

dr Katarzyna Kraszewska*
inż. Michał Kozakiewicz*

Ewolucja modeli pola grawitacyjnego uzyskanych na podstawie misji satelitarnych

The evolution of the gravity field models derived from satellite missions

Rozwój technik satelitarnych stał się przyczynkiem do dokładniejszego wyznaczenia pola grawitacyjnego, co z kolei przekłada się na dokładność pomiarów geodezyjnych wykorzystujących satelitarne techniki pomiarowe.

Pierwsze obiecujące dane, na podstawie których udało się skonstruować pierwotny model o nazwie Eigen-GRACE01S, obrazujący ziemskie pole grawitacyjne, otrzymano po 39 dniach trwania misji GRACE. Były one ok. 5 razy dokładniejsze od modelu zaofiarowanego przez wcześniejszą misję CHAMP. Powstanie drugiego modelu EIGEN-CHAMP02S było możliwe dzięki technologii umożliwiającej zwiększenie ładowności sond wystrzelanych w przestrzeń kosmiczną. Trzeci model, EIGEN-GRACE01S, w którym wykorzystano doświadczenia misji CHAMP, bazował na modelach wcześniejszych. Dokładność, z jaką określono kształt geoidy ziemskiej, wynosiła 2 – 6 cm, w zależności od rozdzielczości oraz rozpiętości stopniowej uzyskanego opracowania.

Kolejny model EIGEN-GRACE02S powstał po upływie 110 dni przebywania bliźniaczych satelitów na orbicie przy wykorzystaniu ciągłych pomiarów odległości pomiędzy dwoma sondami, co pozwoliło na skonstruowanie niezależnego opracowania od danych uzyskanych na lądzie lub oceanie. Odwzorowanie geoidy zostało utworzone z precyzją wyższą niż 1 mm przy rozdzielczości wynoszącej 1000 km. Oznacza to osiągnięcie dokładności o jeden rząd wyższej niż w globalnych modelach wytworzonych podczas trwania misji CHAMP.

Model GGM03S został opublikowany po czteroletnim okresie trwania misji (styczeń 2003 – grudzień 2006). Jest on ulepszonym opracowaniem modelu RL04 o rozpiętości do 180°. Jego następcą został model GGM03C wzbogacony 360-stopniowym zakresem opracowania oraz informacjami dotyczącymi równania kombinowanego powierzchni grawitacyjnej i altimetrii powierzchni morza.

Dane uzyskane z GGM03 umożliwiają szeroki wachlarz przetwarzania danych dzięki:

- możliwości łączenia niejednorodnych typów danych przez przypisywanie im odpowiednich wag;
- umożliwieniu płynnego przejścia pomiędzy danymi pochodzącymi z pomiarów satelitarnych a danymi pochodzącymi z powierzchni Ziemi;
- umożliwieniu swobodnego mieszania różnych typów danych, np. dotyczących odchyłań pionowych, powierzchni lądów i oceanów lub wykorzystywania danych ważonych punkt po punkcie;
- gotowości do tworzenia kombinacji danych z różnego pochodzenia misji satelitarnych, np. GRACE/GOCE/CHAMP.

* Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji, Katedra Geodezji

Badania zmiany lokalnej siły ciężkości

W celu ukazania zmian lokalnej siły ciężkości zachodzących na wybranym obszarze wykorzystano cztery modele otrzymane w wyniku trwania misji satelitarnej CHAMP. Obszarem wybranym jest rejon Morza Śródziemnego wraz z terytorium Azji Mniejszej oraz Europy Południowej. Modele te przedstawiają zmienność w czasie ziemskiego pola grawitacyjnego oraz poprawę dokładności kolejnych modeli uzyskaną dzięki misjom satelitarnym.

Model Eigen-1s jest wynikiem 88 dni trwania misji Champ (od 30 lipca do 10 sierpnia oraz od 24 września do 31 grudnia 2000 r.) i powstał z wykorzystaniem:

- modelu GRIM5-1s zawierającego system odniesień normalnych;
- modeli stworzonych na podstawie pomiarów laserowych do satelitów LAGEOS 1,2 i Starlette;
- danych pochodzących z Systemu Śledzenia GPS CHAMP oraz informacji pochodzących z pomiaru akcelerometrycznego.

Eigen-Champ03S jest ostateczną wersją modelu Eigen-Champ03Sp otrzymanego w wyniku jednoznaczego przekształcenia wszystkich równań normalnych z wzięciem pod uwagę parametrów związanych z dokładniejszą kalibracją akcelerometru. Model Eigen-Champ05S został skonstruowany na zlecenie GFZ na podstawie sześcioletnich obserwacji CHAMP GPS-SST oraz danych pochodzących z akcelerometru otrzymanych w okresie od października 2002 r. do września 2008 r. Proces obróbki danych był zgodny z standardami realizowanymi przez misję GRACE. Epokę odniesienia modelu pola grawitacyjnego datuje się na 1 października 2005 r.

