



Wykorzystanie nowoczesnych technik geodezyjnych do badania zmian zasobów wód kontynentalnych

Jan Mikocki, Anna Kłos, Artur Leńczuk, Janusz Bogusz

Konferencja EnviLink „*Międzynarodowa platforma wymiany doświadczeń młodych naukowców w badaniach przyrodniczych*” Instytutu Badawczego Leśnictwa

Sękocin Stary, 15-17.05.2024 r.

Motywacja

WODA = ŻYCIE

Organizm ludzki składa się w około **60–70%** z wody (Wiśniewski, 2018).

Udział energii wodnej w produkcji energii elektrycznej wynosi obecnie ponad **16%** (Butt i in., 2024).

Sektor rolnictwa zużywa ponad **70%** całkowitej ilości wody pobieranej na świecie (Fuglie i in., 2024).

GRUDZIEŃ 2020



GRUDZIEŃ 2021



GRUDZIEŃ 2022



Zapotrzebowanie na wodę rośnie wraz ze wzrostem liczby ludności i jest potęgowane skutkami zmian klimatu (np. **suszami**).

Do 2025 r. **dwie trzecie** światowej populacji może stanąć w obliczu niedoboru wody (WWF).

Podstawowe pojęcia

Zasoby wód kontynentalnych (ang. Terrestrial Water Storage, **TWS**) – suma zasobów wodnych znajdujących się na i pod powierzchnią Ziemi (Rodell i Famiglietti, 2001).

Rzeki



Jeziora



Śnieg



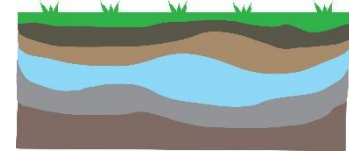
Lód



Rośliny



Wody gruntowe



Wartości TWS są wyrażane jako wysokość słupa wody (ang. Equivalent Water Height, **EWH**).

$$1 \text{ m EWH} = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}}{\rho_w} = \frac{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}}{1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}$$



1000 kg wody o gęstości ρ_w równej $1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ rozłożonej równomiernie na powierzchni 1 m^2 ma wysokość równą 1 m .

Monitorowanie zmian zasobów wód kontynentalnych

Hydrogeodezja (ang. hydrogeodesy) – obszar badawczy obejmujący wykorzystanie obserwacji pozyskiwanych nowoczesnymi technikami geodezyjnymi do wyznaczenia zmian zasobów wód kontynentalnych (Longuevergne, 2008).

Wartości TWS nie są wyznaczane bezpośrednio z obserwacji geodezyjnych.

Zmiany pola
grawitacyjnego Ziemi



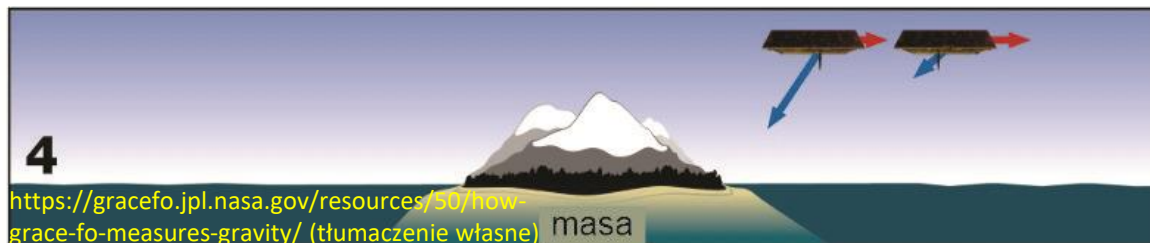
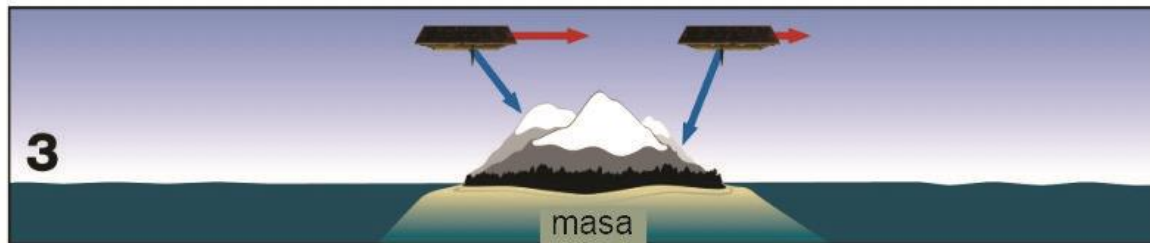
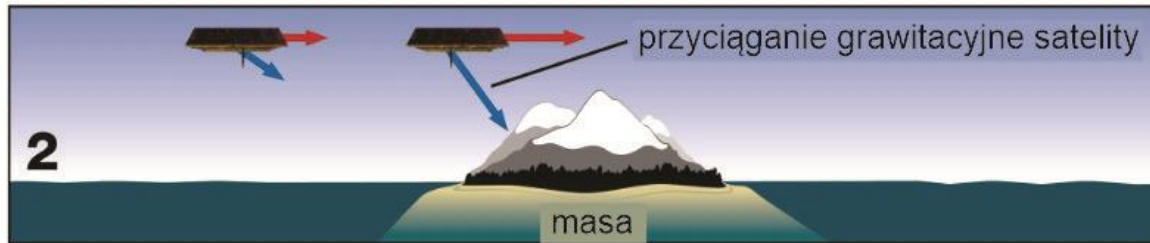
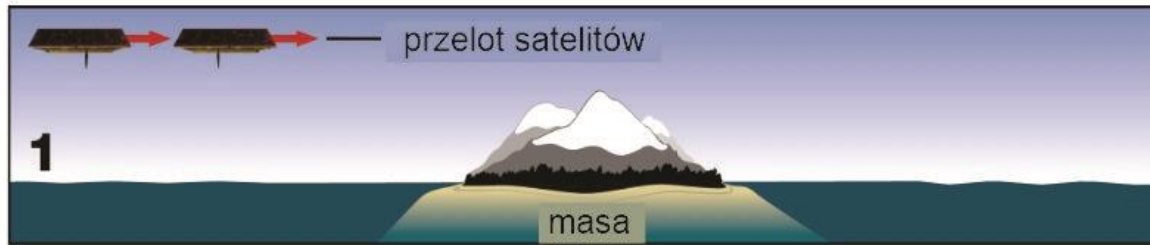
Satelitarne misje
grawimetryczne

