



Badanie wielkoskalowych zmian hydrosfery lądowej w kontekście najnowszych satelitarnych misji grawimetrycznych

JAN MIKOCCI, ARTUR LEŃCZUK, JANUSZ BOGUSZ

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,
Instytut Inżynierii Geoprzestrzennej i Geodezji, ul. gen. S. Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa,
jan.mikocki@wat.edu.pl, artur.lenczuk@wat.edu.pl, janusz.bogusz@wat.edu.pl

Streszczenie. Analiza zmian pola ciężkości Ziemi należy do głównych zadań geodezji fizycznej, a znajomość wybranych charakterystyk tego pola stanowi m.in. podstawowy element wyznaczenia kształtu Ziemi i uwiarygodnienia wiedzy na temat redystrybucji jej masy. Od 2002 roku do tego celu wydatnie przyczynia się satelitarna misja grawimetryczna GRACE (ang. *Gravity Recovery and Climate Experiment*) oraz jej misja kontynuacyjna GRACE-FO (ang. *GRACE Follow-On*). Wyniki opracowanych obserwacji uzyskanych z misji GRACE/GRACE-FO prezentowane są m.in. w postaci maskonów, które dostarczane są przez trzy centra przetwarzania: 1) CSR (Center for Space Research, Austin, Stany Zjednoczone), 2) JPL (Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Stany Zjednoczone) oraz 3) GSFC (Goddard Space Flight Center, Maryland, Stany Zjednoczone). W pracy wykorzystano dane udostępniane przez centrum przetwarzania GSFC w postaci globalnego rozkładu zmian całkowitej zawartości wody w kontynentach (ang. *Total Water Storage*, TWS), wyrażonego w postaci wysokości słupa wody (ang. *Equivalent Water Height*, EWH). W badaniach skupiono się na zidentyfikowaniu obszarów o wyraźnych zmianach TWS. Fluktuacje TWS przeanalizowano pod kątem zmian krótkookresowych, tj. amplitudy oscylacji rocznej (najbardziej wyraźnej oscylacji w hydrosferze), oraz zmian długookresowych, tj. trendu (kluczowego parametru dla badań klimatycznych), wyznaczonych z wykorzystaniem metody najmniejszych kwadratów. W rezultacie wyselekcjonowano piętnaście obszarów charakteryzujących się ekstremalnymi zmianami, tj. jedenaście obszarów dla parametru amplitudy oscylacji rocznej i cztery obszary dla trendu. Otrzymano zmiany sezonowe większe niż 140 mm na obszarach w obrębie równika (głównie dorzecza rzek — Amazonka, Niger, Ganges, Brahmaputra) oraz obszarach pokrytych ogromnymi masami lodowymi (Alaska, Grenlandia). Największe tempo zmian zasobów wodnych na poziomie ± 70 mm/rok obserwowane jest w okolicach Antarktydy Zachodniej, Patagonii czy Morza Kaspijskiego. Wyniki podkreślają również zauważalny wpływ człowieka na zmiany wód kontynentalnych (np. region Meksyku oraz dorzecza rzek Indus, Ganges).

Słowa kluczowe: GRACE, TWS, hydrosfera lądowa, misje grawimetryczne

DOI: 10.5604/01.3001.0016.0554

1. Wprowadzenie

W dzisiejszych czasach na skutek silnych zmian klimatycznych bardzo wiele regionów zmagają się z problemem dostępności wody. Zasoby wodne są niezbędne w wielu dziedzinach życia (m.in. rolnictwie, przemyśle czy zaopatrywaniu ludności w wodę pitną), więc problem dostępu do wody eskaluje do skali globalnej. Przykładowo Vörösmarty i in. [29] wykazali, że prawie 5 miliardów ludzi mieszka na obszarach zagrożonych brakiem dostępu do wody słodkiej, a prawie dwie trzecie siedlisk wodnych jest coraz bardziej zagrożonych na skutek zmiennego zasilania dostarczanego z opadów. Dlatego globalne i regularne monitorowanie zmian zasobów wód hydrosfery lądowej jest kluczowe do zlokalizowania ewentualnych konfliktów wywołanych czynnikami zewnętrznymi, w tym wzmożoną działalnością człowieka oraz zmiennością klimatu.

Zmiany w zasobach wód hydrosfery lądowej są definiowane za pomocą parametru TWS (ang. *Total Water Storage*), który określa zasoby wodne zawarte m.in. w wodach powierzchniowych (jeziorach, rzekach), wodach zawartych w roślinności, lodowcach, glebie czy wodach podpowierzchniowych (m.in. wodach gruntowych). Wielkości poszczególnych komponentów wyznaczone są lokalnie na podstawie obserwacji *in situ* lub globalnie z wykorzystaniem modeli hydrologicznych [8]. Lokalne pomiary *in situ* polegają na obserwacji zasobów wodnych przy użyciu m.in. piezometrów, reflektometrów czy sensorów [30] i ze względu na swoją specyfikę (m.in. czasochłonność lub koszty utrzymania) są ograniczone. W przeciwieństwie do obserwacji *in situ* dane w modelach hydrologicznych są dostępne dla całego globu i definiowane na podstawie obserwacji naziemnych, kosmicznych lub parametrów meteorologicznych [20]. Jednak wykorzystanie modeli nie umożliwia poprawnego oszacowania wielkości zmian (zwłaszcza zmian długookresowych) określanych z użyciem geodezyjnych technik pomiarowych, m.in. GPS (ang. *Global Positioning System*; [14]) lub misji grawimetrycznych [26].