Podsumowanie

Uzyskanie najbardziej prawdopodobnego obrazu zmian rozkładu pola grawitacyjnego w czasie wymagało powiązania danych pomiarowych otrzymanych w wyniku misji satelitarnych z badaniami przeprowadzonymi przez wszelkie stacje badawcze zajmujące się pomiarami grawimetrycznymi na lądach i oceanach. W tabeli podano przykładowo wybrane modele pola grawitacyjnego Ziemi, które ewoluowały w czasie, dostarczając wiedzę na temat sił grawitacyjnych działających na naszej planecie.

Na większości obszarów wartość pola grawitacyjnego pokrywa się z topografią terenu. Z modelu możemy wyczytać, że przy wysokich dodatnich odchyleniach od normy występują równie wysokie odchyłki o nominalne ujemnym, obrazowane na mapach z wykorzystaniem barwy niebieskiej i jej pochodnych. W skład takich rejonów wchodzi m.in. podłużny pas rozpościerający się wzdłuż niziny Gangesu oraz nizina Brahmaputry, Rów Sundajski i okolice Rowu Filipińskiego.

Wybrane modele pola grawitacyjnego – podstawowe parametry

Nazwa modelu	Rok utworzenia	Zakres opracowania w stopniach	Pochodzenie danych	Nazwa opracowania/autor
SE1	1966	8	S	Geodetic parameters for a 1966 Smithsonian Institution Standard Earth/ /Lundquist i Veis
GEML2	1983	20	S	A Refined Gravity Model from Lageos/Lerch i Klosko
GEMT2S	1989	50	S	The GEMT2 Gravitational Model/ /Lerch, Putney, Sanchez, Klosko
TEG3	1996	70	S, G, A	The TEG3 Earth Geopotential Model/ Tapley, Shum, Ries, Poole
TEG4	2000	180	S, G, A	The TEG-4 Earth Gravity Field Model/ Tapley, Chambers, Cheng
EIGEN-1S	2002	119	S (CHAMP)	A high quality global gravity field model from CHAMP GPS tracking data and Accelerometry/Reigber, Balmino, Schwintzer, Biancale, Bode
GGM01S	2003	120	S (GRACE)	Large scale circulation from the GRACE GGM01 Geoid/ Tapley, Chambers, Bettadpur, Ries
AIUB-CHAMP01S	2007	90	S (CHAMP)	Gravity Field Determination at the AIUB – the Celestial Mechanics Approach/ /Prange, Jäggi, Beutler, Mervart, Dach
GGM03S	2008	180	S (GRACE)	The GGM03 Mean Earth Gravity Model from GRACE/ Tapley, Ries, Bettadpur, Chambers
GOCO01S	2010	224	S (GOCE)	GOCE gravity field model derived from orbit and gradiometry data applying the time-wise method/Pail

Objaśnienia symboli: S – śledzenie danych satelitarnych ang. *Satellite Tracking Data*; A – dane altimetryczne ang. *Altimetry Data*; G – dane grawimetryczne ang. *Gravity Data*

Na obszarze basenu Morza Śródziemnego wraz z otaczającymi go lądami, tj. terenami Europy Południowej (Półwysep Iberyjski, Półwysep Bałkański), Azji Mniejszej oraz Afryki Północnej rozkład pola grawitacyjnego jest stały. Można z łatwością wysnuć hipotezę, iż sposób rozmieszczenia pola grawitacyjnego na danym obszarze jest bezpośrednio związany z ukształtowaniem powierzchni Ziemi. Największe anomalie grawitacyjne zazwyczaj powiązane są z odchyleniem rzeźby terenu od przyjętej średniej wysokości. Przyczyną tego zjawiska jest występowanie rejonów o większej gęstości powierzchniowej od pozostałego otoczenia, czego przykładem może być obecność rud metali oraz skał, co skutkuje dodatnim wpływem na siłę ciężkości i wywołuje dodatnie anomalie. Anomalie ujemne są natomiast powodowane występowaniem rejonów o mniejszej gęstości powierzchniowej od przyjętej średniej. Są to najczęściej skały, w których występują puste przestrzenie zwane kawernami oraz innego rodzaju materiały o mniejszej gęstości. Do obszarów występowania wysokiego dodatniego odchylenia pola grawitacyjnego o wartości od 50 do 140 miligali zaliczamy tereny wyżynne i góryste, w skład których wchodzi: południowa część Półwyspu Apenińskiego; środkowy klin Półwyspu Bałkańskiego wraz ze Starą Planiną oraz górami Rodopy, Morze Egejskie (szczególnie duże nasilenie anomalii), Wyżyna Anatolijska, Wyżyna Armeńska aż do gór Kaukaz. Powierzchnią wykazującą znaczne ujemne odchylenie od przyjętej średniej jest wyspa Kreta wraz z obszarem Morza Libijskiego.

