

POLITECHNIKA WARSZAWSKA
Wydział Geodezji i Kartografii



Praca dyplomowa magisterska

**Wykorzystanie danych z grawimetrów
nadprzewodnikowych do weryfikacji pływowych
modeli Ziemi**

**Verification of the Earth Tide models
using superconducting gravimeters data**

Katarzyna Osowiec

Praca napisana
w **Katedrze Geodezji
i Astronomii Geodezyjnej**
pod kierunkiem
dr inż. Marcina Rajnera

Warszawa, rok 2016

*Składam serdeczne podziękowania promotorowi pracy
dr inż. Marcinowi Rajnerowi
za opiekę naukową, życzliwość i poświęcony mi czas.*

Streszczenie pracy:

Treść niniejszej pracy poświęcono zagadnieniom związanym z opracowaniem obserwacji z grawimetrów nadprzewodnikowych, wykorzystywanych m. in. do badania zjawisk pływowych. Celem pracy było sprawdzenie czy dane grawimetryczne mogą posłużyć do weryfikacji pływowych modeli Ziemi. Opracowano dane pozyskane z 13 stacji globalnej sieci grawimetrów nadprzewodnikowych GGP (*Global Geodynamics Project*) w zakresie wyznaczenia parametrów fal pływowych z uwzględnieniem wpływu obciążeń atmosferycznych i oceanicznych. Obserwacje grawimetryczne poddano analizie metodą najmniejszych kwadratów w celu wyznaczenia wartości amplitud, faz oraz współczynników grawimetrycznych fal pływowych. Następnie wprowadzono korektę ze względu na pośredni efekt oceaniczny (OTL – *ocean tidal loading*), wyznaczoną w oparciu o model pływów oceanicznych. Sprawdzono kilka modeli i do dalszej analizy przyjęto model HAMTIDE11a. Skorygowane wartości współczynników grawimetrycznych i faz przeanalizowano pod kątem zależności od położenia stacji obserwacyjnej. Wyznaczono również teoretyczne współczynniki grawimetryczne pochodzące z kilku modeli pływów ziemskich, a następnie porównano wartości modelowe z obserwowanymi. W wyniku tak przeprowadzonej analizy wykazano, że dane z grawimetrów nadprzewodnikowych mogą być wykorzystane do weryfikacji modeli pływowych. Stwierdzono dobrą zgodność wybranych modeli pływów ziemskich z obserwacjami grawimetrycznymi.

Słowa kluczowe: pływy ziemskie, grawimetr nadprzewodnikowy, GGP, pośredni efekt oceaniczny, modele pływowe Ziemi

Abstract:

This thesis is focused on the issue concerning processing of superconducting gravimeters data. The aim of the study was to check whether tidal gravity data can be used for verifying Earth Tide models. Observations recorded at 13 stations in the Global Geodynamics Project, a worldwide network of superconducting gravimeters, were analyzed in order to determine tidal parameters. Tidal waves amplitudes, phases and gravimetric factors were adjusted using least squares method. Atmospheric effects were removed in adjustment process. Next stage was to calculate loading correction using ocean tide models. A few models were tested and finally HAMTIDE11a was chosen. Corrected gravimetric factors and phases at all stations were compared due to tidal models with respect to their location. Verification of the Earth Tide models was done by calculating differences between theoretical and observed gravimetric factor for several models. Research proved that superconducting gravimeters data can be used for verifying Earth tide models. Furthermore, analyses show that theoretical gravimetric factors are consistent with tidal gravity observations.

