# Politechnika Warszawska

# Studium porównawcze międzyrocznych geofizycznych oscylacji ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego

Małgorzata Wińska Politechnika Warszawska Wydział Inżynierii Lądowej Instytut Dróg i Mostów

> Konferencja "Systemy odniesień przestrzennych – podstawy geodynamiczne, aktualne realizacje oraz kierunki rozwoju", 08–10 czerwca 2022 r., Grybów









## Wprowadzenie

W ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego, wyrażanej poprzez składowe równikowe funkcji pobudzenia  $\chi_1$ ,  $\chi_2$ , oprócz wahań sezonowych i krótkookresowych wyróżnia się również wahania międzyroczne. Zmiany te w dużej mierze spowodowane są wymianą momentu pędu geofizycznych ośrodków ciekłych Ziemi, tj. atmosferą, oceanem i hydrosferą lądową.

Kluczowe znaczenie dla zmian sezonowych odgrywają nie tylko zmiany ciśnienia atmosferycznego, prędkości wiatrów, lecz także zmiany prądów oceanicznych i ciśnienia dna oceanicznego jak i zmiany w ilości wód śródlądowych. Niestety, związki pomiędzy obserwowalnym geodezyjnym wzbudzeniem ruchu bieguna ziemskiego a modelami geofizycznymi nie zostały jeszcze w pełni określone. Wynika to zarówno z wad modeli geofizycznych oraz niepełnej wiedzy na temat sprzężeń atmosfera-ocean oraz procesów hydrologicznych zachodzących na lądach.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono analizę zmian międzyrocznych równikowych składowych pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego obliczonych zarówno z obserwacji geodezyjnych (seria CO4), jak i różnych modeli geofizycznych (atmosfera, ocean, hydrologia). Oscylacje międzyroczne składowych równikowych różnych serii czasowych zostały wyodrębnione wielokanałową metodą pojedynczego widma (z ang. Multi Singular Spectrum Analysis).











Celem badań jest pokazanie poziomu zgodności w zakresie oscylacji międzyrocznych pomiędzy **geodezyjną obserwowalną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAM** a **geofizyczną funkcją pobudzenia** pochodzącą z różnych modeli atmosfery i oceanu.

W pracy podjęto również próbę wyjaśnienia geodezyjnego ruchu bieguna ziemskiego poprzez uwzględnienie w geofizycznej ekscytacji (atmosfera + ocean) wpływu **hydrologicznego momentu pędu** obliczonego z różnych źródeł: modelu hydrologii lądowej i z danych z grawimetrycznej misji GRACE/GRACE FO.











Analizy oscylacji międzyrocznych przeprowadzone zostały na następujących szeregach:

• geodezyjna obserwowalna funkcja pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego **GAM**,  $\chi_1$ +i $\chi_2$ , seria **EOP 14 C04 (IAU2000A)**, źródło International Rotation and Reference System Service (IERS), dane dzienne;

Geodezyjna równikowa funkcja pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego obliczana jest na podstawie równań Liouville:

$$p - i\sigma_c p = -i\sigma_c \chi$$

gdzie współrzędne ruchu bieguna ziemskiego:

$$p = p_1 + ip_2$$

oraz zespolona *częstotliwość Chandlera*:

 $\sigma_c = 2\pi(1 + i/2Q)T_c$ 

Gdzie częstotliwość Chandlera przyjęto  $T_c = 433$  dni, a *współczynnik dobroci* Q = 100.













#### Geofizyczne funkcje pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego.

Ruch bieguna ziemskiego może być wyznaczany na *podstawie zasady zachowania* momentu pędu w ośrodkach ciekłych Ziemi (atmosfera, ocean, hydrologia lądowa).

