

**Politechnika Warszawska**  
**Pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa**  
(nazwa i dane adresowe podmiotu habilitującego,  
wybranego do przeprowadzenia postępowania)  
za pośrednictwem:  
**Rady Doskonałości Naukowej**  
pl. Defilad 1  
00-901 Warszawa  
(Pałac Kultury i Nauki, p. XXIV, pok. 2401)

**Małgorzata Wińska**  
(imię i nazwisko wnioskodawcy)

**Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej**  
(miejsce pracy/jednostka naukowa)

## **Wniosek**

z dnia **12.04.2023**

o przeprowadzenie postępowania w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego  
w dziedzinie **nauk inżynieryjno-technicznych** w dyscyplinie<sup>1</sup>  
**inżynieria lądowa, geodezja i transport**

Określenie osiągnięcia naukowego będącego podstawą ubiegania się o nadanie stopnia  
doktora habilitowanego

**cykl tematycznie powiązanych artykułów naukowych pod tytułem „Niedokładność  
modeli atmosferycznego, oceanicznego i hydrologicznego momentu pędu w ewaluacji  
geofizycznej funkcji ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego.”**

Wnioskuje – na podstawie art. 221 ust. 10 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie  
wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 zm.) – aby komisja habilitacyjna podejmowała  
uchwałę w sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego w głosowaniu **tajnym/jawnym**<sup>\*2</sup>

*Zostałem poinformowany, że:*

*Administratorem w odniesieniu do danych osobowych pozyskanych w ramach postępowania w  
sprawie nadania stopnia doktora habilitowanego jest Przewodniczący Rady Doskonałości Naukowej  
z siedzibą w Warszawie (pl. Defilad 1, XXIV piętro, 00-901 Warszawa).*

*Kontakt za pośrednictwem e-mail: [kancelaria@rdn.gov.pl](mailto:kancelaria@rdn.gov.pl), tel. 22 656 60 98 lub w siedzibie organu.  
Dane osobowe będą przetwarzane w oparciu o przesłankę wskazaną w art. 6 ust. 1 lit. c)  
Rozporządzenia UE 2016/679 z dnia z dnia 27 kwietnia 2016 r. w związku z art. 220 - 221 oraz art.  
232 – 240 ustawy z dnia 20 lipca 2018 roku - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, w celu*

<sup>1</sup> Klasyfikacja dziedzin i dyscyplin wg. rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 20 września 2018 r. w sprawie dziedzin nauki i dyscyplin naukowych oraz dyscyplin w zakresie sztuki (Dz. U. z 2018 r. poz. 1818).

<sup>2</sup> \* Niepotrzebne skreślić.



*przeprowadzenie postępowania o nadanie stopnia doktora habilitowanego oraz realizacji praw i obowiązków oraz środków odwoławczych przewidzianych w tym postępowaniu.*

*Szczegółowa informacja na temat przetwarzania danych osobowych w postępowaniu dostępna jest na stronie [www.rdn.gov.pl/klauzula-informacyjna-rodo.html](http://www.rdn.gov.pl/klauzula-informacyjna-rodo.html)*

.....*Małgorzata Winiś*.....  
(podpis wnioskodawcy)

Załączniki:

Załącznik 1: Dane wnioskodawcy.

Załącznik 2: Kopia dokumentu potwierdzającego posiadanie stopnia doktora.

Załącznik 3: Autoreferat przedstawiający opis działalności naukowo-badawczej.

Załącznik 4: Wykaz osiągnięć naukowych stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny.

Załącznik 5: Kopie publikacji wraz z deklaracją wkładu autorskiego.



## AUTOREFERAT

dr inż. Małgorzata Wińska

Warszawa, kwiecień 2023

### 1. Imię i nazwisko.

Małgorzata Wińska

### 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

- ❖ Doktor nauk technicznych,
  - Dyscyplina: geodezja i kartografia,
  - Instytucja: Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie; Wydział Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa,
  - Data uzyskania stopnia: 26/02/2013,
  - Tytuł rozprawy doktorskiej: *Rola hydrosfery lądowej w geofizycznej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego*, promotor rozprawy doktorskiej: prof. dr hab. Jolanta Nastula
- ❖ Magister inżynier na Wydziale Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej,
  - Specjalność: Geodezja i Nawigacja Satelitarna,
  - Rok uzyskania tytułu: 2007,
  - Promotor: prof. dr hab. inż. Marcin Barlik
  - Tytuł Pracy Magisterskiej: *Analiza porównawcza metod interpolacji topozostatycznych odchyleń pionu na obszarze Tatr i Podhala.*

### 3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

|                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| X 2013 - obecnie   | <b>Adiunkt naukowo-badawczy</b> w Zespole Inżynierii Transportowej i Geodezji Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, prowadzenie zajęć z Geodezji Inżynierskiej, obecnie <b>p.o. Kierownika Zakładu Inżynierii Transportowej i Geodezji</b> (od 1 października 2022 do 30 września 2023), poprzednia funkcja (2018-2019): <b>Kierownik Zespołu Inżynierskich Pomiarów Geodezyjnych</b> |
| X 2018 – X 2019    | <b>Wykładowca</b> przedmiotów Geodezja wyższa i astronomia Geodezyjna, Geodezja satelitarna w Społecznej Akademii Nauk w Łodzi                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| X 2015 - X 2016    | <b>Odbycie stażu typu Post-doc na Uniwersytecie w Michigan, Ann Arbor, USA: Visiting Assistant Research Scientist I</b> , Climate and Space Sciences and Engineering, College of Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, USA                                                                                                                                                                   |
| IV 2015 - XII 2018 | <b>Naukowiec wizytujący/badacz w Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa, realizacja zadań w projekcie:</b> Wyznaczanie i analiza funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego z modeli klimatycznych oraz modeli hydrosfery lądowej, UMO-2014/12/B/ST10/04975                                                                                                                                          |
| V 2012 – VIII 2013 | <b>Specjalista badacz w projekcie: 7th Framework Programme „EEGS2 – EGNOS extension to East Europe”</b> , Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk, Warszawa                                                                                                                                                                                                                                   |
| V 2011 – V 2013    | <b>Specjalista - badacz w projekcie:</b> „Wyznaczanie i analiza funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego na podstawie obserwacji misji GRACE i GOCE”, N N526 157040, Projekt realizowany w Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa                                                                                                                                                                  |
| X 2010 – IV 2013   | <b>Pracownik naukowo - badawczy w Społecznej Akademii Nauk w Łodzi, prowadzenie zajęć z Geodezji wyższej i astronomii geodezyjnej oraz z Geodezji satelitarnej</b>                                                                                                                                                                                                                                     |
| X 2009 – VI 2010   | <b>Wykładowca w Uczelni Warszawskiej im. Marii Skłodowskiej - Curie, Warszawa, prowadzenie zajęć z matematyki</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                      |



V 2009 – V 2012

**Badacz w projekcie:** „Szkieletowe modele informacyjne głównych segmentów teoretycznych, metodycznych i obserwacyjnych Globalnego Geodezyjnego Systemu Obserwacyjnego GGOS”, Projekt badawczy MNiSzW realizowany w Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa, N N526 1598361

#### 4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.)..

##### 4.1. Tytuł głównych osiągnięć naukowych

##### 4.1.1. Cykl powiązanych tematycznie 6 artykułów naukowych, zgodnie z art. 219 ust. 1. pkt 2b Ustawy pod tytułem:

*Niedokładność modeli atmosferycznego, oceanicznego i hydrologicznego momentu pędu w ewaluacji geofizycznej funkcji ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego.*

Temat został przedstawiony w sześciu artykułach naukowych oraz został zaprezentowany na ośmiu konferencjach międzynarodowych.

##### 4.1.2. Oryginalne osiągnięcie badawcze pod tytułem:

*Nowatorska metoda wyznaczania sygnału hydrologicznego poprzez kombinację szeregow z minimalizacją ich wewnętrznego szumu.*

##### 4.2. Publikacje wchodzące w skład osiągnięć naukowych.

##### 4.2.1. Niedokładność modeli atmosferycznego, oceanicznego i hydrologicznego momentu pędu w ewaluacji geofizycznej funkcji ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego

|     |                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A1. | <b>Wińska, M.</b> A Comparative Study of Interannual Oscillation Models for Determining Geophysical Polar Motion Excitations. <i>Remote Sens.</i> 2022, 14, 147. <a href="https://doi.org/10.3390/rs14010147">https://doi.org/10.3390/rs14010147</a> |
|     | IF <sub>5lat</sub> = 5.786 (2023) Punktacja MNiSW: 100. Mój udział wynosi 100%.                                                                                                                                                                      |



|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | Wkład Autorski (koncepcja projektu badania – M.W., zbieranie danych – M.W., analiza formalna – M.W., metodologia –M.W., walidacja – M.W., wizualizacja – M.W., przygotowanie draftu – M.W. recenzja i edycja –M.W.).                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| A2. | <p>Nastula, J., <b>Wińska, M.</b>, Śliwińska, J., Salstein, D. Hydrological signals in polar motion excitation – Evidence after fifteen years of the GRACE mission, <i>Journal of Geodynamics</i>, Vol. 124, 2019, pp 119-132, ISSN 0264-3707, <a href="https://doi.org/10.1016/j.jog.2019.01.014">https://doi.org/10.1016/j.jog.2019.01.014</a>.<br/>(<a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264370718301558">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264370718301558</a>)</p> <p>IF<sub>5lat</sub> = 2.377 (2023) Punktacja MNiSW: 100. Mój udział wynosi 35%.<br/>Wkład Autorski (koncepcja projektu badania – J.N., M.W., J. Ś., D.S., zbieranie danych – M.W., J. Ś., analiza formalna – J.N., M.W., J. Ś., metodologia – J.N., M.W., J.Ś., D.S., walidacja – J. N., M.W., J.Ś., D.S., wizualizacja – J.N., M.W., J.Ś., przygotowanie draftu – J.N., M.W., J.Ś., D.S., recenzja i edycja – J.N., M.W., J.Ś., D.S.).</p> |
| A3. | <p><b>Wińska, M.</b>, Śliwińska, J. Assessing hydrological signal in polar motion from observations and geophysical models. <i>Studia Geophysica et Geodaetica</i> 63, 95–117 (2019). <a href="https://doi.org/10.1007/s11200-018-1028-z">https://doi.org/10.1007/s11200-018-1028-z</a></p> <p>IF<sub>5lat</sub> = 1.182 (2021) Punktacja MNiSW: 40. Mój udział wynosi 85%.<br/>Wkład Autorski (koncepcja projektu badania – M.W., zbieranie danych – M.W. i J.S., analiza formalna – M.W., metodologia –M.W. i J.S., walidacja – M.W., wizualizacja – M.W. i J.S., przygotowanie draftu – M.W. i J.S. recenzja i edycja –M.W.).</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| A4. | <p><b>Wińska, M.</b>, Nastula, J. &amp; Salstein, D. Hydrological excitation of polar motion by different variables from the GLDAS models. <i>Journal of Geodesy</i> 91, 1461–1473 (2017). <a href="https://doi.org/10.1007/s00190-017-1036-8">https://doi.org/10.1007/s00190-017-1036-8</a></p> <p>IF<sub>5lat</sub> = 5.154 (2021) Punktacja MNiSW: 140. Mój udział wynosi 50%.<br/>Wkład Autorski (koncepcja projektu badania – M.W., J.N. i D.S., zbieranie danych – M.W., analiza formalna – M.W., metodologia –M.W., J.N. i D.S., walidacja – M.W., wizualizacja – M.W., przygotowanie draftu – M.W. recenzja i edycja –M.W., J.N., i D.S.).</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| A5. | <b>Wińska, M.</b> . Hydrological Excitations of Polar Motion Derived from Different Variables of Fgoals – g2 Climate Model. <i>Artificial Satellites</i> , vol.51, no.4, 2016, pp.107-122. <a href="https://doi.org/10.1515/arsa-2016-0010">https://doi.org/10.1515/arsa-2016-0010</a>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |



|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | <p>Punktacja MNiSW: 40. Mój udział wynosi 100%.</p> <p>Wkład Autorski (koncepcja projektu badania – M.W., zbieranie danych – M.W., analiza formalna – M.W., metodologia –M.W., walidacja – M.W., wizualizacja – M.W., przygotowanie draftu – M.W. recenzja i edycja –M.W.).</p>                                                                                      |
| A6. | <p><b>Wińska, M.</b>, Nastula, J. &amp; Kołaczek, B. Assessment of the Global and Regional Land Hydrosphere and Its Impact on the Balance of the Geophysical Excitation Function of Polar Motion. <i>Acta Geophys.</i> 64, 270–292 (2016). <a href="https://doi.org/10.1515/acgeo-2015-0041">https://doi.org/10.1515/acgeo-2015-0041</a></p>                         |
|     | <p>IF<sub>5lat</sub> = 1.960 (2021) Punktacja MNiSW: 40. Mój udział wynosi 55%.</p> <p>Wkład Autorski (koncepcja projektu badania – M.W., J.N. i B.K., zbieranie danych – M.W., analiza formalna – M.W., metodologia – J.N, M.W., walidacja – M.W. i J.N., wizualizacja – M.W., przygotowanie draftu – M.W., J.N. i B.K. recenzja i edycja – J.N., M.W. i B.K.).</p> |

