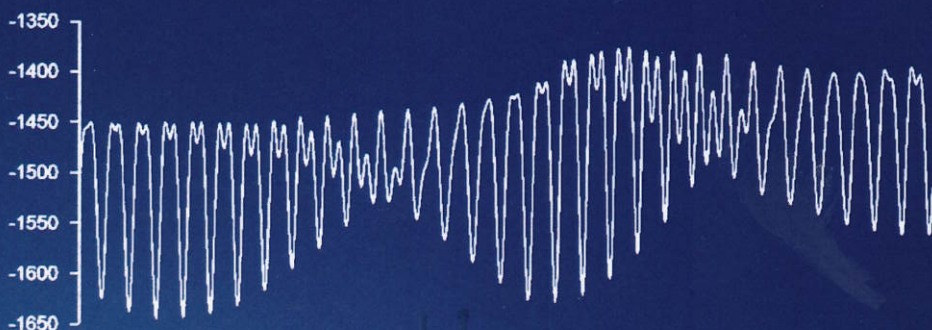


# Udział Obserwatorium Astronomiczno-Geodezyjnego Politechniki Warszawskiej w Józefostawiu

w europejskich i globalnych programach badawczych:  
ciągła służba pomiarowa

Praca zbiorowa  
pod redakcją  
Michała Kruczyka



# Udział Obserwatorium Astronomiczno-Geodezyjnego Politechniki Warszawskiej ..... w Józefosławiu

Michał Kruczyk

Tomasz Liwosz

Jerzy Rogowski

Marcin Rajner

Ryszard Szpunar

Dominik Próchniewicz

Aleksander Brzeziński

**w europejskich i globalnych  
programach badawczych:  
ciągła służba pomiarowa**

Praca zbiorowa

pod redakcją

Michała Kruczyka



Opiniodawcy  
*Marcin Barlik*  
*Marek Kaczorowski*

Projekt okładki  
*Danuta Czudek-Puchalska*

Skład komputerowy  
*Beata Zalewska-Kraśniewska*  
*Andrzej Kowalczyk*

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2016

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych, mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych, w tym nie może być umieszczany ani rozpowszechniany w Internecie bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich

ISBN 978-83-7814-604-1

Księgarnia internetowa Oficyny Wydawniczej PW [www.wydawnictwopw.pl](http://www.wydawnictwopw.pl)  
tel. 22 234-75-03; fax 22 234-70-60; e-mail: [oficyna@pw.edu.pl](mailto:oficyna@pw.edu.pl)

Oficyna Wydawnicza PW, ul. Polna 50, 00-644 Warszawa. Wydanie I. Zam. nr 496/2015  
Druk i oprawa: Drukarnia Oficyny Wydawniczej Politechniki Warszawskiej, tel. 22 234-55-93

# Spis treści

1. WPROWADZENIE ( <i>Michał Kruczyk, Aleksander Brzeziński</i> ) .....	7
2. HISTORIA OBSERWATORIUM ASTRONOMICZNO-GEODEZYJNEGO W JÓZEFOSŁAWIU ( <i>Jerzy Rogowski</i> ) .....	12
2.1. Wstęp .....	12
2.2. Obserwacje prowadzone metodami optycznymi .....	13
2.2.1. Udział Obserwatorium w Międzynarodowej Operacji Długości i Służbie Czasu .....	13
2.2.2. Badanie zmian położenia bieguna za pomocą pomiarów astrometrycznych .....	14
2.2.3. Obserwacje fotograficzne sztucznych satelitów Ziemi .....	14
2.2.4. Metoda wyznaczania zmian kierunku pionu z kombinacji obserwacji grawimetrycznych i astrometrycznych .....	15
2.3. Obserwacje prowadzone metodami satelitarnymi i geofizycznymi .....	17
2.3.1. System obserwacji, przetwarzania i analizy danych obserwacyjnych na początku XXI wieku .....	19
2.4. Podsumowanie .....	22
Załącznik 1. Wykaz osób biorących udział w pracach Obserwatorium Astronomiczno-Geodezyjnego Politechniki Warszawskiej w Józefosławiu od 1959 do 2010 w porządku alfabetycznym .....	24
3. PERMANENTNE POMIARY SATELITARNE W RAMACH IGS I EUREF I ICH WYNIKI ( <i>Michał Kruczyk, Tomasz Liwosz</i> ) .....	25
3.1. Wstęp .....	25
3.2. Wyposażenie .....	25
3.3. Służba permanentna IGS i EPN .....	30
3.4. Szeregi współrzędnych punktów w Józefosławiu .....	40
3.5. Inne projekty i perspektywy rozwoju .....	46
4. PRACE CENTRUM ANALIZ EUREF PRZY POLITECHNICE WARSZAWSKIEJ ( <i>Tomasz Liwosz</i> ) .....	48
4.1. Opracowanie obserwacji GNSS w centrum WUT EPN .....	49
4.2. Analiza rozwiązań opóźnienia troposferycznego (ZTD) .....	52