Przemieszczenia pionowe
skorupy ziemskiej



Inwersja regionalna (matematyczne
odwrócenie) szeregów czasowych

Monitorowanie zmian zasobów wód kontynentalnych (zmiany pola grawitacyjnego Ziemi)



2002-2017 – GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment).

2018-... – GRACE Follow-On (misja kontynuacyjna).

Dokładność pomiaru odległości (Badora, 2016):

- GRACE: $\sim 1 \mu\text{m}$,
- GRACE-FO: $\sim \frac{1 \mu\text{m}}{20}$.

Bazowa rozdzielczość (Schmidt i in., 2008):

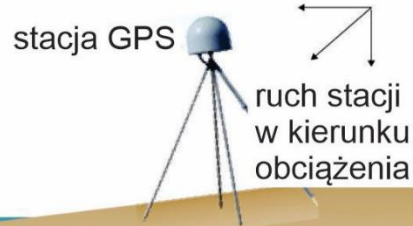
- przestrzenna: $\sim 300 \text{ km}$ ($3^\circ \times 3^\circ$),
- czasowa: 30 dni.

Analiza wyłącznie zmian **globalnych** i **regionalnych**.

Monitorowanie zmian zasobów wód kontynentalnych (przemieszczenia pionowe skorupy ziemskiej)



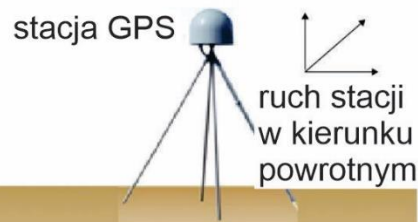
obciążenie



masa wody



odciążenie



Zmiany pozycji stacji permanentnych GPS (ang. Global Positioning System) są interpretowane jako **przemieszczenia**.

Wzrost mas (wartości TWS) powoduje **osiadanie** skorupy ziemskiej (w tym stacji permanentnej GPS).

Ubytek mas (wartości TWS) powoduje **wypiętrzenie** skorupy ziemskiej (w tym stacji permanentnej GPS).

Bazowa rozdzielczość (Argus i in., 2014; Blewitt i in., 2018):

- przestrzenna: zależna od liczby stacji GPS,
- czasowa: 1 doba.

Analiza zmian **regionalnych** i **lokalnych**.

Wykorzystane dane oraz metodyka

Dane (kwiecień 2002 – grudzień 2022 r.):

- miesięczne wartości TWS (EWH) z misji GRACE/-FO, udostępniane przez Jet Propulsion Laboratory w siatce geograficznej $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ (JPL RL06.1_v03; <https://podaac.jpl.nasa.gov/>),
- przemieszczenia pionowe stacji permanentnych GPS, udostępniane przez Nevada Geodetic Laboratory (<http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/GlobalStationList>) – usunięcie efektów niezwiązanych z hydrosferą lądową (Dill i Dobsław, 2013; Stuhne i Peltier, 2015) oraz uśrednienie.

Metodyka:

- obliczenie globalnych zmian sezonowych (amplituda oscylacji rocznej) oraz długookresowych (trend liniowy) wartości TWS z misji GRACE/-FO (metoda najmniejszych kwadratów),
- obliczenie wartości TWS na podstawie przemieszczeń pionowych stacji permanentnych GPS dla dorzecza Sekwany (metoda inwersji regionalnej).

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + k^2 \mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L}$$