Ponadto tematykę „*Niedokładność modeli atmosferycznego, oceanicznego i hydrologicznego momentu pędu w ewaluacji geofizycznej funkcji ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego*” prezentowałam na międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych oraz w monografii naukowej:

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| B1. | <p><b>Wińska, M.</b>, Śliwińska, J., Nastula, J., „Comparison between polar motion excitation functions estimated from recent geophysical models and observations”, EGU21-9490, <a href="https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-9490">https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-9490</a>, 19-30 April EGU General Assembly 2021, online</p> |
| B2. | <p><b>Wińska, M.</b>, Nastula, J., Śliwińska, J. „, Geodetic hydrological excitation functions of polar motion based on new GRACE RL06 solutions.”, Conference: GRACE/GRACE-FO Science Team Meeting 2018At: Potsdam, Germany, <a href="#">GSTM-2018-25_presentation.pdf (copernicus.org)</a></p>                                           |
| B3. | <p><b>Wińska, M.</b>, Nastula, J., Śliwińska, J. „The analysis of geodetic residuals based on recent models of atmosphere and ocean for different time scales”, Conference: XXXth General Assembly of the International Astronomical Union, August 20-31, 2018At: Vienna, Austria</p>                                                      |



|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| B4. | <b>Wińska, M.</b> , Nastula, J., Śliwińska, J., Salstein D. „Mass and motion terms of atmospheric and oceanic angular momentum contributions to polar motion excitation.”, Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-8069, 8-13 April, 2018 EGU General Assembly 2018, Vienna, Austria                                                                                                                                                      |
| B5. | <b>Wińska, M.</b> , Nastula, J., Śliwińska, J., Dobslaw, H., Dill, R., „Geodetic hydrological excitation functions by different atmosphere and ocean models and comparison with hydrological excitation functions and GRACE solution”, Geophysical Research Abstracts, Vol. 20, EGU2018-8358, 8-13 April, 2018 EGU General Assembly 2018, Vienna, Austria                                                                                          |
| B6. | <b>Wińska, M.</b> , Nastula, J., Śliwińska, J. „Analysis of the geodetic residuals as differences between geodetic and sum of the atmospheric and ocean excitation of polar motion.” Journées 2017, des Systèmes de Référence et de la Rotation Terrestre, 25 to 27 September 2017, University of Alicante, Spain<br><a href="https://web.ua.es/journees2017/abstracts-session-2.html">https://web.ua.es/journees2017/abstracts-session-2.html</a> |
| B7. | <b>Wińska, M.</b> , Nastula, J. „Low degree Earth’s gravity coefficients determined from different space geodetic observations and climate models.”, Geophysical Research Abstracts, Vol. 19, EGU2017-1346, 23-28 April 2017, EGU General Assembly 2017, Vienna, Austria                                                                                                                                                                           |
| B8. | <b>Wińska, M.</b> , Nastula J., Salstein D. “Comparison of hydrological signal in polar motion excitation with those based on the CMIP5 climate model.”, Geophysical Research Abstracts, Vol. 18, EGU2016-9466, 2016 EGU General Assembly 2016, 17-22 April, Vienna, Austria                                                                                                                                                                       |

4.2.2. *Nowatorska metoda wyznaczania sygnału hydrologicznego poprzez kombinację szeregów z minimalizacją ich wewnętrznego szumu*

|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| A7. | <b>Wińska, M.</b> Geodetic residual time series: A combined series by minimization of their internal noise level. <i>Frontiers in Earth Science</i> , 27 February 2023, Sec. Solid Earth Geophysics, Volume 11 - 2023   <a href="https://doi.org/10.3389/feart.2023.1138410">https://doi.org/10.3389/feart.2023.1138410</a> |
|     | IF = 3.342 (2020) Punktacja MNiSW: 100. Mój udział wynosi 100%.                                                                                                                                                                                                                                                             |



|     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|     | Wkład Autorski (koncepcja projektu badania – M.W., zbieranie danych – M.W., analiza formalna – M.W., metodologia –M.W., walidacja – M.W., wizualizacja – M.W., przygotowanie draftu – M.W., recenzja i edycja – M.W.).                                                                                                                                                       |
| A8. | Śliwińska, J., <b>Wińska, M.</b> , & Nastula,, J. Exploiting the Combined GRACE/GRACE-FO Solutions to Determine Gravimetric Excitations of Polar Motion. <i>Remote Sensing</i> . 2022; 14(24): 6292. <a href="https://doi.org/10.3390/rs14246292">https://doi.org/10.3390/rs14246292</a>                                                                                     |
|     | IF <sub>5lat</sub> = 5.786 (2023) Punktacja MNiSW: 100. Mój udział wynosi 45%.<br>Wkład Autorski (koncepcja projektu badania – M.W. J.Ś., zbieranie danych – J. Ś. i M.W., analiza formalna – M.W. i J.Ś., metodologia –M.W. i J.Ś., walidacja – M.W. i J.Ś., wizualizacja – M.W. i J.Ś., przygotowanie draftu – J. Ś., M.W. i J.N. recenzja i edycja – J. Ś., M.W. i J.N.). |

Ponadto tematykę „Nowatorska metoda wyznaczania sygnału hydrologicznego poprzez kombinację szeregów z minimalizacją ich wewnętrznego szumu” prezentowałam na międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych oraz w monografii naukowej:

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| B9.  | Śliwińska, J., <b>Wińska, M.</b> , Nastula J., „ <i>Analysis of Combined Series of Gravimetric Polar Motion Excitation</i> ”, American Geosciences Union 2022 Fall Meeting, Chicago, IL, 12-16 December 2022, <a href="https://agu2022fallmeeting-agu.ipostersessions.com/Default.aspx?s=86-77-10-60-B8-A2-CA-57-36-18-B7-A3-D7-5D-7E-AB">https://agu2022fallmeeting-agu.ipostersessions.com/Default.aspx?s=86-77-10-60-B8-A2-CA-57-36-18-B7-A3-D7-5D-7E-AB</a>                                      |
| B10. | Śliwińska, J., <b>Wińska M.</b> , Nastula J., Partyka, A., Kur, T., „ <i>Characterization of a noise level of hydrological and cryospheric angular momentum determined from GRACE and GRACE Follow-On data</i> ”, Scientific Assembly of International Association of Geodesy 2021, Geodesy for a sustainable Earth, Symposium 3: Earth Rotation and Geodynamics S3.1: Earth rotation, low-degree gravitational change and mass transport in geophysical fluids Beijing, China, June 28-July 2, 2021 |
| B11. | <b>Wińska, M.</b> , „Improved geodetic-hydrological residual time series constrained by polar motion observations and geophysical models.”, Journées                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |



|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|      | 2019, Astrometry, Earth Rotation and Reference System in the Gaia era, 7,8,9 October 2019, Paris, France<br><a href="https://syrtel.obspm.fr/astro/journees2019/index.php?page=presentation_pdf">https://syrtel.obspm.fr/astro/journees2019/index.php?page=presentation_pdf</a>                                                |
| B12. | <b>Wińska M.</b> , “Pobudzenie ruchu bieguna ziemskiego - analiza zmian na podstawie modeli geofizycznych i obserwacji geodezyjnych.”, W: Badania naukowe w Instytucie Dróg i Mostów - Monografia jubileuszowa / Olszewski Piotr (red.), 2019, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, s.247-266, ISBN 978-83-8156-018-4 |
| B13. | <b>Wińska, M.</b> , Szafranek K., Zwirowicz-Rutkowska, A., „Geodetic-hydrological residual time series: characterization of their noise level.”. Geophysical Research Abstracts, Vol. 21, EGU2019-13372, 7-12 April 2019 EGU General Assembly 2019, Venna, Austria                                                             |

#### 4.2.3. Podsumowanie nauko-metryczne.

Sumaryczna liczba punktów za publikacje po uzyskaniu stopnia doktora, brana pod uwagę przy ocenie parametrycznej jednostki naukowej wg MNiSW, wynosi 660 pkt. Sumaryczny IF(5-letni) to 24.710 natomiast IF(w roku wydania) to 21.694. Więcej szczegółów dotyczących informacji nauko-metrycznych znajduje się w załączniku 4.

Tabela 1. Cytowania publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego.

| Pozycja | Data publikacji | Czasopismo                      | Cytowania Web of Science | Cytowania Scopus |
|---------|-----------------|---------------------------------|--------------------------|------------------|
| A1      | 2022            | Remote Sensing                  |                          |                  |
| A2      | 2019            | Journal of Geodynamics          |                          | 11               |
| A3      | 2019            | Studia Geophysica et Geodaetica | 7                        | 8                |
| A4      | 2017            | Journal of Geodesy              | 11                       | 14               |
| A5      | 2016            | Artificial Satellites           | 2                        | 1                |
| A6      | 2016            | Acta Geophysica                 | 15                       | 13               |
| A7      | 2023            | Frontiers in Earth Science      |                          |                  |
| A8      | 2022            | Remote Sensing                  |                          |                  |
| Suma:   |                 |                                 | 35                       | 47               |



#### 4.3. Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych, pt.: „Niedokładność modeli atmosferycznego, oceanicznego i hydrologicznego momentu pędu w ewaluacji geofizycznej funkcji ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego”

##### 4.3.1. Skróty

W niniejszym referacie będę używałam skrótów, które poniżej zostają rozwinięte; dla części z nich podaję również polskie tłumaczenie.

Nazwy modeli i danych wykorzystanych w analizach:

AOD – *atmosphere and ocean dealiasing*

AIUB – *Astronomical Institute of the University of Bern*

CLM - *Common Land Model*

CMIP - *Coupled Model Intercomparison Project*

CMIP5 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*

CMIP6 – *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6*

CNES – *Centre National d'Etudes Spatiales (eng. National Centre for Space Studies)*

COST – G - *International Combination Service for Timevariable*

*Gravity Fields*

CPC – *Climate Prediction Center*

CSR - *Center for Space Research*

ECCO - *Estimating the Circulation and Climate of the Ocean*

ECMWF – *European Centre for Medium–Range Weather Forecasts*

Fgoals-g2 - *Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System Model: Grid-point Version*

2

GLDAS - *Global Land Data Assimilation System*

GFZ – *GeoForschungsZentrum*

GNSS – *Global Navigation Satellite System*

GRACE – *Gravity Recovery and Climate Experiment*

GRACE-FO – *Gravity Recovery and Climate Experiment Follow–On*

GSM – *GRACE satellite–only model*

IAU – *International Astronomical Union*

ITSG – *Institute of Geodesy at the Graz University of Technology*



JPL – *Jet Propulsion Laboratory*

LSDM – *Land Surface Discharge Model*

LUH – *Leibniz Universität Hannover*

MPIOM – *Max Planck Institute Ocean Model*

NASA – *National Aeronautics and Space Administration*

NCEP/NCAR - *National Centers for Environmental Prediction/ the National Center for Atmospheric Research*

NOAH - *National Centers for Environmental Prediction/ Oregon State University/ Air Force/ Hydrologic Research Lab*

SLR – *Satellite Laser Ranging*

VIC – *Variable Infiltration Capacity Model*

Pozostałe skróty:

AAM – *Atmospheric Angular Momentum*, atmosferyczny moment pędu

CWT - *continuous wavelet transform*, transformacja falkowa

E – *ewaporation*, parowanie

GAM – *Geodetic Angular Momentum*, Geodezyjny Moment Pędu

GAO – rezydualna funkcja pobudzenia: GAM–AAM–OAM

HAM – *Hydrological Angular Momentum*, Hydrologiczny Moment Pędu

MAS – *mass concentrations, called mascon*

MSSA – *Multi Singular Spectrum Analysis*

OAM – *Oceanic Angular Momentum*, Oceaniczny Moment Pędu

P – *precipitation*, opad atmosferyczny

R – *runoff*, odpływ wód powierzchniowych

RL – *release*

SLAM – *Sea Level Angular Momentum*,

SM – *soil moisture*, wilgotność gleby

SNW – snow water equivalent, ilość wody zawartej w śniegu

TCH – *Three Cornered-hat*

TWS - *Terrestrial Water Storage*, ilość wód powierzchniowych w obszarach lądowych



#### 4.3.2. Wstęp

Działalność badawczą rozpoczęłam w 2008 roku w Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk (CBK PAN) w Warszawie, gdzie pod kierownictwem Pani Profesor Jolanty Nastuli, rozpoczęłam pracę naukową dotyczącą roli hydrosfery lądowej w bilansie geofizycznej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego. Wynikiem tych prac była rozprawa doktorska, którą obroniłam na Uniwersytecie Warmińsko-Mazurskim w Olsztynie w 2013 roku i uzyskałam stopień naukowy doktora nauk inżynieryjno-technicznych.