4.3. Infrastruktura sprzętowa .....	54
4.4. Projekt EPN Reprocessing .....	55
4.5. Testowanie nowych strategii obliczeniowych .....	56
4.6. Opracowanie układu odniesienia dla polskiej osnowy podstawowej .....	58
4.7. Centrum kombinacji rozwiązań EPN .....	61
4.8. Witryna internetowa WUT EPN AC .....	65
5. POMIARY METEOROLOGICZNE I METEOROLOGIA GNSS ( <i>Michał Kruczyk</i> ) .....	66
5.1. Wstęp .....	66
5.2. Pomiar meteorologiczne w Józefosławiu .....	67
5.3. Analiza rozwiązań opóźnienia troposferycznego (ZTD) .....	75
5.4. Badania Scałkowanej zawartości pary wodnej (IPW) .....	78
5.5. Kolumnowa zawartość pary wodnej (IPW) w klimatologii .....	83
6. PŁYWOWE POMIARY GRAWIMETRYCZNE I ICH WYKORZYSTANIE W BADA- NIACH GEODYNAMICZNYCH ( <i>Marcin Rajner</i> ) .....	91
6.1. Grawimetr pływowy .....	91
6.2. Kalibracja .....	92
6.3. Wyznaczanie pływów ziemskich .....	93
6.4. Badanie pośredniego efektu pływów oceanicznych .....	94
6.5. Wyznaczanie okresu swobodnej nutacji jądra ziemskiego .....	95
6.6. Badanie swobodnych oscylacji Ziemi .....	96
6.7. Badanie wpływu atmosfery na zmiany przyspieszenia siły ciężkości .....	97
6.8. Podsumowanie .....	98
7. UDOSKONALANIE ALGORYTMÓW POZYCJONOWANIA GNSS ( <i>Dominik Próchniewicz, Ryszard Szpunar</i> ) .....	99
7.1. Stochastyczny model pozycjonowania GNSS Network RTK .....	99
7.2. Testowanie przetwarzania sygnału GNSS w odbiorniku .....	106

# Pływowe pomiary grawimetryczne i ich wykorzystanie w badaniach geodynamicznych

# 6

**Marcin Rajner**

Katedra Geodezji i Astronomii Geodezyjnej  
Wydział Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej

W ramach działalności Obserwatorium Astronomiczno-Geodezyjnego w Józefosławiu prowadzone są ciągle stacjonarne pomiary przyspieszenia siły ciężkości przy użyciu grawimetru sprężynowego. Poniżej przedstawione są informacje dotyczące metodyki pomiarowej oraz przegląd możliwych zastosowań tych obserwacji w geodezji, geofizyce i badaniach geodynamicznych.

