

Studium wykorzystania modelu GRACE w ocenie zmian poziomu wód gruntowych w kontekście dostępności wody dla rolnictwa w zlewni rzeki Wisły

Damian Badora

Zakład Gleboznawstwa Erozji i Ochrony Gruntów
Instytut Uprawy Nawożenia i Gleboznawstwa – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czartoryskich 8, 24-100 Puławy, Polska

Abstrakt. W 2015 roku w Polsce wystąpiła susza hydrologiczna, która miała niekorzystny wpływ na uprawy rolnicze. Aby zminimalizować skutki suszy hydrologicznej w Polsce oraz prowadzić racjonalną gospodarkę zasobami wodnymi, należy stale monitorować poziom wód gruntowych. Jednak podstawowym problemem w realizacji monitoringu jest dokładny pomiar wysokości wód podziemnych oraz ich ilości. W Polsce stosuje się system Monitoringu Wód Podziemnych, który jest jednym z podstawowych narzędzi oceny stanu wód i zarządzania ich zasobami, jednak częstotliwość pomiaru i gęstość sieci pomiarowej jest niewystarczająca. Monitoring Wód Podziemnych można wzbogacić o badania wysokości zwierciadła wód podziemnych różnymi zdalnymi metodami geofizycznymi. W artykule zaprezentowano ocenę możliwości systemu GRACE, opartego na satelitarnych pomiarach grawimetrycznych, w rozpoznaniu hydrologicznym wód podziemnych. Przetworzono dane z misji GRACE w programach udostępnionych przez instytut w Poczdamie w serwisie internetowym ICGEM i przeanalizowano powstałe obrazy dla obszaru Polski. Wyniki wstępnej analizy dla lat 2003–2015 wykazują dużą zbieżność danych pozyskanych z misji GRACE z danymi zamieszczanymi w różnych publikacjach i prognozach, które ukazywały lata o wzmożonej ilości opadów oraz lata suche. Zbieżność wyników stwarza optymistyczne perspektywy, biorąc pod uwagę zasięg globalny misji GRACE, możliwości oceny zasobów wód w trudno dostępnych miejscach oraz dla dużych obszarów.

słowa kluczowe: susza, monitoring poziomu wód gruntowych, GRACE

WSTĘP

Tematyka niniejszego artykułu skupia się wokół monitoringu poziomu wód podziemnych w zlewni rzeki Wisły. Wody podziemne zalegają pod powierzchnią Ziemi na róż-

nych głębokościach w wolnych przestrzeniach skał. Są one bardzo ważnym elementem obiegu wody w przyrodzie. Zmiany poziomu wód podziemnych mogą następować w wyniku procesów naturalnych (zmiany klimatyczne np. susze, ulewy itp.) oraz gospodarczej działalności człowieka (np. urbanizacja, pobór wód dla rolnictwa i przemysłu itp.) (Parusel, 2004).

W ostatniej dekadzie obserwuje się zwiększenie częstości występowania susz w Polsce. Scenariusze zmian klimatu wskazują na dziesięciokrotne zwiększenie ilości susz na obszarze Polski w nadchodzących dekadach (Parry i in., 2007). Według NOAA, rok 2015 był najcieplejszym rokiem w historii zapisu pomiarów meteorologicznych na świecie (NOAA, 2015).

Susza w Polsce w 2015 r. miała bardzo niekorzystny wpływ na wzrost roślin uprawnych. Bardzo gorące i suche lato na polskich terenach spowodowało oprócz dużych strat w rolnictwie także suszę hydrologiczną (IUNG-PIB, 2015). Rozróżnia się trzy etapy rozwoju suszy (ZODR, 2003): suszę atmosferyczną spowodowaną brakiem opadów, wysoką temperaturą i niską wilgotnością; suszę glebową, która charakteryzuje się niedoborem wody dostępnej dla roślin, i suszę hydrologiczną (niżówkę) o największych konsekwencjach dla gospodarki. Susza hydrologiczna powoduje obniżenie poziomu wód gruntowych, które ma niekorzystny wpływ m.in. na głęboko zakorzenione drzewa, jak również powoduje obniżenie się lustra wód podziemnych. Może to powodować całkowite wyschnięcie niektórych ujęć wody. Susza atmosferyczna oraz glebowa szybko zanikają, natomiast w przypadku suszy hydrologicznej odnowienie zasobów wód powierzchniowych i podziemnych wymaga długiego czasu (ZODR, 2003).

Niewątpliwie dużym problemem jest dokładny pomiar poziomu wód podziemnych oraz ich ilości. W Polsce stosuje się Monitoring Wód Podziemnych, który jest jednym z podstawowych narzędzi oceny stanu wód i zarządzania ich zasobami (Kazimierski, 2008). Bazuje on na 1135 punktach monitoringu stanu ilościowego (Cabalska i in.,

Autor do kontaktu:

Damian Badora
e-mail: dbadora@gmail.com
tel.: 693-021-525

2015) tworzących sieć obserwacyjno-badawczą na obszarze Polski.

Duże nadzieje wiążą się z Ramową Dyrektywą Wodną (RDW, 2000), która ustanawia zasady działania w dziedzinie polityki wodnej. Jest ona wynikiem wieloletnich prac krajów europejskich. Zobowiązuje państwa członkowskie do racjonalnego wykorzystywania i ochrony zasobów wodnych zgodnie z zasadą zrównoważonego rozwoju. Zgodnie z RDW monitorowanie zasobów i jakości wody jest działaniem niezbędnym do zapewnienia bezpieczeństwa społeczeństwu.

Monitoring Wód Podziemnych można wzbogacić o badania geofizyczne, pomiary grawimetryczne, program satelitarnej grawimetrii GRACE oraz system GLDAS.

Monitoring Wód Podziemnych ma pewne ograniczenia wynikające ze stałych punktów pomiarowych. Rozproszona siatka 1135 punktów monitoringu stanu ilościowego wód podziemnych na terenie całego kraju nie ukazuje w pełni sytuacji hydrologicznej. Ze względu na skomplikowaną sytuację geologiczną niektórych obszarów Polski, siatka punktów pomiarowych powinna być zagęszczona. Budowa i utrzymanie punktów monitoringu stanu ilościowego związane jest również z dużymi kosztami.

Kolejnym ograniczeniem jest częstotliwość pomiaru głębokości zwierciadła wody, który odbywa się raz w tygodniu w stacjach hydrogeologicznych II rzędu lub raz dziennie w stacjach hydrogeologicznych I rzędu (PSH, 2015).

Interesującym rozwiązaniem mającym na celu zagęszczenie siatki monitoringu ilościowego jest zastosowanie jednej z wielu metod geofizycznych. Niewątpliwymi zaletami stosowania metody geofizycznej są jej nieinwazyjność oraz mobilność, dająca możliwość określenia głębokości zwierciadła wód w różnych warunkach terenowych.

Niestety, również koszt badań geofizycznych i stworzenia ogólnokrajowej sieci pomiarowej jest dość wysoki, więc nie może być metodą regularnie wykorzystywaną w pomiarach głębokości zwierciadła wody. Metody geofizyczne mogą umożliwić zagęszczenie pomiarów w trudnych sytuacjach geologicznych, gdzie trzeba wykonać serię pomiarów na niewielkim obszarze w niedługim czasie. Głównymi ograniczeniami metod geofizycznych są ich niewielki zasięg oraz wysoki koszt pomiarów.