*Funkcje geofizycznego momentu pędu* wyznaczane są na podstawie złożonych modeli ciekłych otoczek Ziemi i wyrażają składowe zmian mas (mass) i prędkości (motion).

$$\chi(t)_{geoph} = \chi_1(t) + i\chi_2(t) = \frac{1.608[0.684c]}{(C - \bar{A})!}$$

Tensor bezwładności Ziemi











#### AAM (Atmospheric Angular Momentum):

• model NCEP/NCAR, źródło: Special Bureau for the Atmosphere of the Global Geophysical Fluids Center (GGFC), zmienne ciśnienia (*pressure*) i wiatrów (*wind*) ( $\chi^p$ ,  $\chi^w$ ), dane 6h • model ECMWF, źródło Earth System Modeling GFZ (ESMGFZ), zmienne ciśnienia (pressure) i wiatrów

(*wind*) ( $\chi^p$ ,  $\chi^w$ ), dane 3 h

#### **OAM (Oceanic Angular Momentum)**:

• ECCO kf080, źródło Jet Propulsion Laboratory, IERS Special Bureau for the Oceans, model zawiera dane wejściowe w postaci naprężeń wiatrów atmosferycznych, temperatury, przepływ wód śródlądowych na podstawie modelu NCEP.NCAR, dane dzienne,

• MPIOM (Max Planck Institute from the Meteorology Ocean Model), oceaniczny moment pędu, źródło Earth System Modeling GFZ (ESMGFZ), model wyznaczony na podstawie danych wejściowych modelu atmosfery ECMWF, dane dzienne

#### HAM (Hydrological Angular Momentum)

• Land Surface Discharge Model (LSDM), model opracowany przez Earth System Modeling GFZ (ESMGFZ), zmiany w ilości wód w obrębie lądów obejmują akumulację śniegu, sezonowe spływy z lodowców oraz przepływ wody w korytach rzek: dodatkowo uwzględniono barystatyczne zmiany poziomu morza (tzw. SLAM, Sea Level Angular Momentum), efekt ten bilansuje ilość mas w obiegu atmosfera, ocean, hydrologia lądowa. • GRACE\GRACE FO: Level 2 GSM, źródło CSR (Center for Space Research) (dane w postaci współczynników harmonik sferycznych proporcjonalnych do geofizycznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna

ziemskiego)

• GRACE\GRACE FO, Level 3, mass concentartion solution (tzw. Mascons), oraz zmiany ilości wód śródlądowych (TWS – Terrestrial Water Storage), Release 06, źródło CSR (Center for Space Research)









W analizach skoncentrowano się na oscylacjach geodezyjnej i geofizycznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego w przedziale 1,5 roku do 8 lat.

Badano zgodność geodezyjnej funkcji pobudzenia *GAM* z geofizycznymi funkcjami wyodrębnionymi jako: **AO1** (model NCEP/NCAR + model ECCO kf080) AO2 (model ECMWF + model MPIOM).

> GAM = AO1GAM = AO2

Następnie modele geofizyczne AO1, i AO2 zostały wzmocnione sygnałem hydrologicznym pochodzącym z modelu *LSDM* oraz obliczonym z danych grawimetrycznych z misji **GRACE**.

> GAM = AO1 + HAMGAM = AO2 + HAM











## Metodologia

#### Multi Singular Spectrum Analysis

Składowe równikowe geofizycznej i geodezyjnej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego,  $\chi = \chi_1 + i\chi_2$ , zostały rozłożone na parametry rekonstrukcyjne (RC), przy użyciu dwóch kanałów metody MSSA.

W metodzie zostały wyznaczone tzw. parametry rekonstrukcyjne **(RC)** na czas *t* oraz dla **I** serii czasowych:

$$R_{l}^{k} = \begin{cases} \frac{1}{L} \sum_{j=1}^{L} A^{k}(t-j+1) E_{l}^{k}(j), & \text{for} \\ \frac{1}{i} \sum_{j=1}^{L} A^{k}(t-j+1) E_{l}^{k}(j), & \text{for} \\ \frac{1}{N-i+1} \sum_{j=1}^{L} A^{k}(t-j+1) E_{l}^{k}(j), & \text{for} \end{cases}$$

W zależności od częstotliwości wyodrębnionej z szeregu czasowego, można zrekonstruować różne składowe tego szeregu. Warto podkreślić, że sumując wszystkie parametry RC, oryginalny szereg czasowy jest odtwarzany bez utraty informacji. Politechnika Warszawska

 $r L \le t \le N - L + 1$ 

 $r \ 1 \le t \le L - 1$ 

for  $N - L + 2 \le t \le N$ 













# Wyniki analiz







## Rekonstrukcje geodezyjnej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAM



Fig. 1 Miesięczne składowe różnych oscylacji funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAM wyznaczone metodą MSSA, (a) sezonowe, (b) międzyroczne, (c) suma składowych sezonowych i międzyrocznych.







