow convective clouds diagnosed from a bulk-microphysics large-eddy simulation. *J. Climate*, **21**, 1639-1647.

C18 Jarecka, D., Grabowski, W. W., Pawłowska, H., and A.A Wyszogrodzki, 2011: Modeling of Subgrid-Scale cloud-clear air turbulent Mixing in Large-Eddy Simulation of cloud fields, *Journal of Physics: Conference Series*, **318**, 9pp, 072010

C19 Grabowski W.W., J. Sławińska, H. Pawłowska, and A.A. Wyszogrodzki, 2011: Macroscopic impacts of cloud and precipitation processes in shallow convection. *Acta Geophys.*, **59**, 1184-1204

C20 Malinowski, S.P., A.A. Wyszogrodzki, and M.Z. Ziemiański, 2011: Modeling atmospheric circulations with sound-proof equations – Preface to the topical issue, *Acta Geophys.*, **59**, 1073-1075.

C21 Jarecka D., H. Pawłowska, W.W. Grabowski. A.A. Wyszogrodzki, 2013: Modeling microphysical effects of entrainment in clouds observed during EUCAARI-IMPACT field campaign. *Atmos. Chem. Phys.*, **13** (16), 8489-8503

Inne publikacje: czasopisma nie będące w bazie JCR, raporty i monografie

N10 Wang L-P., O. Ayala, H. Parishani, W.W. Grabowski, A.A Wyszogrodzki, Z. Piotrowski, G.R Gao, C. Kambhamettu, X. Li, L.Rossi, D. Orozco and C. Torres, 2011: Towards an integrated multiscale simulation of turbulent clouds on PetaScale computers. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **318**, 072021.

Prezentacje i artykuły konferencyjne

K11 Wyszogrodzki A., F. Vandenberghé & T. Warner, The Use of Coupled Mesoscale and LES Models for Calculating Urban Climatology of Street Level and Boundary Layer Winds With Risk Assessment Implications. 10th Annual George Mason University Conference on Atmospheric Transport and Dispersion Modeling. August 1-3, 2006, George Mason University Fairfax, Virginia, USA.

K12 Warner T., Swerdlin S., Wyszogrodzki A. and Fandenberghé F., A Climate Analysis Tool for Assessing the Vulnerability of a Region to a Variety of Disasters. Conference on Dynamics and Disasters, October 5-7, 2006, Athens, Greece.

K13 Bieberbach G., S. Swerdlin, P. Bieringer, R. Cabell, F. Vandenberghé, A. Wyszogrodzki, R-S. Sheu. Application of Advanced Numerical Weather Prediction Techniques for Improving CBR Source Characterization within a Flexible Simulation and Evaluation Development Environment. CBIS, January 8-12, 2007, Austin, TX, USA.

K14 Bieringer P.E., J. Weil, J. Hurst, G. Bieberbach, A. Wyszogrodzki, R. Sheu & M. Raines, 2008: A Framework for Developing Synthetic Chemical and Biological Agent Release Data Sets for use in Virtual Test and Evaluation. *Chemical and Biological Defense: Physical Science and Technology Conference*, 17-21 November 2008, 3 pp, New Orleans, LA, USA.

K15 Bieberbach G., P. E. Bieringer, A. A. Wyszogrodzki, J. Weil, R. Cabell, and J. Hurst, 2010: Virtual Chemical and Biological (CB) Agent Data Set Generation to support the Evaluation of CB Contamination Avoidance Systems. *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering*, May 23-27, 2010, Chapel Hill, NC, USA.

K16 Wyszogrodzki A..A., J. Weil, G. Bieberbach, P.E. Bieringer, N. Platt, and L.H. Jones, 2010: Evaluation of Large Eddy Numerical Simulations (LES) with Observations from FUsing Sensor Information from Observing Networks (FUSION) Field Trial 2007 (FFT-07). *16th Conference on Air Pollution Meteorology, AMS 90th Annual Meeting*, January 17-21, 2010, Atlanta, Georgia, USA.

K17 Wyszogrodzki A., P. Smolarkiewicz, R. Sharman & J. Szmelter, Large-Eddy Simulations of Urban Boundary Layers. 10th Annual George Mason University Conference on Atmospheric Transport and Dispersion Modeling. August 1-3, 2006, George Mason University Fairfax, Virginia, USA.

K18 Wyszogrodzki, A., Y. Liu, R.S. Sheu, R. Sharman & T. Warner, Assessment and Removal of Rooftop Anemometer Observation Errors for use in Mesoscale NWP and T&D Applications. 10th Annual George Mason University Conference on Atmospheric Transport and Dispersion Modeling. August 1-3, 2006, George Mason University Fairfax, Virginia, USA.

K19 Warner T., S. Swerdlin, A. Wyszogrodzki and F. Vandenberghe. Multi-scale Urban Weather Analyses, Forecasts and Climatologies. Sixth International Conference on Urban Climate, June 12- 16. 2006, Göteborg, Sweden.

K20 Wyszogrodzki, A.A., F. Chen, S. G. Miao, and J. Michalakes, 2009: Two-way coupling approach between WRF NWP and EULAG LES models for urban area transport and dispersion modeling. Eighth Symposium on the Urban Environment, 10-15 January 2009, Phoenix, Arizona, USA.

K21 Wyszogrodzki, A.A., P.K. Smolarkiewicz, 2010: Large-eddy Simulation of Urban Flows: A Porous-media Analogy. Proceedings of 3rd Joint US-European Fluids Engineering Summer Meeting, August 1-5, Montreal, Canada. paper no. FEDSM-ICNMM2010-30157.

3/04/2017

.....
data

Wyszogrodzki

.....
podpis habilitanta