Innowacyjnym rozwiązaniem, którego zasięg obejmuje cały obszar kraju, a pomiar odbywa się w sposób ciągły (oprócz przerw technicznych) jest satelitarny system pomiarowy GRACE. Pomiar gęstości skorupy ziemskiej można powiązać z Monitoringiem Wód Podziemnych oraz ukazać głębokość zwierciadła wody na obszarach, gdzie siatka punktów monitoringu stanu ilościowego wód podziemnych jest rzadka lub jej w ogóle nie ma.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie możliwości wykorzystania danych z misji GRACE do zagęszczenia siatki monitoringu ilościowego wód podziemnych na przykładzie zlewni rzeki Wisły.

MISJA GRACE

Duże możliwości w monitoringu wód gruntowych wiążą się z programem The Gravity Recovery And Climate Experiment (GRACE, 2002) wdrożonym przez amerykańską National Aeronautics and Space Administration (NASA, 2004) oraz Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt (DLR, 2006).

Program GRACE uruchomiono w 2002 roku. GRACE jest zespołem dwóch satelitów, które poruszają się po tej samej orbicie jeden za drugim w odległości 220 kilometrów. Gdy pierwszy satelita znajdzie się nad obszarem lądowym o szczególnie silnej grawitacji, przyspiesza, oddalając się od drugiego satelity. Wzajemny dystans pomiędzy satelitami jest precyzyjnie mierzony za pomocą mikrofal. Po przelocie nad anomalią, czyli obszarem lądowym o większej sile grawitacji, satelita zwalnia. Podobnie zachowuje się drugi satelita, gdy znajdzie się nad anomalią. Gdy oba satelity są poza anomalią, ich dystans wraca do normy. Satelity dokonując wielu przelotów nad tym samym miejscem, mogą rejestrować zmiany w lokalnej gęstości skorupy ziemskiej. Może to oznaczać przemieszczanie się olbrzymich mas wody nad i pod powierzchnią Ziemi. Dane z satelitów można połączyć z danymi GPS, opracowując dokładne mapy pola grawitacyjnego Ziemi. Głównym założeniem programu GRACE jest wyznaczenie geoidy oraz anomalii grawimetrycznych na całej kuli ziemskiej oraz monitorowanie zmian klimatu poprzez zmiany zasobów wodnych (Biryło i in., 2015).

Z wyników misji GRACE tworzony jest Globalny Model Geopotencjału (GGM). GGM dzieli się na modele zmiany w czasie (rozwiązania miesięczne, 10-dniowe, 1-dniowe) oraz modele stacjonarne GRACE z różnymi wariantami, np. SLR – Satellite Laser Ranging, GOCE – Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer, CHAMP – Challenging Minisatellite Payload, dane naziemne (Kryński, 2015). Model GGM można ukazać w postaci rozwinięcia w szereg funkcji kulistych oraz w postaci maskonów. Modele w postaci maskonów nie wymagają dodatkowego opracowania i lepiej oddają zmiany na mniejszych obszarach (Kryński, 2015).

Na konferencji w Józefosławcu w 2015 r. przedstawiono zastosowanie danych z misji GRACE (Kryński, 2015). Dzięki tym danym możliwe było zaobserwowanie oraz oszacowanie zmian w pokrywach lodowych Grenlandii (zmniejszanie się pokrywy lodowej o 142 km³ na rok), Alaski (zmniejszanie się pokrywy lodowej o 84 km³ na rok), zachodniej Antarktydy (zmniejszanie się pokrywy lodowej o 65 km³ na rok). Zaobserwowano również wyczerpywanie się zasobów wód podziemnych w północnych Indiach (54 km³ na rok), co jest spowodowane pobieraniem tych wód w celu nawadniania, a także wyczerpanie zasobów wód na Bliskim Wschodzie, co jest spowodowane suszą. Susza spowodowała także obniżenie poziomu wód podziemnych w Rosji oraz na południowym wschodzie Sta-

nów Zjednoczonych (Teksas). W niektórych częściach kuli ziemskiej poziom wód podziemnych podniósł się (Zachodnia Australia, dorzecze Amazonki) lub powrócił do wcześniejszych wartości, np. dorzecze Okavango po suszy w 2007 roku (Kryński, 2015).

Dopełnieniem programu GRACE jest system Global Land Data Assimilation System (GLDAS, 2004), którego zadaniem jest integracja obserwacji naziemnych oraz satelitarnych z wykorzystaniem nowoczesnych technik modelowania danych w celu tworzenia wyników ukazujących zmiany m.in. w poziomie wód gruntowych. System GLDAS zawiera dane o różnych rozdzielczościach przestrzennych m.in. $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ lub $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. Mogą one poprawić dokładność danych misji GRACE, których rozdzielczość przestrzenna wynosi $1^\circ \times 1^\circ$. GLDAS dostarcza informacji przydatnych w wielkoobszarowych badaniach gleby – zmienne przechowywane w bazie opisują między innymi temperaturę gleby, wskaźnik opadu atmosferycznego, ciśnienie atmosferyczne, spływ powierzchniowy oraz wilgotność gleby na kilku poziomach głębokości (Kędzior i in., 2012).

Misja GRACE powoli dobiega końca. Kontynuację misji GRACE ogłosiło Geo Forschungs Zentrum (GFZ, 2006) w Poczdamie. Kontynuacja będzie nosiła nazwę GRACE-FO. Wystrzelenie satelity jest planowane w sierpniu 2017 r. z kosmodromu Bajkonur. Założenia programu GRACE-FO są podobne do założeń programu GRACE (Biryło in., 2015).

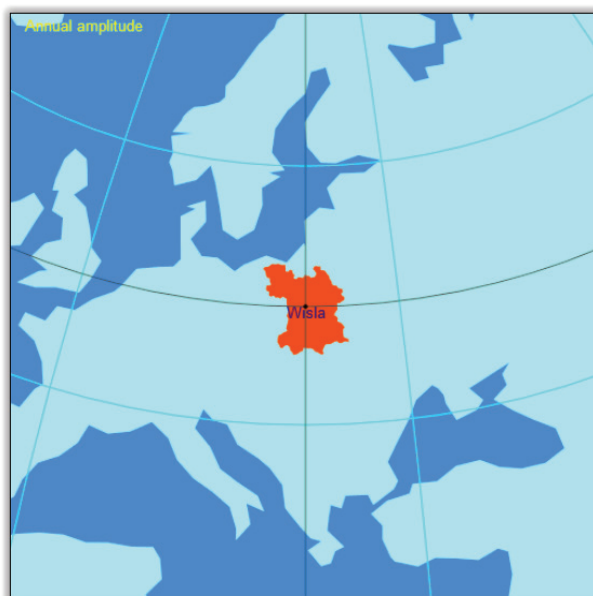
WYKORZYSTANIE DANYCH Z PROGRAMU GRACE W ZLEWNI RZEKI WISŁY

W Poczdamie znajduje się International Centre for Global Earth Models (ICGEM, 2006), które jest jednym z sześciu centrów International Gravity Field Service (IGFS, 2006). ICGEM zajmuje się gromadzeniem i archiwizacją istniejących modeli grawitacyjnych kuli ziemskiej oraz udostępnia serwis internetowy z autorskimi programami, dającymi użytkownikom możliwość modelowania i wizualizacji różnych zjawisk związanych z anomaliami grawitacyjnymi, na podstawie danych pozyskanych z różnych misji, m.in. GRACE (ICGEM, 2006).

Serwis internetowy ICGEM (ICGEM, 2006) jest stale wzbogacany o nowe dane i wciąż rozwijany pod względem oprogramowania. Jednym z takich programów jest G³Browser – GFZ Grace Gravity Browser (G³Browser, 2006), ukazujący czasowe zmiany grawitacji w latach 2002–2014 na podstawie pomiarów satelity GRACE dla wszystkich regionów Ziemi.