W 2013 roku rozpoczęłam pracę na Politechnice Warszawskiej na Wydziale Inżynierii Lądowej w Instytucie Dróg i Mostów, gdzie kontynuuję swoje badania we współpracy z innymi ośrodkami naukowymi: prowadziłam współpracę z CBK PAN oraz nawiązałam kontakty naukowe z dr Davidem Salsteinem z Atmospheric and Environmental Research (AER), Lexington, MA, USA. Wynikiem tej współpracy są wspólne prace naukowe (publikacje i wystąpienia konferencyjne). Prace badawcze prowadzone w tamtym okresie poszerzały zagadnienia poruszone na pierwszym etapie mojej kariery naukowej i dotyczyły studiów globalnych i regionalnych geofizycznych ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego wyznaczanych z różnych modeli hydrologicznych, z danych z satelitarnej misji grawimetrycznej *Gravity Recovery and Climate Experiment* (GRACE), jak i z modeli klimatycznych.

W roku akademickim 2015/2016 odbyłam staż naukowy typu post-doc w instytucie *Climate and Space Sciences and Engineering, College of Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, USA*, gdzie prowadziłam badania w zakresie wpływu różnych parametrów wchodzących w skład równoważnego słupa cieczy (tzw. *Terrestrial Water Storage*, TWS) na zgodność geodezyjnej obserwowalnej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego z geofizyczną ekscytacją. Prace te prowadziłam w zakresie różnych dostępnych modeli klimatycznych z piątej fazy projektu *Coupled Model Intercomparison Project Phase* (CMIP5) i *Global Land Data Assimilation System* (GLDAS).

Od października 2016 w ramach międzynarodowej współpracy z *GeoForschungsZentrum* (GFZ) w Poczdamie i Politechniki Warszawskiej prowadziłam obszerne prace badawcze, które skupiały się na poszukiwaniu nieosiągniętej do tej pory zgodności pomiędzy geodezyjną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego a geofizyczną ekscytacją. W wyniku tych prac pokazałam, że za tę niezgodność odpowiada w dużej mierze niedokładność modeli atmosferycznego momentu pędu (z ang. *Atmospheric Angular Momentum* - AAM) i oceanicznego momentu pędu (z ang. *Oceanic Angular Momentum* – OAM). Na podstawie analizy różnych dostępnych modeli atmosferycznego i oceanicznego momentu pędu



stwierdziłam, że zgodność nie może być osiągnięta tylko poprzez ulepszanie hydrologicznego momentu pędu obliczanego z różnych modeli hydrologicznych, z danych z misji grawimetrycznych, czy modeli klimatycznych.

Podsumowaniem moich prac badawczych po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych jest dorobek przedstawiony w publikacjach, które stanowią podstawę wniosku habilitacyjnego.

#### 4.3.3. Motywacja

Problem braku osiągnięcia pełnej zgodności pomiędzy geodezyjną a geofizyczną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego stanowi ważne zagadnienie geodezji wyższej, które jest badane od ponad czterdziestu lat. Wewnętrzne procesy, do których zaliczamy ciągłą wymianę momentu pędu geofizycznych ośrodków ciekłych: atmosfery, oceanu i hydrologii lądowej, powodują zmiany w położeniu osi rotacji Ziemi wyznaczane w ziemskim układzie odniesienia. Te wahania rotacji Ziemi są wyznaczane poprzez obserwacje średniego bieguna Ziemi odpowiednimi technikami kosmicznymi i satelitarnymi z precyzją osiągającą 0.05 mas (mili sekund łuku), co odpowiada horyzontalnemu przesunięciu rzędu 1.5 mm względem powierzchni Ziemi. Bezpośrednie obserwacje średniego ruchu bieguna, chociaż bardzo precyzyjne, nie dostarczają informacji pozwalających na wyodrębnienie ilościowe składowych geofizycznych powodujących te zmiany. W szczególności, do procesów geofizycznych, powodujących chybotanie bieguna Ziemi, zaliczamy takie procesy jak zmiany ciśnienia atmosferycznego oraz związane z nimi zmiany w prędkości wiatrów atmosferycznych. Drugim procesem, mającym mniejszy udział w pobudzaniu geofizycznym ruchu bieguna ziemskiego niż atmosfera, odgrywają zmiany ciśnienia wywieranego na dno oceaniczne oraz prądy morskie. Trzecim geofizycznym czynnikiem zaburzającym są zmiany dystrybucji mas w obszarach lądowych, tzw. zmiany ilość wód powierzchniowych (*Terrestrial Water Storage*, TWS). Współczesne globalne modele TWS są rozbieżne między sobą, co jest spowodowane pewnymi ograniczeniami w ich konstrukcji, do których zaliczamy m.in. słabe oszacowanie ilości wód gruntowych, niedokładne modelowanie pokrycia czapy lodowej, czy brak zachowania stałej ilości mas zawartych w atmosferze, oceanach i obszarach lądowych. Wpływ poszczególnych składowych geofizycznych ośrodków ciekłych, atmosfery, oceanu i hydrologii lądowej na pobudzenie ruchu bieguna ziemskiego jest istotny i niezaniebdywalny. Jakkolwiek atmosfera i ocean są największymi czynnikami zaburzającymi ruch bieguna Ziemi, wpływ hydrologii lądowej jest też znaczny, chociaż wyznaczany z dużą niepewnością i rozbieżnością.

Mimo, że numeryczne modele geofizycznych ośrodków ciekłych są stale poprawiane co pozwala na coraz lepsze określenie wpływu poszczególnych ośrodków ciekłych Ziemi na



pobudzenie ruchu bieguna ziemskiego, nie osiągnięto do tej pory pełnej zgodności pomiędzy obserwowalnym geodezyjnym ruchem bieguna ziemskiego a geofizycznymi procesami odpowiedzialnymi za te zmiany. Problem ten jest związany zarówno z niedoskonałością współczesnych modeli geofizycznych ośrodków ciekłych, jak i brakiem zachowania balansu mas w zamkniętym obiegu atmosfera + ocean + hydrologia lądowa. W związku z tym zauważyłam potrzebę wskazania różnic pomiędzy modelami wykorzystywanymi do badania zmian geofizycznych ruchu bieguna ziemskiego w zakresie szerokiego pasma oscylacji od zmian kilkudniowych do zmian dekadowych oraz wskazanie wpływu tych różnic na tzw. domknięcie budżetu geodezyjnego.

Głównym celem moich prac badawczych prowadzonych w ostatnich 10 latach, których wyniki opublikowałam w recenzowanych czasopismach, jest wskazanie wpływu różnych geofizycznych ośrodków ciekłych ziemi (atmosfery, oceanu i hydrologii lądowej) na pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego w zakresie szerokiego spektrum oscylacji, od zmian miesięcznych do dekadowych oraz wskazanie czynników powodujących niezgodność pomiędzy geodezyjną a geofizyczną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego (tzw. niedomknięcie budżetu geodezyjnego). Wynikiem moich prac jest również sformułowanie autorskiego algorytmu opierającego się na tzw. metodzie „*three-cornered hat method*” (TCH), za pomocą którego wyznaczyłam szereg geofizyczny, będący kombinacją szeregu funkcji atmosferycznego, oceanicznego i geodezyjnego momentu pędu, w którym wewnętrzny szum został zminimalizowany. Dzięki opracowanemu przeze mnie szeregowi poprawiłam zgodność między obserwowalną geodezyjną funkcją pobudzenia a geofizyczną ekscytacją, co ma fundamentalne znaczenie w określeniu roli geofizycznych otoczek ciekłych Ziemi w pobudzaniu ruchu bieguna ziemskiego.

#### 4.3.4. Zastosowanie różnych metod estymacji globalnej i regionalnej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego do określenia ich zgodności z rezydualną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego

W tym punkcie przedstawiam pierwszy obszar mojej działalności naukowej związany z analizą globalnych i regionalnych funkcji pobudzenia hydrologicznego momentu pędu HAM (z ang. *Hydrological Angular Momentum*). Wyniki moich osiągnięć naukowych wskazują główne przyczyny niezgodności pomiędzy różnymi realizacjami hydrologicznego momentu pędu HAM oraz pokazują różnice pomiędzy regionalnymi funkcjami ekscytacji HAM. Następnie pokazuję poziom zgodności hydrologicznych funkcji pobudzenia HAM z rezydualną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO.



Aby zrealizować założony cel czyli określić rolę geofizycznych ośrodków ciekłych w pobudzeniu ruchu bieguna ziemskiego opracowałam własną ścieżkę badawczą polegającą na:

- i) badaniu zmian regionalnych i globalnych hydrologicznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego wyznaczonych z różnych modeli hydrosfery lądowej i z danych misji grawimetrycznej GRACE,
- ii) oszacowaniu wpływu różnych zmiennych z modeli klimatycznych określających ilość całkowitej wody zawartej w glebie, śniegu, ilość opadów atmosferycznych, parowania oraz odpływu wód powierzchniowych na pobudzenie ruchu bieguna ziemskiego oraz wyznaczeniu zmian regionalnych hydrologicznej ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego HAM z samodzielnie oszacowanego parametru TWS zależnego od wymienionych zmiennych;
- iii) porównaniu geodezyjnej funkcji pobudzenia (Geodetic Angular Momentum – GAM) z sumarycznym pobudzeniem atmosferycznego (Atmospheric Angular Momentum – AAM), oceanicznego (Oceanic Angular Momentum – OAM) i hydrologicznego momentu pędu (Hydrological Angular Momentum – HAM), oraz
- iv) porównaniu tzw. rezydualnej funkcji pobudzenia (GAO), zdefiniowanej jako różnica pomiędzy geodezyjną funkcją ekscytacji a sumą atmosferycznego i oceanicznego momentu pędu, czyli  $GAO = GAM - (AAM + OAM)$ , z wpływem hydrologii lądowej HAM.

Wykorzystując różne dostępne modele numeryczne, wskaźniki ilość wód powierzchniowych w obszarach lądowych TWS (*Terrestrial Water Storage*) oraz dane z satelitarnej misji grawitacyjnej GRACE wykazałam, że HAM (*Hydrological Angular Momentum*) nie poprawia znacząco zgodności pomiędzy GAM (*Geodetic Angular Momentum*), a  $AAM + OAM + HAM$  (*Atmospheric Angular Momentum + Oceanic Angular Momentum + Hydrological Angular Momentum*), mimo to, uważam, że hydrologiczny sygnał jest znaczący w bilansie geofizycznej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego i nie powinien być pomijany w analizach.

W pracach [A1, A2, A4, A5, A6], wykazałam, że różnice między różnymi modelami HAM są znaczące w zakresie rozpatrywanych oscylacji sezonowych (tj. rocznych, półrocznych oraz o okresie 120 dni), szczególnie w komponencie  $\chi_2$ . W analizach wykorzystałam zestaw ogólnie dostępnych hydrologicznych funkcji ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego, składowych równikowych  $\chi_1$ ,  $\chi_2$  udostępnionych przez serwis *Special Bureau of Hydrology of the Global Geophysical Fluids Center (GGFC) of the International Earth Rotation and Reference Systems*



Service (IERS) oraz na podstawie modeli klimatycznych CMIP5, CMIP6. W analizie te włączyłam grawimetryczne funkcje pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego wyznaczone z satelitarnej misji GRACE na podstawie: znormalizowanych harmonik sferycznych drugiego stopnia i pierwszego rzędu,  $\Delta C_{21}$ ,  $\Delta S_{21}$  (GRACE Level-2, tzw. rozwiązanie poziome drugiego), parametru TWS (GRACE Level-3, tzw. rozwiązanie trzeciego poziomu) oraz na podstawie tzw. maskonów (GRACE Level-3, z ang. *mass concentration*).

Sygnał hydrologiczny HAM, pochodzący z różnego zestawu danych geofizycznych porównywałam z rezydualną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO wyznaczoną na podstawie różnych modeli atmosferycznego AAM i oceanicznego momentu pędu OAM.

Wyniki moich badań wskazują na brak pełnej zgodności pomiędzy różnymi globalnymi hydrologicznymi funkcjami pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego HAM w zakresie szerokiego spektrum oscylacji, od zmian krótkookresowych po długoletnie. Co prawda w wyniku porównania GAM z AAM+OAM+HAM następuje poprawa wyjaśnienia zmian ruchu bieguna ziemskiego, niestety niedokładność modeli geofizycznych wpływa na brak wyjaśnienia poszukiwanej zgodności. Zauważyłam wzrost szukanej zgodności dla najnowszych rozwiązań grawimetrycznej funkcji pobudzenia GRACE RL06 w porównaniu z rozwiązaniami starszymi tj. GRACE RL05. Takie porównania przedstawiłam na posterze konferencyjnym [B2], podczas GRACE /GRACE-FO Science Team Meeting, October 9-11, 2018, Potsdam, Germany.