## 6.1. Grawimetr pływowy

Na wyposażeniu Obserwatorium w Józefosławiu jest grawimetr sprężynowy LaCoste-Romberg model ET (numer seryjny 26, dalej oznaczany jako LCR, rys. 6.1). Jest to specjalny model przeznaczony do obserwacji pływów skorupy ziemskiej (skrót ET z j. ang. *Earth Tides*). Pomiarowi w trybie ciągłym podlegają zmiany przyspieszenia siły ciężkości. Ważne jest podkreślenie faktu, że instrument nie różnicuje źródeł zmian przyspieszenia siły ciężkości, a więc rejestruje wypadkową wartość wpływu wszystkich zjawisk geodynamicznych i geofizycznych tak grawitacyjnych jak i inercyjnych. Istotnym krokiem jest wstępne opracowanie obserwacji, usunięcie nieciągłości, szumów i gwałtownych zjawisk, takich jak trzęsienia Ziemi. Więcej informacji o samym instrumencie, pomiarach grawimetrycznych i pomiarach pomocniczych, a także o opracowaniu danych znajduje się w pracy (Rajner 2009, 2010a)<sup>2</sup>.

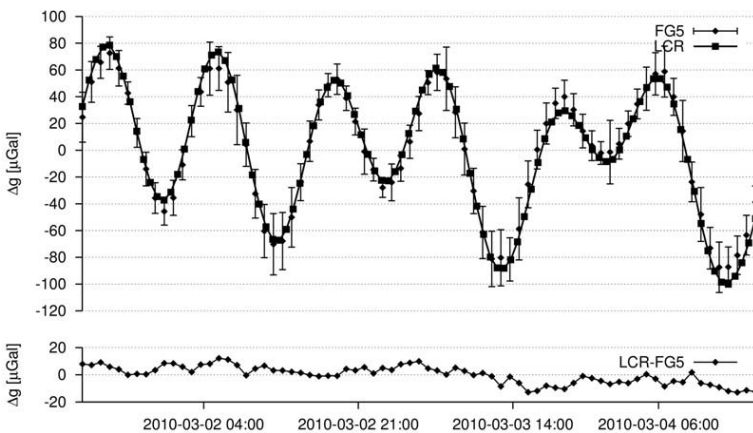
<sup>2</sup> Wszystkie cytowane prace są dostępne na życzenie u autora mrajner@gik.pw.edu.pl



Rys. 6.1. Grawimetr sprężynowy LCR ET26

## 6.2. Kalibracja

Warto podkreślić, że dzięki wyposażeniu laboratorium w Józefosławiu także w grawimetr absolutny, grawimetr pływowy poza kalibracją poprzez pływ teoretyczny, był również kalibrowany bezpośrednio poprzez grawimetr balistyczny FG5 (Rajner i Olszak 2010). Prowadzenie ciągłych obserwacji względnych pozwoliło na wyznaczenie fizycznej efemerydy pływowej zastosowanej do redukcji sygnału pływowego z obserwacji absolutnych. Przykład tych synchronicznych obserwacji znajduje się na rysunku 6.2.

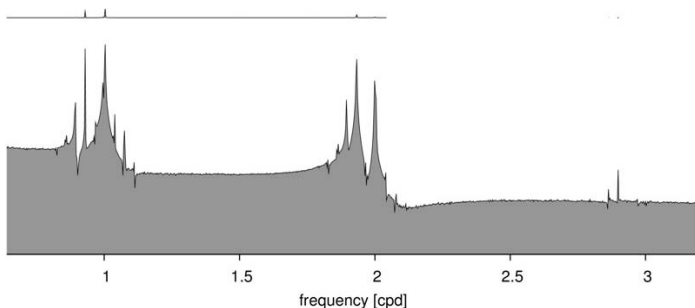


Rys. 6.2. Synchroniczne pomiary grawimetrami FG5 i LCR ET (Rajner i Olszak 2010)

### 6.3. Wyznaczanie pływów ziemskich

Głównym przeznaczeniem grawimetru jest ciągle wyznaczanie zmian siły ciężkości zwłaszcza ze względu na występowanie pływów ziemskich – a więc rejestrowanie pływów grawimetrycznych. Są to różne efekty wywoływane przez różnicowe (zmiennie w czasie i przestrzeni) oddziaływanie grawitacyjne ciał niebieskich. Uwzględniając charakter tych zjawisk sumaryczny efekt pływowy można przedstawić jako złożenie wielu prostych wyrazów harmonicznym, których argumenty zależą tylko od kilku podstawowych częstotliwości. Są to fale pływowe. Fale te grupują się w pasma w okolicach małych częstotliwości (okresy dwutygodniowe, miesięczne, roczne i wyrazy stałe) a także w paśmie okołodobowym, półdobowym i kolejnych wielokrotności cykli na dobę.

Wyraźnie jest to widoczne na widmie danych grawimetrycznych na rysunku 6.3. Pokazuje on, że mimo że sygnał pływowy jest złożeniem wielu dziesiątek tysięcy fal pływowych to istotnych amplitudowo fal jest kilkadziesiąt (pozostałe są niemierzalne). Na tym rysunku zastosowana jest skala logarytmiczna, aby uwypuklić piki głównych fal. Maksymalne amplitudy głównych fal pływowych to ok. 30–40 mikroGali. Górny wykres z zaledwie trzema pikami to wykres w skali liniowej, wskazujący jak rzeczywiście tylko kilka wybranych fal dominuje cały efekt pływowy.

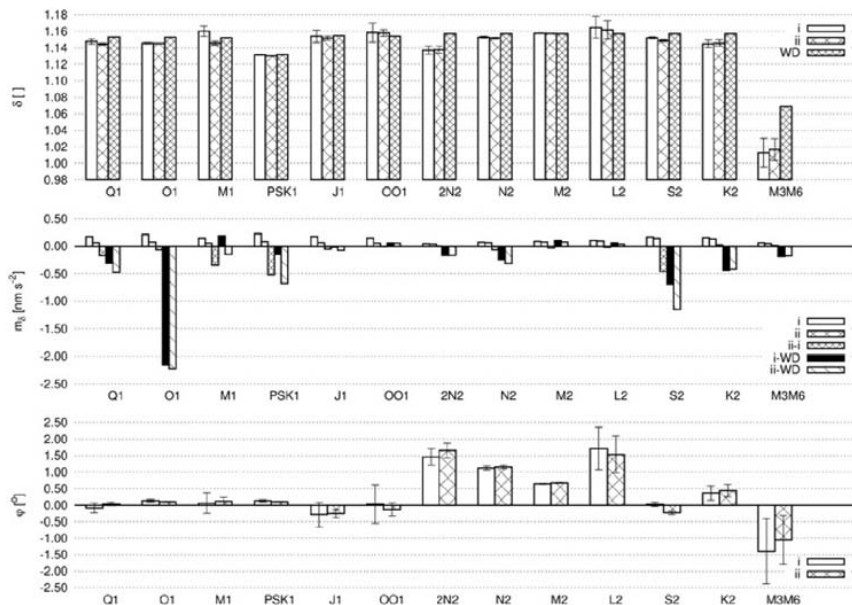


Rys. 6.3. Przykład analizy spektralnej dla danych grawimetrycznych (Rajner 2009)

W rzeczywistości analiza harmoniczna Fouriera ma mniejsze znaczenie w badaniach pływowych, gdzie częstotliwości fal pływowych (wynikające ze zjawisk astronomicznych) są bardzo dobrze znane. W tym przypadku posługujemy się Metodą Najmniejszych Kwadratów, w której możliwe jest także wyznaczenie amplitud oraz przesunięć fazowych fal pływowych.



W ten sposób głównym wynikiem jest określenie współczynników grawimetrycznych (kombinacji liczb Love'a opisujących elastyczność Ziemi) oraz opóźnień fazowych grup głównych fal pływowych.

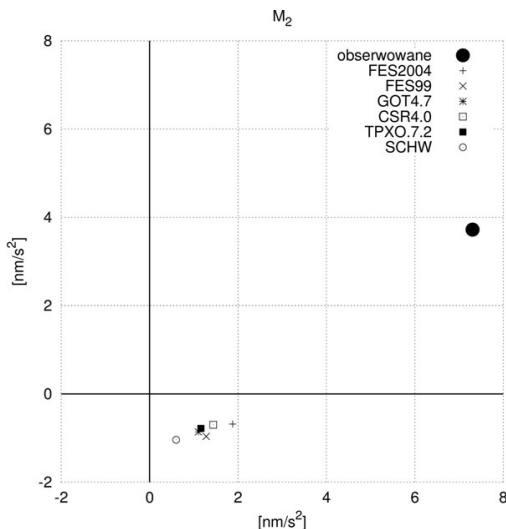


Rys. 6.4. Wyznaczone współczynniki geodezyjne grawimetryczne oraz opóźnienia fazowe grup fal pływowych (w dwóch wariantach – ii oznacza uwzględnienie zmian ciśnienia atmosferycznego) w stosunku do modelu Wahr-Dehant (WD) (Rajner 2010a).

## 6.4. Badanie pośredniego efektu pływów oceanicznych

Pomimo znacznej odległości od oceanów również w Józefosławiu obserwujemy efekty pośrednie (drugorzędowe, wtórne efekty pływowe) związane z deformacjami skorupy ziemskiej i efektami Newtonowskimi od masy wód pływowych i obciążeniowych deformacji skorupy. Deformacje skorupy powstają na skutek zmiennego obciążenia dna wynikającego z pływów oceanicznych. Ten efekt był szczegółowo badany, a wyniki można znaleźć w pracy (Rajner 2010b). Przykład znaczenia pośredniego efektu oceanicznego przedstawiono na rysunku 6.5 dla fal

plywowej  $M_2$ , gdzie po korekcji oceanicznej amplitudy są znacznie bliższe wartościom wynikającym z modeli geofizycznych (dla wszystkich współczesnych modeli pływów oceanicznych).

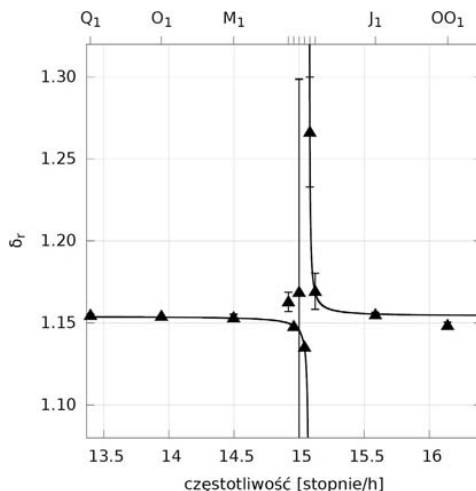


Rys. 6.5. Rozbieżności pomiędzy obserwowanymi, a modelowymi wartościami amplitud fali pływowej  $M_2$  bez korekcji OTL i po jej zastosowaniu (akronimy oznaczają różne modele oceaniczne) (Rajner 2010b)

## 6.5. Wyznaczanie okresu swobodnej nutacji jądra ziemskiego

Nadzwyczaj interesującą możliwością wynikającą z precyzyjnego wyznaczenia wartości grawimetrycznych współczynników geodezyjnych jest możliwość określenia okresu i dobroci zjawiska swobodnej nutacji jądra Ziemskiego (FCN). Obecność płynnego jądra powoduje rezonans, a tym samym subtelne odstępstwo współczynników grawimetrycznych od wartości modelowych dla fal okołodobowych. Należy tutaj zaznaczyć, że grawimetria i klinometria obok techniki VLBI jest jedynymi metodami, pozwalającymi badać to zjawisko. Ze względu na okresy kilkudziesięciominutowe metody geodezyjne (grawimetryczne i klinometryczne) mają przewagę nad sejsmicznymi w badaniach głębokich warstw Ziemi. Na

rysunku 6.6 przedstawiony jest przykład tego efektu wraz z wpasowanym efektem FCN.