## Rekonstrukcje geofizycznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego AO1 i AO2



Politechnika Warszawska Fig. 2 Miesięczne składowe różnych oscylacji geofizycznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego AO1 i AO2 wyznaczone metodą MSSA, (a) sezonowe, (b) międzyroczne, (c) suma składowych sezonowych i międzyrocznych.

![](_page_10_Figure_4.jpeg)

![](_page_10_Picture_6.jpeg)

![](_page_10_Picture_7.jpeg)

## Międzyroczne oscylacje geodezyjnej GAM i geofizycznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego AO1 i AO2

![](_page_11_Figure_1.jpeg)

### Politechnika Warszawska

Fig. 3 Międzyroczne oscylacje geodezyjnej GAM funkcji pobudzenia oraz różnych geofizycznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego wyznaczonych dla różnych kombinacji wyrazów mass i motion z modeli AO1 i AO2.

![](_page_11_Figure_4.jpeg)

![](_page_11_Picture_5.jpeg)

![](_page_11_Picture_6.jpeg)

![](_page_11_Picture_7.jpeg)

## Średnia kwadratowe (RMS)

Tabela 1 Wartości RMS obliczone dla oscylacji międzyrocznych składowych równikowych geodezyjnej funkcji ekscytacji oraz dla geofizycznych ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego.

	$\chi_1$ (mas)	$\chi_2$ (mas)
GAM	6.57	14.16
AAM NCEP/NCAR mass	3.08	5.13
AAM NCEP/NCAR motion	4.27	6.35
AAM NCEP/NCAR mass+motion	5.57	9.50
OAM ECCO mass	1.98	5.13
OAM ECCO motion	1.71	2.81
OAM ECCO mass+motion	2.55	7.33
AO1=AAM <sub>mass+motion</sub> +OAM <sub>mass+mo</sub>	6.47	12.27
tion		
AAM ECMWF mass	2.79	4.78
AAM ECMWF motion	2.62	2.24
AAM ECMWF mass+motion	3.50	6.19
OAM MPIOM mass	3.80	6.58
OAM MPIOM motion	4.90	5.12
<b>OAM MPIOM mass+motion</b>	5.35	10.05
AO2=AAM <sub>mass+motion</sub> +OAM <sub>mass+mo</sub>	7.04	12.65
r: tion		

![](_page_12_Figure_3.jpeg)

![](_page_12_Picture_4.jpeg)

![](_page_12_Picture_5.jpeg)

![](_page_12_Picture_6.jpeg)

## Współczynnik korelacji i procent wyjaśnionej wariancji

![](_page_13_Figure_1.jpeg)

Politechnika Warszawska Fig. 4 Współczynniki korelacji oraz procent wyjaśnionej wariancji pomiędzy geodezyjną funkcją pobudzenia GAM a geofizycznymi funkcjami pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego AO1 i AO2.

![](_page_13_Picture_5.jpeg)

![](_page_13_Picture_6.jpeg)

![](_page_13_Picture_7.jpeg)

![](_page_13_Picture_8.jpeg)

![](_page_13_Picture_9.jpeg)

## Międzyroczne oscylacje geodezyjnej GAM i geofizycznych funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego AO1 i AO2 + HAM

![](_page_14_Figure_1.jpeg)

#### Politechnika Warszawska

Fig. 5 Porównanie oscylacji międzyrocznych obserwowalnej geodezyjnej funkcji pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego GAM i (a) geofizycznymi pobudzeniami AO1 wzmocnionymi sygnałem hydrologicznych HAM, (b) geofizycznymi pobudzeniami AO2 wzmocnionymi sygnałem hydrologicznych HAM, (c) różnice między sygnałem GAM a sumą pobudzeni AO1+HAM, (d) różnice między sygnałem GAM a sumą pobudzeni AO2+HAM

![](_page_14_Picture_4.jpeg)

![](_page_14_Picture_5.jpeg)

![](_page_14_Picture_6.jpeg)

![](_page_14_Picture_7.jpeg)

## Średnia kwadratowe (RMS)

**Tabela 2** Wartości RMS obliczone dla oscylacji międzyrocznych składowych równikowych geodezyjnej funkcji ekscytacji oraz dla geofizycznych ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego wzmocnionych różnymi sygnałami hydrologicznymi.