Do wyznaczania zmian globalnych i regionalnych hydrologicznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego korzystałam z następującej zależności:

$$\begin{bmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \end{bmatrix} = -\frac{1.098R^2}{C-A} \int_{\varphi=0}^{\pi} \int_{\lambda=0}^{2\pi} \Delta q(\varphi, \lambda, t) \sin \varphi \cos \varphi \begin{bmatrix} \cos \lambda \\ \sin \lambda \end{bmatrix} dS, \quad (1)$$

gdzie:  $\Delta q(\varphi, \lambda, t)$  wyraża zmiany w ilości zmagazynowanej wody wyrażanej na jednostkę powierzchni  $dS$  zadaną w czasie  $t$ ,  $R$  to średni promień Ziemi,  $C$  i  $A$  są głównymi momentami bezwładności Ziemi (osiowy i równikowy). Współczynnik 1.098 wyraża podatność Ziemi stałej na obciążenia powierzchniowe, deformacje wynikające z rotacji Ziemi i oddzielenie rdzenia Ziemi od płaszcza Ziemi.

Celem moich analiz było dokładne zbadanie, które regiony globu ziemskiego mają znaczący wkład w zmiany ruchu bieguna ziemskiego oraz porównanie regionalnych hydrologicznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego wyznaczonych na podstawie różnych modeli hydrologicznych i danych z satelitarnej misji grawimetrycznej GRACE.



W pracy [A6] wykazałam, że zmiany o znacznych wariancjach zespolonej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego występują na wspólnych obszarach dla różnych modeli HAM i danych z rozwiązań GRACE. Należą do nich obszary południowo - wschodniej Azji, południowej Azji, południowo - wschodnie Stany Zjednoczone Ameryki, dorzecze Amazonki, północno - zachodnie regiony Ameryki Północnej oraz kraje basenu Morza Śródziemnego. Wykazałam, że zmienność hydrologicznej funkcji pobudzenia w tych regionach jest silniejsza dla hydrologicznego momentu pędu HAM obliczonego na podstawie danych z satelitarnej misji GRACE aniżeli z modeli hydrologicznych opracowywanych w różnych ośrodkach naukowych (CPC, GLDAS, NOAA, LSDM). Wskazałam, że przyczyną silniejszych oscylacji zmian regionalnej hydrologicznej funkcji pobudzenia wyznaczonej na podstawie danych z satelitarnej misji GRACE jest fakt, że dane z misji grawimetrycznej GRACE opisują wszystkie zmiany mas zachodzące nad obszarami lądowymi, również te nie związane ze zmianą redystrybucji wód śródlądowych.

Analizując zmiany regionalne HAM zwróciłam uwagę na problem słabo modelowanych obszarów Grenlandii i Antarktydy. Są to regiony, gdzie w różnych modelach hydrosfery lądowej zmiany TWS modelowane są z niską dokładnością i zmiany te nie są spójne w obszarze analizowanych modeli. Ze względu na położenie geograficzne regiony Grenlandii i Antarktydy mają nieznaczny wkład w globalną ekscytację ruchu bieguna ziemskiego, jednakże brak dokładnego modelowania tych regionów również przyczynia się do nieosiągnięcia zgodności pomiędzy obserwowalnym geodezyjnym a geofizycznym ruchem bieguna ziemskiego.

Moim ważnym osiągnięciem naukowym, omówionym w pracy [A6], jest analiza hydrologicznych szeregów zespolonych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego  $\chi_1$ ,  $\chi_2$  HAM, które wyznaczyłam dla pięciu regionów globu ziemskiego o największych wariancjach zmian ilości wód powierzchniowych TWS. W tych badaniach wyznaczyłam amplitudy i fazy o oscylacjach rocznych prostych i wstecznych dla czterech różnych modeli HAM i dla danych z satelitarnej misji GRACE. Wykazałam, że największa zgodność fazowa uzyskana została dla oscylacji prostej rocznej dla obszaru Południowej Ameryki oraz dla oscylacji wstecznej rocznej dla obszaru Afryki. Stwierdziłam, że największa rozbieżność pomiędzy regionalnymi hydrologicznymi funkcjami pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego występuje dla oscylacji prostej rocznej dla obszaru Ameryki Południowej. W pracy tej wykazałam dodatkowo, że regiony o małych wariancjach regionalnych ekscytacji hydrologicznego momentu pędu HAM również mają znaczenie w osiągnięciu zgodności pomiędzy geodezyjnym momentem pędu GAM a geofizyczną ekscytacją ruchu bieguna ziemskiego.



Kluczowym elementem w dalszej części badań było wyznaczenie przeze mnie zmiany ilości zmagazynowanej wody wyrażanej na jednostkę powierzchni  $\Delta q(\varphi, \lambda, t) = \Delta TWS$  na podstawie samodzielnie wybranych parametrów wejściowych opracowywanych w modelach klimatycznych i w modelach hydrologicznych (ilość zmagazynowanej wody w glebie, ilość zalegającej pokrywy śnieżnej, ilość opadów, ilość wody wyparowanej oraz odpływ wód powierzchniowych). Zastosowałam dwa podejścia wyznaczania zmian równoważnego słupa wody TWS. Pierwszy sposób wyznaczania zmian ilości zmagazynowanej wody wynika z zależności pomiędzy całkowitym opadem (P), wodą wyparowaną (E) i odpływem wód powierzchniowych do mórz i oceanów (R) i wyraża się równaniem:

$$\Delta TWS1 = (TWS1)_{n+1} - (TWS1)_n = P_n - E_n - R_n. \quad (2)$$

W drugim sposobie zastosowałam parametry wyrażające całkowitą ilość wody zawartej w glebie (tzw. *soil moisture* – SM) oraz ilość zmagazynowanego śniegu (tzw. *snow water equivalent* – SNW). Do obliczenia zmian TWS użyłam następującej zależności:

$$\Delta TWS2 = (TWS2)_{n+1} - (TWS2)_n = (SM_{n+1} + SNW_{n+1}) - (SM_n + SNW_n). \quad (3)$$

Warto dodać, że różne modele hydrologiczne różnią się między sobą w zakresie wyżej wymienionych parametrów. Różnice takie pokazałam dla przykładu w pracy [A4] w Tabeli 1, gdzie dla czterech różnych realizacji modelu GLDAS wyznaczyłam średnie wartości roczne całkowitego opadu P, wody wyparowanej E, odpływu wód powierzchniowych R, wilgotności gleby SM, oraz ilości wody zgromadzonej w śniegu SNW. Ponadto, istnieją modele hydrologii lądowej, w których brane są pod uwagę inne parametry pokazujące całkowitą zmianę w ilości wody, np. model GLDAS zawiera informacje na temat ilości wody zgromadzonej w roślinach (Tabela 1 praca [A6]). Metodę wyznaczania  $\Delta TWS1$  oraz  $\Delta TWS2$  po raz pierwszy zastosowałam i pokazałam w publikacji [A5], gdzie na podstawie jednego modelu klimatycznego z serii CMIP5 wyznaczyłam wpływ poszczególnych komponentów TWS na pobudzenie ruchu bieguna ziemskiego w szerokim spektrum oscylacji, tj. dla zmian sezonowych, międzyrocznych i dekadowych. Zmiany TWS były wyznaczone regionalnie na podstawie modelu klimatycznego FGOALS-g2. W drugim etapie badań pokazałam zgodność globalnych hydrologicznych funkcji HAM z rezydualną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO, będącą różnicą pomiędzy obserwowalnym, geodezyjnym ruchem bieguna ziemskiego, a sumą atmosferycznego i oceanicznego momentu pędu obliczonych na podstawie modeli atmosfery NCEP/NCAR i oceanu ECCO JPL.



W analizie zmian samodzielnie wyznaczonych globalnych hydrologicznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego z parametrów TWS1 i TWS2 wykazałam, że są one dosyć zgodne między sobą. Ponadto pokazałam, że amplitudy zmian sezonowych, międzyrocznych (1,5-2 lat) oraz wieloletnich globalnych funkcji HAM TWS1 i HAM TWS2 są mniejsze od amplitud zmian funkcji, których użyłam do porównań, tj. GLDAS oraz GRACE, szczególnie w zakresie komponentu  $\chi_1$ .

W następnych krokach wykazałam, że hydrologiczny moment pędu HAM TWS1 daje lepszą zgodność z rezydualną funkcją pobudzenia GAO oraz HAM GLDAS i GRACE w zakresie oscylacji sezonowych i międzyrocznych, niż hydrologiczny moment pędu HAM TWS2. Okazuje się, że funkcja HAM TWS2, którą obliczyłam na podstawie zmian wilgotności gleby oraz ilości zalegającej pokrywy śnieżnej jest niedoszacowana względem rezyduum geodezyjnego GAO. Wniosek ten jasno wskazuje, że modele klimatyczne dostarczające danych o ilości ekwiwalentnego słupa cieczy na podstawie parametrów wilgotności gleby i ilości zalegającej pokrywy śnieżnej mogą być niedoszacowane.

Ponadto wykazałam, że najsilniejszą oscylacją HAM TWS1 i HAM TWS2 jest oscylacja roczna, przy czym HAM TWS1 lepiej reprezentuje zmiany w geofizycznym ruchu bieguna ziemskiego wywołane przez wahania poziomu równoważnego słupa wody wyznaczone z parametrów: opady P, parowanie E, oraz odpływu wód powierzchniowych R, niż parametr TWS2 oparty na dwóch zmiennych, tj. wilgotności gleby SM, oraz ilości pokrywy śnieżnej SNW. Dodatkowo, w przypadku oscylacji półrocznych prostych i wstecznych zmiany obliczone dla HAM TWS1 są zbliżone do amplitud zmian GAO, i wyjaśniają geodezyjne pobudzenie ruchu bieguna ziemskiego w większym stopniu niż zmiany wyznaczone z danych GRACE i z modelu GLDAS.

W końcowym etapie pokazałam zgodność globalnych hydrologicznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego z rezydualną funkcją pobudzenia GAO przy zastosowaniu semblancji ciągłej transformaty falkowej (tzw. CWT *semblance analysis*). Analizy wykonałam dla oscylacji poniżej 12 miesięcy. Pokazałam, że zmiany niesezonowe hydrologicznego momentu pędu HAM wyznaczonego na podstawie parametru TWS1 są bardziej zgodne z rezyduum geodezyjnym GAO, niż zmiany HAM wyznaczone z parametru TWS2. Natomiast zgodność pomiędzy rezyduum geodezyjnym GAO a HAM GRACE RL05 okazała się najlepsza spośród wszystkich rozważanych sygnałów hydrologicznych.

Stwierdziłam, że użycie różnych parametrów wejściowych dostępnych w modelu klimatycznym CMIP5 nie poprawia zgodności pomiędzy geodezyjną a geofizyczną funkcją



ruchu bieguna ziemskiego. Wynika to z niedokładności modeli klimatycznych, niepełnego poznania dynamiki systemu ziemskiego, jego ciekłych otoczek, czy błędów pomiarowych modeli hydrosfery lądowej.

Na podstawie przeprowadzonych analiz, nie zalecam stosowania wyłącznie parametrów SM i SNW do wyznaczania zmian równoważnego słupa cieczy TWS, a w konsekwencji, do wyznaczania globalnych zmian w sygnale hydrologicznym HAM na podstawie tak oszacowanego parametru TWS. Wszelkie prace oparte na innych modelach klimatycznych z serii CMIP5 i późniejszej realizacji CMIP6 powinny być poprzedzone analizami porównawczymi zmian parametrów TWS1 i TWS2 oraz ich wpływie na geofizyczne pobudzenie ruchu bieguna ziemskiego.

Powyższe wnioski, dotyczące znacznych różnic pomiędzy globalną funkcją hydrologiczną HAM obliczoną na podstawie parametru równoważnego słupa cieczy TWS1 i TWS2, były przyczynkiem do przeprowadzenia kolejnych analiz regionalnych hydrologicznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego wyznaczonych przeze mnie z różnych realizacji modelu hydrologicznego GLDAS: CLM, MOSAIC, NOAH, VIC, na podstawie zmiennych zdefiniowanych wzorami (2) i (3). Wyniki tych analiz zostały przedstawione przeze mnie w pracy [A4]. Do analiz porównawczych zgodności sygnału hydrologicznego użyłam danych z misji GRACE serii CSR RL05 oraz rezyduum geodezyjne GAO obliczone na podstawie modelu atmosfery NCEP/NCAR oraz na podstawie modelu oceanu ECCO-JPL.

W badaniach zmian regionalnych HAM na podstawie różnych danych wejściowych opisanych wzorami (2) i (3) wykazałam, że obszary geograficzne o największych wariancjach hydrologicznego momentu pędu HAM są na ogół zbliżone i podobne dla różnych modeli GLDAS oraz dla HAM wyznaczonego z GRACE oraz są zgodne z obszarami zmian wykazanymi w pracy [A6]. Wykazałam duże różnice w rozkładzie regionalnym HAM opartym na zmiennych: opad P, parowanie E, odpływ wód powierzchniowych R, wyliczonych z różnych realizacji modelu GLDAS. I tak, największe amplitudy zmian regionalnych zaobserwowałam dla modelu GLDAS VIC, oraz GLDAS MOSAIC. Najmniejsze amplitudy wariancji regionalnych HAM odnotowałam dla modelu GLDAS CLM oraz dla danych GRACE CSR RL05.

