

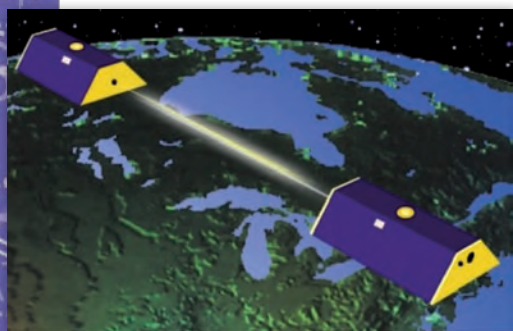
Badania Ziemi z kosmosu

MISJA GRACE

Od 17 marca 2002 roku po orbicie okołozemskiej krążą satelity GRACE (Gravity Recovery And Climate Experiment). Dwa bliźniacze aparaty podążają prawie 500 km nad powierzchnią Ziemi w odległości 220 km jeden za drugim. Pozwalają wyznaczyć nie tylko przyspieszenie siły ciężkości, ale też grubość pokrywy lodowej oraz gęstość elektronów w atmosferze.

MONIKA SIENKIEWICZ

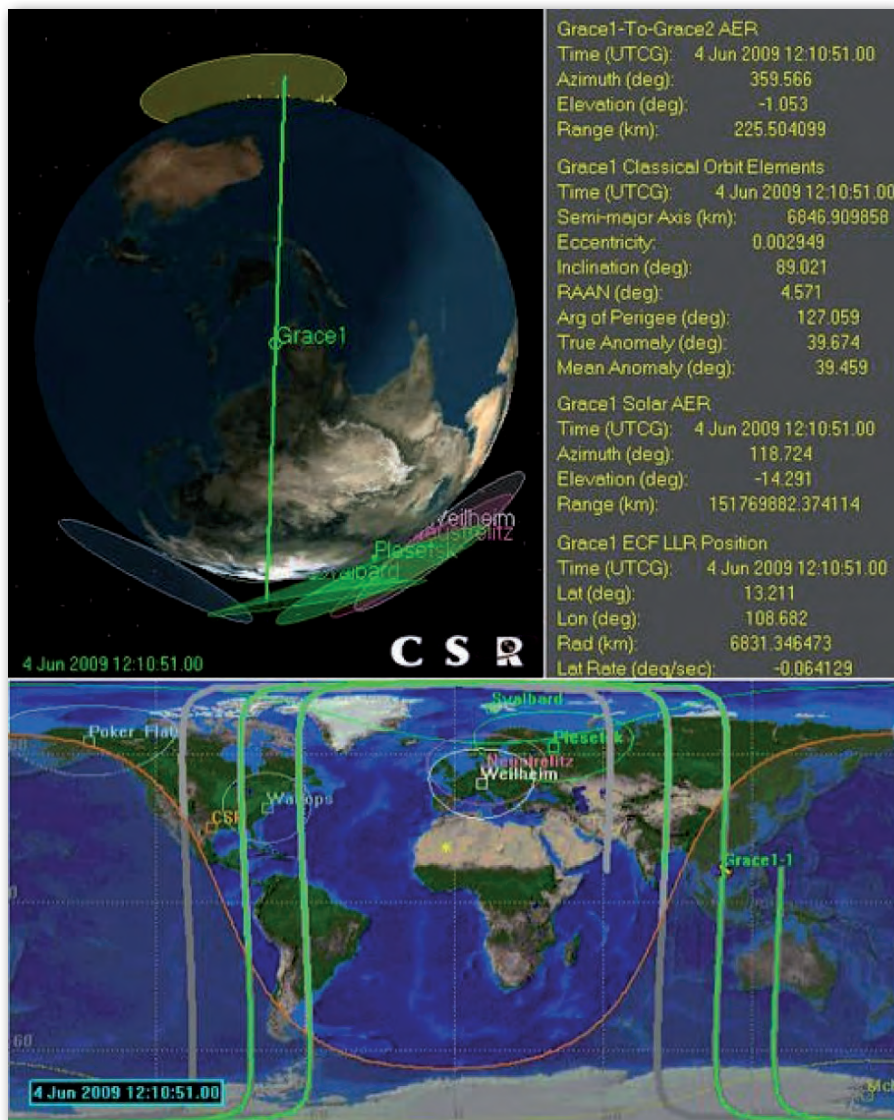
Pole grawitacyjne Ziemi nie jest jednorodne ani do końca poznane. Kształt Ziemi odbiega bowiem od regularnej bryły, a gęstość jej wnętrza jest różna w różnych miejscach. Pomiar pola grawitacyjnego nie jest łatwy ze względu na to, że masy Ziemi przemieszczają się, a poza tym nie ma możliwości przeprowadzenia na jej powierzchni pomiarów globalnych. Jedynym rozwiązaniem jest pomiar z kosmosu. Na to właśnie zapotrzebowanie odpowiadają satelity GRACE.



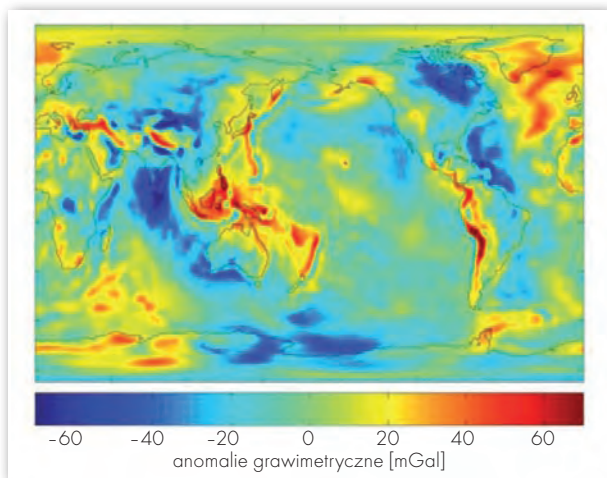
Rys. 1. Satelity GRACE na orbicie okołozemskiej

TABELA 1. PORÓWNANIE SATELITÓW MISJI GRACE I GPS

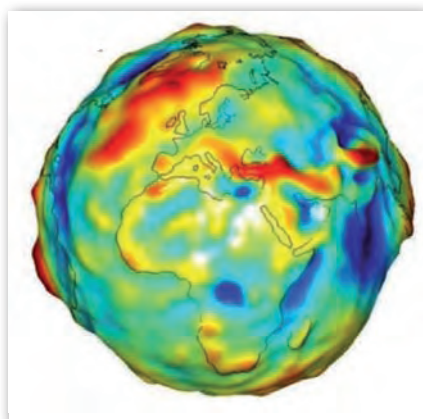
	GRACE	GPS
Rozpoczęcie misji	marzec 2002	lutym 1978
Wysokość orbity	485 km	20 200 km
Inklinacja	89 stopni	55 stopni
Ekscentr położenia	0,001	0,02
Żywotność	5 lat	ok. 10 lat



Rys. 2. Ścieżka satelitów i parametry orbitalne (www.csr.utexas.edu/grace/ground/globe.html); dane orbitalne uaktualniane co 5 minut (www.csr.utexas.edu/grace/ground/)



Rys. 3. Mapa grawitacyjna Ziemi stworzona na podstawie pomiarów wykonanych przez satelitę GRACE



Rys. 4. Mapa pola grawitacyjnego – zbliżenie na Europę i Afrykę

Satki amerykańsko-niemieckiej misji GRACE są umieszczone na niskich orbitach (rys. 2) i wyposażone w precyzyjne odbiorniki geodezyjne GPS, akcelerometry i wewnątrzsatelitarne obserwatory działające w zakresie pasma K (mikrofałe). Za pomocą wyznaczenia orbity (Precise Orbit Determination, POD) z wykorzystaniem danych GPS satki GRACE określają swoje względne położenie na orbicie z wielką precyzją (w tabeli 1 porównano je z satelitami GPS, które są zdecydowanie bardziej znane).

Zadaniem bliźniaczych aparatów GRACE jest pomiar pola grawitacyjnego. Przelatując nad miejscem o silniejszym polu grawitacyjnym, satelita jest mocniej przyciągany przez Ziemię, czyli oddala się od drugiego satelity. Natomiast gdy pole jest słabsze, oddala się on od Ziemi i zbliża do bliźniaczego satelity. Tak więc zmiana pola grawitacyjnego jest wyznaczana poprzez pomiar zmiany odległości między aparatami. Ponieważ odległość między satelitami i ich prędkości są zna-

ne z wysoką dokładnością, możliwe jest precyzyjne wyznaczenie ich oddalania i przybliżania się. Znajdujące się na pokładzie urządzenia mierzą tę odległość z dokładnością nawet do pojedynczych mikronów.

Dane z aparatów GRACE odbierane są przez cztery centra: CSR (Center for Space Research), GFZ (GeoforschungsZentrum Potsdam), JPL (Jet Propulsion Laboratory), CNES (Centre Natio-

nal d'Études Spatiales). Poza zmianami pola grawitacyjnego satelity służą także do badania parowania wody, topnienia lodowców czy migracji monsunowej, ponieważ to są źródła zmian pola grawitacyjnego. Dzięki misji możliwe są również inne obserwacje, będące niejako efektem ubocznym założonych zadań.

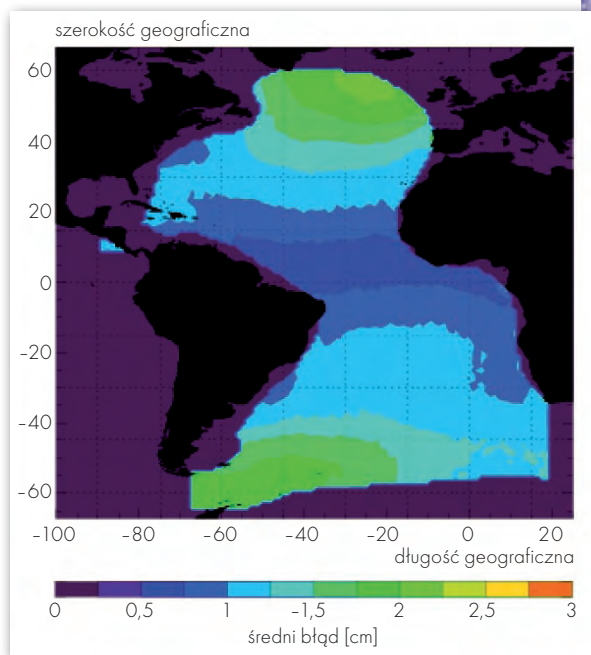
Od początku XX wieku zaczęto gromadzić dane dotyczące pola grawitacyjnego Ziemi, w wyniku czego powstało także archiwum. Jednak to, co uzyskano w ciągu pięcioletniej amerykańsko-niemieckiej misji, znacznie przerosło oczekiwania. Zbiór danych grawimetrycznych został w tym czasie stworzony od początku, ale w o wiele bardziej rozbudowanej formie i z dokładnością nawet stukrotnie większą niż z poprzedniego satelity CHAMP. Ponadto istnieje teraz możliwość śledzenia wszelkich zmian pola co trzydzieści dni (czas niezbędny do tego, by satelity mogły wykonać powtórny pomiar każdego miejsca na globie). Zebrane dane można wykorzystać przede wszystkim do budowy trójwymiarowych modeli ziemskiego pola grawitacyjnego (rys. 3, 4).

Pomiary wykonywane przez satelity GRACE mogą posłużyć do wyjaśnienia,

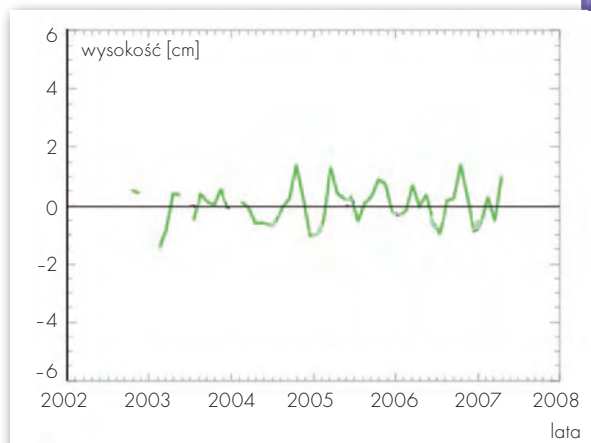
dłaczego masy ziemskie (a co za tym idzie – pole grawitacyjne) są tak chwiejne. Wynikiem misji może być również dokładne wyznaczenie geoidy. Taki monitoring Ziemi pozwoli na dokładniejsze badanie klimatu i atmosfery.

Pomiary z satelitów GRACE wykorzystano już m.in. do wyznaczenia anomalii Zatoki Hudsona (wynik przemieszczania się gorących skał głębokiego podłoża i ruchu płyt kontynentalnych), wahań poziomu wód na obszarze dorzecza Missisipi, śledzenia wpływu zmian klimatu na stosunki wodne na ogromnych obszarach Ziemi.

W 2007 roku zostały przedstawione wyniki pomiaru bilansu wody Oceanu Atlantyckiego [Esselborn S. i in., 2007].



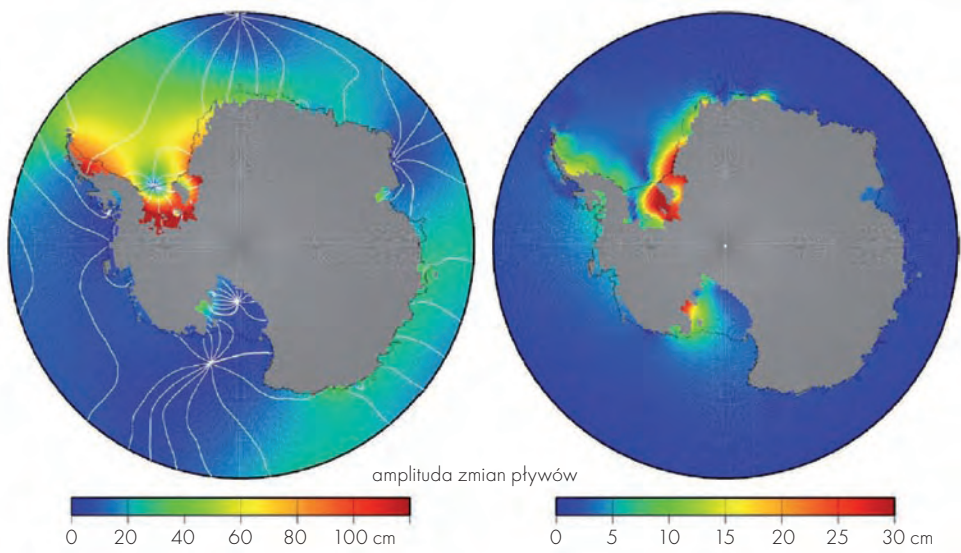
Rys. 5. Zmiany poziomu Oceanu Atlantyckiego [Esselborn S. i in., 2007]



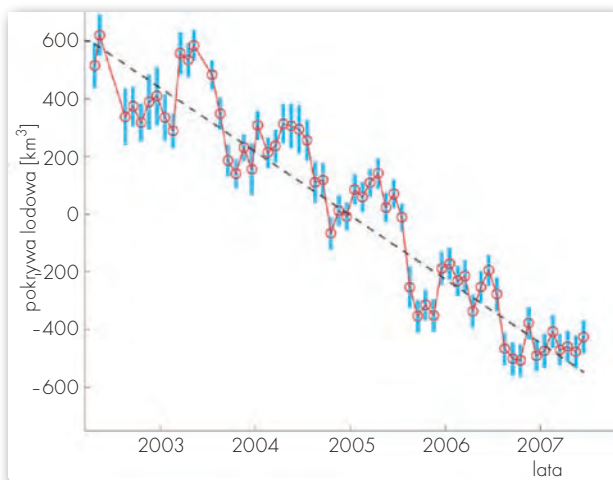
Rys. 6. Średni poziom Oceanu Atlantyckiego na podstawie pomiarów GRACE [Esselborn S. i in., 2007]

Jak wiadomo, masy wodne zmieniają się na skutek parowania oraz przemieszczania się podczas zamarzania. Na podstawie danych GRACE zbieranych w okresie 52-miesięcznym stworzono model wahań wody oceanu (rys. 5). Na rys. 6 przedstawiono średni poziom oceanu od 2003 roku do 2008. Można z niego odczytać, że największe skoki poziomu nastąpiły w okresie paromiesięcznym – koniec 2004 roku i początek 2005 roku.

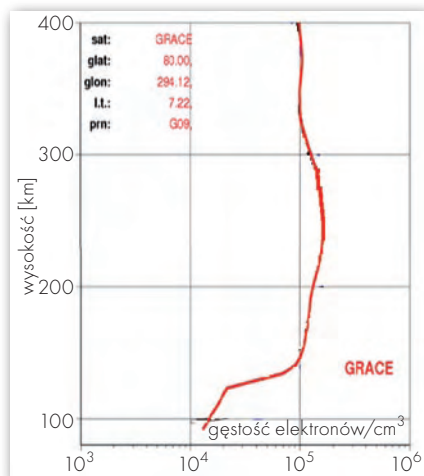
Dane pozyskane z misji GRACE pozwoliły także stwierdzić, iż znacznie większe wahania poziomu Atlantyku są w rejonie subpolarnym (różnice sięgają blisko 2 cm w ciągu roku), natomiast zmiany w rejonie subtropikalnym wynoszą jedynie 0,5 cm. Wynikiem doświadczenia, w któ-



Rys. 7. Pływy na Morzu Arktycznym mierzone metodami klasycznymi (z lewej) i mierzone satelitarne [Ray R. i in., 2007]



Rys. 8. Zmiany pokrywy lodowej na obszarze Grenlandii [Velicogna I., Vahr J., 2007]



Rys. 9. Profil gęstości elektronów w jonosferze [Jakowski N. i in., 2007]

rym mierzono poziom wody Oceanu Atlantyckiego, jest także porównanie modeli wykonanych na podstawie różnych danych (oprócz GRACE także altimetria i in-situ). Wykazano, że dane z GRACE znacznie przewyższają dokładnością pozostałe wykorzystane metody.

Innym ciekawym doświadczeniem związanym z GRACE było opracowanie mapy pływów z wykorzystaniem danych GFZ, CNES, GSFC (Goddard Space Flight Center) [Ray R. i in., 2007]. Pływy zostały przebadane w basenie Morza

Arktycznego. Gdy porównamy je z poprzednimi obliczeniami, zdecydowanie mniej dokładnymi, widać ogromną różnicę w przemieszczaniu się masy wody (rys. 7).

Bardzo ciekawym zagadnieniem jest także pomiar przez satelity GRACE ziemskiej pokrywy lodowej [Howarth M. i in., 2007]. Wszelkie dotychczasowe badania nie dawały satysfakcjonujących rezultatów, gdyż masy lodowe odznaczają się dużą zmiennością, a ponadto są trudne do pomierzenia. I tu z pomocą przychodzi satelity GRACE. Przykładem takiego badania jest pomiar pokrywy lodowej Grenlandii prowadzony od kwietnia 2002 roku do grudnia 2006 roku (rys. 8). W jego wyniku

zauważono pomniejszenie warstwy lodu o $238 \text{ km}^3 \pm 36 \text{ km}^3$ rocznie. Dużo większe wahania są w południowej części Grenlandii (około trzykrotnie).

Zastosowaniem zupełnie odmiennym jest wyznaczenie TEC (Total Electron Content – gęstości elektronów na cm^3). Pomiar przeprowadzone 31 lipca 2007 roku przedstawiono na rys. 9. Można z niego odczytać TEC w zależności od wysokości nad Ziemią (w kilometrach). Pomiar wykonywane są do wysokości orbit satelitów GRACE (ponad 400 km). Wynika z nich, że najmniejsza zawartość elektronów jest najbliższej Ziemi, następnie ich gęstość rośnie, osiągając maksimum na wysokości około 250 kilometrów nad Ziemią, po czym delikatnie spada. Pomiar przeprowadzone w ramach misji GRACE pozwoliły na globalne wyznaczenie TEC.

MONIKA SIENKIEWICZ

(Katedra Geodezji Szczegółowej, UWM Olsztyn)

Autorka dziękuje dr hab. Jolancie Nastuli z CBK PAN za udostępnienie materiałów

Literatura:

- 1. Esselborn S., Homberg A., Schone T., Schmidt R., Basin Scale Mass Variation in the Atlantic Ocean from Altimeter, in situ and GRACE data, GRACE Science Team Meeting, SPP 1257 Symposium, 15-17 September 2007;
- 2. Ray R., Egbert G., Erofeeva L., Han S., Luthcke S., Tides and GRACE;
- 3. Howarth M., Dietrich R., Huybrechts P., Linow S., Antarctic ice mass change estimates from GRACE: results, uncertainties, and the combination with complementary information;
- 4. Velicogna I., Vahr J., Recent results from GRACE in Greenland and Antarctica;
- 5. Jakowski N., Mayer C., Wicker J., Heise S., Kohler W., Retrieval of electron density profiles from GRACE occultation data.