Keywords: Earth Tides, superconducting gravimeter, GGP, ocean tidal loading, Earth tide models

Spis treści

1. Wstęp.....	4
2. Zjawiska pływowe.....	5
2.1. Siły pływowe i potencjał pływowy.....	5
2.2. Typy fal pływowych.....	7
2.3. Analiza i interpretacja obserwacji pływowych.....	9
2.3.1. Obliczanie pływów.....	9
2.3.2. Pływy Ziemi sztywnej.....	12
2.3.3. Pływy oceaniczne i efekty pośrednie.....	14
2.3.4. Inne czynniki powodujące pływowe zmiany przyspieszenia.....	15
3. Grawimetry nadprzewodnikowe.....	16
3.1. Zasada działania instrumentu.....	16
3.2. Global Geodynamics Project (GGP).....	19
3.3. Wykorzystanie grawimetrów nadprzewodnikowych w badaniach geodynamicznych.....	21
4. Analiza fal pływowych.....	24
4.1. Dane.....	24
4.2. Wyznaczenie parametrów fal pływowych.....	27
4.3. Pośredni efekt oceaniczny.....	30
4.3.1. Modele pływów oceanicznych.....	30
4.3.2. Wyznaczenie poprawionych wartości współczynników grawimetrycznych.....	30
4.4. Analiza wyznaczonych parametrów.....	30
5. Porównanie z modelami geofizycznymi.....	31
6. Podsumowanie.....	32
7. Literatura.....	33
8. Załączniki.....	35

Spis załączników:

Załącznik 1 – Wyrównane parametry fal pływowych

Załącznik 2 – Wartości OTL

1. Wstęp

Pływy ziemskie to ruchy bryły Ziemi wywoływane przez siły pływowe, które są wynikiem różnicowego, grawitacyjnego oddziaływania na Ziemię innych ciał niebieskich, przede wszystkim Księżyca i Słońca. Siły te powodują również zmiany w potencjale grawitacyjnym skutkujące zmianą przyspieszenia siły ciężkości, tzw. pływy grawimetryczne. Obserwowanie takich zjawisk pływowych ma znaczenie w badaniach geofizycznych, ponieważ dostarcza istotną informację o Ziemi oraz pozwala na usunięcie zmian pływowych z innych pomiarów (np. poprawka do obserwacji grawimetrycznych) lub znalezienie pływowej zależności dla innych zjawisk (np. badanie trzęsień Ziemi). Obserwacje pływowe to głównie ciągłe pomiary grawimetryczne lub rejestrowanie zmian położenia punktów.

Treść niniejszej pracy poświęcono opracowaniu obserwacji pływowych pod kątem wyznaczenia współczynników grawimetrycznych. W tym celu wykorzystano dane z 13 stacji, wykonujących ciągłe pomiary grawimetrami nadprzewodnikowymi, udostępniane przez IGETS (*International Geodynamics and Earth Tide Service*), obejmujące obserwacje z roku 2013. Do obliczenia pływów niezbędna jest również równoległa rejestracja zmian ciśnienia atmosferycznego, która służy do wyznaczenia wpływu atmosfery na mierzoną ciężkość. W procesie opracowania obserwacji wykorzystany został również model pływów oceanicznych w celu usunięcia wpływu zmian powodowanych ugięciem skorupy Ziemskiej (*ocean tidal loading*), związanym ze zmianą jej obciążenia.

Tezą niniejszej pracy jest możliwość weryfikacji pływowych modeli Ziemi na podstawie obserwacji z grawimetrów nadprzewodnikowych. Założenie to zostanie potwierdzone poprzez porównanie współczynników grawimetrycznych pochodzących z modeli geofizycznych z wartościami otrzymanymi z pomiaru. Na podstawie tak przeprowadzonej analizy będzie można stwierdzić, czy dokładność wyznaczenia parametrów fal pływowych jest wystarczająca do zweryfikowania modelu oraz w jakim stopniu modele są zgodne z obserwacjami grawimetrycznymi.