W przypadku regionalnych hydrologicznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego wyznaczonych z sumarycznego pobudzenia obliczonego na podstawie wilgotności gleby i ilości wody zawartej w śniegu (SM+SNW) zaobserwowałam spadek amplitudy zmian szeregów czasowych w stosunku do regionalnych hydrologicznych funkcji pobudzenia HAM



wyznaczonych z parametrów: opad  $P$ , parowanie  $E$ , odpływ wód powierzchniowych  $R$ . Wynik ten wpływa na wartość oscylacji sezonowych globalnych szeregów HAM, i tak jak już wcześniej pokazałam w pracy [A5], amplitudy szeregów HAM obliczonych z parametrów  $P$ ,  $E$ ,  $R$  są większe i bardziej zgodne z amplitudami rezydualnej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO niż hydrologiczne funkcje pobudzenia HAM wyznaczone z parametrów  $SM$  i  $SNW$ .

Wariancje zmian różnych regionalnej funkcji HAM,  $\chi_1+i\chi_2$ , pokazują dużą rozbieżność między modelami i wyniki te wpływają na globalną zgodność pomiędzy geodezyjną a geofizyczną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego.

W następnym kroku analizowałam zmiany globalnych zespolonych szeregów czasowych HAM GLDAS. W analizie globalnych szeregów GLDAS HAM pokazałam, że składowe równikowe,  $\chi_1$ ,  $\chi_2$ , modelu GLDAS CLM znacznie różnią się od pozostałych rozwiązań, tj. VIC, MOSAIC, NOAH. Potwierdziłam, że dominującą oscylacją HAM jest oscylacja roczna, a amplitudy wyrazów prostych i wstecznych różnią się między sobą i są mniejsze dla HAM oszacowanego z parametrów określających wilgotność gleby i ilość wody zawartej w pokrywie śnieżnej ( $SM+SNW$ ) niż dla zmian HAM wyznaczonych z parametrów  $P$ ,  $E$  i  $R$ .

Do oszacowania roli sygnału hydrologicznego w bilansie geofizycznej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego wyznaczonego z różnych realizacji modelu GLDAS, wykorzystałam rezydualną funkcję pobudzenia GAO. Pokazałam, że amplitudy szeregów HAM GLDAS i grawimetrycznej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego z rozwiązania GRACE CSR RL05 są mniejsze niż dla funkcji porównawczej GAO zarówno w zakresie oscylacji sezonowych, jak i niesezonowych. Wyjątek stanowią wyznaczone przeze mnie dwa rozwiązania oparte na modelu GLDAS NOAH oraz GLDAS MOSAIC dla składowej  $\chi_2$ . Udowodniłam, że amplitudy i fazy wyrazu rocznego wstecznego są zgodne z rezydualną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO, zarówno dla HAM wyliczonych z formuły (2) i (3) modelu GLDAS MOSAIC i NOAH.

Mimo wskazania pewnych zgodności pomiędzy globalnymi funkcjami pobudzenia hydrologicznego HAM wyznaczonymi z czterech różnych rozwiązań modelu hydrologii lądowej GLDAS, żadna z tych funkcji nie charakteryzuje się dostateczną mocą aby wyjaśnić geodezyjne zmiany ruchu bieguna ziemskiego GAM wywołane hydrologicznym momentem pędu HAM, co pokazałam na przykładzie wykresu mocy amplitudowej w kierunku prostym i wstecznym na Fig. 7 w pracy [A4]. Moc amplitudowa, zarówno w kierunku prostym i wstecznym, jest większa dla globalnych funkcji GLDAS wyznaczonych z parametru TWS1



(Fig. 7a [A4]), ale nadal mniejsza od mocy amplitudowej rezyduum geodezyjnego GAO. Tym samym uważam, że istnieje potrzeba poprawy globalnych i regionalnych modeli hydrologicznych a w szczególności wymagana jest poprawa oszacowania całkowitej zmiany mas zawartych w glebie, pokrywie śnieżnej, oraz poprawa parametrów opisujących wartości opadów, parowania oraz odpływu wód lądowych. Niezmiernie ważne jest osiągnięcie poprawy modelowania zmian mas na obszarach Grenlandii i Antarktydy, mimo, iż wpływ tych regionów na zmiany hydrologicznej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego HAM jest mały. W wyniku przeprowadzonych prac badawczych, ponownie rekomenduję aby przy wyznaczaniu równoważnego słupa wody TWS na podstawie modeli klimatycznych używać porównawczo zarówno parametrów P, E, R oraz SM i SNW.

Zmiany regionalnych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego HAM, oparte na innych modelach klimatycznych, niż analizowane do tej pory, zaprezentowałam w postaci plakatu [B8], na konferencji międzynarodowej EGU General Assembly 2016, 17-22 April, Vienna, Austria we współpracy z Panią Profesor Jolantą Nastulą z CBK PAN i we współpracy z Davidem Salsteinem z *Atmospheric and Environmental Research (AER)*.

Moje badania obejmujące wpływ globalnej i regionalnej hydrosfery lądowej na pobudzenie ruchu bieguna ziemskiego w zakresie różnego spektrum oscylacji kontynuuję we współpracy z Zakładem Geodezji Planetarnej Centrum Badań Kosmicznych PAN w Warszawie oraz z *GeoForschungsZentrum* w Poczdamie. Dalsze prace obejmują analizy oparte na różnych, nowych rozwiązaniach grawimetrycznej funkcji pobudzenia HAM opartej na satelitarnych pomiarach grawimetrycznych GRACE/GRACE-FO oraz na różnych modelach klimatycznych z szóstej fazy projektu CMIP6.

#### 4.3.5. Zastosowanie różnych kombinacji geofizycznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego celem określenia niedokładności modeli atmosferycznego i oceanicznego momentu pędu oraz ich wpływu na zgodność z sygnałem hydrologicznym HAM

Na podstawie analizy dostępnych modeli hydrosfery lądowej i danych z satelitarnej misji GRACE stwierdziłam, że wkład hydrologicznego momentu pędu HAM na pobudzenie ruchu bieguna ziemskiego nie jest zaniedbywalny, mimo dużych rozbieżności regionalnych i globalnych funkcji HAM. Istnieją duże różnice pomiędzy różnymi rozwiązaniami HAM, co wykazałam w wielu pracach [A1, A2, A4, A5, A6, A8]. Referencyjna, rezydualna funkcja



pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO, na podstawie której szacuję wpływ hydrologicznego momentu pędu HAM na pobudzenie ruchu bieguna ziemskiego jest obarczona błędami modeli atmosfery i oceanu. W różnych pracach użyto różnych referencji GAO, i jak dotąd nie powstało żadne kryterium, które jasno określa wybór konkretnej kombinacji do porównań z funkcjami HAM. W związku z tym doprowadzenie do pełnej zgodności pomiędzy geodezyjną a geofizyczną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego staje się problematyczne i jest nieosiągalne. Zauważyłam potrzebę dokładnego określenia wpływu poszczególnych składowych atmosferycznego i oceanicznego momentu pędu na różnice w składowych równikowych rezydualnych funkcji GAO. Uważam, że różnice pomiędzy różnymi kombinacjami GAO są na tyle duże, że osiągnięcie pełnej zgodności z sygnałem hydrologicznym HAM jest niemożliwe. Problem ten stanowił temat rozważań moich dalszych badań i został przedstawiony w czterech publikacjach [A1, A2, A3, A7] oraz na wystąpieniach konferencyjnych [B1, B3, B4, B5, B6, B7].

W moich badaniach opartych na analizie różnych modeli atmosferycznego AAM i oceanicznego momentu pędu OAM pokazałam, że rezydualne funkcje pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO znacznie różnią się między sobą. Celem moich badań było określenie, która z kombinacji modeli AAM + OAM najlepiej przedstawia hydrologiczny sygnał GAO, a tym samym jaka kombinacja modeli geofizycznych powinna być stosowana jako wartość referencyjna.

Taką próbę podjęłam w kilku pracach przedstawionych na konferencjach międzynarodowych. W pracy [B5] (poster z konferencji EGU 2018), dokonałam porównania pięciu różnych rezydualnych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO, które wyznaczyłam z różnych modeli AAM i OAM. Pokazałam, że zarówno składowa  $\chi_1$  i  $\chi_2$  różnych kombinacji rezydualnych funkcji GAO różnią się znacznie między sobą. Ponadto wykazałam, że zgodność różnych kombinacji rezydualnych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO z hydrologicznym momentem pędu HAM LSDM i GRACE jest wyższa dla oscylacji sezonowych niż niesezonowych.

W pracy [A3] przedstawiłam wyniki moich badań dotyczących wyjaśnienia niezgodności różnych rezydualnych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO w zakresie oscylacji niesezonowych, sezonowych, międzyrocznych oraz długookresowych.

Ważnym elementem w poszukiwaniu nieosiągniętej do tej pory zgodności rezydualnego geodezyjnego GAO z hydrologicznym momentem pędu HAM jest dyskusja na temat prawa zachowania mas w systemie zamkniętym ciekłych otoczek Ziemi. Dyskusję tę przedstawiłam



w pracy [A3] w rozdziale 2.2.4. W dyskusji tej wskazuję na problem niejednorodnego rozmieszczenia obserwatoriów meteorologicznych na globie ziemskim, z których dane pomiarowe wykorzystywane są w modelach hydrologicznych, teoretyczne przybliżanie pewnych nieznanych parametrów wejściowych do modeli atmosfery AAM, oceanu OAM i hydrosfery lądowej HAM, oraz niezachowanie sumy mas w systemie zamkniętym ciekłych otoczek Ziemi AAM+OAM+HAM. Wskazuję, że bardzo ważne jest stosowanie takich modeli AAM, OAM i HAM, w których suma mas ciekłych otoczek Ziemi jest stała w czasie. Przykładem takiego systemu są modele opracowane przez GFZ Potsdam: AAM ECWMF, OAM MPIOM i HAM LSDM+SLAM. W wielu przypadkach modele AAM, OAM, oraz HAM są opracowywane niezależnie od siebie, stąd prawo zachowania mas nie jest spełnione a tym samym do analiz mogą być wprowadzane sztuczne błędy zakłócające osiągnięcie poszukiwanej zgodności geodezyjnej.

W pracy [A3] po raz pierwszy pokazałam rozkład składowych równikowych zespolonych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego,  $\chi_1 + i\chi_2$ , na część prostą i wsteczną, według dekompozycji Fouriera:

$$\chi(t) = \sum_{\sigma>0} a_{\sigma}^{+} e^{i\sigma t} + \sum_{\sigma>0} a_{\sigma}^{-} e^{-i\sigma t} + \chi_0, \quad (5)$$

gdzie  $a_{\sigma}^{+}$  jest zespoloną amplitudą składowej prostej o częstotliwości  $\sigma$ ,  $a_{\sigma}^{-}$  jest zespoloną amplitudą składowej wstecznej o tej samej częstotliwości.  $\chi_0$  jest wyrazem stałym.

W pracy [A3] przedstawiłam 12 różnych rezydualnych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO, które wyznaczyłam z różnych kombinacji wyrazów wyrażających zmiany tensora bezwładności Ziemi („mass”) i względnego momentu pędu („motion”) w modelach atmosferycznego AAM i oceanicznego momentu pędu OAM. Modele te zostały wypunktowane w Tabeli 1 w pracy [A3].

Rezydualne funkcje pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO, składowych równikowych,  $\chi_1 + i\chi_2$ , mają porównywalny przebieg czasowy. Mimo to odnotowałam duże różnice w ich wartościach RMS, które są w przedziale 15 – 23 mas, oraz 19 – 31 mas odpowiednio dla komponentu  $\chi_1$  i  $\chi_2$  (Tabela 2 w pracy [A3]). Oscylacje o największej amplitudzie zmian rezydualnych szeregów czasowych odnotowałam dla rezyduów obliczonych na podstawie modeli atmosferycznego momentu pędu. Pokazałam, że wprowadzenie do wyznaczenia rezydualnej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO oceanicznego momentu pędu redukuje wartości amplitud GAO i przybliża zmiany szeregów czasowych GAO do zmian hydrologicznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego HAM obliczanych z modeli i danych satelitarnej misji GRACE. Wynikiem tym potwierdzam, że rola OAM w badaniu



zgodności geodezyjnej ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego z geofizyczną ekscytacją jest duża i niezaniebawalna.