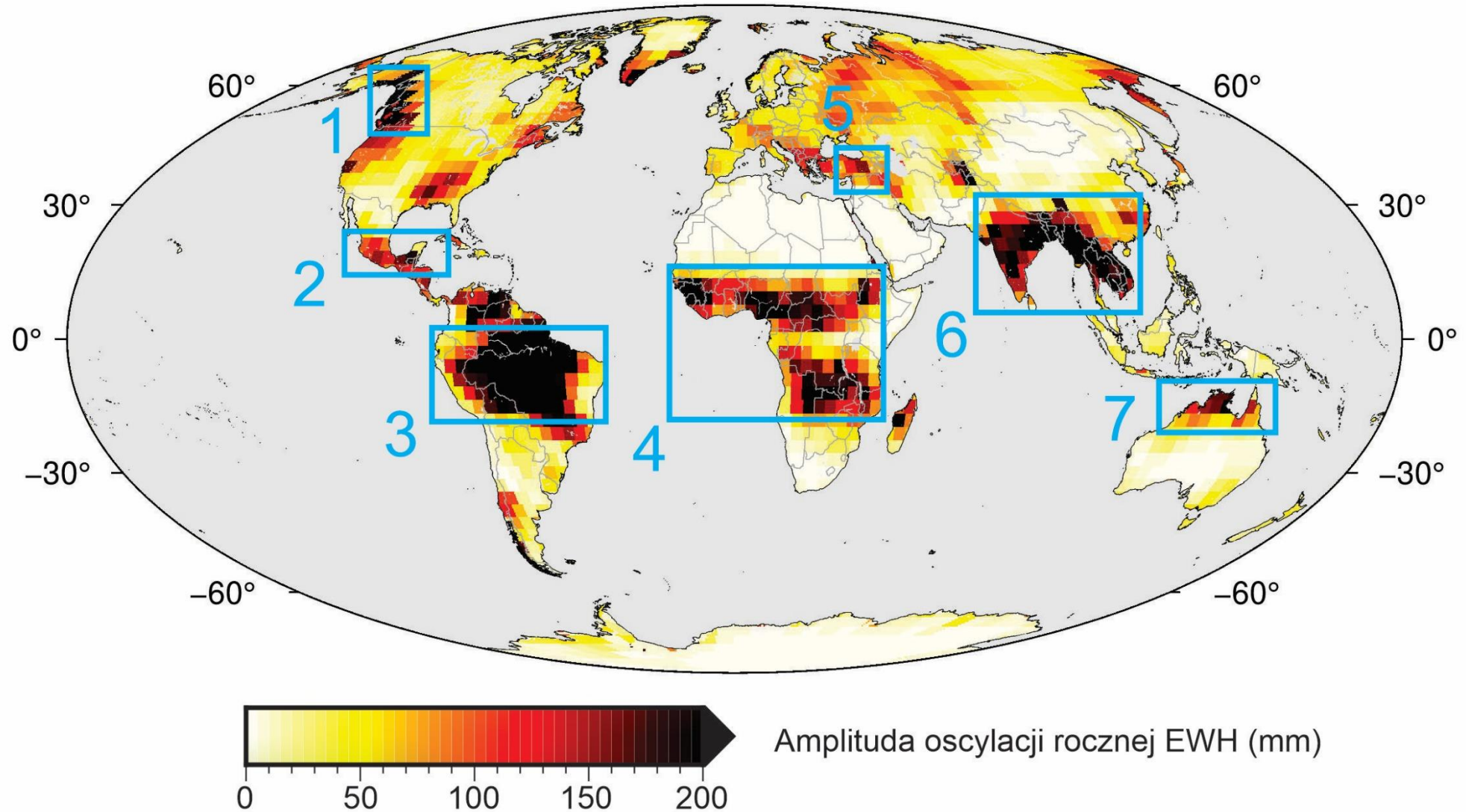


\mathbf{A} – macierz funkcji Greena, \mathbf{P} – macierz wag,
 k – parametr regularyzacji, \mathbf{B} – macierz Laplasjanów,
 \mathbf{L} – wektor przemieszczeń pionowych GPS.