Wnioski te wynikały z modeli Eigen, które powstały głównie podczas trwania misji CHAMP w latach 2000 – 2008. Zobrazowania te począwszy od modelu Eigen-1s przeszły metamorfozy przez zwiększenie zasięgu obserwacji oraz dokładności przeprowadzenia pomiaru. W każdym kolejnym modelu obszary, na których występu-

ją anomalie grawitacyjne, są coraz dokładniej przedstawiane na mapach. Obszary znajdujące się na pierwszym modelu wydają się jednakowe pod względem natężenia występowania anomalii (zakres pomiaru natężenia od -100 mg do $+80$ mg), natomiast na kolejnych, dzięki zastosowaniu szerszego zakresu (-170 mg do $+136$ mg) obserwacji, stają się one wyraźnie od siebie odseparowane. Przykładem może być obszar o ujemnej wartości pola grawitacyjnego leżący na Morzu Śródziemnym u wybrzeży półwyspu Peloponez, który na pierwszym modelu Eigen-1s jest niemal niedostrzegalny, zaś po 8 latach trwania misji (na modelu Eigen-CHAMP05S) wyraźnie odrysowuje się u wybrzeża półwyspu. Również obszar występowania anomalii o wysokim natężeniu pola grawitacyjnego na pierwszym zobrazowaniu obejmuje praktycznie cały obszar, zaczynając od Morza Egejskiego biegnąc wzdłuż Wyżyny Anatolijskiej aż po góry Kaukaz, zaś na modelu z 2008 r. jest wyraźnie zróżnicowany pod względem występowania anomalii z obszarem kumulacyjnym natężenia pola grawitacyjnego w rejonie Morza Egejskiego. Wraz z ewolucją poszczególnych modeli zwiększał się zasięg kątowy, począwszy od 119° w zobrazowaniu Eigen-1S aż po 150° dla Eigen-CHAMP05S. W przypadku, gdy nasze rozważania rozszerzymy o model powstały w wyniku połączenia zobrazowań otrzymanych pomiędzy rokiem 1966 a 2012, dostrzeżemy, że rozkład pola grawitacyjnego Ziemi jest bezpośrednio związany z płytami tektonicznymi tworzącymi naszą planetę. Na większości obszarów wartość pola grawitacyjnego pokrywa się z topografią terenu. Najwyższe odchylenia wartości pola od średniej są oznaczone kolorem czerwonym oraz fioletowym. Do terenów o najwyższych odchyleniach wartości pola od średniej należą m.in. Góry Himalajskie wraz z Wyżyną Tybetańską, Wyżyna Anatolijska (Turcja) oraz góry Zagros. Z modelu możemy wyczytać, że przy wysokich dodatknych odchyleniach od normy występują równie wysokie odchyłki o nominale ujemnym. W skład takich rejonów wchodzi m.in. podłużny pas rozpościerający się wzdłuż niziny Gangesu oraz nizina Brahmaputry, Rów Sundajski i okolice Rowu Filipińskiego.

Misje satelitarne i zastosowane techniki pomiarowe zrewolucjonizowały dziedzinę naukową, jaką jest grawimetria. Pozwoliły na opracowanie modeli opisujących kształt kuli ziemskiej oraz umożliwiły precyzyjny pomiar zmian lokalnych i globalnych rozkładów pola grawitacyjnego naszej planety. Globalny zasięg opracowań znacznie zmniejszył koszty badań grawimetrycznych, jakie były ponoszone tradycyjnymi metodami.

Streszczenie

W artykule zaprezentowano wyznaczenie modeli pola grawitacyjnego z wykorzystaniem misji satelitarnych: GOCE, GRACE i CHAMP i pokazano, jak pomiary satelitarne wpłynęły na dokładność wyznaczenia kolejnych modeli w skali całego globu oraz obszaru południowej Europy.

Słowa kluczowe: modele pola grawitacyjnego, misje satelitarne, grawimetria satelitarna.

Abstract

This article shall determine the subject matter of the gravity field models using satellite missions: GOCE, GRACE and CHAMP. As shown in the satellite measurements affect the precision of the following models for the entire world and for the area of southern Europe.

Literatura

[1] Barlik M., Pachuta A.: Geodezja fizyczna i grawimetria geodezyjna – Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

[2] Tapley B., Ries J., Bettadpur S., Chambers D., Cheng M., Condi F., Pole S.: Pdf – The GGM03 Mean Earth Gravity Model from GRACE, Journal of Geodesy, 2005, DOI 10.1007, s00190-005-0480-z.