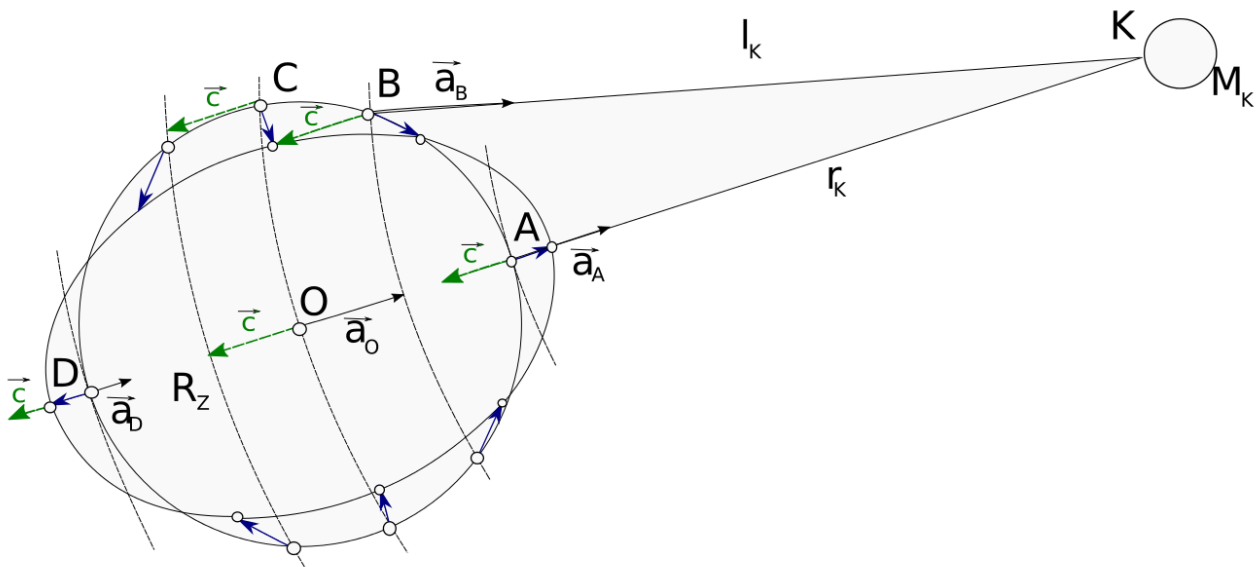
Niniejsza praca składa się z dwóch części: teoretycznej i praktycznej. W pierwszej części opisana jest teoria pływów, w szczególności powstawanie i typy fal pływowych, a także sposoby opracowywania obserwacji pływów grawimetrycznych. Na część teoretyczną składa się również rozdział poświęcony grawimetrom nadprzewodnikowym zarówno pod kątem technicznym, tzn. zasada działania i budowa grawimetru, jak i pod kątem wykorzystania grawimetrów nadprzewodnikowych. Część praktyczna obejmuje opracowanie danych wraz z korektami o efekty pośrednie, analizę wyznaczonych parametrów fal pływowych oraz porównanie ich z modelami geofizycznymi.

2. Zjawiska pływowe

Zmiany pola siły ciężkości Ziemi spowodowane są oddziaływaniem innych ciał niebieskich, w szczególności Księżyca i Słońca i wywołują tzw. zjawiska pływowe. Pływy oceaniczne jako zmiany poziomu morza w zależności od położenia Księżyca znane są od wieków. Te same siły pływowe powodują również deformacje skorupy ziemskiej. Problem pływowych zmian pola siły ciężkości nabiera praktycznego znaczenia wraz z rozwojem satelitarnych technologii pomiarowych.