W przypadku obserwacji grawimetrycznych w ostatnich latach globalne i regionalne badanie wielkości zmian zasobów mas umożliwiała satelitarna misja grawimetryczna GRACE (ang. *Gravity Recovery and Climate Experiment*; [28]). Nierównomierny rozkład mas nad, na i pod powierzchnią Ziemi powoduje miejscowe wariacje pola grawitacyjnego, które w przypadku GRACE wyznaczone są na podstawie zmian odległości pomiędzy dwoma satelitami misji poruszającymi się na jednej orbicie. Zmiany mas powodują zwiększanie lub zmniejszanie odległości bazowej (około 220 km) pomiędzy satelitami. Odległość mierzona jest z zastosowaniem systemu mikrofalowego z dokładnością do pojedynczych mikrometrów i z wykorzystaniem interferometrii laserowej z dokładnością do kilkudziesięciu nanometrów [10]. Działająca w latach 2002-2017 misja GRACE z sukcesem umożliwiała miesięczne obserwacje pola grawitacyjnego Ziemi, wykorzystywane do badania zmian m.in. w kriosferze [19], atmosferze [7] czy hydrosferze lądowej [26].

Od maja 2018 roku misja GRACE-FO [10] skutecznie kontynuuje rejestrowanie globalnych i regionalnych zmian rozkładu masy Ziemi, w tym zmian mas wód lądowych [5]. Fluktuacje rejestrowane przez obie misje udostępniane są użytkownikom w różnej postaci przez kilka centrów przetwarzania danych (<https://www.gfz-potsdam.de/en/section/global-geomonitoring-and-gravity-field/projects/grace/grace-products>).

W tej pracy skupiono się na ocenie możliwości wykorzystania danych dostarczanych przez misje GRACE i GRACE-FO do badania wpływu czynników klimatycznych i antropogenicznych na zasoby wód kontynentalnych. Wybrano dane w postaci rozwiązania maskonowego, które w ostatnich latach jest szeroko wykorzystywane przez naukowców. Pojęcie maskon (od ang. *mass concentration block*) po raz pierwszy zastosowano w latach 60. ubiegłego wieku w odniesieniu do badania zmian pola grawitacyjnego na Księżycu. Obszar maskonu charakteryzuje się znacznie większą gęstością od terenów sąsiednich, a jego powierzchnia określana jest jako fragment powierzchni kuli (fragment sfery). Rozmiar maskonu zawiera parametry opisujące jego masę oraz wielkość, zaś położenie określone jest przez podanie współrzędnych sferycznych środka. Do realizacji zadania wybrano maskony opracowane przez jedno z trzech centrów przetwarzania udostępniających tego typu dane, tj. Centrum Lotów Kosmicznych im. Roberta Goddarda (ang. Goddard Space Flight Center, GSFC) w Maryland (Stany Zjednoczone). W pracy analizie globalnej poddano wartości amplitudy oscylacji rocznej, dla której widoczne są największe zmiany hydrologiczne, oraz trendu liniowego, istotnego ze względu na długookresowy charakter zmian klimatycznych. Na podstawie obu parametrów wytłumaczono przyczyny wariacji zasobów wód lądowych w charakterystycznych regionach świata.

2. Dane

W badaniach wykorzystano wartości TWS w postaci maskonów dla najnowszego rozwiązania RL06 w wersji 02, udostępnianego przez centrum przetwarzania GSFC (<https://earth.gsfc.nasa.gov/geo/data/grace-mascons>; [18]). Analizie poddano 204 miesiące danych obserwacyjnych dostarczonych przez misję GRACE (163 miesiące) oraz misję GRACE-FO (41 miesiące), które objęły okres od kwietnia 2002 roku do grudnia 2021 roku. Zmiany TWS w postaci maskonów określają wariacje masy w postaci równoważnej wysokości słupa wody (ang. *Equivalent Water Height*, EWH) w skoncentrowanych blokach na powierzchni Ziemi ([19], [25], [32]). Maskony GSFC obejmują 41 168 bloków zdefiniowanych na siatce $1^\circ \times 1^\circ$ pomiędzy równoleżnikami 89.875°N – 89.875°S i południkami 0.125°E – 359.875°E , dla których efekt wynurzenia postglacjalnego (ang. *Glacial Isostatic Adjustment*, GIA) został usunięty przy pomocy modelu ICE-6G_D [23]. W porównaniu do rozwiązań w postaci harmonik sferycznych reprezentacja zmian pola grawitacyjnego za pomocą zastosowanych maskonów umożliwia redukcję błędów występujących przy opracowywaniu

danych GRACE i GRACE-FO, m.in. przecieku sygnału między oceanem a lądem czy filtracji danych, która jest konieczna ze względu na specyfikację misji GRACE i GRACE-FO (m.in. parametry orbity). W konsekwencji, jak wykazali Leńczuk i in. (2020), maskony zawierają większą wariancję sygnału niż rozwiązania harmonik sferycznych, głównie dla niskich i wyższych rzędów harmonik.