Wyniki moich badań pokazujące amplitudy i fazy oscylacji rocznych prostych i wstecznych wszystkich kombinacji rezydualnych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO i funkcji hydrologicznego momentu pędu HAM LSDM są w dobrej zgodności z rezyduum geodezyjnym opartym na modelach AAM ECMWF, OAM MPIOM i AAM NCEP/NCAR i OAM MPIOM. Wynikiem tym potwierdzam, że modele atmosferycznego momentu pędu ECMWF i NCEP/NCAR są wyznaczone z dużą zgodnością dla oscylacji sezonowych. Udowodniłam, że włączenie oceanicznego momentu pędu OAM w wyznaczenie rezydualnej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO zwiększa różnice pomiędzy amplitudami i fazami wyrazów rocznych prostych i wstecznych, co przedstawiłam w tabeli 3 [A3]. Na podstawie tych analiz udowodniłam, że OAM jest największym kontrybutorem powodującym błędy niedomknięcia budżetu geodezyjnego. Równocześnie pokazałam, że w przypadku oscylacji niesezonowych, najmniejsze amplitudy odnotowałam dla hydrologicznego sygnału obliczonego z modelu HAM LSDM+ SLAM, które to zmiany są mniejsze od amplitud rezydualnej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO. Przyczyną tego jest fakt, że sygnały powodujące zaburzenia w ruchu bieguna ziemskiego, takie jak trzęsienia Ziemi czy długoterminowe zmiany mas pokrywy lodowej nie są uwzględniane w modelu LSDM. Lepsza zgodność w obrębie różnych kombinacji rezydualnych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO występuje dla oscylacji sezonowych, międzyrocznych oraz dekadowych. W przypadku oscylacji niesezonowych, wykryłam znaczące różnice w różnych rezydualnych funkcjach pobudzenia GAO i hydrologicznym momencie pędu HAM.

Głównym osiągnięciem wynikającym z tych badań jest konkluzja, że sygnał hydrologiczny, wyznaczany jako różnica pomiędzy obserwowalnym geodezyjnym pobudzeniem geodezyjnym GAM a sumą atmosferycznego AAM i oceanicznego OAM momentu pędu, powinien być poprawiony aby osiągnąć lepszą zgodność z hydrologiczną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego HAM, zwłaszcza w zakresie oscylacji niesezonowych. Różnice w różnych modelach AAM, a zwłaszcza OAM, są dość duże i są źródłem nieosiągnięcia szukanej zgodności pomiędzy rezyduum geodezyjnym GAO a hydrologicznym momentem pędu HAM. Jednocześnie podkreślam, że pełna zgodność między rezydualnymi funkcjami pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO a hydrologicznymi funkcjami pobudzenia HAM nie zostanie osiągnięte, póki inne sygnały powstałe w wyniku różnych zjawisk takich jak trzęsienia Ziemi, modelowanie zmian pokrywy lodowej, czy zmiany mas śródlądowych wywołane zmianami



klimatycznymi nie będą uwzględnione w modelach HAM. Niestety, mimo ciągłej poprawy modeli atmosferycznego, oceanicznego i hydrologicznego moment pędu, nie jestem w stanie całkowicie wyjaśnić geodezyjnych zmian ruchu bieguna ziemskiego wywołanego przez zjawiska geofizyczne.

Wyniki przedstawione w artykule [A3] są zgodne z konkluzjami omówionymi w pracy [B6]. W prezentacji [B6], którą wygłosiłam na konferencji *Journées 2017, des Systèmes de Référence et de la Rotation Terrestre, 25 to 27 September 2017, University of Alicante, Spain*, przedstawiłam wyniki dotyczące różnic pomiędzy rezydualnymi GAO obliczonymi z różnych kombinacji AAM i OAM oraz pokazałam wpływ nieuwzględnienia oceanicznego momentu pędu w bilansie geofizycznej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego w zakresie oscylacji sezonowych oraz w postaci szeregów prostych i wstecznych zespolonej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego.

W innych pracach mojego współautorstwa wykorzystałam inne kombinacje rezydualnych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO do porównań z grawimetrycznymi funkcjami pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego [praca A2]. W pracy [A2] podkreśliłam, że różnice między sygnałami hydrologicznymi, pochodzącymi zarówno z danych misji grawimetrycznej GRACE, jak i różnych modeli GAO są znaczące w zakresie szerokiego spektrum oscylacji. Rezydualne funkcje pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO zostały wyznaczone w postaci pięciu różnych kombinacji różnych modeli AAM i OAM, przy czym piąty model stanowił średnią arytmetyczną czterech niezależnych modeli GAO (Tabel 1 praca [A2]). W pracy tej pokazałam, że kombinacja różnych modeli AAM i OAM nie ma wpływu na korelacje z sygnałem hydrologicznym oszacowanym z GRACE, ale ma wpływ na zgodność amplitudową geofizycznych funkcji pobudzenia.

Następny obszar moich badań został przedstawiony w pracy [A1] i dotyczy wkładu zmian atmosferycznego ciśnienia i prędkości wiatrów oraz prądów oceanicznych i ciśnienia wywieranego na dno oceanów w geofizyczną funkcję pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego w zakresie oscylacji międzyrocznych, tj. od 1.5 roku do 10 lat. Głównym celem tych badań była ocena zgodności pomiędzy obserwowalną geodezyjną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAM a geofizycznymi ekscytacjami ruchu bieguna ziemskiego w zakresie oscylacji międzyrocznych na podstawie ogólnodostępnych modeli AAM i OAM, według relacji:



$$GAM = AO + HAM, (6)$$

gdzie rozważałam dwie kombinacje:  $AO = AO1$  (łączne pobudzenia AAM z modelu NCEP/NCAR i z modelu OAM ECCO), oraz  $AO = AO2$  (łączne pobudzenie AAM z modelu ECMWF i z modelu OAM MPIOM). Modele te zostały tak dobrane, aby w jednym z nich,  $AO2 + HAM LSDM + SLAM$ , została zachowana suma mas w globalnym systemie ciekłych otoczek Ziemi.

Aby osiągnąć postawione cele, zbadalam różnice w składowych odpowiadających za zmianę „mass” i „motion” w różnych modelach atmosferycznego AAM i oceanicznego momentu pędu OAM. Poszukiwania zgodności w ruchu bieguna ziemskiego przeprowadziłam z wykorzystaniem różnych grawimetrycznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego (rozwiązania z misji GRACE i GRACE-FO poziomu drugiego ze współczynników Stokesa  $\Delta C_{21}$ ,  $\Delta S_{21}$ , oraz z poziomu trzeciego z tzw. maskonów oraz z równoważnego słupa wody TWS) oraz na podstawie hydrologicznego momentu pędu HAM wyznaczonego z modelu LSDM. Wyniki tych prac pokazałam w [A1].

W celu wyodrębnienia oscylacji międzyrocznych w autorskiej pracy [A1], zamiast tradycyjnych metod filtracji szeregów czasowych (filtracja Gaussa, filtracja Butterwortha, średnia ruchoma), stosowanych powszechnie w literaturze, zastosowałam metodę tzw. *Multi Singular Spectrum Analysis* (MSSA). Metoda ta pozwala na rekonstrukcję szeregu czasowego na dowolną ilość  $k$  komponentów rekonstrukcyjnych (z ang. *Reconstruction Components RC*) charakteryzujących się odpowiednią częstotliwością zmian. Zaletą takiej metody jest to, że suma wszystkich otrzymanych parametrów rekonstrukcyjnych jest równa oryginalnemu szeregowi czasowemu i wyodrębnienie żadanego pasma częstotliwości odbywa się bez utraty informacji, w przeciwieństwie do tradycyjnych metod filtracji.

Wyniki moich badań wskazują, że zarówno składowe zmiany mas i prędkości ciekłych otoczek atmosferycznego AAM i oceanicznego momentu pędu OAM nie są zaniedbywalne i odgrywają ważną rolę w międzyrocznym pobudzaniu ruchu bieguna ziemskiego. W szczególności, zgodność pomiędzy składowymi odpowiadającymi za zmiany ciśnienia atmosferycznego dwóch modeli, NCEP/NCAR i ECMWF, wykazują dużą zgodność między sobą. Pewne różnice w składowej „motion” tych modeli są znaczące i wpływają na brak zgodności geodezyjnej funkcji pobudzenia GAM z sumą atmosferycznej i oceanicznej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego AAM+OAM. Wykryłam również znaczące rozbieżności pomiędzy modelami oceanicznymi MPIOM i ECCO. Zmiany szeregów geofizycznych modelu  $AO1$  i  $AO2$  nie wyjaśniają zgodności zmian obserwowalnej geodezyjnej funkcji pobudzenia ruchu



bieguna ziemskiego GAM w zakresie oscylacji międzyrocznych. Żadna z tych kombinacji nie może być wybrana, jako reprezentacja zmian wywołanych przemieszczeniem mas geofizycznych otoczek Ziemi. Stwierdzam, że nie tylko różnice w modelach OAM ale również w modelach AAM są na tyle duże, że niezgodność pomiędzy geofizyczną a geodezyjną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego jest spowodowana tymi różnicami. Dodatkowo, w pracy [B4] podczas konferencji EGU General Assembly 2018, Vienna, Austria przedstawiłam wyniki pokazujące wpływ różnych modeli AAM i OAM komponentów „mass” i „motion” na zgodność z geodezyjną funkcją pobudzenia GAM w zakresie oscylacji sezonowych i niesezonowych. Wyniki moich badań pokazują poprawę zgodności geodezyjnej ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego GAM z sumą pobudzenia atmosfery i oceanu (AAM + OAM) po uwzględnieniu sukcesywnie wyrazów AAM „mass”, AAM „motion”, OAM „mass” i OAM „motion”. Wykryłam różnice pomiędzy różnymi modelami AAM i OAM, szczególnie znaczące w przypadku oscylacji niesezonowych.

Na drugim etapie pracy [A1] podjęłam próbę zwiększenia zgodności opisanej worem (6), zarówno dla modelu  $AO1$  i  $AO2$ , poprzez zastosowanie trzech różnych hydrologicznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego HAM obliczonych z danych satelitarnej misji GRACE oraz poprzez zastosowanie modelu hydrologicznego LSDM+SLAM.

Wykazałam wzrost rozpatrywanej zgodności  $GAM = AO + HAM$ , zwłaszcza w zakresie składowej równikowej  $\chi_2$ , co jest związane z faktem, że składowe równikowe  $\chi_2$  atmosferycznej AAM i oceanicznej OAM funkcji pobudzenia są modelowane z większą wiarygodnością niż dla komponentu  $\chi_1$ . Jest to bezpośrednio związane z tym, że zmiany mas nad obszarami lądowymi są bardziej czułe na zmiany w komponencie  $\chi_2$  niż  $\chi_1$ .

W wyniku analiz międzyrocznych zmian  $GAM = AO + HAM$ , wykazałam, że istnieją oscylacje o okresach 5.90, 3.53, oraz 2.50 roku, zarówno dla części prostej i wstecznej ruchu bieguna ziemskiego. Najsilniejszą oscylacją jest oscylacja o okresie 5.9 lat, którą wyznaczyłam poprzez wzmocnienie zarówno sygnału  $AO1$  i  $AO2$  sygnałem grawimetrycznej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego obliczonej z rozwiązań GRACE/GRACE-FO. Udowodniłam, że sygnał wsteczny o okresie 3.53 lat został wzmocniony, gdy do zmian AO dodałam zmiany grawimetrycznej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GRACE/GRACE-FO. Wykazałam również, że mimo rozbieżności w modelach geofizycznych  $AO1$  i  $AO2$  następuje poprawa poszukiwanej zgodności z geodezyjną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAM poprzez uwzględnienie sygnału hydrologicznego HAM z misji grawimetrycznej GRACE/GRACE-FO.



Prezentowane przeze mnie wyniki badań są obarczone źródłami wielu błędów. Ruch bieguna ziemskiego jest wyznaczany współcześnie z bardzo dużą dokładnością technikami kosmicznymi i satelitarnymi, natomiast modele atmosferycznego AAM, oceanicznego OAM i hydrologicznego momentu pędu HAM są obarczone wieloma błędami zarówno pomiarowymi, jak i wynikającymi z ograniczenia w zrozumieniu dynamiki systemu ziemskiego, czy niezdolności modeli do możliwie realnego odtwarzania zjawisk atmosferycznych. Również niezachowanie mas w obiegu zamkniętym geofizycznych ośrodków ciekłych, czy słabo modelowane parametry modeli hydrologicznych HAM są kolejnym przyczynkiem do braku wyjaśnienia geodezyjnych zmian ruchu bieguna ziemskiego wywołanych geofizyczną wymianą momentu pędu ciekłych otoczek Ziemi. Uważam, że w wyniku usunięcia wpływu atmosferycznego AAM, oceanicznego OAM i hydrologicznego momentu pędu HAM z geodezyjnej funkcji pobudzenia GAM, pozostały sygnał będzie odpowiadał sumie szumów i sygnałów pochodzących z niemodelowanych zjawisk geofizycznych. Wyzaczyłam wielkości RMS różnicy  $GAM - (AAM + OAM + HAM)$ , które są znaczące i przedstawiłam je w Tabeli 3 [A1]. Moim ważnym osiągnięciem jest pokazanie, że modele geofizyczne są niedokładne i istnieje potrzeba modelowania zjawisk do tej pory nie uwzględnionych w bilansie pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego w zakresie rozpatrywanych oscylacji międzyrocznych.