	$\chi_1$ (mas)	$\chi_2$ (mas)
GAM	6.57	14.16
A01=AAM <sub>mass+motion</sub> +OAM <sub>mass+motion</sub>	6.47	12.27
AO1 + HAM LSDM	8.62	14.08
AO1 + GRACE GSM	8.44	11.81
AO1 + GRACE TWS	7.38	12.51
AO1 + GRACE MAS	8.58	14.00
AO2=AAM <sub>mass+motion</sub> +OAM <sub>mass+motion</sub>	7.04	12.65
AO2 + HAM LSDM	8.25	18.06
AO2 + GRACE GSM	8.46	14.81
AO2 + GRACE TWS	7.50	14.99
AO2 + GRACE MAS	8.96	17.07

![](_page_15_Picture_4.jpeg)

![](_page_15_Picture_5.jpeg)

![](_page_15_Picture_6.jpeg)

## Średnia kwadratowe (RMS)

**Tabela 3** Wartości RMS obliczone dla oscylacji międzyrocznych różnic składowych równikowych geodezyjnej funkcji ekscytacji oraz dla geofizycznych ekscytacji ruchu bieguna ziemskiego wzmocnionych różnymi sygnałami hydrologicznymi.

	$\chi_1$ (mas)	$\chi_2$ (mas)
GAM-AO1	4.16	10.93
GAM-( AO1 + HAM LSDM)	5.57	6.10
GAM-(AO1 + GRACE GSM)	4.07	6.92
GAM-(AO1 + GRACE TWS)	3.73	7.37
GAM-(AO1 + GRACE MAS)	3.89	5.76
GAM-AO2	5.52	5.61
GAM-(AO2 + HAM LSDM)	5.38	8.23
GAM-(AO2 + GRACE GSM)	4.74	5.50
GAM-(AO2 + GRACE TWS)	4.60	5.00
GAM-(AO2 + GRACE MAS)	5.22	7.26

![](_page_16_Picture_4.jpeg)

![](_page_16_Picture_5.jpeg)

![](_page_16_Picture_6.jpeg)

## Współczynnik korelacji i procent wyjaśnionej wariancji

![](_page_17_Figure_1.jpeg)

Politechnika Warszawska Fig. 6 Współczynniki korelacji oraz procent wyjaśnionej wariancji pomiędzy geodezyjną funkcją pobudzenia GAM a geofizycznymi funkcjami pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego AO1 i AO2 wzmocnionymi różnymi sygnałami hydrologicznymi.

![](_page_17_Picture_4.jpeg)

![](_page_17_Picture_5.jpeg)

![](_page_17_Picture_6.jpeg)

![](_page_17_Picture_7.jpeg)

#### Spektra amplitudowe GAM, AO1, AO2, AO1+HAM

![](_page_18_Figure_1.jpeg)

![](_page_18_Figure_2.jpeg)

![](_page_18_Figure_4.jpeg)

Fig. 7 Spektra amplitudowe wyznaczone metodą FTBPF (Fourier Transform Band Pass Filter) zespolonych ekscytacji GAM oraz: (a) ekscytacji AO1 i (b) ekscytacji AO1 AO2; wzmocnionych różnymi sygnałami hydrologicznymi; okres obcięcia 50-4500 dni.