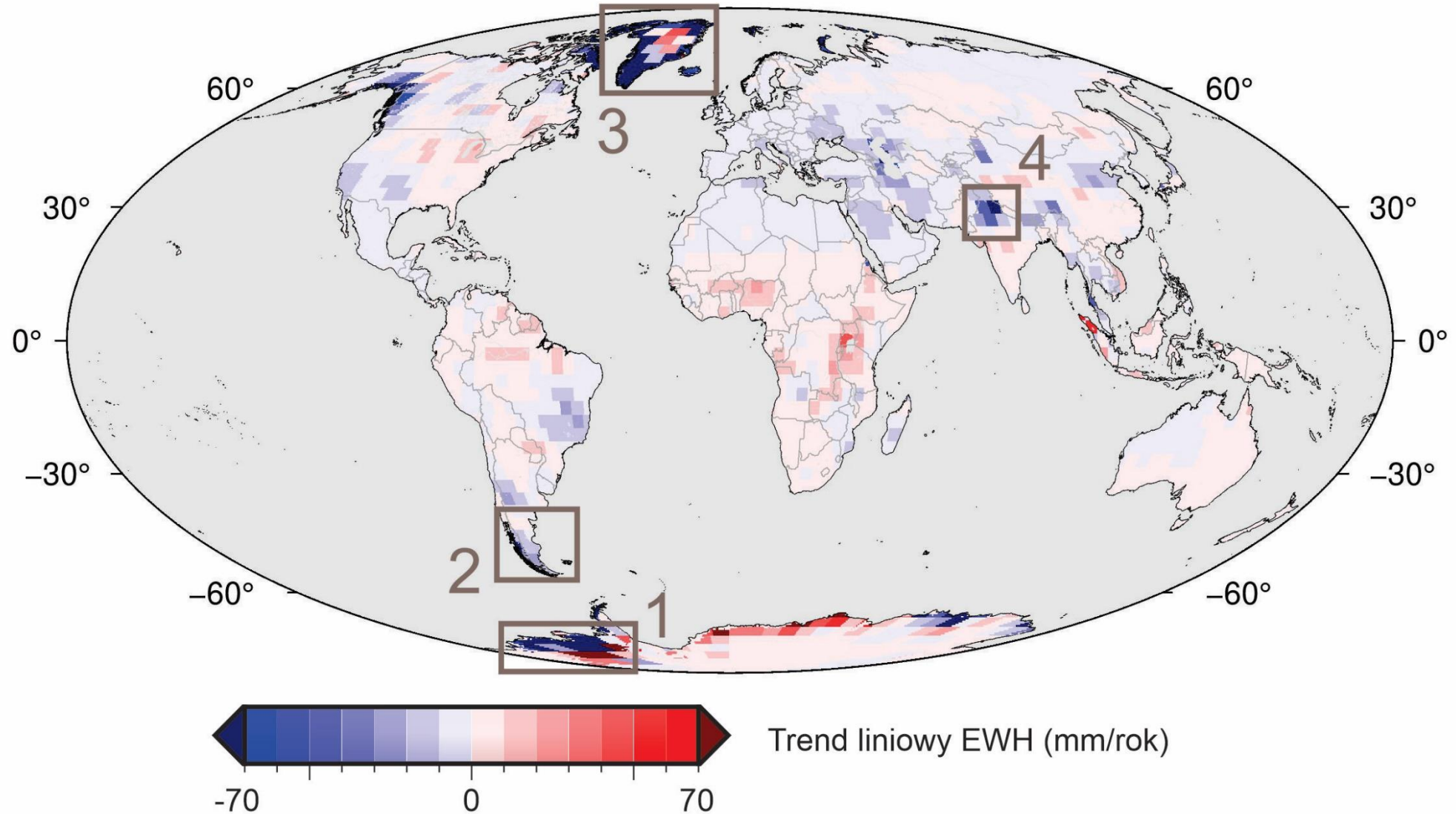
Wyniki

Sezonowe zmiany zasobów wód kontynentalnych z misji GRACE/-FO



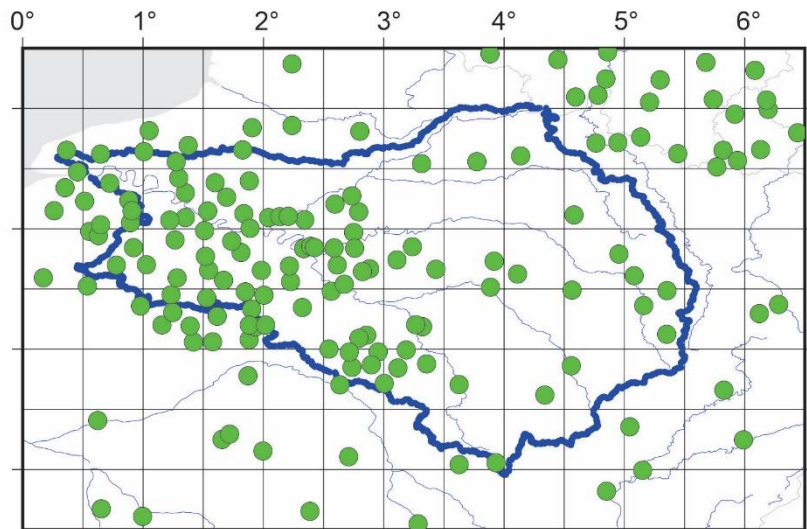
Wyniki

Długookresowe zmiany zasobów wód kontynentalnych z misji GRACE/-FO

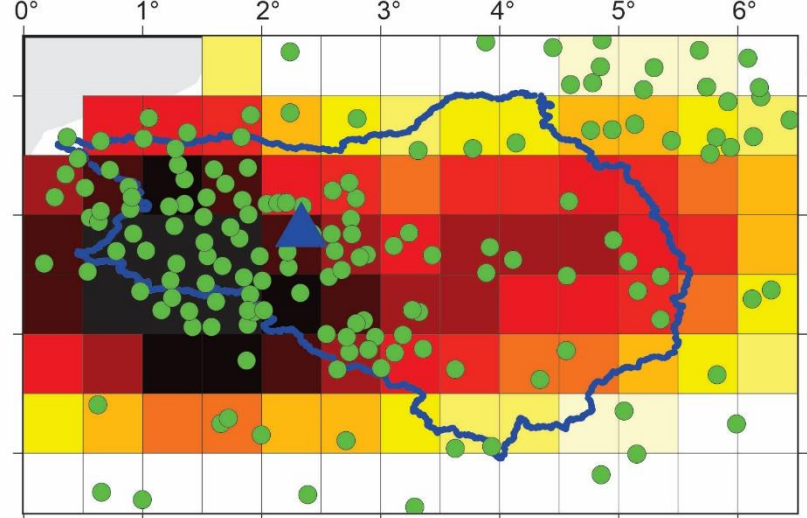


Wyniki

Zmiany zasobów wód kontynentalnych na podstawie przemieszczeń pionowych stacji GPS



Wartości TWS po inwersji przemieszczeń GPS dla stycznia 2018 r.

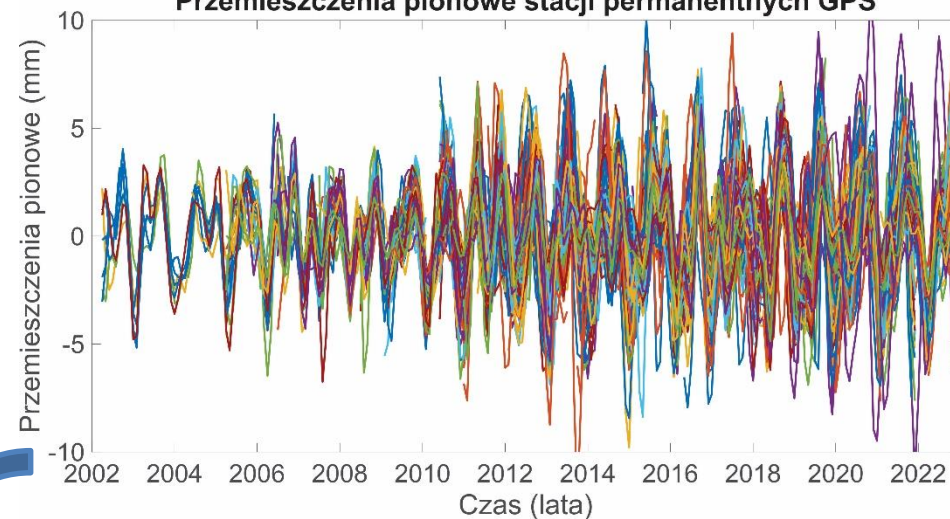


Dorzecze Sekwany:

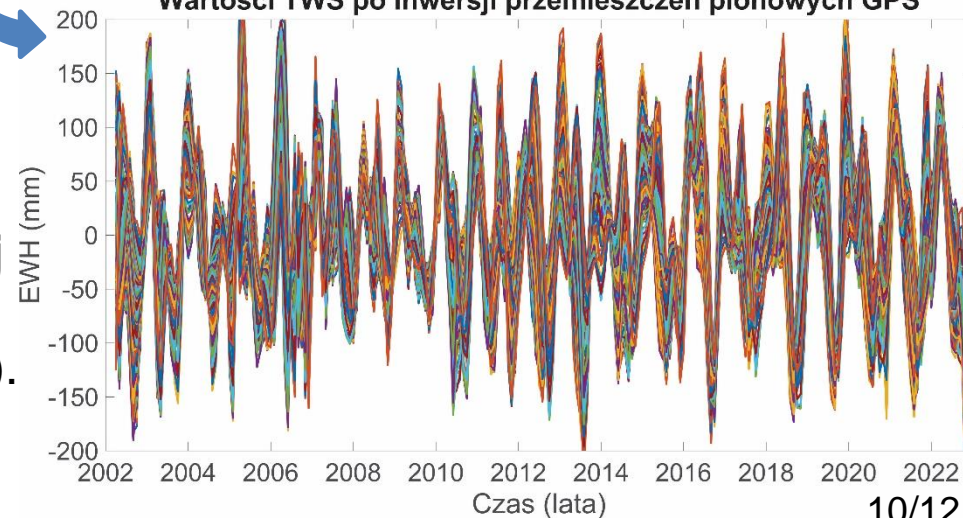
- amplituda oscylacji rocznej wartości TWS (EWH) z misji GRACE/-FO (do ~90 mm),
- duża liczba stacji GPS (wyższa rozdzielczość przestrzenna TWS),
- amplituda oscylacji rocznej przemieszczeń pionowych stacji GPS (do ~5 mm).

Od 1 grudnia 2017 r. do 21 stycznia 2018 r. w Paryżu spadło **dwukrotnie więcej** deszczu niż w typowym roku (*businessinsider.com*).

Przemieszczenia pionowe stacji permanentnych GPS



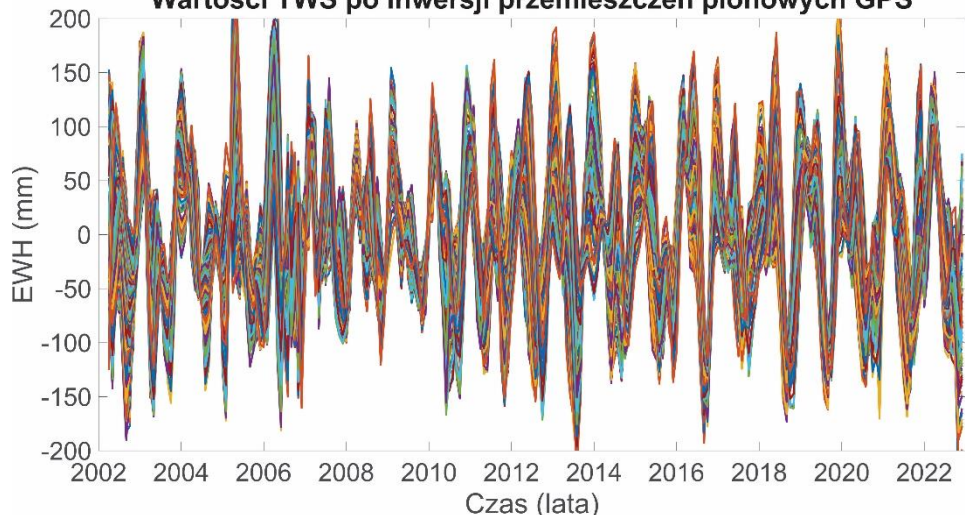
Wartości TWS po inwersji przemieszczeń pionowych GPS



Wyniki

Zmiany zasobów wód kontynentalnych na podstawie przemieszczeń pionowych stacji GPS

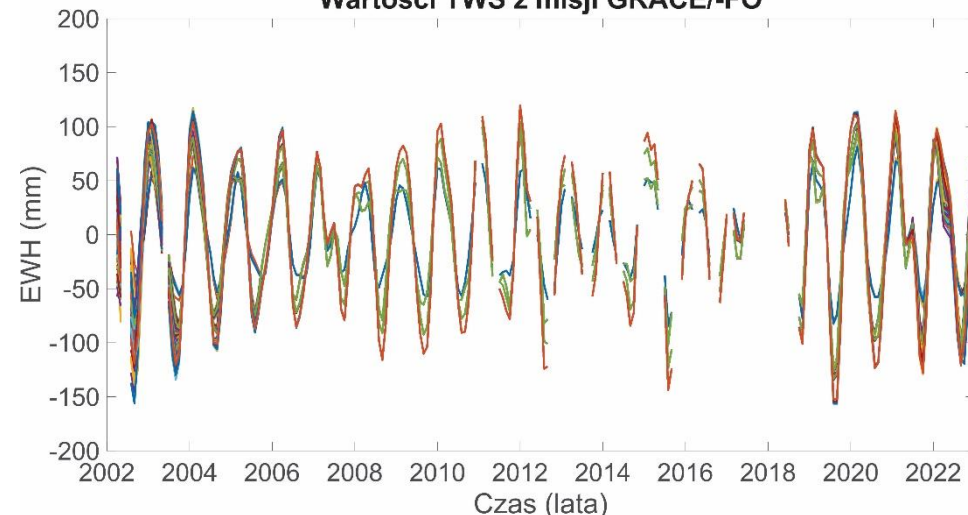
Wartości TWS po inwersji przemieszczeń pionowych GPS



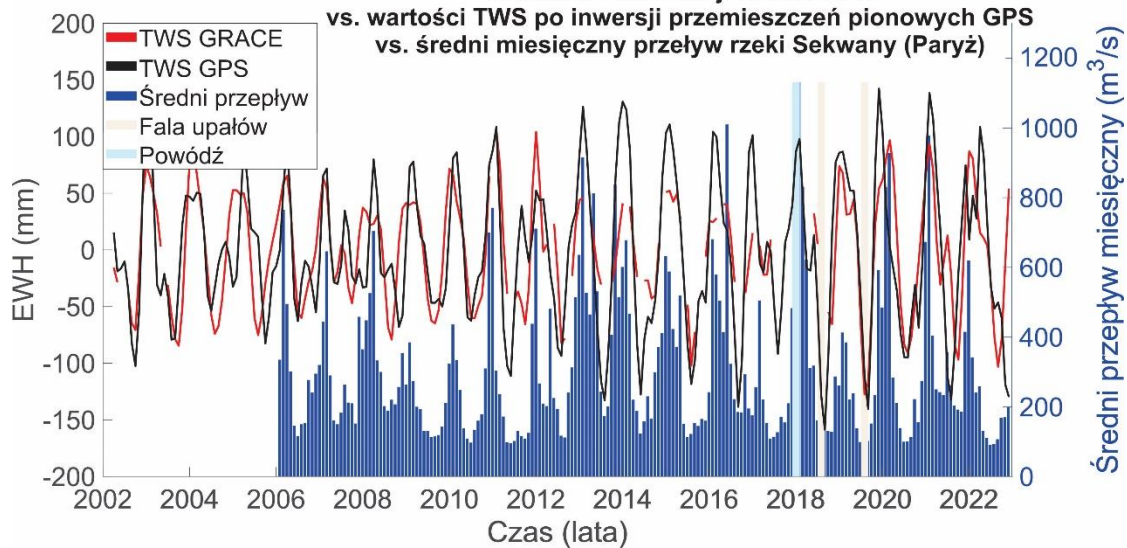
Wartości TWS po inwersji przemieszczeń pionowych GPS są pozytywnie skorelowane z wartościami TWS z misji GRACE/-FO.

Zgodność TWS ze średnim przepływem miesięcznym (Paryż; przepływomierz).

Wartości TWS z misji GRACE/-FO

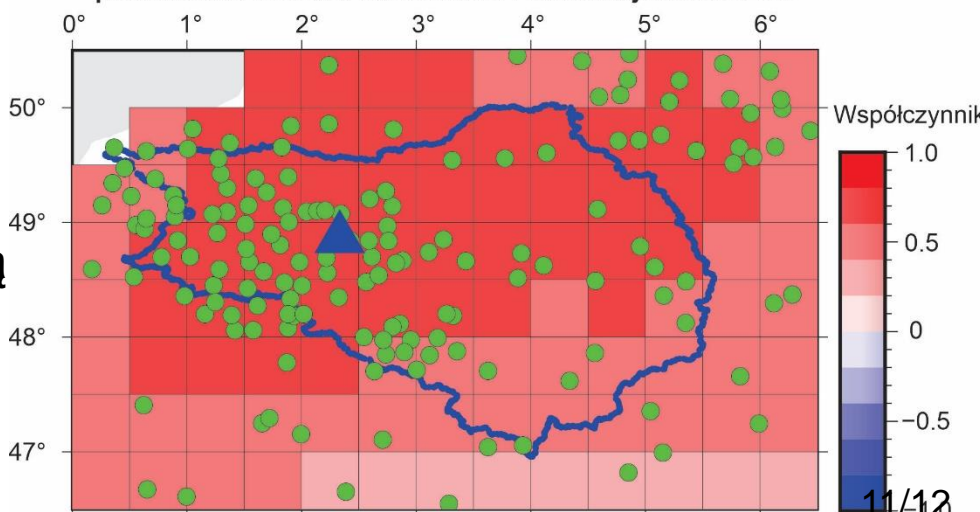


Wartości TWS z misji GRACE/-FO vs. wartości TWS po inwersji przemieszczeń pionowych GPS vs. średni miesięczny przepływ rzeki Sekwany (Paryż)



W lipcu 2019 roku odnotowano rekordowo wysoką temperaturę w Paryżu (42,6°C) (*bbc.com*).

Korelacja liniowa Pearsona pomiędzy wartościami TWS po inwersji przemieszczeń GPS a wartościami TWS z misji GRACE/-FO



Podsumowanie i wnioski

1. Wyznaczanie zmian zasobów wód kontynentalnych na podstawie zmian pola grawitacyjnego Ziemi umożliwiają misje GRACE/-FO, które ze względu na niską rozdzielczość przestrzenną są efektywne w badaniu zmian zasobów wód kontynentalnych jedynie w skali globalnej i regionalnej.
2. Metoda inwersji regionalnej przemieszczeń pionowych stacji permanentnych GPS stanowi alternatywę do wyznaczania zmian zasobów wód kontynentalnych (także z dzienną rozdzielczością czasową), jednakże wynikowe zmiany zależą w głównej mierze od liczby stacji w danym regionie.
3. Pomimo ograniczeń każdej z technik, zmiany zasobów wód kontynentalnych charakteryzują się pozytywną korelacją (pomiędzy sobą) w dorzeczu rzeki Sekwany.
4. Zmiany zasobów wód kontynentalnych z technik GRACE/-FO oraz GPS są zgodne ze średnim miesięcznym przepływem rzeki Sekwany – techniki umożliwiają analizy skutków zmian klimatu.

Dziękuję za uwagę!

17.05.2024 r. - Sesja referatowa Technologia (8:15-9:45):
dr inż. Artur Leńczuk – Ocena właściwości suszy na podstawie danych geodezyjnych.

* Źródło finansowania pracy — Narodowe Centrum Nauki (NCN), numer umowy:
UMO-2022/45/B/ST10/00333.

- Rodell M., Famiglietti J. S. (2001). *An analysis of terrestrial water storage variations in Illinois with implications for the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE)*, Water Resources Research, 37(5), s. 1327-1339. DOI: <https://doi.org/10.1029/2000WR900306>.
- Wiśniewski J. (2018). *Rola krzemu i siarki w chorobach tkanki łącznej. Część II*, Polskie Towarzystwo Farmaceutyczne, 74(3), DOI: 10.32383/farmpol/119189.
- Butt A. Q., Shangquan D., Ding Y. i in. (2024). *Assessing the existing guidelines of environmental impact assessment and mitigation measures for future hydropower projects in Pakistan*, Frontiers in Environmental Science, 11. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1342953.
- Fugile O. K., Morgan S., Jelliffe J. (2024). *World Agricultural Production, Resource Use, and Productivity, 1961–2020*, Economic Research Service, Economic Information Bulletin, 268.
- Longuevergne L. (2008). *Contribution to Hydrogeodesy*. PhD Thesis. DOI:10.13140/RG.2.2.16521.65127.
- Badora D. (2016). *Studium wykorzystania modelu GRACE w ocenie zmian poziomu wód gruntowych w kontekście dostępności wody dla rolnictwa w zlewni rzeki Wisły*. Polish Journal of Agronomy 27, s. 21–31. DOI: 10.26114/pja.iung.306.2016.27.03.
- Schmidt R., Flechtner F., Meyer U. i in. (2008). *Hydrological Signals Observed by the GRACE Satellites*. Surveys in Geophysics, 29(4-5), s. 319-334. DOI: 10.1007/s10712-008-9033-3.
- Argus, D. F., Fu, Y., Landerer, F. W. (2014). *Seasonal variation in total water storage in California inferred from GPS observations of vertical land motion*. Geophysical Research Letters, 41(6), 1971-1980. DOI: 10.1002/2014GL059570.
- Blewitt, G., Hammond, W., Kreemer, C. (2018). *Harnessing the GPS Data Explosion for Interdisciplinary Science*. Eos, 99. DOI: 10.1029/2018EO104623.
- Dill R., Dobsław, H. (2013). *Numerical simulations of global-scale high-resolution hydrological crustal deformations*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 118(9), s. 5008–5017. DOI: 10.1002/jgrb.50353.
- Stuhne G. R., Peltier W. R. (2015). *Reconciling the ICE-6G_C reconstruction of glacial chronology with ice sheet dynamics: The cases of Greenland and Antarctica*, Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 120(9), s. 1841–1865. DOI: 10.1002/2015JF003580.
- <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>
- <https://www.worldwildlife.org/threats/water-scarcity>
- <https://gracefo.jpl.nasa.gov/resources/50/how-grace-fo-measures-gravity/> (tłumaczenie własne)
- https://globalcda.de/wp-content/uploads/2020/09/P9_globalcda_webpage03.jpg (tłumaczenie własne)
- <https://podaac.jpl.nasa.gov/>
- <http://geodesy.unr.edu/NGLStationPages/GlobalStationList>
- <https://www.businessinsider.com/see-paris-underwater-as-the-seine-floods-the-streets-hundred-year-flood-2018-1?IR=T#from-december-1-2017-to-january-21-2018-paris-got-more-than-7-inches-of-rain-double-the-amount-in-a-typical-year-2>
- <https://www.bbc.com/news/world-europe-49108847>
- Dane z przepływomierza pozyskano ze strony: <https://www.hydro.eaufrance.fr/>
- Pozostałe obrazy pobrano ze strony: <https://pixabay.com/>

Metodyka

Przemieszczenia pionowe wywołane potencjałem grawitacyjnym:

$$\left[\frac{m^3}{kg} \right] \leftarrow G(\theta_{i,j}) = \sum_{n=0}^{\infty} h_n \cdot \Gamma_n \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot G \cdot a}{g \cdot (2 \cdot n + 1)} \cdot P_n(\cos \theta_{ij})$$

gdzie:

$\theta_{i,j}$ – odległość kątowa pomiędzy współrzędnymi punktów obserwacji (i , np. stacją GPS) a punktem (j), w którym wartość TWS wyznaczamy:

$$\cos(\theta_{i,j}) = \sin \varphi_j \cdot \sin \varphi_i + \cos \varphi_j \cdot \cos \varphi_i \cdot \cos(\lambda_j - \lambda_i)$$

$$\theta_{i,j} = \arccos(\cos(\theta_{i,j}))$$

φ_i – szerokość geograficzna punktu i ,

φ_j – szerokość geograficzna punktu j ,

λ_i – długość geograficzna punktu i ,

λ_j – długość geograficzna punktu j ,

n – liczba stopni (10000),

h_n – liczba Love'a dla danego stopnia n ,

Metodyka

Przemieszczenia pionowe wywołane potencjałem grawitacyjnym:

$$\left[\frac{m^3}{kg} \right] \leftarrow G(\theta_{i,j}) = \sum_{n=0}^{\infty} h_n \cdot \Gamma_n \cdot \frac{4 \cdot \pi \cdot G \cdot a}{g \cdot (2 \cdot n + 1)} \cdot P_n(\cos \theta_{ij})$$

gdzie:

Γ_n jest równe wyrażeniu:

$$\Gamma_0 = \frac{1}{2} (1 - \cos \alpha) \quad \text{dla } n = 0$$

$$\Gamma_n = \frac{1}{2} [P_{n-1}(\cos \alpha) - P_{n+1}(\cos \alpha)] \quad \text{dla } n > 0$$

G – stała grawitacji ($\sim 6.6743 \cdot 10^{-11} \frac{m^3}{kg \cdot s^2}$),

a – średni promień Ziemi (6371000 m),

g – przyspieszenie grawitacyjne na powierzchni Ziemi ($\sim 9.8186 \frac{m}{s^2}$),

α – promień dysku, zmieniający się w zależności od szerokości geograficznej punktu siatki geograficznej (TWS),

$P_n(\cos \theta_{ij})$ – wielomiany Legendre'a dla odległości kątowej θ_{ij} i danego stopnia n .

Metodyka

gdzie:

$$\hat{\mathbf{X}} = (\mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{A} + k^2 \mathbf{B}^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{P} \mathbf{L}$$

$\hat{\mathbf{X}}$ – wektor estymatorów wartości TWS, wyznaczanych na daną epokę w punktach (węzłach) regularnej siatki geograficznej,

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} G(\theta_{11}) \cdot d & G(\theta_{12}) \cdot d & \cdots & G(\theta_{1M}) \cdot d \\ G(\theta_{21}) \cdot d & G(\theta_{22}) \cdot d & \cdots & G(\theta_{2M}) \cdot d \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ G(\theta_{N1}) \cdot d & G(\theta_{N2}) \cdot d & \cdots & G(\theta_{NM}) \cdot d \end{bmatrix},$$

N – liczba stacji GPS (punktów i),

M – liczba punktów siatki geograficznej (punktów j),

\mathbf{P} – macierz wag,

k – parametr regularyzacji,

\mathbf{B} – macierz Laplasjanów, składająca się z masek operatora Laplace'a: $\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & -4 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ oraz $[1 \quad -2 \quad 1]$,

\mathbf{L} – wektor przemieszczeń pionowych GPS / InSAR (w danej epoce).

1 kg wody o gęstości ρ_w równej $1000 \frac{kg}{m^3}$ rozłożonej równomiernie na powierzchni $1 m^2$ ma wysokość równą $1 mm$, stąd $1 \frac{kg}{m^2} = 1 mm$ TWS.

$$1 m \text{ TWS} = \frac{1000 \frac{kg}{m^2}}{\rho_w} = \frac{1000 \frac{kg}{m^2}}{1000 \frac{kg}{m^3}}$$

Macierz \mathbf{A} zawiera przemieszczenia wywołane 1 m TWS, stąd:

$$d = 1000 \frac{kg}{m^2} \quad G(\theta_{i,j}) \left[\frac{m^3}{kg} \right] \cdot d = \mathbf{A} [m]$$

Potencjał grawitacyjny → TWS

$$V(r, \theta, \lambda_0) = \frac{GM}{r} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^n P_{nm}(\cos\theta) (C_{nm} \cos m\lambda_0 + S_{nm} \sin m\lambda_0)$$

gdzie:

r – promień wodzący,

θ / λ_0 – (90° - szerokość geograficzna) / (długość geograficzna),

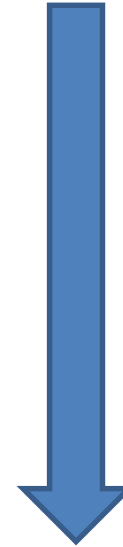
G – stała grawitacji,

M – masa Ziemi,

a – średni promień równikowy

P_{nm} – wielomiany Legendre'a stopnia n , rzędu m ,

C_{nm}, S_{nm} – współczynniki harmonik sferycznych.



$$TWS = \frac{a\rho_{ave}}{3\rho_w} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^n \tilde{P}_{nm}(\cos\theta) \frac{2n+1}{1+k_n} (\Delta C_{nm} \cos(m\lambda_0) + \Delta S_{nm} \sin(m\lambda_0))$$

gdzie:

ρ_{ave} – średnia gęstość Ziemi,

ρ_w – gęstość wody,

k_n – liczba Love'a.

Jeziro Montbel

GRUDZIEŃ 2019



GRUDZIEŃ 2020



GRUDZIEŃ 2021



GRUDZIEŃ 2022



browser.dataspace.copernicus.eu