Prace badawcze z tego zakresu zaprezentowałam na międzynarodowych konferencjach naukowych a zakres omawianych częstotliwości geofizycznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego był rozszerzony o zmiany oscylacji niesezonowych oraz sezonowych. W pracy [B1], zreferowanej przeze mnie podczas konferencji EGU General Assembly 2021, online, pokazałam porównanie pomiędzy geodezyjną funkcją ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego GAM a sumą najnowszych rozwiązań atmosferycznego, oceanicznego i hydrologicznego momentu pędu ( $AAM + OAM + HAM$ ). W tych badaniach zastosowałam przekształcenie geodezyjnej i geofizycznych funkcji pobudzenia w dziedzinie czasu z wykorzystaniem dyskretnej transformaty falkowej opartej na zespolonej funkcji falkowej Morleta. Następnie, porównałam szeregi czasowe (GAM vs. geofizyczne) wykorzystując korelację czasowo - zmienną wykorzystując algorytm semblancji. W wyniku tak przeprowadzonych analiz otrzymałam dobrą zgodność pomiędzy GAM vs.  $AAM + OAM$ , natomiast kombinacja oparta na modelach NCEP/NCAR + ECCO okazała się lepsza niż kombinacja modeli ECMWF + MPIOM dla obu komponentów  $\chi_1$ ,  $\chi_2$  w zakresie wszystkich oscylacji czasowych. Potwierdziłam, że uwzględnienie hydrologicznej funkcji pobudzenia



ruchu bieguna ziemskiego HAM z GRACE jak i modelu LSDM poprawia ogólną zgodność GAM vs. AAM + OAM + HAM.

Podsumowując tę część badań stwierdzam, że geofizyczny sygnał, będący sumą pobudzenia atmosferycznego AAM, oceanicznego OAM i hydrologicznego momentu pędu HAM, powinien być ulepszony w celu osiągnięcia pełnej zgodności  $GAM = AO + HAM$ , szczególnie w zakresie oscylacji międzyrocznych ruchu bieguna ziemskiego. Dalsze poprawy modeli AAM, OAM i HAM, również tych na podstawie nowych opracowań danych z satelitarnej misji GRACE/GRACE-FO mogą przyczynić się do osiągnięcia lepszej zgodności sygnału geofizycznego z geodezyjną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAM.

#### 4.3.6. Podsumowanie.

Podsumowując, moje główne osiągnięcia naukowe dotyczące niedokładność modeli atmosferycznego, oceanicznego i hydrologicznego momentu pędu w ewaluacji geofizycznej funkcji ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego są następujące:

- określiłam przyczyny braku zgodności pomiędzy różnymi regionalnymi i globalnymi funkcjami hydrologicznego momentu pędu HAM w zakresie oscylacji sezonowych i niesezonowych, które wyznaczyłam z parametrów TWS1 i TWS2 oraz podałam źródła tych nieścisłości;
- wykazałam, że obszary globu ziemskiego o małych wariancjach zmian HAM również mają znaczący wkład w pobudzanie ruchu bieguna ziemskiego;
- rekomenduję aby w procesie wyznaczania globalnej i regionalnej funkcji hydrologicznego momentu pędu HAM z modeli klimatycznych wykorzystywać zarówno parametry określające zmiany wilgotności gleby SM, ilości wody zawartej w pokrywie śnieżnej SNW, jak i opad atmosferyczny E, parowanie P i odpływ wód powierzchniowych R, gdyż parametry te są szacowane różnie w różnych modelach klimatycznych; jednocześnie należy mieć na uwadze, że słabo modelowane obszary Antarktydy i Grenlandii w modelach klimatycznych również mają wpływ na pobudzenie ruchu bieguna ziemskiego;
- potwierdziłam, że hydrologiczny sygnał wyznaczany z misji satelitarnej GRACE lepiej wyjaśnia zmiany ruchu bieguna ziemskiego niż modele klimatyczne i hydrologiczne, niemniej dane z tych modeli oraz ich oszacowanie są niezbędne do określania wpływu zmian poszczególnych zmiennych: wilgotności gleby SM, ilości wody zawartej w pokrywie śnieżnej SNW, opadu atmosferycznego E, parowania P i odpływu wód powierzchniowych R na ruch bieguna ziemskiego;



- określiłam różnice w różnych kombinacjach rezydualnych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO; wskazałam, że brak zgodności pomiędzy różnymi rozwiązaniami atmosferycznego AAM i oceanicznego momentu pędu OAM oraz ich składowymi opisującymi zmiany tensora bezwładności Ziemi i relatywny moment pędu odpowiada w dużej mierze za brak wyjaśnienia ekscytacji geodezyjnej ruchu bieguna ziemskiego przez geofizyczną funkcję pobudzenia w zakresie szerokiego spektrum oscylacji, od zmian kilkudniowych do dekadowych;
- jako przyczynę niezgodności rezydualnych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO wskazałam duże różnice pomiędzy modelami oceanicznymi OAM oraz błędy modeli atmosferycznego AAM i oceanicznego momentu pędu OAM, które nie są określone i biorą udział w procesie wyznaczania rezyduum geodezyjnego GAO;
- jako główną przyczynę niezgodności rezydualnej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO z hydrologiczną funkcją pobudzenia HAM wskazałam nieuwzględnienie bilansu mas w geofizycznych ośrodkach ciekłych Ziemi, błędy modeli AAM i OAM, słabo modelowaną kriosferę oraz nieuwzględnienie w sygnale hydrologicznym efektów zmieniających globalny rozkład mas wywołanych przez niemodelowane zjawiska w GAO i HAM (np. trzęsienia Ziemi);
- określiłam wielkość niemodelowanego do tej pory sygnału hydrologicznego powstałego po usunięciu wpływów atmosferycznego AAM, oceanicznego OAM i hydrologicznego momentu pędu HAM z geodezyjnej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego; wykazałam, że sygnał ten jest znaczący, w związku z czym istnieje potrzeba włączenia do budżetu geodezyjnego innych niemodelowanych do tej pory sygnałów powodujących zmiany geofizycznego momentu pędu.

#### 4.4. Omówienie celu naukowego i wyników osiągnięcia naukowego, pt.: *Nowatorska metoda wyznaczania sygnału hydrologicznego poprzez kombinację szeregów z minimalizacją ich wewnętrznego szumu.*



#### 4.4.1. Wstęp

We wcześniejszych pracach dowiodłam, że istnieją znaczące różnice pomiędzy modelami atmosferycznego AAM, oceanicznego OAM, i hydrologicznego momentu pędu HAM i do dziś nie znamy odpowiedzi, która z kombinacji tych modeli daje prawdziwy obraz geofizycznego pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego. Ponadto, modele te wyznaczane są z dużą niedokładnością w porównaniu z geodezyjną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAM i zawarte w nich szумы nie są możliwe do usunięcia. W związku z tym zauważyłam potrzebę zbudowania obiektywnego kryterium uzasadniającego użycie jednej serii geofizycznej w szczególności. W tym celu wykorzystałam uogólniony algorytm, tzw. „*three cornered hat method*” (TCH), który zaimplementowałam w środowisku Matlab, i który to algorytm jest uniwersalnym programem, za pomocą którego wyznaczam funkcje kombinowane na podstawie  $n \geq 3$  funkcji wejściowych. Poprzez minimalizację szumów wewnętrznych wchodzących do rozwiązania kombinowanego geofizycznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego, minimalizuję nieznane szумы, które do tej pory wchodziły w skład pojedynczych rozwiązań AAM, OAM i HAM. Tym samym chcę zbliżyć się do wyjaśnienia geodezyjnej zmiany ruchu bieguna ziemskiego przez geofizyczną funkcję ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego.

#### 4.4.2. Motywacja i cel naukowy.

Szeroko przedstawiona problematyka braku zgodności pomiędzy  $GAM=AO+HAM$ , która wciąż nie ulega poprawie, mimo pojawiających się nowych rozwiązań hydrologicznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego HAM określanych z modeli klimatycznych i danych z misji satelitarnej GRACE/GRACE-FO, skłoniła mnie do podjęcia próby zwiększenia takiej zgodności poprzez zastosowanie odpowiednich algorytmów matematycznych opartych na założeniu minimalizacji szumów wewnętrznych wchodzących w skład tzw. kombinowanych szeregów czasowych. Poprzez zabieg eliminacji błędów i szumów, które są zawarte w modelach AAM, OAM oraz HAM, których nie jestem w stanie usunąć poprzez modelowanie różnych zjawisk geofizycznych (np. trzęsienie Ziemi, zmiany klimatyczne, niedokładne modelowanie zjawisk atmosferycznych i oceanicznych), osiągnęłam poprawę poszukiwanej zgodności i przybliżyłam się do zamknięcia budżetu geodezyjnego.

Ten ostatni etap prac, który przedstawiam w moim cyklu, został omówiony w dwóch pracach, [A7] i [A8].



#### 4.4.3. Kombinowane szeregi geofizyczne - wyniki

W pracy [A8] przedstawiłam tzw. kombinowane szeregi grawimetrycznego pobudzenia HAM wyznaczone na podstawie siedmiu różnych rozwiązań pochodzących z misji GRACE/GRACE-FO. Zostały one wymienione i opisane w rozdziale 2.2 pracy [A8]. Taka mnogość rozwiązań opracowywanych przez różne ośrodki naukowe na całym świecie, które to rozwiązania różnią się między sobą, budzi wątpliwości, które z tych serii są optymalne do wyznaczania zmian geofizycznych pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego.

Aby wyznaczyć funkcję kombinowaną metodą TCH, niezbędna jest znajomość minimum trzech różnych funkcji wejściowych reprezentujących ten sam proces. Metoda TCH pozwala na wyznaczenie wewnętrznego poziomu szumu na podstawie porównania funkcji wejściowych między sobą. Stosując tę metodę założyłam brak zerowej korelacji między wejściowymi seriami czasowymi. W obliczeniach przyjąłm jedną z serii czasowych jako wartość referencyjną, a szumy wariancji wyznaczyłam z różnic pomiędzy każdą funkcją wchodzącą w skład rozwiązania kombinowanego i szeregiem referencyjnym. Wybór referencyjnego szeregu czasowego okazuje się kompletnie arbitralny i nie ma wpływu na wynik końcowy. Opis algorytmu przedstawiłam zarówno w pracy [A7], rozdział 2.3, jak i w pracy autorskiej [A8], również rozdział 2.3.

W pracy [A8] założyłam, że szum pochodzący z różnych rozwiązań GRACE/GRACE-FO może znacznie różnić się między pojedynczymi rozwiązaniami. Drugim założeniem było wyznaczenie takiej kombinowanej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego HAM, z różnych rozwiązań GRACE/GRACE-FO, która najlepiej będzie reprezentowała zmiany hydrologiczne w pobudzeniu ruchu bieguna ziemskiego.

Kombinowaną funkcję pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego wyznaczyłam jako średnią ważoną z następującej zależności:

$$\begin{bmatrix} \chi_1^{comb} \\ \chi_2^{comb} \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^N w_i(t) \begin{bmatrix} \chi_1^i(t) \\ \chi_2^i(t) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

gdzie  $w_i$  oznacza wagi powiązane ze składowymi równikowymi  $\chi_1^i$ ,  $\chi_2^i$ .

Warunek minimalizacji wewnętrznych szumów funkcji kombinowanej osiągnęłam poprzez obliczenie wag  $w_i$  z zależności:

$$w_i = \frac{\frac{1}{var(\varepsilon_i)}}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{var(\varepsilon_i)}}, \quad (8)$$

gdzie  $\varepsilon_i$  to szum pozostały w każdej funkcji po wyodrębnieniu wspólnego prawdziwego sygnału  $S$ .



Opierając się na tych założeniach, w pracy [A8] przedstawiłam cztery rozwiązania kombinowane, oparte na różnych funkcjach wejściowych.

Wszystkie kombinowane funkcje hydrologicznego momentu pędu HAM poddałam analizie statystycznej w zakresie oscylacji sezonowych i niesezonowych i porównałam je z rezydualną funkcją GAO w celu oszacowania poprawy zgodności między sygnałem hydrologicznym a rezydualną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO.

W wyniku porównań dowiodłam, że wszystkie wyznaczone przeze mnie serie kombinowane są zgodne między sobą oraz reprezentują podobny poziom zgodności z rezydualną funkcją GAO. W szczególności, obliczyłam, że rozwiązanie COMB4 (rozwiązanie oparte na pojedynczych szeregach z misji GRACE: CNES, JPL, CSR, LUH, AIUB) wykazuje najlepszą zgodność z rezydualną funkcją GAO w zakresie oscylacji niesezonowych. Wyniki moich badań wskazują, że serią czasową o najwyższym współczynniku korelacji z GAO i najmniejszej wartości RMSD jest seria COMB4 (Fig. 11, [A8]). Pojedyncze rozwiązania HAM obliczone z różnych rozwiązań GRACE/GRACE-FO są rozbieżne między sobą i wykazują się mniejszą zgodnością z rezydualną funkcją GAO niż rozwiązania kombinowane GAO. Tak dobry wynik poprawy zgodności geodezyjnej osiągnęłam poprzez minimalizację wewnętrznych szumów w geofizycznych szeregach czasowych COMB, co jednocześnie wpłynęło na zmniejszenie amplitud szeregów kombinowanych metodą TCH.