![](_page_18_Figure_6.jpeg)

![](_page_18_Picture_7.jpeg)

![](_page_18_Picture_9.jpeg)

![](_page_18_Picture_10.jpeg)

![](_page_18_Picture_11.jpeg)

#### Spektra amplitudowe GAM, AO1, AO2, oraz AO2+HAM

![](_page_19_Figure_1.jpeg)

Spektra amplitudowe 8 Fig. FTBPF metodą wyznaczone (Fourier Transform Band Pass Filter) zespolonych ekscytacji GAM oraz: (a) ekscytacji AO1 i (c) ekscytacji AO2 AO2; różnymi wzmocnionych sygnałami hydrologicznymi. Okres obcięcia 50-4500 dni,

![](_page_19_Figure_4.jpeg)

![](_page_19_Picture_5.jpeg)

![](_page_19_Picture_6.jpeg)

![](_page_19_Picture_7.jpeg)

## Wnioski

- W pracy przedstawiono porównania międzyrocznych zmian zespolonych geofizycznych składowych ruchu bieguna ziemskiego,  $\chi_1$ +i $\chi_2$ , które odzwierciedlają zmiany w hydrologiczno-atmosferycznym sygnale ruchu bieguna ziemskiego wyznaczanego na podstawie pomiarów geodezyjnych.
- Składowa wyrażające zmianę mas atmosferycznego momentu pędu modeli NCEP/NCAR i ECMWF wykazuje dużą zgodność dla obu komponentów  $\chi 1$  i  $\chi 2$ , natomiast składowa zmian prędkości wiatrów jest różna, zwłaszcza dla składowej  $\chi^2$ . Podobnie, została znaleziona rozbieżność między składowymi mass i motion oceanicznego momentu pędu obliczonymi dla modeli ECCO i MPIOM.
- Geodezyjna i geofizyczne funkcje ekscytacji wykazały lepszą zgodność z uwzględnieniem hydrologicznego sygnału w łącznej kombinacji AO.
- Wzmocnienie sygnału geofizycznego za pomocą danych z misji satelitarnych GRACE daje lepsze rezultaty niż wzmocnienie modeli AO modelem LSDM.
- Lepszą zgodność uzyskano dla składowej równikowej  $\chi^2$ , prawdopodobnie ze względu na fakt, że zmiany mas atmosferycznych i oceanicznych są bardziej czułe dla obszarów lądowych

![](_page_20_Figure_12.jpeg)

![](_page_20_Picture_13.jpeg)

![](_page_20_Picture_14.jpeg)

![](_page_20_Picture_15.jpeg)

## Wnioski

- Różnice między geodezyjną funkcją pobudzenia GAM a sygnałem hydro-atmosferycznym AO+HAM wykazały niewyjaśniony międzyroczny sygnał pozostały w rezydualnym szeregu GAM-AO-HAM.
- Wykazano istnienie oscylacji o okresach 5.9, 3.53 i 2.5 roku dla składowej prostej i wstecznej; ponadto, funcje HAM GRACE MAS i GSM poprawiły zgodność z GAM w zakresie oscylacji 5.9 i 3.53 roku zarówno dla składowej wstecznej jak i prostej.
- Żadna składowa, zarówno odnosząca się do zmian mas, jak i do zmian ruchu, atmosferycznego i oceanicznego momentu pędu nie jest zaniedbywalna i nie można pominąć jej w analizach poszukiwania zgodności pomiędzy geodezyjną a geofizyczną funkcją pobudzenia ruchu bieguna ziemskiego dla oscylacji międzyrocznych.
- Co więcej, uwzględnienie hydrologicznego sygnału, wyznaczonego z modeli hydrologicznych, jak i z danych satelitarnej misji GRACE (z ang. Gravity Recovery and Climate Experiment) i GRACE Follow on przyczynia się do poniesienia rozważanej zgodności, jednakże obserwowalny geodezyjny sygnał międzyroczny nie jest w pełni wyjaśniony przez kombinacje rozważanych modeli geofizycznych.

![](_page_21_Figure_10.jpeg)

![](_page_21_Picture_11.jpeg)

![](_page_21_Picture_12.jpeg)

![](_page_21_Picture_13.jpeg)

![](_page_21_Picture_14.jpeg)

# Politechnika Warszawska

# Dziękuję za uwagę

![](_page_22_Picture_4.jpeg)

![](_page_22_Picture_5.jpeg)

.