3. Metodyka

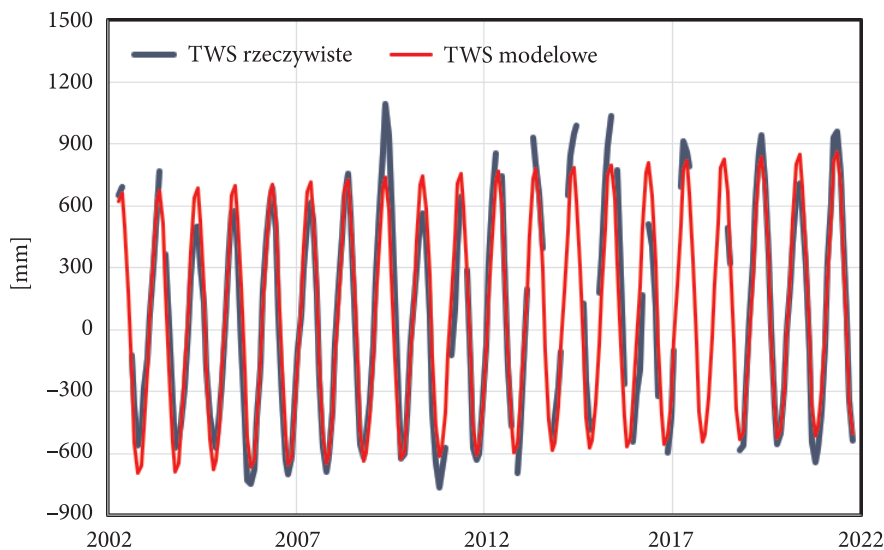
Do wyznaczenia parametrów trendu liniowego oraz amplitudy oscylacji rocznej dla każdego maskonu (punktu siatki) wykorzystano metodę najmniejszych kwadratów (MNK). W tym celu szeregi czasowe TWS opisano za pomocą modelu:

$$\begin{aligned} TWS(t) = & TWS_0 + v_x \cdot t + A_A^O \cdot \sin 2\pi t + A_A^I \cdot \cos 2\pi t + \\ & + A_{SA}^O \cdot \sin 4\pi t + A_{SA}^I \cdot \cos 4\pi t + A_{\frac{1}{3}A}^O \cdot \sin 6\pi t + A_{\frac{1}{3}A}^I \cdot \cos 6\pi t + \\ & + A_{\frac{1}{4}A}^O \cdot \sin 8\pi t + A_{\frac{1}{4}A}^I \cdot \cos 8\pi t + res \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie parametr $TWS(t)$ określający modelowany szereg czasowy TWS dla miesiąca t opisany jest przez część deterministyczną szeregu, tj. TWS_0 , v_x określające odpowiednio wartość początkową TWS w danym punkcie i trend liniowy, oraz składowe sinusowe A^O i kosinusowe A^I amplitudy o zadanej oscylacji. Przez parametry A_A^O i A_A^I rozumiemy składową sinusową i kosinusową amplitudy oscylacji rocznej. Parametry A_{SA}^O i A_{SA}^I dotyczą amplitudy oscylacji półrocznej, a kolejne poszczególnych części roku (np. $A_{\frac{1}{3}A}^O$ i $A_{\frac{1}{3}A}^I$ odpowiadają amplitudzie oscylacji 4-miesięcznej). Część stochastyczną definiuje parametr res , który jest opisywany przez model szumu białego i określa wiarygodność wpasowania zdefiniowanego modelu deterministycznego w szereg TWS . Bazując na wyznaczonych wartościach A_A^O i A_A^I , amplitudę oscylacji rocznej wyznaczono jako pierwiastek z sumy kwadratów obu składowych (sinusowej i kosinusowej). Zmiany w hydrosferze charakteryzują się w większości regionów maksymalnymi zmianami o oscylacji rocznej, dlatego tylko w sposób ogólny przedstawiono wartości amplitudy dla pozostałych składowych.

4. Wyniki i dyskusja

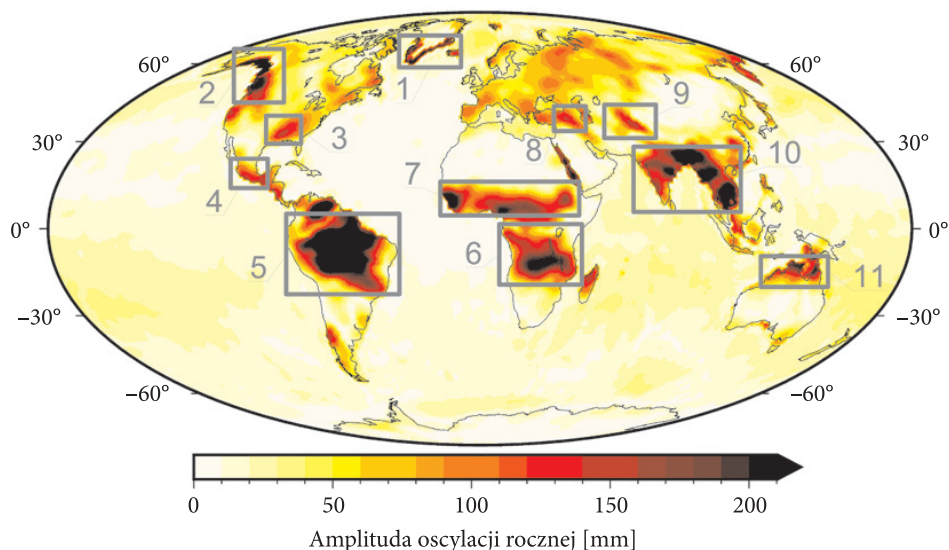
Miesięczne szeregi czasowe globalnych zmian parametru TWS dla danych GRACE i GRACE-FO opisano, wykorzystując model MNK (rozdział 3) dla każdego maskonu (punktu siatki). Przykładowe wyniki zaprezentowano na rysunku 1 dla wybranego maskonu usytuowanego na obszarze dorzecza rzeki Amazonki (5°S, 63°W).



Rys. 1. Szereg czasowy rzeczywistych zmian TWS dla maskonu położonego na terenie Amazonii (5°S, 63°W) (granatowa krzywa) oraz modelowych zmian TWS oszacowanych metodą najmniejszych kwadratów (czerwona krzywa)

Szeregi czasowe zaprezentowane na rysunku 1 określają rzeczywiste zmiany parametru TWS wyznaczone z obu generacji misji GRACE (granatowa krzywa) oraz modelowe wartości TWS oszacowane na podstawie MNK (rozdział 3, czerwona krzywa) dla punktu w regionie Amazonii. Analizując miesięczne zmiany zasobów wodnych, widać wyraźne odchylenia od modelu, które odzwierciedlają kolejno powódzie w roku 2009 [3] oraz w latach 2011-2012, 2013-2014, a także silną suszę w latach 2015-2016 [13] występującą na skutek mniejszej intensywności opadów. Dla opisywanego szeregu czasowego otrzymano wartość amplitudy oscylacji rocznej i trendu liniowego odpowiednio na poziomie około 680 mm i 10 mm na rok.

W celu przeprowadzenia analiz globalnych w podobny sposób oszacowano parametry modelu TWS dla pozostałych punktów węzłowych (maskonów). Analizie poddano wartości parametru amplitudy oscylacji rocznej (rys. 2) i trendu liniowego (rys. 3).



Rys. 2. Mapa amplitudy oscylacji rocznej wyznaczona na podstawie rozwiązania maskonowego GRACE i GRACE-FO dostarczanego przez centrum GSFC dla okresu od kwietnia 2002 roku do grudnia 2021 roku

Analizując wartości amplitudy oscylacji rocznej przedstawione na rysunku 2, wyselekcjonowano regiony charakteryzujące się wyraźnymi zmianami sezonowymi zasobów wód kontynentalnych. W badaniach wybrano jedenaste regionów (jeden region w Grenlandii, trzy regiony w Ameryce Północnej, jeden region w Ameryce Południowej, dwa regiony w Afryce, trzy regiony w Eurazji oraz jeden w Australii), które charakteryzują się amplitudą oscylacji rocznej większą niż 140 mm. Większość regionów (tj. 7 z 11) jest usytuowanych w pobliżu równika, gdzie występuje klimat tropikalny, charakteryzujący się silnymi wahaniami opadów atmosferycznych w ciągu roku, a także okresowymi zjawiskami El Niño i La Niña [12].

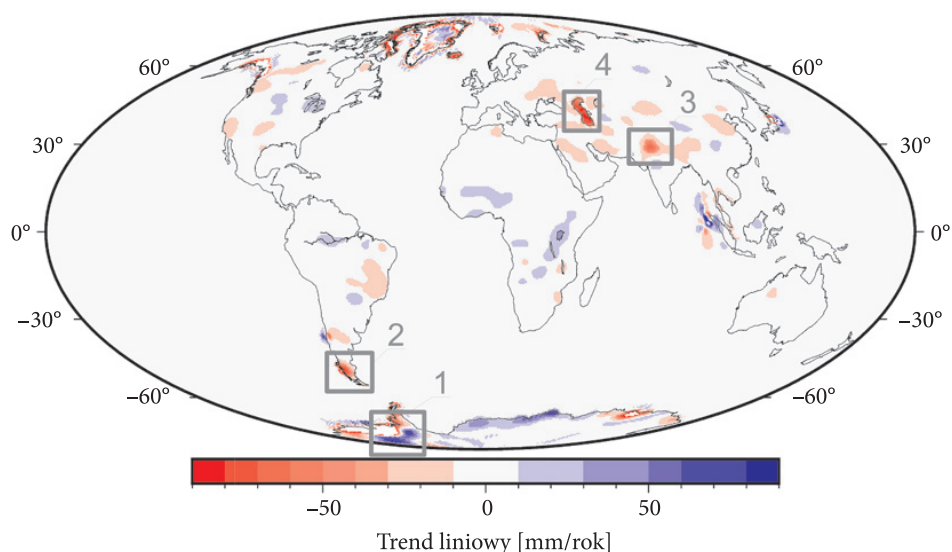
Wyselekcjonowany region w Grenlandii (nr 1) oraz trzy regiony w Ameryce Północnej, tj. Alaska (nr 2), dorzecze rzeki Missisipi (nr 3) i tereny Meksyku (nr 4), charakteryzują się dominującym wpływem różnych komponentów hydrosfery lądowej na całkowity sygnał TWS. Dominujący sygnał w regionie Grenlandii (nr 1) oraz Alaski (nr 2) spowodowany jest wahaniami mas lodowych — silne doładowanie mas śniegu w okresie zimowym oraz gwałtowne topienie lodu w okresie letnim [31], co w przypadku Alaski skutkuje wahaniami amplitudy oscylacji rocznej na poziomie 500 mm. Podobna sytuacja występuje na terenie Grenlandii (nr 1), gdzie uzyskaliśmy wartości amplitudy oscylacji rocznej powyżej 200 mm. W dorzeczu rzeki Missisipi (nr 3) wysoka wartość amplitudy oscylacji rocznej parametru TWS związana jest przede wszystkim z wahaniami zasobów wód powierzchniowych w obrębie dorzecza rzeki, co jest spowodowane m.in. silnymi opadami atmosferycznymi [22]. Dla tego

obszaru uzyskaliśmy zmiany sezonowe wielkości 150 mm. W ostatnim regionie Ameryki Północnej, Meksyku (nr 4), wahania zasobów TWS są spowodowane nadmiernym wypompowywaniem wód gruntowych [2], co odzwierciedlają wartości amplitudy oscylacji rocznej rzędu 150 mm. Największe wartości amplitudy oscylacji rocznej (około 780 mm) otrzymaliśmy dla regionu Ameryki Południowej, tj. dorzecza Amazonki (nr 5), w którym zasoby wodne uwarunkowane są przez obfite opady deszczu [9] oraz ogromne ilości wody spływającej przez rozległe sieci rzeczne [34]. Podobna sytuacja jest zauważalna w Afryce Środkowej w okolicach dorzeczy rzek Zambezi oraz Kongo (nr 6), a także Nigru i Wolty (nr 7). W obu regionach Afryki uzyskaliśmy wartości amplitudy oscylacji rocznej do 250 mm, gdzie na widoczne zmiany sezonowe silny wpływ mają czynniki klimatyczne (np. nasłonecznienie terenu, wilgotność powietrza, opady atmosferyczne) oraz czynniki antropogeniczne (wylesianie terenów, wypompowywanie wód gruntowych) [33]. W przeciwieństwie do regionów wyselekcjonowanych dla obu Ameryk (wyłączając Meksyk) zmiany w zasobach wodnych TWS dla kontynentu eurazjatyckiego są wywołane nie tylko czynnikami klimatycznymi, lecz także działalnością antropogeniczną. Wahania sezonowe przekraczające 140 mm na obszarze dorzeczy rzek Tygrys i Eufrat (nr 8) są skutkiem częstego występowania susz, które powodują ekstensywne wykorzystanie wód powierzchniowych i wód gruntowych do celów irygacyjnych [24]. W Azji zauważalne są także zmiany lodowcowe — w łańcuchu górskim Karakorum (nr 9), gdzie zmiany sezonowe rzędu 160 mm są spowodowane wzrostem mas lodowych, a następnie ich topnieniem, a tempo tych procesów będzie nadal systematycznie rosło aż do 2050 r. [1]. W przypadku wyselekcjonowanego regionu Azji Południowej (nr 10) widoczne wahania amplitudy oscylacji rocznej na poziomie do 330 mm pokrywają się z terenem dorzeczy rzek Ganges, Brahmaputra i Irawadi, które odzwierciedlają wpływ monsunów: letniego z silnymi opadami atmosferycznymi oraz zimowego charakteryzującego się występowaniem suszy [11]. Ponadto w opisywanym regionie Azji Południowej, poza wodami powierzchniowymi, silny wpływ na sezonowe wahania wartości parametru TWS mają wody gruntowe, które w okresie suchym stanowią około 90% pobieranych zasobów wodnych [21] i są wykorzystywane do celów irygacyjnych. Na wartości amplitudy oscylacji rocznej w ostatnim z analizowanych obszarów, tj. Australii Północnej (nr 11), największy wpływ na obserwowane zmiany zasobów wód kontynentalnych mają wyłącznie czynniki klimatyczne. Otrzymane wartości amplitudy oscylacji rocznej na poziomie 210 mm są spowodowane głównie występującymi zjawiskami El Niño oraz La Niña [11].

Analizując wartości amplitudy oscylacji półrocznej, maksymalne wartości parametru występują w większości regionów wyselekcjonowanych dla amplitudy rocznej (z wyjątkiem dorzecza rzeki Missisipi (nr 3), Meksyku (nr 4), dorzeczy rzek Tygrys i Eufrat (nr 8) oraz w regionie łańcucha górskiego Karakorum (nr 9). Największe zmiany otrzymaliśmy w obrębie dorzecza Amazonki (110 mm), Alaski (100 mm), a także Azji Południowej (dorzecze rzeki Ganges — 80 mm). W przypadku składowej

1/3 roku największe wartości uzyskano dla regionów Grenlandii (nr 2, 60 mm), Azji Południowej (nr 10) — głównie okolice dorzecza rzeki Ganges (30 mm) i Jenisej (20 mm). Maksymalne wartości rzędu ponad 60 mm i 30 mm zauważalne są również w regionach północnej części Azji i Morza Kaspijskiego, które nie zostały wyselekcjonowane dla amplitudy rocznej. Pozostałe obszary charakteryzujące się maksymalnymi wartościami składowej 1/3 roku pokrywają się z obszarami z rysunku 2 (z wyjątkiem regionu dorzeczy rzek Tygrys i Eufrat (nr 8) oraz łańcucha górskiego Karakorum — nr 9). Podobny rozkład przestrzenny zauważalny jest w przypadku wartości amplitudy dla składowej 1/4 roku, gdzie dla jedenastu obszarów wyselekcjonowanych na rys. 2 największe wartości powyżej 15 mm uzyskano dla Grenlandii (nr 1) i dorzecza rzeki Amazonki (nr 5). Dla regionów dorzecza rzeki Missisipi (nr 3), rzek Tygrys i Eufrat (nr 8) oraz łańcucha górskiego Karakorum (nr 9) otrzymaliśmy wartości najwyżej do 5 mm.

W przypadku dokładności wyznaczenia parametru amplitudy oscylacji rocznej rozkład przestrzenny błędów ma charakter zbliżony do wartości amplitudy oscylacji rocznej (rys. 2). Dla większości obszarów błędy wyznaczenia amplitudy oscylacji rocznej są mniejsze niż 10 mm. Największe wartości występują głównie w okolicach równika, tj. obszarów dorzecza Amazonki (do 24 mm) oraz Australii Północnej (do 12 mm). W przypadku amplitudy oscylacji półrocznej, 3- i 4-miesięcznej otrzymano odpowiednio błędy mniejsze średnio o 4, 10 i 14 razy w porównaniu do błędów amplitudy oscylacji rocznej. Należy zaznaczyć, że błędy dla wszystkich składowych zostały wyznaczone z uwzględnieniem szumu białego.



Rys. 3. Mapa trendu liniowego wyznaczonego na podstawie rozwiązania maskonowego GRACE i GRA-CE-FO dostarczanego przez centrum GSFC dla okresu od kwietnia 2002 roku do grudnia 2021 roku

Kolejnym parametrem opisującym zmiany hydrologiczne jest trend liniowy, dla którego zmiany globalne przedstawiono na rysunku 3. Analizując parametr trendu liniowego, należy zaznaczyć, że regiony charakteryzujące się znaczącym tempem zmian TWS (około ± 30 mm na rok) pokrywają się z większością regionów wyselekcjonowanych dla parametru amplitudy oscylacji rocznej (rys. 2), tj. tereny Amazonki, Nigru, Tygrysu i Eufratu czy obszary Alaski. Dlatego szczegółowej analizie poddaliśmy tylko cztery obszary, tj. Antarktydę Zachodnią (nr 1), Patagonię (nr 2), dorzecze rzeki Indus (nr 3) oraz tereny Morza Kaspijskiego (nr 4) — rys. 3.

Pierwszym z wyselekcjonowanych regionów dla parametru trendu liniowego jest Antarktyda Zachodnia (nr 1), gdzie uzyskaliśmy wartość trendu do 80 mm/rok, który odzwierciedla silne opady śniegu na lodowcu [15]. Drastyczne zmiany zasobów wodnych zawartych w śniegu są odwzorowane również w regionie Patagonii (nr 2), gdzie przez ostatnie lata obserwowane jest ogromne tempo topnienia lodowców górskich [17]. W efekcie region Patagonii charakteryzuje się trendem ujemnym dochodzącym do -80 mm/rok. Dla dorzecza rzeki Indus (nr 3), położonego w Azji Południowej, otrzymano ekstremalny trend ujemny w okolicach -70 mm/rok. Jest on spowodowany systematycznymi okresami suszy, które mimo doładowania wodami z topniejących lodowców nasiliły proces wypompowywania wód gruntowych [4]. Jak podają Shamsudduha i Panda [27], jest to obszar charakteryzujący się największym stopniem nawadniania w Azji Południowej. Ostatnim analizowanym regionem jest obszar Morza Kaspijskiego (nr 4), gdzie zauważalny jest spadek zasobów wód kontynentalnych spowodowany odparowywaniem wód zbiornika na skutek ocieplenia klimatu [6]. W efekcie obserwowany jest spadek parametru TWS na poziomie przekraczającym -80 mm/rok. W przypadku dokładności wyznaczenia parametru trendu liniowego maksymalne wartości błędów z uwzględnieniem szumu białego uzyskano dla regionów charakteryzujących się ekstremalnym tempem zmian TWS (rys. 3), m.in. Antarktyda, okolice Morza Kaspijskiego, Grenlandia, a także maksymalnymi zmianami sezonowymi TWS (rys. 2), m.in. dorzecze rzek Amazonki, Zambezi, Kongo lub region Australii Północnej. W wymienionych regionach wartości błędów wyznaczenia trendu dochodzą nawet do 4-5 mm/rok.

5. Podsumowanie i wnioski

W pracy skupiono się na oszacowaniu i ocenie wielkości zmian całkowitych zasobów wód lądowych dla całego świata. Analiza obejmowała wyznaczenie wielkości krótko- i długookresowych zmian parametru TWS na podstawie danych dostarczanych przez grawimetryczne misje satelitarne GRACE i GRACE-FO. Wykorzystano dane udostępniane przez centrum GSFC w postaci maskonów. Analizowane parametry określające wielkość i tempo zmian zasobów wód kontynentalnych zostały wyznaczone na podstawie modelowania szeregów czasowych TWS z wykorzystaniem MNK.

Przeprowadzona analiza parametrów amplitudy oscylacji rocznej i trendu liniowego potwierdziła możliwości wykorzystania danych z misji grawimetrycznych do badania globalnych i regionalnych zmian mas w hydrosferze lądowej. Największe zmiany sezonowe wielkości 780 mm otrzymano w regionie Amazonki, wynikają one z częstych i naprzemiennie występujących suszy i powodzi. Największe zmiany długookresowe o wielkości powyżej -80 mm/rok otrzymano dla obszaru Morza Kaspijskiego, są one wynikiem odparowywania wód powierzchniowych zbiornika na skutek ocieplenia klimatu. Zmiany w obu regionach spowodowane są przez wpływ czynnika klimatycznego. Uzyskane wyniki podkreślają również rosnące znaczenie wpływu człowieka na zmiany zasobów wód kontynentalnych w wielu miejscach na świecie. Wpływ ten jest widoczny dla zmian sezonowych (region Meksyku dla parametru amplitudy oscylacji rocznej) i zmian długookresowych (region dorzecza rzeki Indus dla parametru trendu liniowego). Badania pokazują, że główną przyczyną wpływu czynnika antropogenicznego na zmiany wód kontynentalnych jest niewłaściwa polityka wodna i zarządzanie zasobami wodnymi (zwłaszcza wodami gruntowymi).

Warto podkreślić, że informacje na temat globalnych zmian pola grawitacyjnego z misji GRACE i GRACE-FO są wykorzystywane w geodezji nie tylko do monitorowania zmiany rozkładu masy Ziemi (w tym masy wód kontynentalnych). Jak pokazano w artykule, dane z misji GRACE mogą być również z powodzeniem wykorzystywane w hydrologii do badań zasobów wód kontynentalnych czy w klimatologii, dając szanse na ciągłe obserwowanie przyczyn i skutków ocieplającego się klimatu.

Artykuł opracowany na podstawie referatu wygłoszonego na XVI Ogólnopolskiej Konferencji Studentów Geodezji i XXXV Seminarium KNS Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji.

Miejsce i data wystąpienia: Politechnika Warszawska, Warszawa, dn. 29.04.2022 r.;
Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, dn. 2.06.2022 r.

Źródło finansowania pracy — Narodowe Centrum Nauki (NCN), numer projektu 2021/41/N/ST10/01472.

Artykuł wpłynął do redakcji 2.06.2022 r. Zatwierdzono do publikacji 5.07.2022.

Jan Mikocki <https://orcid.org/0000-0001-7318-7441>

Artur Leńczuk <https://orcid.org/0000-0002-9573-1302>

Janusz Bogusz <https://orcid.org/0000-0002-0424-7022>

LITERATURA

- [1] AZAM M.F., KARGEL J.S., SHEA J.M., NEPAL S. et al., *Glaciohydrology of the Himalaya-Karakoram*, Science, vol. 373, no. 6557, 2021, 869, DOI: 10.1126/science.abf3668.
- [2] CHAUSSARD E., BÜRGMANN R., SHIRZAEI M., FIELDING E.J., BAKER B., *Predictability of hydraulic head changes and characterization of aquifer-system and fault properties from InSAR-derived ground deformation*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 119, 8, 2014, 6572-6590, DOI: 10.1002/2014JB011266.
- [3] CHEN J.L., WILSON C.R., TAPLEY B.D., *The 2009 exceptional Amazon flood and interannual terrestrial water storage change observed by GRACE*, Water Resources Research, 46, 12, nr W12526, 2010, DOI: 10.1029/2010wr009383.
- [4] CHEN G., POWERS R.P., DE CARVALHO L.M.T. et al., *Spatiotemporal patterns of tropical deforestation and forest degradation in response to the operation of the Tucuruí hydroelectric dam in the Amazon basin*, Applied Geography, 63, 2015, 1-8, DOI: 10.1016/j.apgeog.2015.06.001.
- [5] CHEN J., CAZENAVE A., DAHLE C. et al., *Applications and challenges of GRACE and GRACE Follow-On satellite gravimetry*, Surveys in Geophysics, 43, 2022, 305-345, DOI: 10.1007/s10712-021-09685-x.
- [6] DERO Q.Y., YARI E., CHARRAHY Z., *Global warming, environmental security and its geo-economic dimensions case study: Caspian Sea level changes on the balance of transit channels*, Journal of Environmental Health Science Engineering, 18, 2020, 541-557, DOI: 10.1007/s40201-020-00481-0.
- [7] DOBSLAW H., BERGMANN-WOLF I., DILL R. et al., *A new high-resolution model of non-tidal atmosphere and ocean mass variability for de-aliasing of satellite gravity observations: AOD1B RL06*, Geophysical Journal International, 211, 1, 2017, 263-269, DOI: 10.1093/gji/ggx302.
- [8] DÖLL P., HOFFMANN-DOBREV H., PORTMANN F.T. et al., *Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations*, Journal of Geodynamics, 59-60, 2012, 143-156, DOI: 10.1016/j.jog.2011.05.001.
- [9] ESPINOZA J.C., SEGURA H., RONCHALI J. et al., *Evolution of wet-day and dry-day frequency in the western Amazon basin: Relationship with atmospheric circulation and impacts on vegetation*, Water Resources Research, 52, 11, 2016, 8546-8560, DOI: 10.1002/2016WR019305.
- [10] FLECHTNER F., NEUMAYER K.H., DAHLE C. et al., *What can be expected from the GRACE-FO laser ranging interferometer for Earth science applications?*, Surveys in Geophysics, 37, 2, 2016, 453-470, DOI: 10.1007/s10712-015-9338-y.
- [11] GARCÍA-GARCÍA D., UMMENHOFER C. C., ZLOTNICKI V., *Australian water mass variations from GRACE data linked to Indo-Pacific climate variability*, Remote Sensing of Environment, 115, 9, 2011, 2175-2183, DOI: 10.1016/j.rse.2011.04.007.
- [12] HAYASHI M., JIN F-F., STUECKER M.F., *Dynamics for El Niño-La Niña asymmetry constrain equatorial-Pacific warming pattern*, Nature Communications, 11, 4230, 2020, DOI: 10.1038/s41467-020-17983-y.
- [13] JIMÉNEZ-MUÑOZ J., MATTAR C., BARICHIVICH J. et al., *Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015-2016*, Scientific Reports, 6, 33130, 2016, DOI: 10.1038/srep33130.
- [14] JIN S., ZHANG T., *Terrestrial Water Storage Anomalies Associated with Drought in Southwestern USA from GPS Observations*, Surveys in Geophysics, 37, 6, 2016, 1139-1156, DOI: 10.1007/s10712-016-9385-z.