Przykładem działania programu G³Browser jest analiza poziomu wód TWS – Terrestrial Water Storage (Rodell in., 2006) dla zlewni rzeki Wisły w Polsce (rys. 1).

G³Browser wizualizuje dane GFZ Release 05, które są przetworzonym, miesięcznym zbiorem danych z misji GRACE (Kushe i in., 2015). Oprócz GFZ – Deutsches Geo



Rysunek 1. Zlewnia rzeki Wisły (G³Browser, 2006)
Figure 1. Vistula river basin (G³Browser, 2006).

Forschungs Zentrum (GFZ, 2006), przetwarzaniem danych zajmują się także centra CSR – Center of Space Research – University of Texas at Austin (CSR, 2002) oraz JPL – NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL, 2004).

Wysokość poziomu wody, którą otrzymujemy z danych misji GRACE, to TWS – Terrestrial Water Storage (Rodell in., 2006). Pomiar i zapis wysokości poziomu wody przez misję GRACE jest ograniczony rozdzielczością pionową, przez co satelity misji GRACE nie są w stanie rozróżnić poziomu wód zmagazynowanych jako pokrywa śnieżna, wilgotność gleby oraz wody gruntowe (Rodell i in., 2006).

Aby obliczyć poziom wód gruntowych (Groundwater) należy wykorzystać dane z baz GLDAS: SoilMoisture oraz SnowWaterEquivalent:

$$\Delta \text{Groundwater} = \Delta \text{TWS}_{\text{GRACE}} - (\Delta \text{SoilMoisture}_{\text{GLDAS}} + \Delta \text{SnowWaterEquivalent}_{\text{GLDAS}})$$

gdzie:

$\Delta \text{Groundwater}$ – przyrost poziomu wód gruntowych

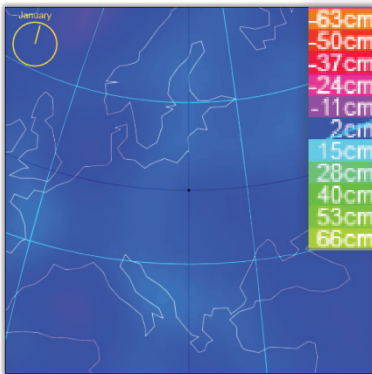
$\Delta \text{TWS}_{\text{GRACE}}$ – wysokość poziomu wody otrzymana z danych misji GRACE

$\Delta \text{SoilMoisture}_{\text{GLDAS}}$ – wilgotność gleby

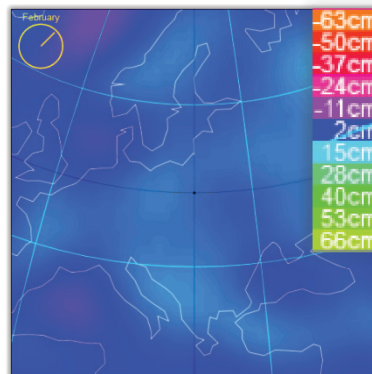
$\Delta \text{SnowWaterEquivalent}_{\text{GLDAS}}$ – poziom pokrywy śnieżnej

Zestawienie danych misji GRACE z danymi GLDAS daje duże możliwości w monitorowaniu poziomu wód gruntowych na dużych powierzchniach z comiesięczną częstotliwością zestawienia danych, która pozwala na bieżące śledzenie zmian i prognozowanie niekorzystnych zjawisk w postaci suszy lub powodzi.

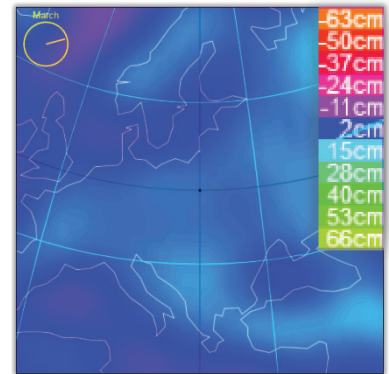
Styczeń; January



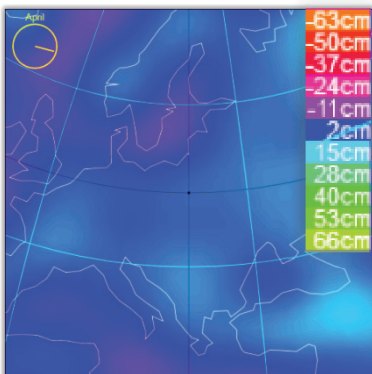
Luty; February



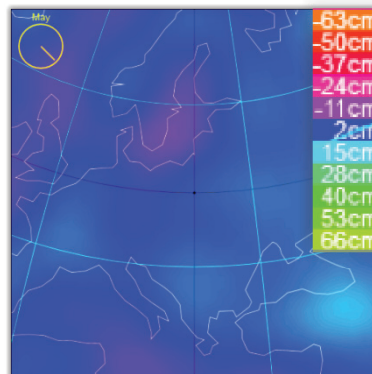
Marzec; March



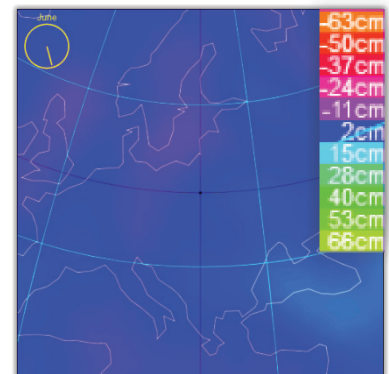
Kwiecień; April



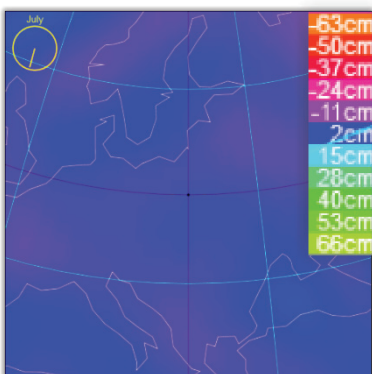
Maj; May



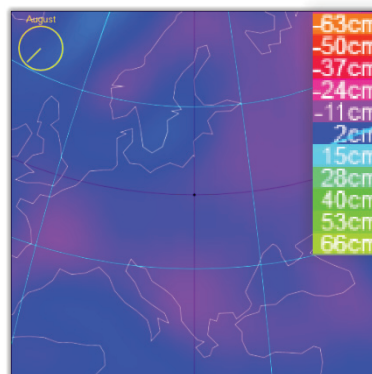
Czerwiec; June



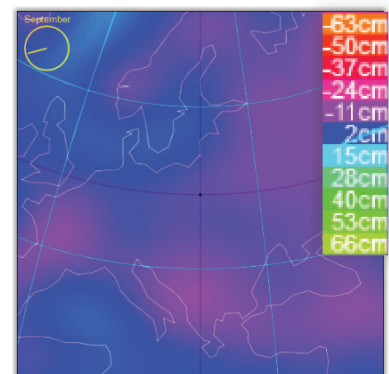
Lipiec; July



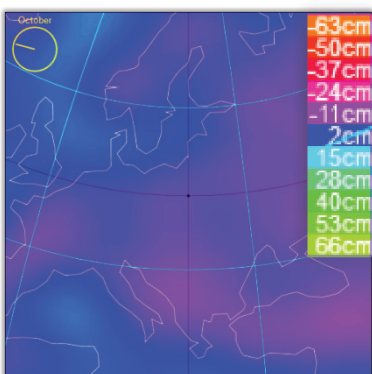
Sierpień; August



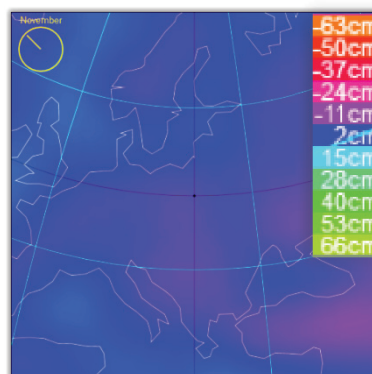
Wrzesień; September



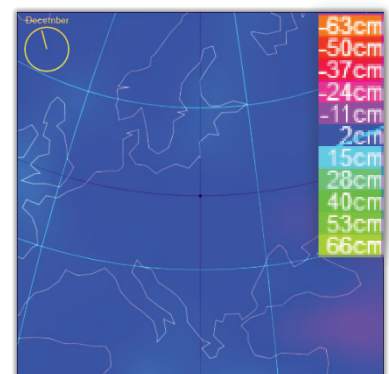
Październik; October



Listopad; November



Grudzień; December



Rysunek 2. Zmiany wysokości poziomu wody TWS zlewni rzeki Wisły w poszczególnych miesiącach (G³Browser, 2006)
 Figure 2. Changes in the water level in the Vistula River basin each month (G³Browser, 2006).