Zwracam uwagę, że zaprezentowana przeze mnie metoda obliczania kombinowanych geofizycznych szeregów czasowych, poprzez minimalizację szumów wewnętrznych danych wejściowych, opiera się tylko i wyłącznie na różnicach w obrębie grupy funkcji reprezentujących ten sam proces i w żaden sposób nie odnosi się do funkcji zewnętrznej, referencyjnej GAO. Uważam, że poszukiwanie kombinowanych rozwiązań geofizycznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego jest dobrym kierunkiem w zbliżaniu się do osiągnięcia lepszej zgodności *GAM vs. AAM + OAM + HAM*.

Moją nowatorską metodę wyznaczania szeregów kombinowanych opartą na metodzie TCH wykorzystałam w badaniach poszukiwania rezydualnej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO. Wyniki tych prac przedstawione są w moim autorskim artykule [A7]. Praca ta, to szerokie spektrum analiz dotyczących zmian różnych rezydualnych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO, w tym kombinowanej funkcji GAO Res Comb., którą wyznaczyłam algorytmem TCH, w zakresie oscylacji od zmian kilkumiesięcznych do dekadowych. Do porównań różnych rezydualnych funkcji GAO użyłam modelu hydrologii lądowej HAM LSDM+SLAM, oraz dwóch rozwiązań z satelitarnej misji GRACE/GRACE-



FO, mianowicie rozwiązanie komercyjne kombinowane COST-G oraz rozwiązanie CSR RL06. W celu wyznaczenia oscylacji powyżej 10 lat zastosowałam metodę MSSA, która pozwala na wykrycie oscylacji bez zakładania zmiany liniowych w czasie. Taki zabieg też ma na celu poprawę poszukiwanej zgodności  $GAM$  vs.  $AAM + OAM + HAM$ .

Wyniki moich badań wskazują, że rezydualne funkcje pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO, wyznaczone z różnych kombinacji wyrazów „mass” i „motion” modeli atmosferycznego AAM i oceanicznego momentu pędu OAM odgrywają znaczącą rolę w pobudzaniu ruchu bieguna ziemskiego w zakresie oscylacji od zmian kilkumiesięcznych do zmian długoterminowych powyżej 10 lat. Wskazane przeze mnie różnice pomiędzy różnymi rozwiązaniami rezydualnej funkcji pobudzenia GAO, w tym kombinowanej funkcji GAO metodą TCH, nie są zaniedbywalne i potwierdzają moje osiągnięcia pokazane w pracach wcześniejszych z tego cyklu (np. [A3, A1]).

Wykazałam, że wyznaczona przeze mnie kombinowana rezydualna funkcja pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO osiąga dużą zgodność z rozwiązaniami GRACE COST-G i CSR w zakresie oscylacji sezonowych. Zgodność ta okazała się lepsza niż w przypadku zgodności rozwiązań GRACE z rezydualną funkcją pobudzenia Res1 (AAM NCEP/NCAR, OAM ECCO), oraz funkcją Res2, ( AAM ECMWF, OAM MPIOM). Wykazałam, że zgodność rezydualnej funkcji pobudzenia Res2 z rozwiązaniami GRACE/GRACE-FO jest najniższa. Wysoka korelacja i niski wskaźnik RMSD zauważyłam pomiędzy rezydualną funkcją Res2 i rozwiązaniem HAM LSDM + SLAM.

Pokazałam, że zgodność rezydualnej funkcji kombinowanej GAO z różnymi hydrologicznymi funkcjami pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego HAM w zakresie oscylacji niezesezonowych nie jest najlepsza, i w tym przypadku lepszą zgodność osiągnęłam dla rezydualnej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego Res2 opartej na modelu ECMWF+MPIOM z hydrologiczną funkcją pobudzenia HAM LSDM+SLAM.

Tym samym dowiodłam, że jest możliwa poprawa poszukiwanej zgodności pomiędzy geodezyjną a geofizyczną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego poprzez wyznaczenie kombinowanej funkcji ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego opartej na metodzie TCH.

#### 4.4.4. Podsumowanie

Podsumowując, moje główne osiągnięcia naukowe dotyczące nowatorskiej metody wyznaczania sygnału hydrologicznego poprzez kombinację szeregów z minimalizacją ich wewnętrznego szumu są następujące:



- Zwiększyłam zgodności obserwowalnej geodezyjnej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAM z sumą atmosferycznej AAM, oceanicznej OAM i hydrologicznej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego HAM poprzez minimalizację szumów wewnętrznych funkcji geofizycznych w zakresie szerokiego spektrum oscylacji, szczególnie dla zmian sezonowych;
- uzyskałam poprawę zgodności pomiędzy rezydualną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO z kombinowaną hydrologiczną funkcją pobudzenia HAM którą obliczyłam z różnych pojedynczych rozwiązań z satelitarnej misji GRACE/GRACE-FO;
- wyznaczyłam taką kombinowaną funkcję COMB4, która wykazuje większą zgodność z referencyjną rezydualną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO niż rozwiązanie komercyjne COST-G i pojedyncze CSR;
- zauważyłam, że zaimplementowany przeze mnie algorytm metody TCH może redukować nie tylko szum, ale realny sygnał w geofizycznych szeregach czasowych;
- udowodniłam, że możliwe jest osiągnięcie lepszej zgodności pomiędzy rezydualną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO wyznaczoną przeze mnie metodą TCH a hydrologiczną funkcją pobudzenia HAM policzoną z rozwiązań GRACE COST-G i CSR niż z innymi rezydualnymi funkcjami pobudzenia opartymi na pojedynczych rozwiązaniach modeli atmosferycznego AAM i oceanicznego momentu pędu OAM.

Opracowana przeze mnie nowatorska metoda poprawy zgodności pomiędzy geodezyjną a geofizyczną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego została przedstawiona w dwóch pracach naukowych [A7], i [A8], oraz w rozdziale monografii [B12] i podczas wystąpień konferencyjnych [B9], [B10], [B11], [B13]. Szerokie studium porównawcze geofizycznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego oraz wyznaczenie kombinowanej funkcji hydrologicznego momentu pędu HAM i rezydualnej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAO, które zwiększają poszukiwaną od lat zgodność pomiędzy geodezyjną a geofizyczną funkcją ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego stanowią znaczny wkład w rozwój dyscypliny naukowej.

#### 4.5. Kontynuacja rozwoju naukowego

W najbliższym czasie planuję złożyć wniosek o projekt badawczy (OPUS NCN), który będzie koncentrował się wokół poszukiwania różnic w regionalnych i globalnych hydrologicznych



funkcjach pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego wyznaczonych z różnych realizacji modeli klimatycznych CMIP6. W moich badaniach planuję dokonać analiz opartych na porównaniach rozwiązań TWS1 i TWS2 oraz wskazać różnice i podobieństwa między regionalnymi funkcjami HAM obliczonymi z tych rozwiązań. W zaproponowanym badaniu planuję oszacować dane historyczne oraz te zgodne z okresem misji grawimetrycznej GRACE/GRACE-FO na podstawie różnych parametrów wejściowych, tak jak opisałam to w rozdziale 4.3.4. Planuję rozszerzyć algorytm wyznaczania parametrów zmian równoważnego słupa wody o inne zmienne podawane w modelach CMIP6 wyrażające zmiany ilości mas wodnych na obszarach lądowych.

Równolegle planuję kontynuować temat poszukiwań kombinowanych geofizycznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego opartych na innych algorytmach niż TCH (np. *Least Difference Combination*). Zgodność tę można również zwiększyć włączając w obliczenia inne dane odzwierciedlające zmiany pola grawitacyjnego Ziemi, takie jak dane SLR, czy Swarm.

Planuję uczestniczyć w projekcie OPUS LAP „Poprawa prognozowania parametrów orientacji Ziemi dla celów geodezyjnych w czasie rzeczywistym”, UMO-2021/43/I/ST10/01738, którego zakończenie planowane jest na koniec 2025 roku. Projekt dotyczy poprawy prognozowania parametrów orientacji Ziemi dla celów geodezyjnych w czasie rzeczywistym i jest realizowany we współpracy z CBK PAN i GeoForschungsZentrum w Poczdamie.

## 5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

### 5.1. Doświadczenia naukowe i pełnione funkcje

Po uzyskaniu stopnia doktora:

- współpracuję z Zakładem Geodezji Planetarnej Centrum Badań Kosmicznych PAN w Warszawie, celem tej współpracy jest realizacja grantów krajowych i zagranicznych:

|                           |                                                                                                                                                                                                                         |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>I 2023 – w trakcie</b> | <b>Realizacja zadań w projekcie OPUS LAP z NCN:</b> Poprawa prognozowania parametrów orientacji Ziemi dla celów geodezyjnych w czasie rzeczywistym, UMO-2021/43/I/ST10/01738, wykonawca partner Politechnika Warszawska |
| <b>IV 2015 - XII 2018</b> | <b>Realizacja zadań w projekcie z NCN:</b> Wyznaczanie i analiza funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego z modeli                                                                                                   |



|                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                        | klimatycznych oraz modeli hydrosfery lądowej, UMO-2014/12/B/ST10/04975 , wykonawca                                                                                                                                                                                                    |
| <b>V 2011 – V 2013</b> | <b>Specjalista - badacz w projekcie z NCN:</b> „Wyznaczanie i analiza funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego na podstawie obserwacji misji GRACE i GOCE”, N N526 157040, Projekt realizowany w Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa                                           |
| <b>V 2009 – V 2012</b> | <b>Badacz w projekcie z NCN:</b> „Szkieletowe modele informacyjne głównych segmentów teoretycznych, metodycznych i obserwacyjnych Globalnego Geodezyjnego Systemu Obserwacyjnego GGOS”, Projekt badawczy MNiSzW realizowany w Centrum Badań Kosmicznych PAN, Warszawa, N N526 1598361 |

- w ramach mojej współpracy z CBK PAN oraz GeoForschungsZentrum Potsdam w 2021 roku została uruchomiona kampania pomiarowa *2nd Earth Orientation Parameters Prediction Comparison Campaign* (EOP PCC) i jestem członkiem biura tej kampanii, adres strony kampanii: <http://eoppcc.cbk.waw.pl/eop-pcc-office/>;

- współpracuję z ośrodkami zagranicznymi: *GeoForschungsZentrum Potsdam*, *Atmospheric and Environmental Research (AER)*, oraz *Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, USA* czego dowodem są wspólne publikacje i wystąpienia konferencyjne (np. [B4], [A4], [A2], oraz te wymienione w Załączniku 4); w ramach tej współpracy odbyłam kilka wizyt studyjnych w GFZ Potsdam, oraz jedną wizytę studyjną w AER;

- odbyłam roczny staż naukowy typu post-doc (*Visiting Assistant Research Scientist I*), miejsce: *Climate and Space Science and Engineering, College of Engineering, University of Michigan, Ann Arbor, USA*; podczas stażu realizowałam badania dotyczące różnic globalnych i regionalnych funkcji hydrologicznego momentu pędu HAM wyznaczonych z modeli klimatycznych CMIP5.

## 6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

W październiku 2013 roku objęłam stanowisko adiunkta w Instytucie Dróg i Mostów Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej. Od 2013 roku prowadzę zajęcia z Geodezji inżynierskiej dla I i II semestru studiów stacjonarnych pierwszego stopnia. Od 2014 roku jestem



Załącznik nr 3 – Autoreferat przedstawiający opis dorobku i osiągnięć, w szczególności określonych w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce

współorganizatorem praktyk polowych geodezyjnych dla studentów Wydziału Inżynierii Lądowej PW, które odbyły się również w ramach projektu **NERW PW Nauka – Edukacja – Rozwój - Współpraca**” Zadanie 40 Podnoszenie kompetencji studentów Wydziału Inżynierii Lądowej.

Opracowałam program i sylabus dla przedmiotu „Elementy Geodezji Inżynierskiej”, który to przedmiot był realizowany na nowym kierunku studiów Budowa i Eksploatacja Maszyn Szynowych w ramach programu **NERW 2 PW Nauka – Edukacja – Rozwój - Współpraca** Zadanie 3 Nowy kierunek studiów II stopnia „Budowa i eksploatacja infrastruktury transportu szynowego”. W roku akademickim 2021/2022 prowadziłam również zajęcia z przedmiotu *Surveying* w języku angielskim na studiach anglojęzycznych (Faculty of Civil Engineering WUT).

W roku akademickim 2017/2018 pełniłam funkcję kierownika Zespołu Inżynierskich Pomiarów Geodezyjnych IDiM PW. Od października 2022 roku pełnię obowiązki kierownika Zakładu Inżynierii Transportowej i Geodezji Instytutu Dróg i Mostów Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej.