

## ZAŁĄCZNIK 2

---

### **Badanie grawimetrycznych pływów ziemskich w obserwatorium w Józefosławiu w 2010 roku**

Praca wykonana w ramach SPUB  
*Udział Astrogeodezyjnego Obserwatorium Międzynarodowej Stacji IGS w  
Józefosławiu  
w Europejskich i Globalnych Programach Badawczych  
Warszawa, 22grudnia2010*

Marcin Rajner  
Katedra Geodezji i Astronomii Geodezyjnej  
Wydział Geodezji i Kartografii  
Politechnika Warszawska  
[mrjner@gik.pw.edu.pl](mailto:mrjner@gik.pw.edu.pl)

## SPIS TREŚCI

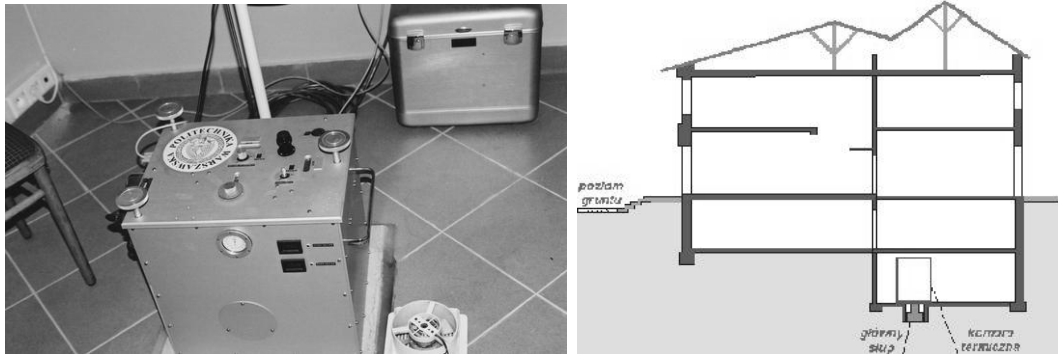
Spis rysunków	3
Spis tabel	3
1. Laboratorium pływowe	4
2. Dane	5
2.1. Obserwacje grawimetryczne	6
2.2. Kalibracja	6
3. Przygotowanie danych	7
4. Analiza obserwacji	8
4.1. Analiza harmoniczna	8
4.2. Analiza Metodą Najmniejszych Kwadratów	10
5. Efekty pośrednie	14
5.1. Oceaniczny	14
5.2. Atmosferyczny	16
6. Wnioski	17
Literatura	18

## SPIS RYSUNKÓW

1	Grawimetr pływowy <i>LCR ET26</i> oraz jego usytuowanie w budynku obserwatorium	4
2	Panel programu <i>Tidaq</i> nadzorującego pracę grawimetru	5
3	Przykład obserwowanych wartości przyspieszenia siły ciężkości oraz ciśnienia atmosferycznego w Józefosławiu	5
4	Scentrowane wartości przyspieszenia siły ciężkości pomierzone grawimetrem sprężynowym (LCR) oraz balistycznym (FG5) podczas wspólnej sesji obserwacyjnej	7
5	Korelacja pomiędzy zmianami przyspieszenia siły ciężkości rejestrowanymi przez oba grawimetry	7
6	Zakłócenie grawimetru spowodowane trzęsieniem Ziemi w Chile	9
7	„Szum” obserwacyjny	9
8	Widmo mocy obserwacji grawimetrycznych	10
9	Spektrogram obserwacji grawimetrycznych	10
10	Wartości współczynników grawimetrycznych oraz faz dla wybranych fal pływowych	13
11	Residua obserwacji grawimetrycznych	14
12	Widmo mocy residuów	14
13	Wpływ obciążeń oceanicznych na zmiany przyspieszenia siły ciężkości	15
14	Residua obserwacji fali $M_2$ po korekcji oceanicznej	16
15	Korelacja zmian ciśnienia atmosferycznego oraz wartości rezydualnych przyspieszenia siły ciężkości	17

## SPIS TABEL

1	Wyniki analizy Metodą Najmniejszych Kwadratów	11
2	Wyniki analizy metodą Bayesa	12
3	Oceaniczny efekt pośredni w Józefosławiu wg modelu <i>tpxo6.2</i>	15



RYSUNEK 1. Grawimetr pływowy *LaCoste&Romberg ET26* oraz schematyczne umiejscowienie laboratorium pływowego w budynku obserwatorium (źródło: Barlik i in. 2006)

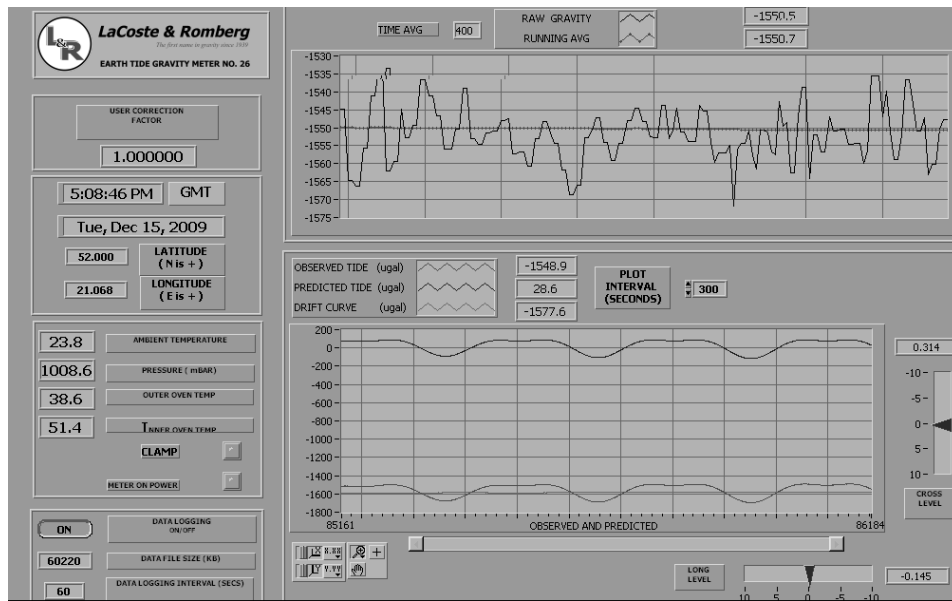
## 1. LABORATORIUM PŁYWOWE

Laboratorium pływowe znajdują się w części piwnicznej (około 6 metrów pod powierzchnią terenu) budynku Obserwatorium Astro-Geodezyjnego w Józefosławiu (rys. 1). Główny punkt obserwacyjny to żel-betonowy słup wpuszczony ponad metr w grunt, a także odizolowany od budynku, aby wykluczyć przenoszenie drgań.

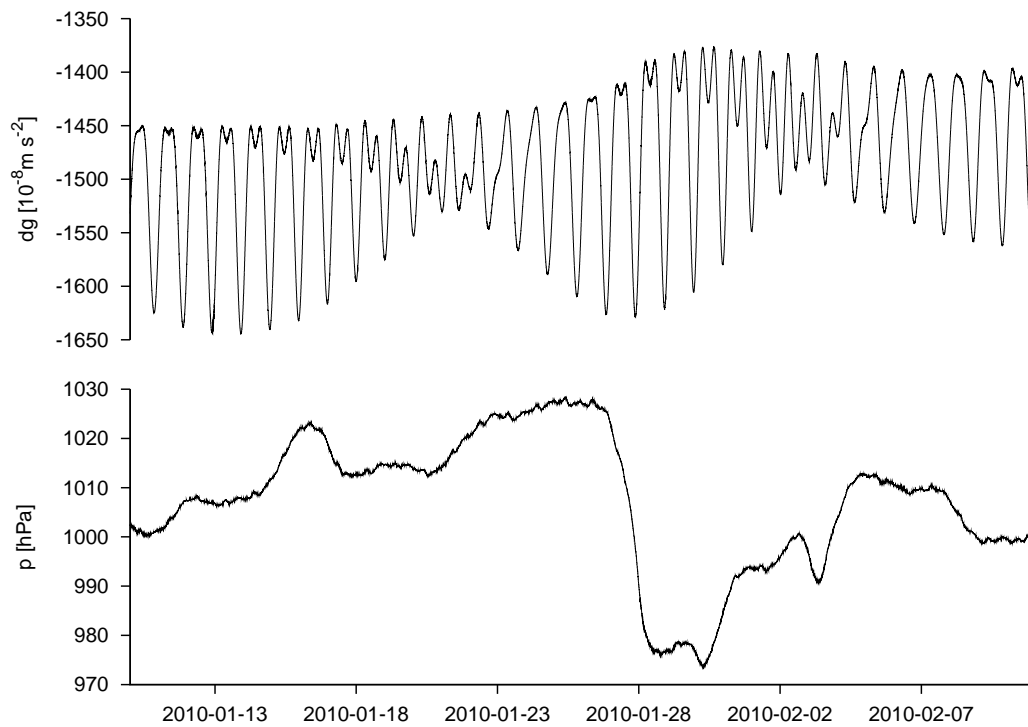
Obserwatorium w Józefosławiu od 2002 roku wyposażone jest w grawimetr sprężynowy *LaCoste&Romberg Earth Tide no. 26* (rys. 1) dedykowany do ciągłych, stacjonarnych obserwacji zmian przyspieszenia siły ciężkości (Bogusz, 2002; Bogusz i Lemańska, 2004; Bogusz, 2005; Rajner, 2010b). Jest to najdokładniejszy instrument w klasie instrumentów sprężynowych, różniący się od poprzednich modeli tym, że posiada znacznie lepszą stabilizację termiczną (podwójne naczynie Dewara), jest wyposażony w tzw. „feedback” utrzymujący masę próbną w stałym położeniu (nie są rejestrowane zmiany położenia masy próbnej, tylko „odpowiedzi” z tego urządzenia), posiada zmienioną konstrukcję tłumienia drgań oraz stabilne podzespoły elektroniczne (La Coste & Romberg, 2001).

Instrument wyposażony jest w dodatkowe czujniki, których pozwalają kontrolować stabilność instrumentu (libele elektroniczne) oraz stabilność termiczną (rejestracja temperatury otoczenia, oraz temperatur wewnątrz komór termicznych). Mierzone jest także ciśnienie, którego wpływ musi być uwzględniony w precyzyjnych opracowaniach.

Pracę wszystkich urządzeń kontroluje firmowe oprogramowanie *Tidaq* (rys. 2), które służy również do zapisywania, szybkiej wizualizacji i porównania danych z obliczonym wpływem teoretycznym. Zdalny dostęp do zabezpieczonej sieci w Józefosławiu pozwala na zdalną kontrolę urządzenia (bez zakłócania jego pracy), szybką reakcję obserwatora w przypadku wystąpienia problemów oraz uniknięcie długich przerw w obserwacjach.



RYSUNEK 2. Panel programu Tidaq nadzorującego pracę grawimetru



RYSUNEK 3. Przykład obserwowanych wartości przyspieszenia siły ciężkości oraz ciśnienia atmosferycznego w Józefosławiu

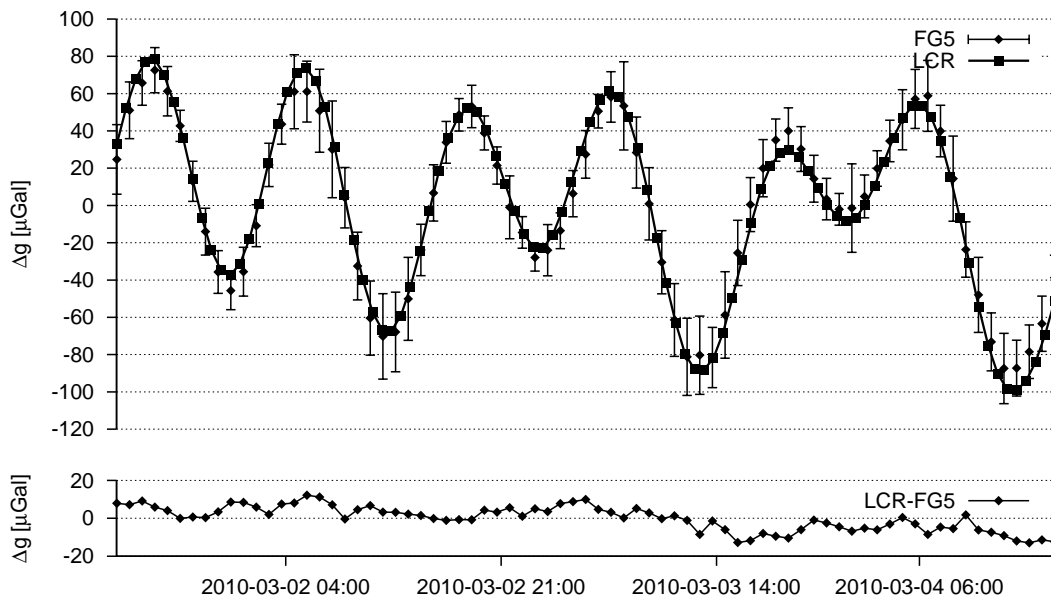
## 2. DANE

**2.1. Obserwacje grawimetryczne.** Niniejsze sprawozdanie zawiera analizy i wyniki uzyskane na podstawie obserwacji zarejestrowanych w 2010 roku. Sygnał próbkowany jest z rozdzielczością 0,2 sekundy, a następnie wygładzany (średnia ruchoma) i zapisywany z rozdzielczością minutową. Czas jest kontrolowany przez zegar komputera, który jest synchronizowany co godzinę przez internetowe serwery czasu. Ponadto uwzględniane jest stałe przesunięcie związane z instrumentalnym opóźnieniem fazowym (związane z czasem reakcji układu mierzącego na występujące zjawisko). Wartość ta została wyznaczona wcześniej (Bogusz, 1998) i wynosi 206 s. Ze względu na obfite deszcze i dużą wilgotność gleby w maju (powodzie w całej Polsce) piwnice obserwatorium były zalewane przez wodę. Spowodowało to uszkodzenie dysku komputera kontrolującego pracę grawimetru pływowego. Ponadto późniejsze zaniki prądu związane ze spięciami powodowanymi zawilgoceniem sieci elektrycznej spowodowały, że obserwacje w tym roku są niekompletne, a niektóre okresy obserwacyjne są zbyt krótkie, aby mogły być opracowywane. Pomimo tych trudności, zebrany materiał obserwacyjny jest wysokiej jakości, co ma swoje odzwierciedlenie w wynikach zawartych w dalszej części niniejszego opracowania.

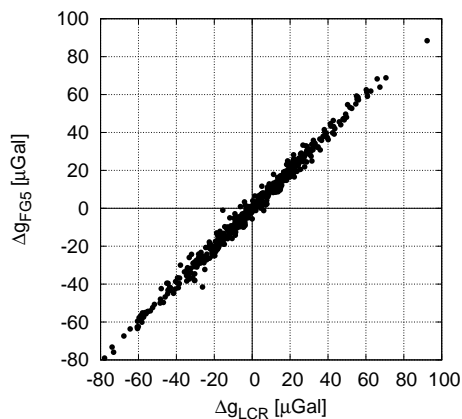
Rys. 3 przedstawia fragment zarejestrowanych wartości przyspieszenia siły ciężkości. Przy tej rozdzielczości widoczne są zmiany o okresie okołodwutygodniowym (pół miesiąca syderecznego) związane ze wzmocnieniem (pływy syzygijne) oraz wygaszaniem (pływy kwadraturowe) sumarycznego wpływu Księżyca i Słońca. Rozpoznać można również fale dobowe i półdobowe. Wpływ poszczególnych składników harmoniczných (fal pływowych) został określony dalej. Dolny wykres przedstawia zarejestrowane ciśnienie atmosferyczne, które jest szczególnie istotne w obserwacjach grawimetrycznych. Pozostałe dane (odczyty libeli, wartości temperatur pomieszczenia oraz komór termicznych) stanowią tylko kontrole urządzenia i nie są tutaj przedstawione.

Wpływ zmian ciśnienia widoczny jest na rys. 3. Pomimo że wykres przedstawia surowe obserwacje to wyraźny widać „uniesienie” górnego zakresu krzywej pływowej związane z bardzo gwałtownym (2 dni) i głębokim spadkiem ciśnienia ( $\sim 50$  hPa) Wpływ atmosfery został ilościowo oszacowany podczas analizy danych grawimetrycznych w dalszej części opracowania.

**2.2. Kalibracja.** W przypadku pomiarów grawimetrami różnicowymi bardzo istotną czynnością jest ich cechowanie. Błąd stałej grawimetru bezpośrednio wpływa na wyniki, które są przeskalowane. Kalibracja grawimetru sprężynowego jest czynnością rutynową i można ją wykonać różnymi metodami. Spośród różnych metod największą zaletą bezpośredniego porównywania wyników z innym grawimetrem jest brak przerw w rejestracji i pełna automatyzacja. Najlepszym sposobem jest kalibracja poprzez synchroniczne pomiary z grawimetrem balistycznym. Warto zwrócić tutaj uwagę, że zaletą obserwatorium w Józefosławiu są częste (raz na miesiąc) obserwacje przyspieszenia siły ciężkości przy pomocy grawimetru FG5 no. 230 (patrz inny załącznik tego raportu), które pozwalają na dokładną kalibrację grawimetru pływowego i kontrole zmian jego współczynnika (Bogusz i Kłęk, 2008; Rajner i Olszak, 2010). Przykładowe wyniki



RYSUNEK 4. Scentrowane wartości przyspieszenia siły ciężkości pomierzone grawimetrem sprężynowym (LCR) oraz balistycznym (FG5) podczas wspólnej sesji obserwacyjnej



RYSUNEK 5.  
Korelacja pomiędzy zmianami przyspieszenia siły ciężkości rejestrowanymi przez oba grawimetry

z tegorocznych wspólnych obserwacji pokazane są na rys. 4 i 5. Ta metoda pozwala na potwierdzenie stałej grawimetru podawanej przez producenta z dokładnością względną ok. 1% podczas pomiaru dwudniowego.

### 3. PRZYGOTOWANIE DANYCH

Przed przystąpieniem do analizy właściwej z zebranych danych usunięto zakłócenia w postaci (i) obserwacji odstających, (ii) przerw w obserwacjach oraz (iii) nagłych skoków odczytów (nieciągłości). Szczególnie wyraźny jest wpływ trzęsień Ziemi nawet z odległych rejonów (rys. 6). Czynności te zostały wykonane interaktywnie w trybie graficznym przy pomocy programu *Tsoft* (Van Camp i Vauterin, 2005), przy użyciu techniki *remove-restore*. Technika ta usuwa znaną wartość sygnału (pływ teoretyczny - policzony na podstawie

parametrów wyznaczonych w poprzednich latach), tak aby pracować na residuach, gdzie interpolacja, choć nadal sztuczna, jest bardziej uprawniona. Związek pomiędzy wartościami obserwowanymi a rezydualnymi można w prosty sposób zapisać,

$$(1) \quad R = O - P_{teor} + k \cdot p,$$

gdzie,

$R$  - residua,

$O$  - wartości obserwowane,

$P_{teor}$  - pływ teoretyczny,

$k$  - współczynnik określający wpływ ciśnienia (ok.  $3.5 \frac{nm}{s^2 \cdot hPa}$ ),

$p$  - ciśnienie atmosferyczne.

Po usunięciu wspomnianych zakłóceń sygnał został odtworzony przez proste przekształcenie wzoru 1. Wrażliwość grawimetru na wstrząsy i zakłócenia wynikające z ruchu samochodowego przedstawia rys. 7, który pokazuje wartość „szumu” obserwacyjnego o różnych porach dnia (mniejszy nocą, większy za dnia) i dla różnych dni tygodnia (najlepsze warunki obserwacyjne w niedzielę). Przedstawiony szum obliczony został na podstawie surowych obserwacji grawimetrycznych, po odjęciu dryftu i wpisanej krzywej wielomianowej dziewiątego stopnia. Takie residua po scentrowaniu posłużyły do obliczenia opisywanego i przedstawionego na rysunku parametru RMS. Widać również sezonowo zmienną wartość szumu obserwacyjnego, znane również z obserwacji sejsmologicznych. Zwiększone wartości zimą prawdopodobnie powodowane są występującymi w tym okresie sztormami oceanicznymi.

Na koniec została zmieniona rozdzielczość z minutowej na godzinną. Przy zmianie próbkowania zastosowano również filtr dolnoprzepustowy usuwający częstotliwości większe niż  $12 \text{ cpd}^1$ . Filtracja ta jest bardzo wrażliwa na występowanie przerw w danych i może powodować znaczne zwiększanie takich zdarzeń (z minut do dni).

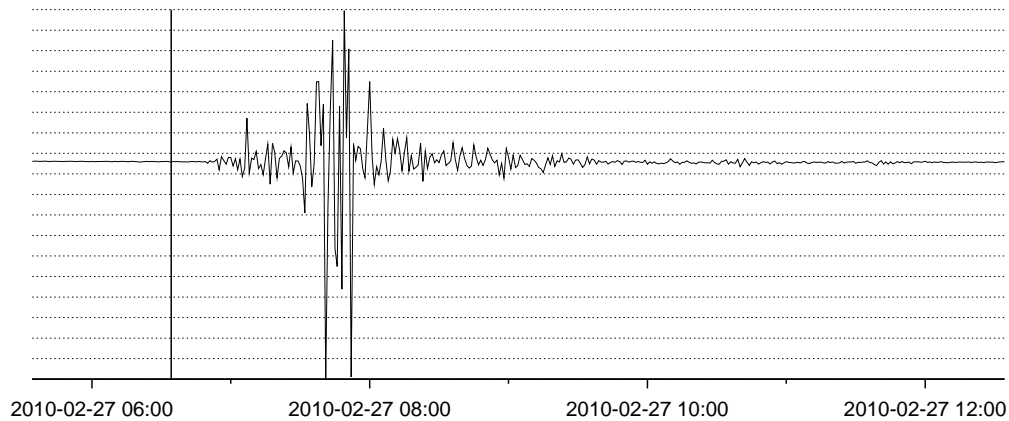
#### 4. ANALIZA OBSERWACJI

**4.1. Analiza harmoniczna.** Dobry pogląd na charakter zjawiska pływów daje przedstawienie rezultatów otrzymanych po zastosowaniu techniki FFT (Fast Fourier Transform - rys. 9). Korzystając z danych godzinnych, zgodnie z kryterium Nuquist, można uzyskać widmo fal o okresie do dwóch godzinnych. Wyraźne w otrzymanym widmie są główne fale (a właściwie ze względu na bliskie położenie - kombinacje fal) pływowe.

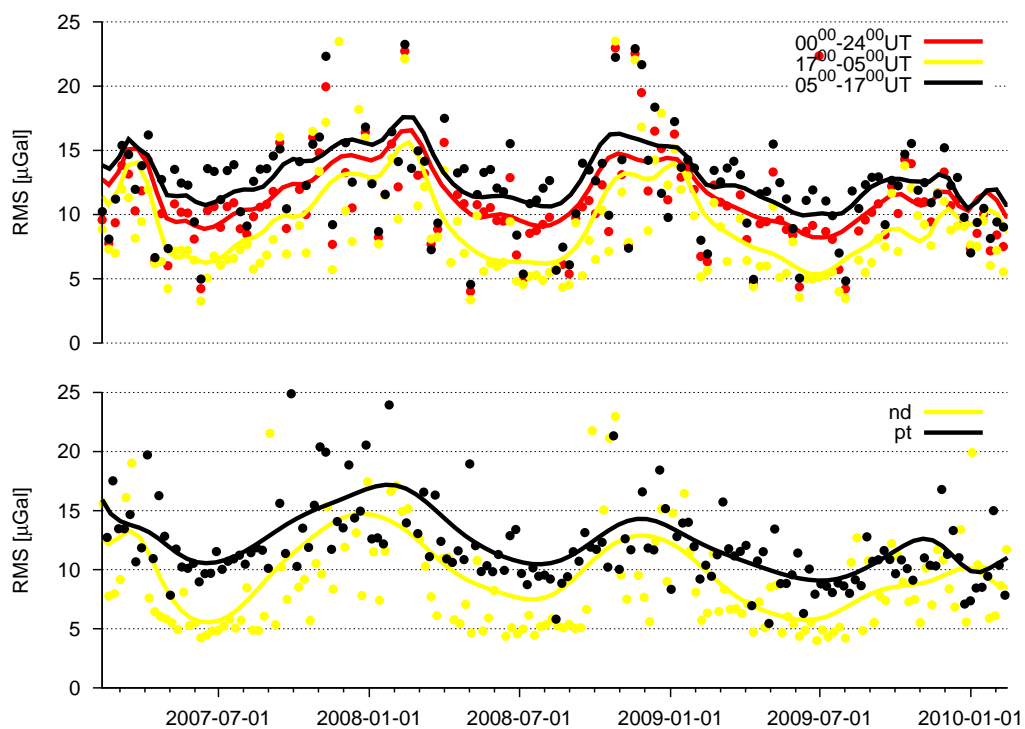
Otrzymane w ten sposób wyniki są zgodne z teorią pływów, w której główne składniki harmoniczne grupuje się w przedziały pływów długookresowych (LP - long period), dobowych (D - diurnal), pół-dobowych (SD - semi-diurnal), o okresie jednej-trzeciej doby (TD - term diurnal) i dalsze (te, ze względu na bardzo małe amplitudy nie będą wyznaczane). Przedmiotem analiz są pasma

<sup>1</sup>cycle per day

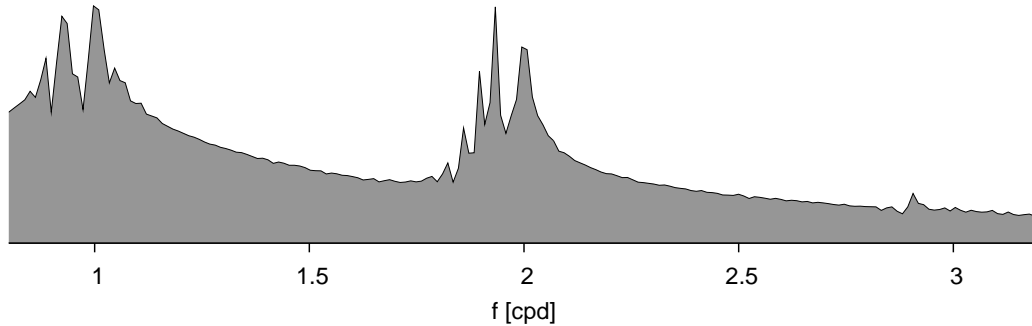




RYSUNEK 6. Zakłócenie grawimetru spowodowane trzęsieniem Ziemi w Chile (2010 02 27, M8.8). Pionowa kreska oznacza początek trzęsienia na skali czasu. Linie poziome wskazują zmiany przyspieszenia siły ciężkości równe  $1\text{ mGal}$ . Identyfikacja na podstawie bazy USGS (USGS, 2010).

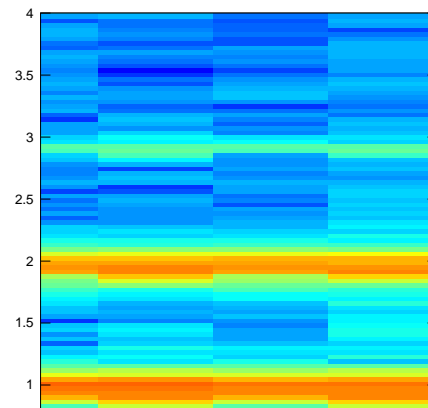


RYSUNEK 7. „Szum” obserwacyjny podczas różnych pór dnia i dla różnych dni tygodnia (pt -piątek, nd -niedziela). Kropki przedstawiają dobowe wartości, na podstawie których została wpasowana krzywa.



RYSUNEK 8. Widmo mocy obserwacji grawimetrycznych (skala logarytmiczna)

RYSUNEK 9.  
Spektrogram  
obserwacji gra-  
wimetrycznych  
(na skali piono-  
wej zaznaczono  
częstotliwość w  
*cpd*)



D, SD, TD gdyż długość obserwacji nie pozwala na wyznaczanie pływów długookresowych (pływy roczne, półroczne, miesięczne). Częstotliwości mniejsze niż 0,8 cpd (cycle per day, ilość okresów na dobę) zostały numerycznie odfiltrowane przed przystąpieniem do analizy właściwej. Z tego też względu można pominąć wpływy zmian położenia bieguna, zmiany długości doby oraz wielkoskalowych zmian mas wodnych gdyż zjawiska te mają długi okres w porównaniu z falami określanymi w niniejszej pracy.

**4.2. Analiza Metodą Najmniejszych Kwadratów.** Technika FFT nie jest metodą wystarczającą w precyzyjnych analizach pływów grawimetrycznych. Najistotniejszą wadą jest brak możliwości określenia faz poszczególnych fal. Najpowszechniej w tego typu analizach wykorzystuje się Metodę Najmniejszych Kwadratów, która w postaci podanej przez Chojnickiego (Chojnicki, 1973) wykorzystana jest w pakiecie ETERNA (Wenzel, 1996). W obliczeniach wykorzystano katalog potencjału pływowego Hartmann-Wenzel (Hartmann i Wenzel, 1995) zawierający prawie 1300 fal pływowych,

**4.2.1. Wartości amplitud oraz faz.** W tabeli 1 podane zostały wyznaczone parametry dla fal pływowych, czyli współczynnik grawimetryczny ( $\delta$ , określa

TABELA 1. Wyniki analizy Metodą Najmniejszych Kwadratów

$f_{od}$ [cpd]	$f_{do}$ [cpd]	Fala	$A_{theo} [\frac{nm^2}{s^2}]$	$\delta_{WD}$	Bez korekcji atmosferycznej			Z korekcją atmosferyczną				
					$\delta$	$m_\delta$	$\varphi$ [°]	$m_\varphi$ [°]	$\delta$	$m_\delta$	$\varphi$ [°]	$m_\varphi$ [°]
0.5014	0.9114	$Q_1$	57.7	1.1447	1.1477	0.0031	-0.085	0.153	1.1447	0.0011	0.037	0.053
0.9114	0.9480	$O_1$	301.3	1.1453	1.1456	0.0007	0.137	0.035	1.1453	0.0002	0.106	0.012
0.9480	0.9819	$M_1$	23.7	1.1456	1.1601	0.0063	0.061	0.310	1.1456	0.0022	0.121	0.109
0.9819	1.0236	$P_1S_1K_1$	423.6	1.1301	1.1314	0.0005	0.135	0.027	1.1301	0.0002	0.107	0.009
1.0236	1.0575	$J_1$	23.7	1.1515	1.1539	0.0074	-0.288	0.368	1.1515	0.0026	-0.257	0.128
1.0575	1.4702	$OO_1$	13.0	1.1580	1.1584	0.0117	0.032	0.580	1.1580	0.0041	-0.128	0.202
1.4702	1.8803	$2N_2$	8.7	1.1378	1.1372	0.0050	1.458	0.250	1.1378	0.0043	1.656	0.217
1.8803	1.9141	$N_2$	54.3	1.1514	1.1527	0.0013	1.118	0.064	1.1514	0.0011	1.152	0.055
1.9141	1.9504	$M_2$	283.8	1.1574	1.1575	0.0003	0.646	0.015	1.1574	0.0003	0.674	0.013
1.9504	1.9843	$L_2$	8.0	1.1618	1.1645	0.0131	1.710	0.645	1.1618	0.0114	1.536	0.561
1.9843	2.0027	$S_2$	132.0	1.1484	1.1519	0.0013	0.028	0.064	1.1484	0.0011	-0.231	0.056
2.0027	2.4519	$K_2$	35.9	1.1456	1.1449	0.0044	0.365	0.219	1.1456	0.0038	0.438	0.190
2.4519	7.0000	$M_3M_6$	3.4	1.0167	1.0130	0.0174	-1.401	0.985	1.0167	0.0131	-1.051	0.735
$f$	częstotliwość											
$A_{theo}$	amplituda teoretyczna dla Ziemi sztywnej											
$\delta_{WD}$	współczynnik grawimetryczny w modelu Wahr-Dehant											
$\delta$	współczynnik grawimetryczny											
$m_\delta$	błąd wyznaczenia współczynnika grawimetrycznego											
$\varphi$	faza fali											
$m_\varphi$	błąd wyznaczenia fazy											

TABELA 2.  
Wyniki analizy  
metodą Bayesa  
(oznaczenia jak  
w tab. 1)

Fala	$\delta$	$m_\delta$	$\varphi$ [°]	$m_\varphi$ [°]	$A_{theo}$ [ $\mu Gal$ ]
$Q_1$	1.14488	0.00374	0.018	0.187	6.603
$O_1$	1.14518	0.00080	0.121	0.040	34.500
$M_1$	1.14744	0.00690	0.340	0.345	2.719
$P_1$	1.14433	0.00221	0.114	0.110	16.040
$S_1$	1.13528	0.04685	0.049	2.365	0.376
$K_1$	1.13043	0.00070	0.083	0.036	47.895
$J_1$	1.14924	0.00663	-0.166	0.330	2.723
$OO_1$	1.15706	0.00943	-0.045	0.469	1.500
$2N_2$	1.14223	0.00420	1.507	0.211	0.821
$N_2$	1.15165	0.00102	1.189	0.051	6.254
$M_2$	1.15737	0.00023	0.690	0.011	32.828
$L_2$	1.15792	0.00952	1.681	0.472	0.928
$S_2$	1.14780	0.00063	-0.157	0.032	15.147
$K_2$	1.14877	0.00209	0.323	0.104	4.121
$M_3$	1.01253	0.00974	-0.034	0.551	0.347

stosunek obserwowanych pływów grawimetrycznych w stosunku do teoretycznego pływu dla Ziemi sztywnej) oraz fazę fali ( $\varphi$ , w niniejszej pracy zastosowano konwencje, że opóźnienie ma znak ujemny).

Analizy wykonano dwukrotnie. W pierwszym przypadku nie uwzględniono zmian ciśnienia atmosferycznego, a analizie podlegały tylko obserwacje przyspieszenia siły ciężkości. W drugim przypadku do analiz została włączona obserwacja ciśnienia atmosferycznego i wpasowany został współczynnik regresji liniowej<sup>2</sup>. Wpływ ciśnienia atmosferycznego wyniósł  $-3.17 \frac{nm}{s^2 \cdot hPa}$ . Rząd tej wartości jest zgodny z wyznaczeniami w poprzednich latach oraz wartościami oczekiwanymi (Warburton i Goodkind, 1977).

Uzyskane wyniki zostały przedstawione na rys. 10, gdzie współczynniki amplitud zostały porównane do wartości teoretycznych wynikających z globalnego modelu Wahr-Dehant (Dehant, 1987; Wahr, 1981).

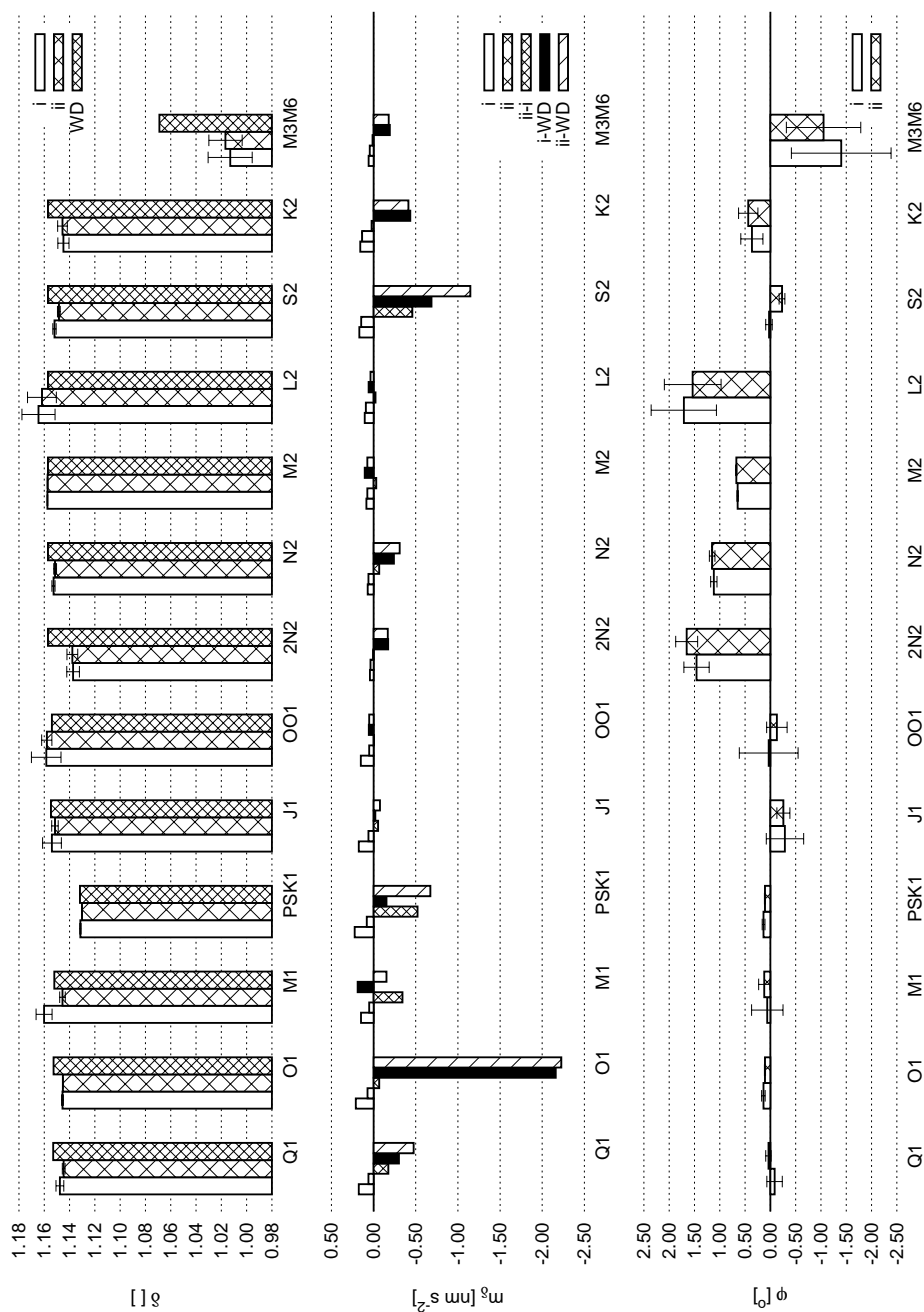
Zaprezentowane wyniki wskazują na duże znaczenie ciśnienia atmosferycznego w przypadku obserwacji grawimetrycznych. Nie jest to jednak, aż tak wyraźne jak w przypadku opracowania zeszłorocznego, gdzie podczas całego roku nie było większych przerw i zakłóceń (Rajner, 2010a).

Dane grawimetryczne zostały również opracowane przy pomocy innego programu opierającego się na innej zasadzie wykorzystując statykę bayesowską – baytap08 (Tamura i Agnew, 2008). Wyniki przedstawione są w tabeli 2 i są zbieżne z wynikami z programu ETERNA, jednocześnie pokazują, że przy niekompletnych obserwacjach, baytap07 „lepiej” radzi sobie z rozdzielaniem fal o bliskich częstotliwościach.

Błąd średni typowego spostrzeżenia ( $m_0$ )<sup>3</sup> wyniósł odpowiednio  $1.88 \frac{nm}{s^2}$  (bez uwzględniania wpływu ciśnienia) i  $1.09 \frac{nm}{s^2}$  (z uwzględnianiem wpływu ciśnienia). Wartości te wskazują na dobrą jakość obserwacji i są tylko nieznacznie większe

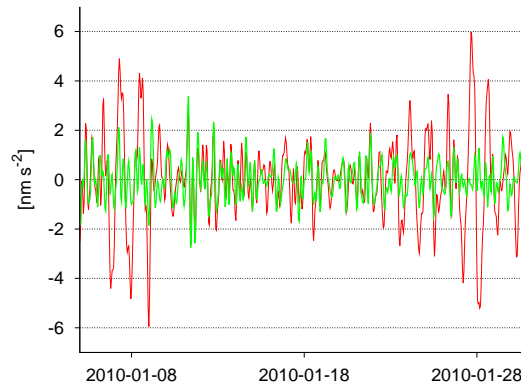
<sup>2</sup>Parametr  $k$  z wzoru 1

<sup>3</sup>Wynik metody najmniejszych kwadratów jest zbyt optymistyczny, dlatego są one skalowane przez średni poziom szumu - szczegóły w Wenzel 1996

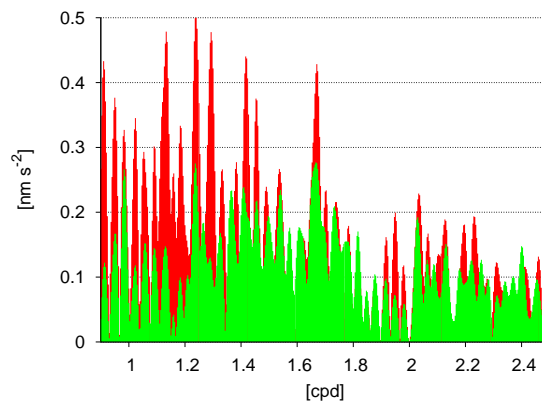


RYSUNEK 10. Wartości współczynnika grawimetrycznego dla różnych fal pływowych wraz z ich błędami w porównaniu do modelu Wahr-Dehant (górny wykres). Wartości błędów wyznaczonych fal, różnic pomiędzy poszczególnymi wyznaczeniami oraz różnic w stosunku do modelu Wahr-Dehant w jednostkach przyspieszenia (środkowy wykres) oraz wyznaczone fazy (dolny rysunek). i - bez ciśnienia, ii - z uwzględnieniem ciśnienia, WD - wartości modelowe.

RYSUNEK 11.  
 Fragment resyduów obserwacji grawimetrycznych (czerwony kolor bez uwzględnienia ciśnienia, zielony – z uwzględnieniem ciśnienia).



RYSUNEK 12.  
 Widmo mocy resyduów (oznaczenia kolorów jak na rys. 11)



od zeszlórocznych, i znacznie mniejsze niż te sprzed 2009 roku (Bogusz, 2009; Rajner, 2010a).

4.2.2. *Residua obserwacji.* Dobrym sposobem na poszukiwanie obserwacji odstających od pływów modelowych jest przyjrzenie się resyduom obserwacyjnym. Duże wartości dla pewnych przedziałów czasowych mogą świadczyć o różnych problemach instrumentalnych (mierzone błędne wartości, synchronizacja zegara) nie do końca odpowiednim „oczyszczeniu” obserwacji, ale także mogą wskazywać na występowanie zjawisk geofizycznych i geodynamicznych. Na rys. 11 przedstawione jest fragment resyduów obserwacyjnych a na rys. 12 przedstawione jest ich widmo mocy. Zwłaszcza analizując wykres widma mocy resyduów wyraźny jest spadek wartości w wybranych przedziałach częstotliwości. Ponownie podkreślamy, że efekt ten nie jest tak wyraźny jak w roku ubiegłym, ze względu na przerwy w obserwacjach.

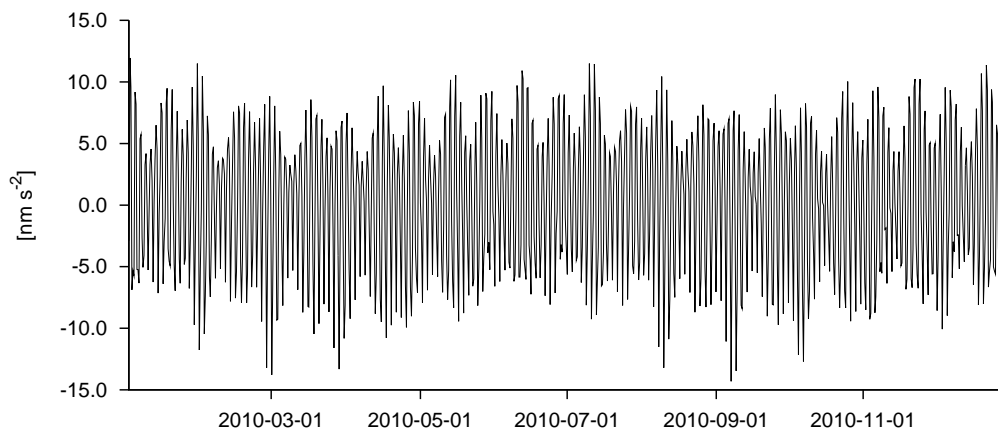
## 5. EFEKTY POŚREDNIE

5.1. **Oceaniczny.** W przypadku obserwacji grawimetrycznych pływów ziemskich istotne jest uwzględnienie czynników pośrednich. Jednym z istotniejszych jest wpływ oceanów, który jest istotny nawet dla stacji położonych dalej od wybrzeża, a w przypadku stacji przybrzeżnych może sięgać nawet kilkunastu procent sygnału pływowego (Melchior, 1978). Wyróżnić można dwa efekty:

TABELA 3. Oceaniczny efekt pośredni w Józefosławiu wg modelu tpxo6.2

	$M_M$	$M_F$	$Q_1$	$O_1$	$P_1$	$K_1$	$N_2$	$M_2$	$S_2$	$K_2$
$L$ [ $\frac{nm}{s^2}$ ]	0.51	0.69	0.38	1.42	0.49	1.17	1.53	7.29	1.99	0.37
$\lambda$ [ $^\circ$ ]	95.11	-23.26	37.34	-32.57	-24.69	6.13	136.45	81.39	-167.27	12.58

$L$  - amplituda  
 $\lambda$  - faza (względem południka lokalnego, opóźnienie ujemne)



RYSUNEK 13. Wpływ obciążeń oceanicznych na zmiany przyspieszenia siły ciężkości wg modelu tpxo6.2 (Agnew, 1996, 1997)

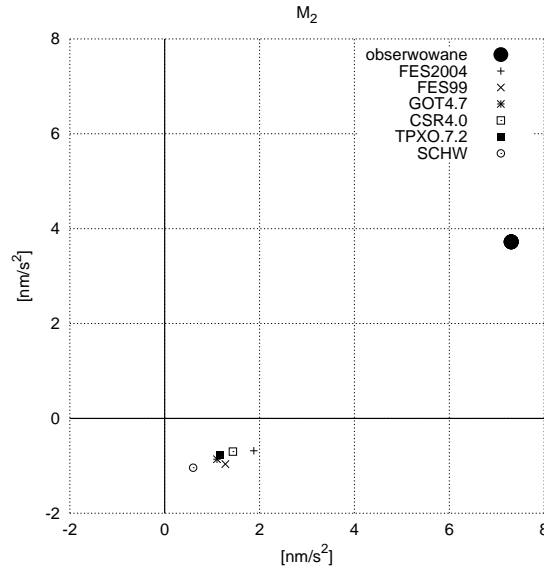
(i) zmiany przyspieszenia powodowane zmianami rozkładu mas (pot. „newtonowskie”) oraz (ii) zmiany przyspieszenia powodowane ugięciem skorupy ziemi powodowanej jej zmiennymi obciążeniami (loading). W przypadku stacji wewnątrz kontynentu, np. Józefosław, składnik (i) jest bez znaczenia.

Obliczenia tego efektu zostały wykonane przy pomocy pakietu `spot1` (Agnew, 1996, 1997), w którym wykorzystano model oceanu wyznaczony na podstawie altimetrycznej misji satelitarnej TOPEX/POSEIDON (Egbert i Foreman, 1994). W modelu uwzględnione są składniki, które mają największą amplitudę, a pozostałe pochodzą z interpolacji. Do obliczeń zostały użyte scałkowane wartości funkcji Greena dla modelu Ziemi Gutenberga, policzone przez Farrella (Farrell, 1972). Obliczone wartości amplitud oraz faz dla przyspieszenia siły ciężkości zawarte są w tabeli 3.

Przedstawienie szeregu czasowego wpływu obciążeń oceanicznych (rys. 13) pokazuje, że wielkości te są rzędu  $\mu Gal$ , a więc są to wielkości znaczące nawet dla stacji w Józefosławiu.

Zgodnie z oznaczeniami podanymi przez Melchiora (Melchior, 1978) możemy zapisać równanie wektorowe,

$$(2) \quad \vec{R}(R, 0) = \vec{A}(A_{theo} \cdot \delta, \varphi) - \vec{L}(L, \lambda) - \vec{X}(X, \chi),$$

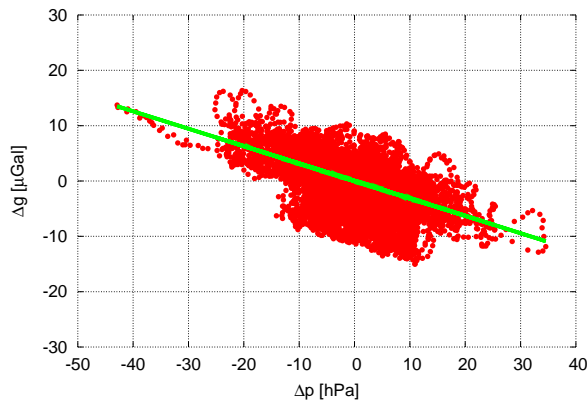


RYSUNEK 14. Residua obserwacji fali  $M_2$  po korekcji oceanicznej; obs oznacza rozbieżność między obserwacjami a teoretycznymi wartościami pływów ( $\vec{A} - \vec{R}$  z wzoru 2), pozostałe oznaczenia przedstawiają wektor rezydualny po uwzględnieniu różnych modeli oceanicznych ( $\vec{A} - \vec{R} - \vec{L}$ )

które pozwala na przeliczenie z wartości obserwowanych ( $\vec{A}$ ) na wartości modelowe ( $\vec{R}$ ) uwzględniając wpływ obciążeń oceanicznych ( $\vec{L}$ ) oraz wszelkie rozbieżności wynikające z lokalnych wartości współczynników grawimetrycznych, błędów instrumentalnych i innych ( $\vec{X}$ ). W tym roku została opracowana wieloletnia analiza efektów oceanicznych i ich wpływu na obserwacje grawimetryczne (Rajner, 2011), która zostanie w najbliższym czasie zgłoszona do publikacji w odpowiednim czasopiśmie. Z analiz tam zawartych wynika jednoznacznie, że pośredni efekt oceaniczny jest widoczny w obserwacjach grawimetrycznych wykonanych przy pomocy *LCR-ET 26*, a także, że uwzględnienie modelowych wartości obciążeń oceanicznych ( $\vec{L}$ ) znacznie redukuje residua obserwacyjne ( $\vec{X}$ ), szczególnie dla fali  $M_2$ , co jest w zgodzie z reżimem pływów oceanicznych obserwowanych na północnym Atlantyku (rys. 14).

5.2. **Atmosferyczny.** Wpływ ciśnienia na wyniki analiz pływowych został pokazany w poprzednich rozdziałach. Wyniki analizy spektralnej pokazują wyraźne piki w częstotliwościach dobowych i półdobowych ( $1, 2 [cpd]$ , czyli radiacyjne (nazywane też insolacyjnymi) pływy atmosfery. Jest to jednak efekt znikomy w porównaniu z wahaniami ciśnienia atmosferycznego o okresach kilku-, kilkunastodniowych co jest normalne dla naszego klimatu. Oscylacje ciśnienia w okołodobowych częstotliwościach pływowych mogą być źródłem znacznego błędu przy wyznaczaniu grawimetrycznych parametrów pływowych, szczególnie tych o niewielkiej amplitudzie np.  $S_1$ .





RYSUNEK 15.  
Korelacja zmian ciśnienia atmosferycznego oraz wartości rezydualnych przyspieszenia siły ciężkości

Zmiany ciśnienia są dla stacji kontynentalnych źródłem największych (po pływach ziemskich) zaburzeń w obserwacjach grawimetrycznych. Oszacowanie wpływu tego efektu przeprowadza się przez wpasowanie zmian ciśnienia do zmian rezydualnych wartości przyspieszenia siły ciężkości, tj. do serii pomiarowej, z której został odjęty pływ teoretyczny, rys. 15). Takie proste podejście jest w wystarczające w analizie pływowej dla okresów krótszych niż kilka dób. W przypadku pomiarów grawimetrem balistycznym i uwzględniania sezonowych zmian rozkładu mas atmosferycznych empiryczne podejście jest niewystarczające. W takim przypadku należy uwzględnić rzeczywiste, wielkoskalowe zjawiska związane z przemieszczaniem atmosfery np. w oparciu o dane pomiarowe naziemne (ciśnienie atmosferyczne). Aby dokładność poprawek atmosferycznych była lepsza niż pojedyncze mikrogale, należy uwzględnić także pionowy rozkład mas atmosferycznych. Takie precyzyjne podejście do tego zagadnienia, z wykorzystaniem numerycznych modeli pogodowych, jest tematem obecnie prowadzonej pracy doktorskiej autora niniejszego opracowania.

## 6. WNIOSKI

Przedstawione w sprawozdaniu analizy i wyniki oraz ocena dokładności wyznaczonych parametrów wskazuje na bardzo dobrą jakość obserwacji w 2010 roku. Niestety problemy z rejestracją związane z występowaniem wody w części piwnicznej obserwatorium spowodowały poważne przerwy w rejestracji. Na podstawie zebranych danych wykazano jednak, że pozwalają one zarówno na jakościową i ilościową analizę zjawisk geodynamicznych, które wpływają na zmiany przyspieszenia siły ciężkości. Grawimetryczne parametry pływowe nie różnią się istotnie od tych uzyskanych w zeszłorocznej analizie. Błąd średni analizy harmonicznej Metodą Najmniejszych Kwadratów ( $1.09 \frac{nm}{s^2}$ ) jest bardzo mały dla tej klasy instrumentu. Zebrany materiał obserwacyjny posłuży dalszym szczegółowym analizom. Zakres tych badań zdecydowanie rozszerza bogate instrumentarium obserwatorium w Józefosławiu. Zarówno pomiary grawimetrem balistycznym jak i pozycyjne pomiary satelitarne, a także obserwacje meteorologiczne i hydrologiczne stanowią dopełnienie obserwacji pływowych. Podobnie wyniki tej pracy mogą być użyteczne dla pozostałych badań prowadzonych w obserwatorium.

## LITERATURA

- Agnew, D. C., 1996. SPOTL: Some programs for ocean-tide loading, *SIO Ref. Ser.*, 96-8, 35 pp.
- Agnew, D. C., 1997. NLOADF: a program for computing ocean-tide loading, *J. Geophys. Res.*, 102, 5109–5110.
- Barlik, M., J. Bogusz i T. Olszak, 2006. Plans for gravimetric measurements at Jozefoslaw Observatory, *Bulletin d'informations Mares Terrestres*, 141, 11235–11244.
- Bogusz, J., 1998. Instrumental phase lag determination in polish tidal stations, *Reports on Geodesy*, 39(9), 293–300.
- Bogusz, Janusz, 2002. New tidal gravimetric laboratory in Jozefoslaw, *Reports on Geodesy*, 61(1), 153–300.
- Bogusz, Janusz, 2005. Tidal observations in astrogeodetic observatory at Jozefoslaw, *Reports on Geodesy*, 73(2), 190–198.
- Bogusz, J., 2009. Badanie grawimetrycznych pływów ziemskich w obserwatorium Józefosławiu w 2008 roku, *Raport wew. Kat. Geod. i Astr. Geod. PW*.
- Bogusz, J. i M. Kłęk, 2008. Calibration of Spring Gravimeter ET-26 Using Absolute Gravity Measurements, Proceedings of the European Geosciences Union General Assembly 2008 session G10 “Geodetic and Geodynamic Programmes of the CEI (Central European Initiative), *Reports on Geodesy*, 84(1), 111–118.
- Bogusz, Janusz i Katarzyna Lemańska, 2004. Earth Tide research programme conducted in the Jozefoslaw Observatory, *Reports on Geodesy*, 69(2), 253–259.
- Chojnicki, T., 1973. Ein Verfahren zur Erdzeitenanalyse in Anlehnung an das Prinzip der kleinsten Quadrate, *Mitteilungen aus dem Institut für Theoretische Geodäsie der Universität Bonn*, 15.
- Dehant, V., 1987. Tidal Parameters for an Inelastic Earth., *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 49, 97–116.
- Egbert, A. F. Bennett, G. D. i M. G. G. Foreman, 1994. TOPEX/POSEIDON tides estimated using a global inverse model, *J. Geophys. Res.*, 99, 24821–24852.
- Farrell, W. E., 1972. Deformation of the Earth by surface loads, *Rev. Geophys and Space Phys.*, 10, 761–797.
- Hartmann, T. i H.-G. Wenzel, 1995. Catalogue HW95 of the tide generating potential, *Bulletin d'informations Marees Terrestres*, 123, 9278–9301.
- La Coste & Romberg, 2001. Instruction manual Earth Tide Gravity Meter, Austin, Texas, (Document NAVAIR 50-1C-52).
- Melchior, P., 1978. The Tides of the Planet Earth, Pergamon, Oxford.
- Rajner, M., 2010a. Badanie grawimetrycznych pływów ziemskich w obserwatorium Józefosławiu w 2009 roku, *Raport wew. Kat. Geod. i Astr. Geod. PW*.
- Rajner, M., 2010b. Investigation in Tidal Gravity Results in Józefoslaw Observatory, *Reports on Geodesy*, w druku.
- Rajner, M., 2011. Ocean tidal loading from the gravity measurements at Józefoslaw Observatory, *w przygotowaniu*.
- Rajner, M. i 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 Józefoslaw Observatory, *Reports on Geodesy*, w druku.
- Tamura, Y. i D. C. Agnew, 2008. Baytap08 User's Manual.
- USGS, 2010. [earthquake.usgs.gov](http://earthquake.usgs.gov).
- Van Camp, Michel i Paul Vauterin, 2005. TSoft: graphical and interactive software for the analysis of time series and Earth tides, *Computers and Geosciences*, 31(5), 631–640.
- Wahr, J.M., 1981. Body tides on an elliptical, rotating, elastic and oceanless earth., *Geophysical Journal of the Royal astronomical Society*, 64, 677–703.
- Warburton, R. J. i J. M. Goodkind, 1977. The influence of barometric-pressure variations on gravity, *Gephys. J. R. astr. Soc.*, 48, 281–292.
- Wenzel, Hans-Georg, 1996. The nanogal software: Earth Tide Data processing package ETERNA 3.30, *Bulletin d'Informations Marees Terrestres*, 124, 9425–9439.