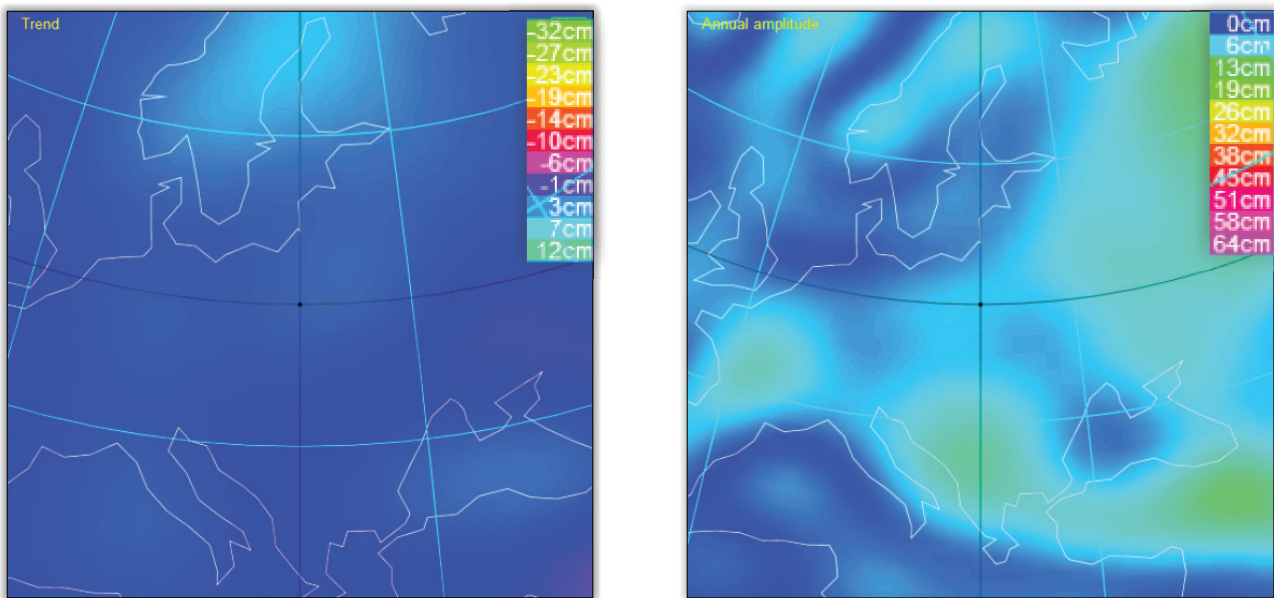
Wizualizacja (rys. 2) pokazuje uśrednione wysokości poziomu wody TWS dla poszczególnych miesięcy z wszystkich lat trwania pomiaru, w stosunku do średniej z całego okresu pomiarowego misji GRACE na siatce o rozdzielczości $1^\circ \times 1^\circ$ (ok. 110 km na 110 km), dla zlewni rzeki Wisły.

Z analizy wizualizacji (rys. 2) wynika, że poziom wód TWS od stycznia do maja jest podwyższony, co na wizualizacji jest odwzorowane kolorem błękitnym. Natomiast od lipca do listopada obniża się. Obniżanie poziomu wody TWS oznaczono na wizualizacji kolorem różowym. Wyniki analizy pokrywają się z prognozami PSH (PSH, 2015). Sierpień, wrzesień i październik wg wizualizacji, a także

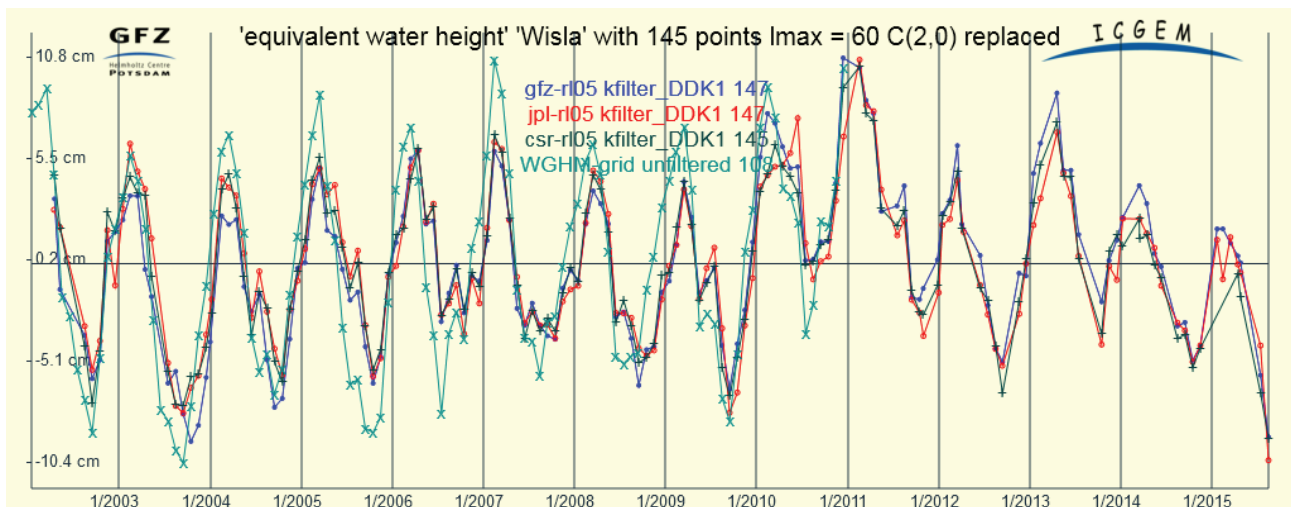
PSH są miesiącami o obniżonym zwierciadle wód TWS, natomiast luty, marzec i kwiecień są miesiącami o podwyższonym zwierciadle wód TWS. W celu lepszego porównania wyników misji GRACE oraz danych PSH należałoby skorzystać z technik geostatycznych do upscalingu. Ten problem wynika z niskiej rozdzielczości misji GRACE.

Program G³Browser oprócz średnich miesięcznych pokazuje również trend, który może sugerować wzrost poziomu wód TWS w kolejnych latach o kilkanaście milimetrów, oraz roczne i półroczne amplitudy poziomu wód TWS (rys. 3).