- [15] KIM B.-H., SEO K.-W., EOM J. et al., *Antarctic ice mass variations from 1979 to 2017 driven by anomalous precipitation accumulation*, Scientific Reports, 10, 20366, 2020, DOI: 10.1038/s41598-020-77403-5.
- [16] LEŃCZUK A., LESZCZUK G., KŁOS A., BOGUSZ J., *Comparing variance of signal contained in the most recent GRACE solutions*, Geodesy and Cartography, 69, 1, 2020, 19-37, DOI: 10.24425/gac.2020.131084.
- [17] LI J., CHEN J., NI S., TANG L., HU X., *Long-term and inter - annual mass changes of Patagonia Ice Field from GRACE*, Geodesy and Geodynamics, 10, 2, 2018, 100-109, DOI: 10.1016/j.geog.2018.06.001.
- [18] LOOMIS B.D., LUTHCKE S.B., SABAKA T.J., *Regularization and error characterization of GRACE mascons*, Journal of Geodesy, 93, 2, 2019, 1381-1398, DOI: 10.1007/s00190-019-01252-y.
- [19] LUTHCKE S.B., SABAKA T.J., LOOMIS B.D. et al., *Antarctica, Greenland and Gulf of Alaska land ice evolution from an iterated GRACE global mascon solution*, Journal of Glaciology, 59, 216, 2013, 613-631, DOI: 10.3189/2013JofG12J147.
- [20] MITCHELL K.E., LOHMANN D., HOUSER P.R. et al., *The multi-institution North American Land Data Assimilation System (NLDAS): Utilizing multiple GCIP products and partners in a continental distributed hydrological modeling system*, Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 109(D7), nr D07S90, 2004, DOI: 10.1029/2003JD003823.
- [21] MUKHERJEE A., SAHA D., HARVEY C.F. et al., *Groundwater systems of the Indian Sub-Continent*, Journal of Hydrology: Regional Studies, 4(A), 2015, 1-14, DOI: 10.1016/j.ejrh.2015.03.005.
- [22] OUYANG Y., ZHANG J., FENG G. et al., *A century of precipitation trends in forest lands of the Lower Mississippi River Alluvial Valley*, Scientific Reports, 10, nr 12802, 2020, DOI: 10.1038/s41598-020-69508-8.
- [23] PELTIER W.R., ARGUS D.F., DRUMMOND R., *Comment on "An Assessment of the ICE-6G_C (VM5a) Glacial Isostatic Adjustment Model" by Purcell et al.*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 123, 2, 2018, 2019-2028, DOI:10.1002/2016JB013844.
- [24] RATEB A., KUO C.-Y., *Quantifying Vertical Deformation in the Tigris–Euphrates Basin Due to the Groundwater Abstraction: Insights from GRACE and Sentinel-1 Satellites*, Water, 11, 8, nr 1658, 2019, DOI: 10.3390/w11081658.
- [25] SAVE H., BETTADPUR S., TAPLEY B.D., *High-resolution CSR GRACE RL05 mascons*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 121, 10, 2016, 7547-7569, DOI: 10.1002/2016JB013007.
- [26] SCANLON B.R., ZHANG Z., SAVE H. et al., *Global models underestimate large decadal declining and rising water storage trends relative to GRACE satellite data*, Proceedings of the National Academy of Sciences, 115, 6, 2018, 1080-1089, DOI: 10.1073/pnas.1704665115.
- [27] SHAMSUDDUHA M., PANDA D.K., *Spatio-temporal changes in terrestrial water storage in the Himalayan river basins and risks to water security in the region: a review*, International Journal of Disaster Risk Reduction, 35, nr 101068, 2019, DOI: 10.1016/j.ijdrr.2019.101068.
- [28] TAPLEY B.D., BETTADPUR S., WATKINS M., REIGBER C., *The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results*, Geophysical Research Letters, 31, 9, nr L09607, 2004, DOI: 10.1029/2004gl019920.
- [29] VÖRÖSMARTY C., MCINTYRE P., GESSNER M. et al., *Global threats to human water security and river biodiversity*, Nature, 467, 2010, 555-561, DOI: 10.1038/nature09440.
- [30] WALKER J.P., WILLGOOSE G.R., KALMA J.D., *In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques*, Journal of Hydrology, 293, 1-4, 2004, 85-99, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.01.008.

- [31] WANG F., SHEN Y., CHEN Q., WANG W., *Bridging the gap between GRACE and GRACE follow-on monthly gravity field solutions using improved multichannel singular spectrum analysis*, Journal of Hydrology, 594, nr 125972, 2021, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.125972.
- [32] WATKINS M.M., WISE D. V., YUAN D-N. et al., *Improved methods for observing Earth's time variable mass distribution with GRACE using spherical cap mascons*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 120, 4, 2015, 2648-2671, DOI: 10.1002/2014JB011547.
- [33] WERTH S., WHITE D., BLISS D.W., *GRACE Detected Rise of Groundwater in the Sahelian Niger River Basin*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 122, 12, 2017, 10459-10477, DOI: 10.1002/2017jb014845.
- [34] ZULKAFLI Z., BUYTAERT W., MANZ B. et al., *Projected increases in the annual flood pulse of the Western Amazon*, Environmental Research Letters, 11, 1, nr 14013, 2016, DOI: 10.1088/1748-9326/11/1/014013.

J. MIKOCKI, A. LEŃCZUK, J. BOGUSZ

The study of large-scale variability in total water storage within the context of modern satellite gravity missions

Abstract. The analysis of Earth's gravity field changes is the one of essential task of physical geodesy. So the knowledge about selected characteristics of gravity field is the basic element of the Earth shape determining process and help to find information about mass redistribution in the Earth system. Since 2002, the gravity field changes have been successfully observed by the Gravity Recovery and Climate Experiment (GRACE) satellite gravity mission and its continued GRACE-FO (GRACE Follow-On) mission. The results obtained from GRACE/GRACE-FO observations are presented, among other, in form of mascons and they are provided by three processing centers: (1) Center for Space Research (CSR; Austin, United States), (2) Jet Propulsion Laboratory (JPL; Pasadena, United States), and (3) Goddard Space Flight Center (GSFC; Maryland, United States). In the following study, we used data provided by GSFC in form of the global distribution of Total Water Storage (TWS), which are expressed in terms of Equivalent Water Height (EWH). In our study, we focused on identifying areas with significant changes in TWS. We analysed TWS fluctuations in seasonal short-term changes, i.e., amplitude of annual oscillation (the most pronounced oscillation in the land hydro-sphere) and long-term changes, i.e., trend (a key parameter for climate studies) determined using the Least Squares Method. As a result, we selected 15 areas characterised by extreme TWS changes, i.e., 11 areas for annual amplitude and 4 areas for trend parameter. We obtained seasonal changes greater than 140 mm in areas within the equator (mainly Amazon, Niger, Ganges, Brahmaputra river basin regions) and areas covered by huge ice masses (Alaska, Greenland). The greatest rate of change in water storage at $\pm 70^\circ$ is observed around West Antarctica, Patagonia or the Caspian Sea. The results also emphasize the significant human impact in continental water masses (e.g. Mexico, Indus and Ganges river basins).

Keywords: GRACE, TWS, land hydrology, gravity missions

DOI: 10.5604/01.3001.0016.0554