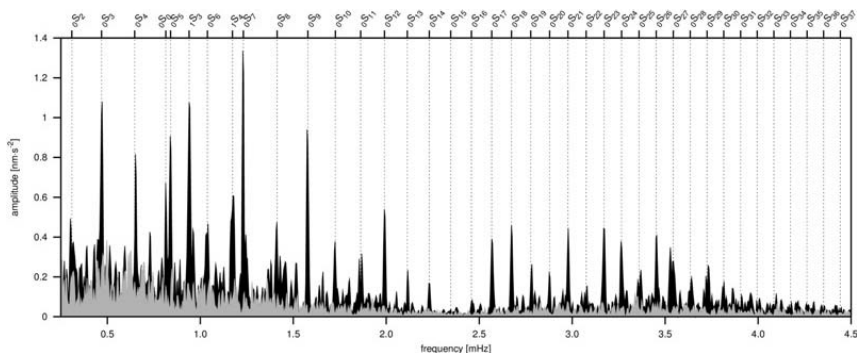


Rys. 6.6. Wyznaczenie okresu swobodnej nutacji jądra ziemskiego (FCN) na podstawie współczynników grawimetrycznych

Te prace były prezentowane podczas Zgromadzenia Generalnego Europejskiej Unii Nauk o Ziemi (Rajner i Brzeziński 2012).

## 6.6. Badanie swobodnych oscylacji Ziemi

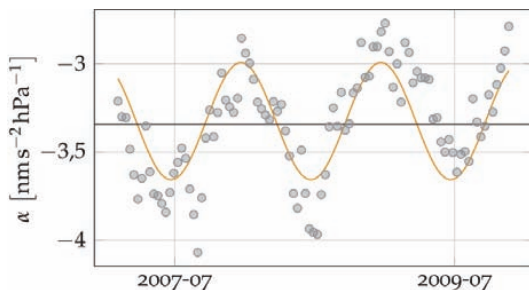
Innym przedmiotem badań grawimetrycznych, które również mogą konkurować z metodami geofizycznymi, głównie sejsmografami szerokopasmowymi, są swobodne oscylacje Ziemi. Na skutek trzęsień Ziemi pojawiają się drgania Ziemi o pewnych określonych i zależnych od budowy Ziemi częstotliwościach. Są one doskonale widoczne w pomiarach sejsmicznych, ale w przypadku tych długo-okresowych, fundamentalnych przewagę mają grawimetry nadprzewodnikowe. Okazuje się, że istotne i wyraźne są również te drgania w obserwacjach pływowych grawimetrem sprężynowym w przypadku silnych trzęsień Ziemi. Na rysunku 6.7 przedstawiono przykład identyfikacji sferoidalnych modów własnych Ziemi po silnym trzęsieniu Ziemi w Chile w 2010 roku.



Rys. 6.7. Spektrum amplitudowe policzone po silnym trzęsieniu Ziemi w Chile (2010), zidentyfikowane mody zostały odpowiednio oznaczone (Rajner & Rogowski 2011)

## 6.7. Badanie wpływu atmosfery na zmiany przyspieszenia siły ciężkości

Istotnym zagadnieniem badawczym, w którym były wykorzystywane obserwacje z grawimetrów w Józefosławiu, było określenie wpływu atmosfery na pomiary siły ciężkości. Prace te uwzględniały złożony charakter fizyczny tego zjawiska i uwzględniały efekty grawitacyjne i te związane z pośrednim oddziaływaniem wynikającym z deformacji skorupy Ziemskiej. Te rozważania zostały zawarte w rozprawie doktorskiej (Rajner 2014). W pracy tej wskazano, że w przypadku dokładniejszych grawimetrów balistycznych i grawimetrów nadprzewodnikowych niezbędne jest uwzględnianie rzeczywistego rozkładu mas atmosferycznych.



Rys. 6.8. Sezonowe zmiany współczynnika wpływu atmosfery na zmiany przyspieszenia siły ciężkości. Wartości obliczone (punktowe) i wpasowany model (linia ciągła) (Barlik i in. 2011)

## 6.8. Podsumowanie

Wprawdzie współcześnie grawimetry sprężynowe straciły nieco na znaczeniu i nie stanowią konkurencji dla grawimetrii nadprzewodnikowej, to wciąż jest to źródło istotnych informacji w kontekście interpretacji geofizycznych i geodynamicznych.

W ramach prac, związanych z grawimetrią pływową, poza wspomnianymi pracami naukowymi cytowanymi w tekście powstało również kilka prac przekrojowych, które dają ogólny przegląd możliwości i wykorzystania stacjonarnych obserwacji grawimetrem sprężynowym (Rajner 2010c, 2013; Rogowski i in. 2010; Barlik i in. 2011).

## Literatura

- Barlik M., M. Rajner, T. Olszak (2011). Analysis of Measurements Collected in Gravity Laboratory in Józefosław Observatory during 2007–2010. pp. 116–120 in V. Peshekhonov ed. *Proceedings: IAG Symposium on Terrestrial Gravimetry*. Sankt Petersburg
- Rajner M. (2009). *Badanie grawimetrycznych pływów ziemskich w obserwatorium Józefosławiu w 2009 roku* (sprawozdanie). Udział Astrogeodezyjnego Obserwatorium w Józefosławiu w Europejskich i Globalnych Programach Badawczych dofinansowanego ze środków na SPUB. Politechnika Warszawska, Katedra Geodezji i Astronomii Geodezyjnej
- Rajner M. (2010a). *Badanie grawimetrycznych pływów ziemskich w obserwatorium Józefosławiu w 2010 roku* (sprawozdanie). Udział Astrogeodezyjnego Obserwatorium w Józefosławiu w Europejskich i Globalnych Programach Badawczych dofinansowanego ze środków na SPUB. Politechnika Warszawska, Katedra Geodezji i Astronomii Geodezyjnej
- Rajner M. (2010b). Ocean tidal loading from the gravity measurements at Józefosław observatory. *Artificial Satellites* 45: pp. 175–183
- Rajner M. (2010c). Investigation in Tidal Gravity Results in Józefosław Observatory. *Reports on Geodesy* 88: pp. 7–14
- Rajner M. (2013). Still valuable measurements taken with spring gravimeter — results from Józefosław observatory. Poster, Warszawa
- Rajner M. (2014). *Wyznaczanie atmosferycznych poprawek grawimetrycznych na podstawie numerycznych modeli pogody* (rozprawa doktorska). Politechnika Warszawska, Wydział Geodezji i Kartografii
- Rajner M., A. Brzeziński. (2012). The estimation of Free Core Nutation period and quality factor from tidal gravity measurements at Józefosław, Poland. Poster, EGU 2012, Wiedeń
- Rajner M., T. Olszak. (2010). Calibration of spring gravimeter using absolute gravity measurements. Results of parallel observations using LCR-ET and FG5 gravimeters during 2007–2010 in Józefosław Observatory. *Reports on Geodesy* 88: pp. 15–20
- Rajner M., J.B. Rogowski. (2011). Earth free oscillation measurements with LCR-ET 26 spring gravimeter. *Reports on Geodesy* 91: pp. 89–95
- Rogowski J.B., M. Barlik, T. Liwosz, M. Kruczyk, L. Kujawa, M. Rajner, T. Olszak, et al. (2010). Activities of Józefosław Astro-Geodetic Observatory in the last five decades. *Reports on Geodesy* 89: pp. 31–52

Oficyna Wydawnicza PW jest wydawnictwem największej polskiej uczelni technicznej – Politechniki Warszawskiej, prowadzącej działalność naukowo-dydaktyczną na 48 kierunkach studiów.



Publikacje wydawnictwa są dostępne w bibliotekach i księgarniach na terenie Politechniki Warszawskiej oraz innych uczelni, a także księgarniach technicznych na terenie całego kraju. Pełna oferta wydawnicza jest prezentowana na stronie internetowej:

**[www.wydawnictwopw.pl](http://www.wydawnictwopw.pl)**

Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej prowadzi sprzedaż:

- stacjonarną – w księgarniach OWPW  
– Gmach Główny Politechniki Warszawskiej  
przy Placu Politechniki 1  
– ul. Noakowskiego 18/20
- internetową – <http://www.wydawnictwopw.pl>
- wysyłkową – tel. 22 234-75-03; fax 22 234-70-60  
e-mail: [oficyna@pw.edu.pl](mailto:oficyna@pw.edu.pl)

ISBN 978-83-7814-604-9