Z rysunku 3 wynika, że roczna amplituda poziomu wód TWS dla zlewni rzeki Wisły wynosi kilka centymetrów, co

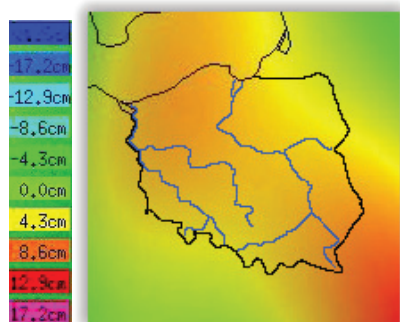


Rysunek 3. Po lewej stronie trend wzrostu poziomu wód TWS, po prawej stronie roczne amplitudy poziomu wód TWS (G³Browser, 2006)
Figure 3. On the left side show growth TWS trend. On the right side show annual amplitude TWS (G³Browser, 2006).

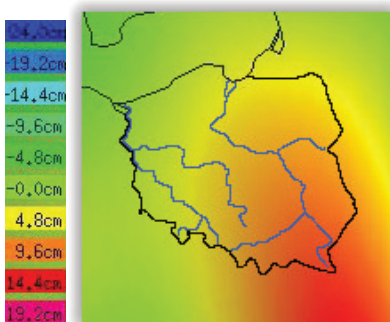


Rysunek 4. Wykres zmian wysokości poziomów wód gruntowych na przestrzeni lat na obszarze zlewni rzeki Wisły (G³Browser, 2006)
Figure 4. Graph of the amount of groundwater levels over the years in the area of the Vistula River basin (G³Browser, 2006).

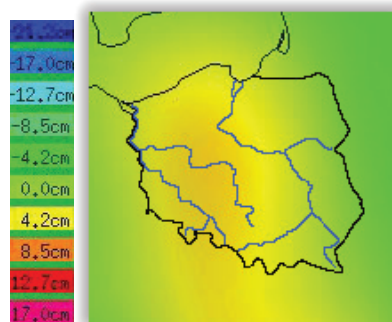
Styczeń; January 2003



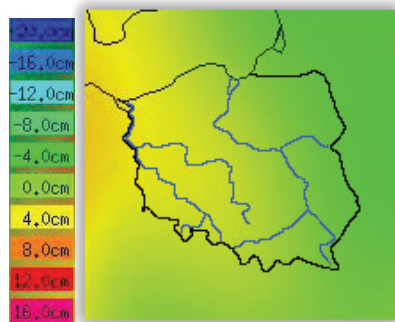
Luty; February 2003



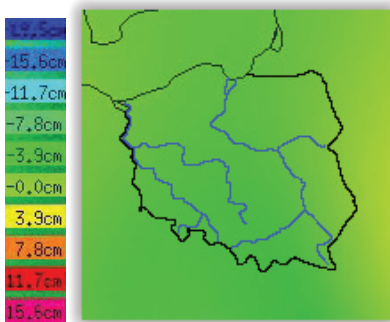
Marzec; March 2003



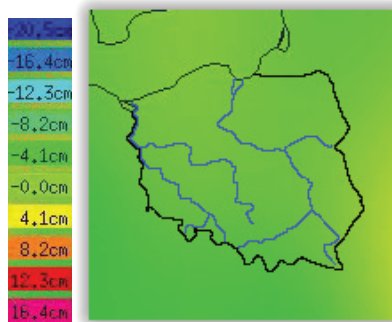
Kwiecień; April 2003



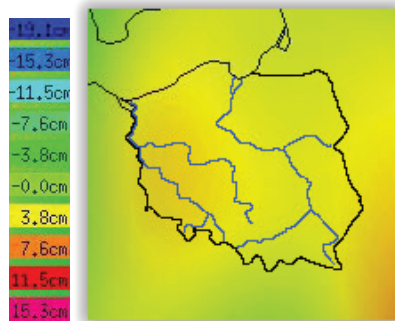
Maj; May 2003



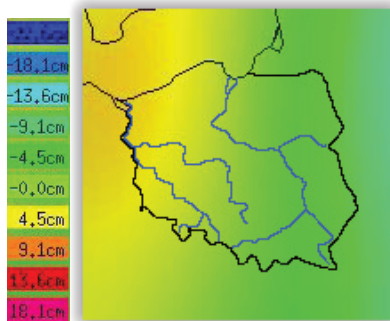
Czerwiec; June 2003



Lipiec; July 2003



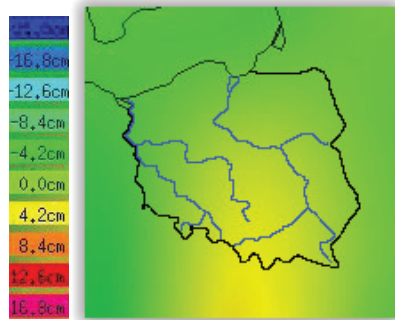
Sierpień; August 2003



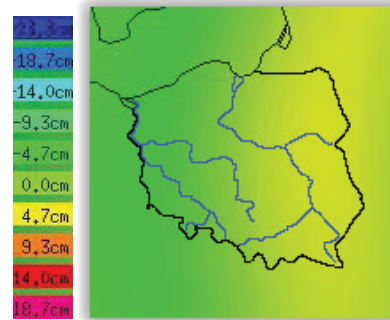
Wrzesień; September 2003



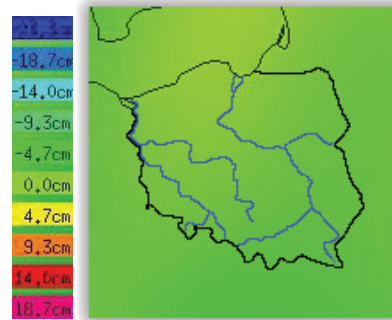
Październik; October 2003



Listopad; November 2003

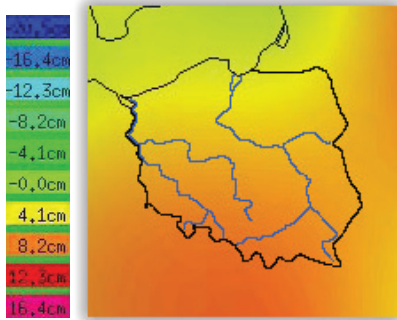


Grudzień; December 2003

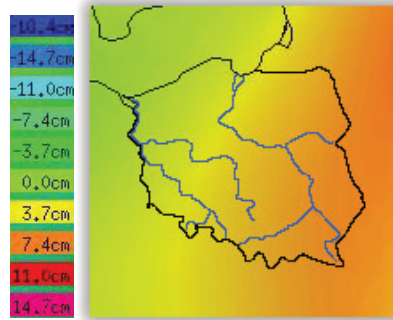


Rysunek 5. Zmiany wysokości poziomu wody TWS na terenie Polski w 2003 roku (VoMM, 2006)
 Figure 5. Changes TWS in Poland in 2003 (VoMM, 2006).

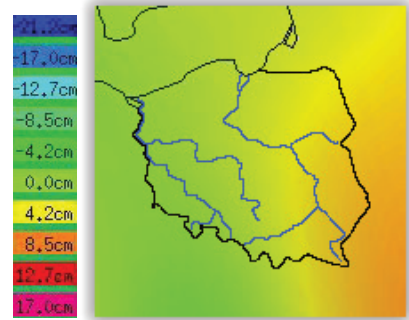
Styczeń; January 2010



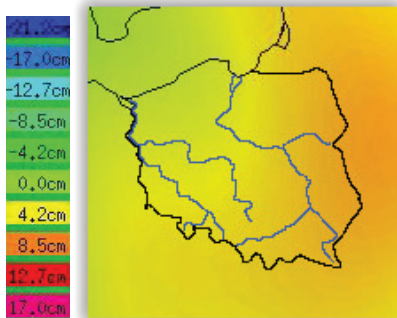
Luty; February 2010



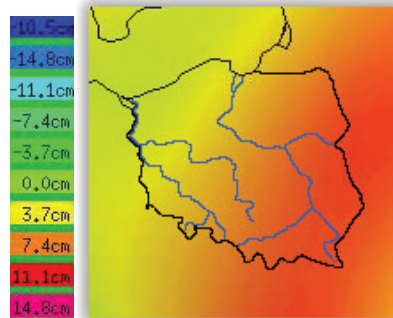
Marzec; March 2010



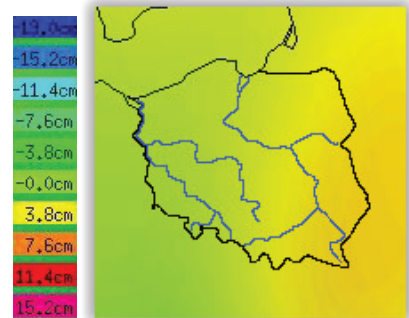
Kwiecień; April 2010



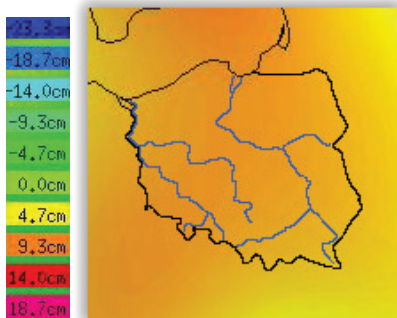
Maj; May 2010



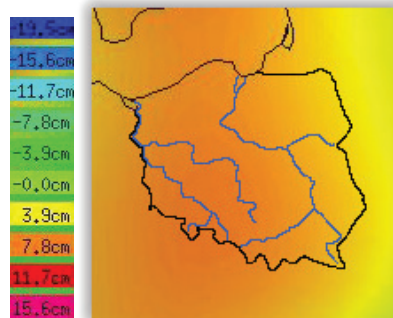
Czerwiec; June 2010



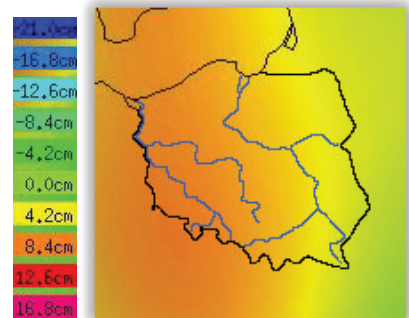
Lipiec; July 2010



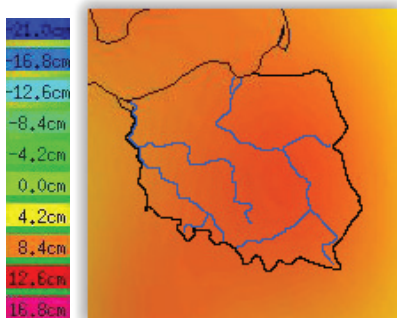
Sierpień; August 2010



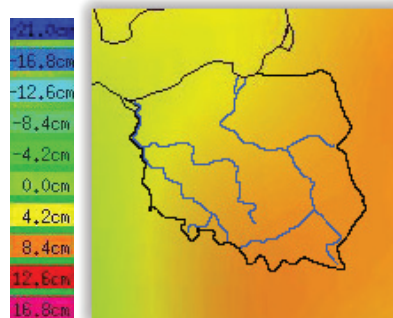
Wrzesień; September 2010



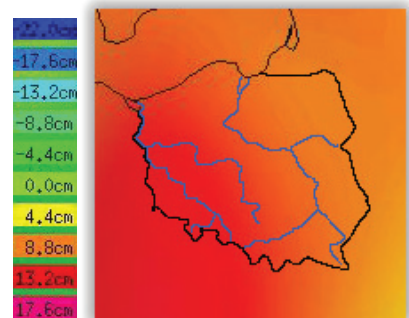
Październik; October 2010



Listopad; November 2010



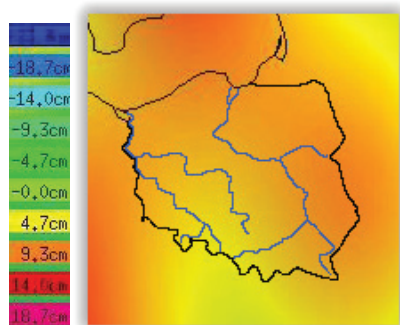
Grudzień; December 2010



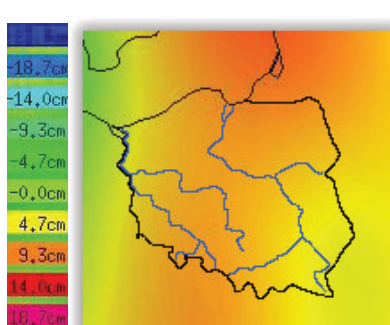
Rysunek 6. Zmiany wysokości poziomu wody TWS na terenie Polski w 2010 roku (VoMM, 2006)

Figure 6. Changes TWS in Poland in 2010 (VoMM, 2006).

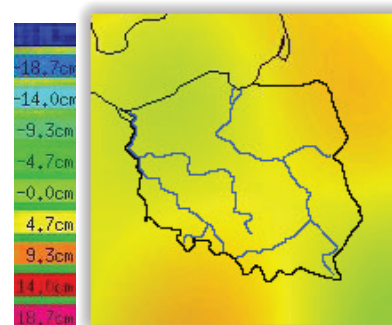
Styczeń; January 2015



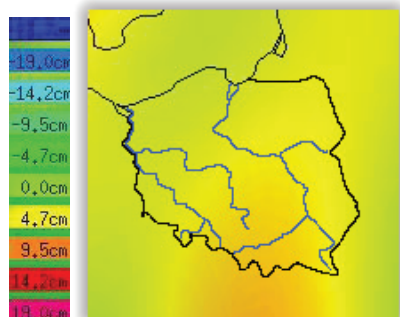
Luty; February 2015



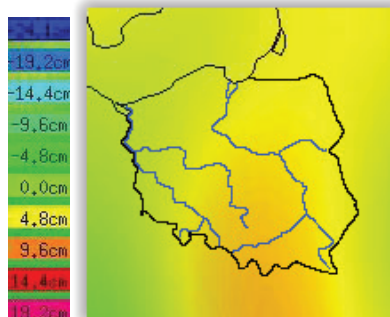
Marzec; March 2015



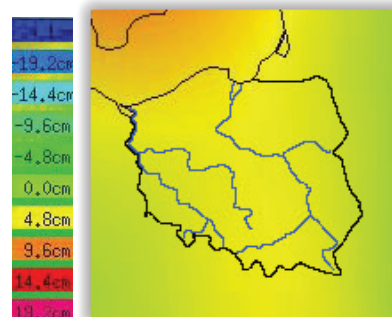
Kwiecień; April 2015



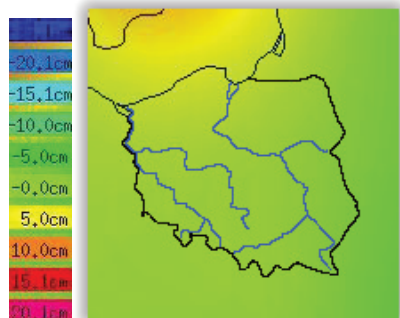
Maj; May 2015



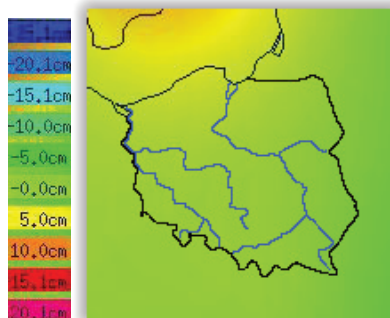
Czerwiec; June 2015



Lipiec; July 2015



Sierpień; August 2015



Rysunek 7. Zmiany wysokości poziomu wody TWS na terenie Polski w 2015 roku (VoMM, 2006)
Figure 7. Changes TWS in Poland in 2015 (VoMM, 2006).

wyraża błękitny kolor. W przypadku wizualizacji trendów wysokość poziomu wód TWS w północnej części zlewni rzeki Wisły na przestrzeni lat odbywania się misji GRACE ma tendencję wzrostu. W północnej części Europy poziom wód TWS wzrasta o kilka centymetrów rocznie. Taki trend może świadczyć o topnieniu skandynawskich lodowców (Barthelmes, Kohler, 2015).

Oprócz przydatnego narzędzia wizualizacji, program G³Browser posiada również opcję rysowania wykresów (rys. 4). Na wykresie można umieścić dane z misji GRACE przetworzone przez różne centra badawcze, m.in. przez Deutsches Geo Forschungs Zentrum (GFZ, 2006), NASA Jet Propulsion Laboratory (JPL, 2004), Center of Space

Research (CSR, 2002). Na wykresie można również wyświetlić dane z WaterGAP Global Hydrology Model (WGHM, 2012), który jest algorytmem obliczającym przy-
pływy i odpływy wód gruntowych, powierzchniowych itp. Program posiada również odpowiednie filtry pozwalające na pozbycie się szumów i wyklarowanie wyników.

Dane uzyskane z centrów badawczych widniejące na wykresie (rys. 4) wyraźnie się ze sobą pokrywają. Wyjątkiem są tu dane pozyskane z WGHM. Na wykresie zaznacza się pewna coroczna powtarzalność niskiego poziomu wód TWS, przypadającego na miesiące wrzesień i październik. Wysoki poziom wód TWS przypada natomiast na luty i marzec. Z wykresu można również odczytać lata,

w których poziom zwierciadła wód TWS był wysoki, np. rok 2010, 2011, oraz lata, gdy poziom ten był niski, np. 2003.

Wysokość zwierciadła wód TWS w poszczególnych miesiącach można wizualizować, wykorzystując funkcję 3D Visualization of Monthly Models (VoMM, 2006). Za pomocą tej funkcji można porównać otrzymane wizualizacje z wykresem (rys. 4). Od początku roku 2003 do początku kwietnia notowano podniesiony poziom wód TWS (rys. 5). W maju i czerwcu poziom wód był obniżony. W lipcu poziom wód TWS znów się podniósł. Tę niewielką zmianę można zauważyć również na wykresie (rys. 4). Wrzesień, październik, listopad i grudzień są miesiącami o obniżonym poziomie wód TWS. Dane z misji GRACE o suszy, która nawiedziła Europę, w tym Polskę, pokrywa się z opisem dotkliwej suszy, która nawiedziła Polskę w 2003 roku (Kręgiel, Jarosińska, 2009).

Rok 2010 był bardzo obfity w opady. Komunikaty wy stosowane na rok 2010 przez System Monitoringu Suszy Rolniczej (SMSR, 2011) nie stwierdzały zagrożenia suszą rolniczą. W sierpniu, wrześniu i październiku wystąpiły duże opady w całej Polsce. Informacje o braku suszy można również odczytać z wykresu (rys. 4), a także analizując wizualizację wysokości poziomu wód TWS w poszczególnych miesiącach (rys. 6). Przez cały rok poziomy wód TWS były podwyższone o kilka centymetrów. Rok 2010 z dużą ilością opadów poskutkowało rekordowo wysokim poziomem wód TWS na początku 2011 roku (rys. 4).

Zagrożenie suszą rolniczą w Polsce w 2015 roku było komunikowane przez System Monitoringu Suszy Rolniczej (SMSR, 2011). Powyższy komunikat pokrywa się z danymi dostarczonymi przez satelity GRACE (rys. 4, rys. 7). Na wykresie (rys. 4) widać bardzo wyraźny spadek poziomu wód TWS w 2015 roku. Analiza wizualizacji poszczególnych miesięcy 2015 roku przedstawia bardzo wyraźne obniżenie poziomu wód TWS od lipca do sierpnia, co może świadczyć, że były to miesiące suche. Niestety, dla kolejnych miesięcy 2015 roku nie ma przetworzonych danych z misji GRACE.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

System satelitarny GRACE daje duże możliwości monitoringu zmian ilości oraz zwierciadła wód podziemnych. Jest metodą nieinwazyjną i, co bardzo istotne – globalną. Tradycyjne metody oceny zasobów wód gruntowych, opierające się na pomiarze w otworach badawczych i piezometrach, są bardzo czasochłonne i dają ograniczony zakres pomiaru. Podobnie jest z naziemnymi metodami geofizycznymi, których pole działania ogranicza się do niewielkich obszarów.

Według analiz Państwowej Służby Hydrogeologicznej (PSH, 2015) zwierciadło wód podziemnych zmienia się na przestrzeni lat. Ta zmiana zwierciadła wód jest również dobrze widoczna na wykresie danych z misji GRACE (rys. 4). Poziomy wód uwidocznione jako linie wykresu dla nie-

których lat są wyraźnie wyższe lub niższe w porównaniu do innych lat. Może to świadczyć o tym, że dany rok był suchy lub wyjątkowo mokry. Czynnikiem utrudniającym porównanie danych z GRACE jest złożoność danych Monitoringu Wód Podziemnych. Wody podziemne składają się z wielu poziomów. Również bilans wód podziemnych jest trudny do oszacowania ze względu na pobór tych wód na różne cele. Dane z różnych punktów pomiarowych mają podobny trend, jednak mogą się od siebie bardzo różnić. Do celów porównawczych z danymi misji GRACE można skorzystać z technik geostatycznych do upscalingu (Zawadzki, 2011). Te techniki pozwolą powiązać dane z misji GRACE z danymi Monitoringu Wód Podziemnych. Potrzeba ich wykorzystania jest spowodowana niską rozdzielczością wyników misji GRACE (Biryło i in., 2015). Przykładem porównania uśrednionych pomiarów zwierciadła wód gruntowych ze studni z danymi GRACE oraz GLDAS na przestrzeni kilku lat są badania z obszaru Zachodniego Wybrzeża Stanów Zjednoczonych (Xiao i in., 2015). Wyniki miesięczne powyższych badań z dwóch źródeł danych są do siebie zbliżone. Wskazuje to dobre perspektywy wykorzystania w przyszłości systemu GRACE.

Aby nie korzystać z technik geostatycznych dla danych z Monitoringu Wód Podziemnych, by nie pogorszyć wyniku estymacji, która jest bardzo istotna przy określaniu poziomu zwierciadła wód gruntowych dla obszaru Polski, powinno się wspomóc dane z misji GRACE dodatkowymi danymi pomiarowymi uzyskanymi za pomocą wybranych metod geofizycznych.

Dane z programu GRACE umożliwiają ocenę zasobów wód na różnych głębokościach. Ukazują również zasięg tych wód, a także pozwalają określić ilość i, co istotne, zmiany poziomu wód gruntowych na przestrzeni lat. Przykładem z ostatnich lat są badania poziomu, objętości i zasięgu wód gruntowych na obszarze Ameryki Południowej (Frappart i in., 2013).

Amplituda roczna poziomu wód gruntowych dla zlewni rzeki Amazonki jest w skali roku dość duża, rzędu ok. 40 cm. Natomiast dla zlewni rzeki Wisły ta amplituda wynosi średnio kilka centymetrów. Tak niewielka amplituda utrudnia analizę danych, co może powodować błędy w interpretacji.

Obserwacja trendów zmian zwierciadła wód podziemnych daje możliwość przewidywania ewentualnych zagrożeń i pozwala zawczasu podjąć odpowiednie kroki.

Zarówno Monitoring Wód Podziemnych, jak również dodatkowe dane z misji GRACE i powiązania z systemem GLDAS umożliwiają bardzo precyzyjne określenie rzeczywistego poziomu wód gruntowych w Polsce, jak również rzetelne tego poziomu monitorowanie, co ma strategiczne znaczenie zarówno w bieżącym gospodarowaniu wodą dla rolnictwa i ludności, jaki i w projektowaniu działań adaptacyjnych i mitygacyjnych związanych z dostosowaniem rolnictwa do zmian klimatu (Olesen i in., 2011).

LITERATURA

- Barthelmes F., Kohler W., 2015.** Global Gravity Field Models and the IAG Service ICGEM, Tutorial Height and Gravity. EUREF Symposium 2015, Leipzig, Germany, 02.07.2015.
- Biryło M., Kuczyńska-Sieheń J., Nastula J., Rzepecka Z., 2015.** Monitoring poziomu wód gruntowych. Badania geodynamiczne z wykorzystaniem współczesnych osiągnięć geodezji, Józefosław, 19-20.10.2015.
- Cabalska J., Galczak M., Mikołajczyk A., 2015.** Baza danych – Monitoring Wód Podziemnych. <http://www.psh.gov.pl/plik/id,7946.pdf>. (dostęp 16.03.2016)
- CSR, 2002. Center of Space Research – University of Texas at Austin. <http://www.csr.utexas.edu/>. (dostęp 05.01.2016)
- DLR, 2006, Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, <http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10002/>, (dostęp 12.12.2015).
- Frappart F., Seoane L., Ramillien G., 2013.** Validation of GRACE-derived terrestrial water storage from a regional approach over South America. *Remote Sensing of Environment*, 137: 70-82.
- Kazimierski B., 2008.** Monitoring wód podziemnych – przykład zastosowania lokalnego. *Przeгляд Geologiczny*, 56(4): 281-284.
- G³Browser, 2006. GFZ Grace Gravity Browser. <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/JSB/G3Browser-st.html>. (dostęp 05.01.2016)
- GFZ, 2006. Deutsches Geo Forschungs Zentrum. <http://www.gfz-potsdam.de/>. (dostęp 20.01.2016)
- GLDAS, 2004. Global Land Data Assimilation System. <http://ldas.gsfc.nasa.gov/gldas>. (dostęp 12.12.2015)
- GRACE, 2002. The Gravity Recovery And Climate Experiment. <http://www.csr.utexas.edu/grace>. (dostęp 12.12.2015)
- ICGEM, 2006. International Centre for Global Earth Models. <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM>. (dostęp 12.12.2016)
- IGFS, 2006. International Gravity Field Service. <http://igfs.topo.auth.gr/>. (dostęp 12.12.2015)
- IUNG-BIP, 2015. Komunikat odnośnie wystąpienia warunków suszy w Polsce. <http://www.susza.iung.pulawy.pl/komentarz>, (dostęp 03.12.2015)
- JPL, 2004. NASA Jet Propulsion Laboratory. <http://www.jpl.nasa.gov>. (dostęp 20.01.2016)
- Kędzior M., Przeździecki K., Zawadzki J., 2012.** Wykorzystanie bazy danych GLDAS i narzędzi Open Source w badaniach wilgotności gleby. *Roczniki Geomatyki*, tom X, zeszyt 3, 53: 68-76.
- Kregiel B., Jarosińska E., 2009.** Obecny stan monitoringu zjawiska suszy w Polsce i na świecie. https://suw.biblos.pk.edu.pl/resources/i1/i8/i2/r1822/KregielB_ObecnyStan.pdf. (dostęp 05.01.2016)
- Kryński J., 2015.** Zmiany w czasie pola siły ciężkości – mechanizmy, monitorowanie, zastosowania, perspektywy. *Badania geodynamiczne z wykorzystaniem współczesnych osiągnięć geodezji*, Józefosław, 19-20.10.2015
- Kushe J., Schmidt R., Petrovic S., Rietbroek R., 2015.** <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/shms/monthly/gfz-rl05>. (dostęp 05.01.2016)
- NASA, 2004. National Aeronautics and Space Administration. <https://www.nasa.gov>. (dostęp 12.12.2015)
- NOAA, 2015. Global Summary Information - December 2015. <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/summary-info/global/201512>. (dostęp 03.03.2016)
- Olesen J.E., Trnka M., Kersebaum K.C., Skjelvåg A.O., Sequin B., Peltonen-Sainio P., Rossi F., Kozyra J., Micale F., 2011.** Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, 34: 96-112.
- Parusel J., 2004.** Opracowanie ekofizjograficzne do Planu Zagospodarowania Przestrzennego Województwa Śląskiego. http://www.slaskie.pl/planzagospodarowania/index.php?grupa=9&dzi=1287555795&art=1287578584&id_menu=1. (dostęp 01.12.2015)
- Parry M.L., Canziani O.F., Palukitof J.P., van der Linden P.J., Hanson C.E., 2007.** Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/contents.html, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. (dostęp 12.12.2015)
- Rodell M., Chen J., Kato H., Famiglietti J.S., Nigro J., Wilson C.R., 2006.** Estimating ground water storage changes in the Mississippi River basin (USA) using GRACE. *Hydrogeology Journal*, doi:10.1007/s10040-006-0103-7.
- PSH, 2015. Państwowa Służba Hydrogeologiczna. <http://www.psh.gov.pl>. (dostęp 10.01.2016)
- RDW, 2000. Ramowa Dyrektywa Wodna 2000/60/WE (RDW) z dnia 23 października 2000 r.
- SMSR, 2011. System Monitoringu Suszy Rolniczej. Komunikat odnośnie wystąpienia warunków suszy w Polsce, <http://www.susza.iung.pulawy.pl/arch10/komentarz/13>. (dostęp 05.01.2016)
- VoMM, 2006. 3D Visualization of Monthly Models. <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM>. (dostęp 20.01.2016)
- WGHM, 2012. WaterGAP Global Hydrology Model. <http://www.watergap.de>. (dostęp 20.01.2016)
- Xiao R., He X., Zhang Y., Ferreira V., Chang L., 2015.** Monitoring Groundwater Variations from Satellite Gravimetry and Hydrological Models: A Comparison with in-situ Measurements in the Mid-Atlantic Region of the United States. *Remote Sensing*, 7: 686-703.
- Zawadzki J., 2011.** Metody geostatystyczne dla kierunków przyrodniczych i technicznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- ZODR, 2003. Zachodniopomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego w Barzkowicach. *Susza*. http://www.zodr.pl/download/obserwacje_meteo/susza.pdf. (dostęp 03.12.2015)

D. Badora

USE OF THE GRACE MODEL IN THE ASSESSMENT OF THE GROUNDWATER LEVEL IN THE CONTEXT OF THE AVAILABILITY OF WATER FOR AGRICULTURE IN THE BASIN OF THE VISTULA

Summary

In 2015, there was hydrological drought in Poland which had a negative impact on the growth of crops. To minimize the effects of hydrological drought in Poland, monitoring of the levels of groundwater must be continued. However, the basic problem is to accurately measure the amount of groundwater and its quantity. In Poland, groundwater monitoring is one of the basic tools to as-

sess the status of water and the management of its resources. The paper presents the appraisal of the system GRACE tests used in the hydrogeological exploration of groundwater level. Data from the GRACE mission were processed in the programs provided

by the Institute in Potsdam on website ICGEM and the resulting images were analyzed on a nation-wide scale.

Keywords: drought, groundwater levels monitoring, GRACE.