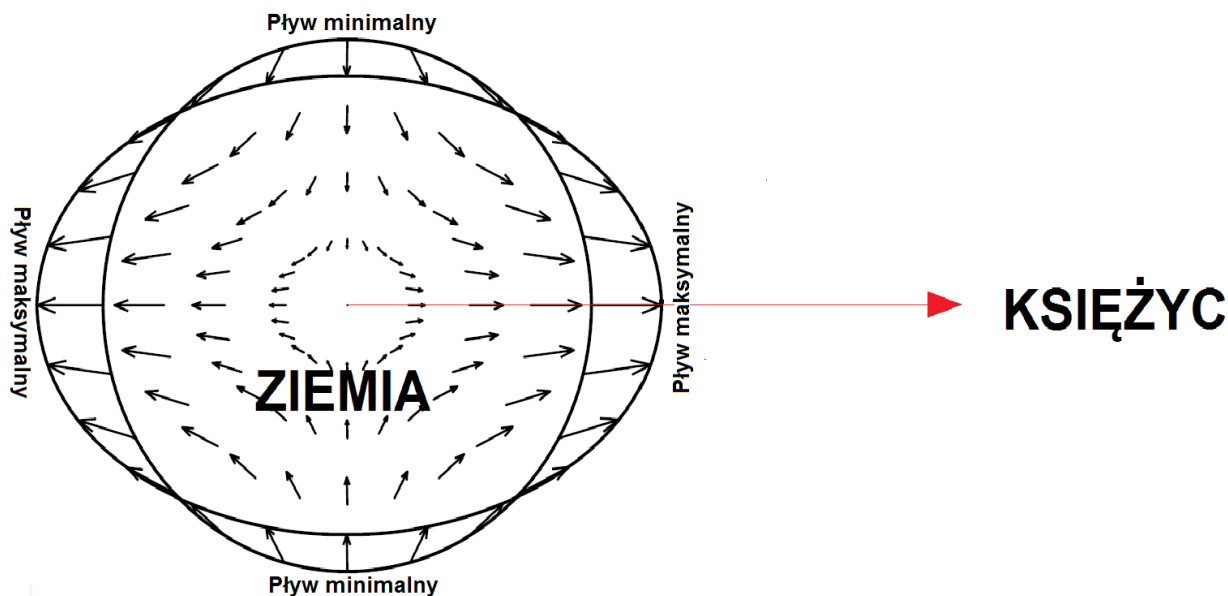
2.1. Siły pływowe i potencjał pływowy

Siłami pływowymi nazywane jest oddziaływanie na Ziemię ciał niebieskich. Powstawanie siły pływowej przedstawiono na rysunku 2.1 na przykładzie układu Ziemia-Księżyc.



Rysunek 2.1: Powstawanie fali pływowej [na podstawie: Czarnecki, 1997]

Można wyróżnić dwa wektorowe pola sił: pole stałe wywołane ruchem obiegowym i pole radialne związane z grawitacyjnym przyciąganiem Księżyca. Zsumowanie wektorów tych pól określa kierunek i zwrot wektorów sił pływowych, natomiast ich długość zależy od odległości punktu na Ziemi od Księżyca, masy Księżyca i rozmiarów Ziemi. Układ tych wektorów (rys. 2.2) obrazuje ogólny charakter zjawiska pływów Ziemi.



Rysunek 2.2: Rozkład wektorów sił pływowych na Ziemi [na podstawie: Agnew, 2007]

Łatwo zauważyć, że wektory fal pływowych są największe w punktach, względem których ciało niebieskie znajduje się w zenicie i nadirze rozpatrywanego punktu. Są to punkty antypodalne, wektory różnią się zwrotem, a wynika to z faktu, że w punkcie położonym najbliżej Księżyca (A na rys. 2.2) wektor przyciągania jest największy, w punkcie D najmniejszy, a dodawane są do nich wektory stałego pola c o przeciwnych względem siebie zwrotach. Dlatego wektory w punktach A i D są równe co do wielkości. Elipsa na powyższych rysunkach przedstawia przekrój powierzchni ekwipotencjalnej utworzonej pod wpływem potencjału pływowego. Rozpatrując oddzielnie oddziaływanie wybranych ciał niebieskich największy efekt siły pływowej (w zenicie i nadirze) w przybliżeniu przedstawia tabela 2.1. Efekt ten oznacza zmianę ciężkości wywołaną przez siłę pływową.

Tabela 2.1: Maksymalne przyspieszenie pływowe na Ziemi [na podstawie: Wenzel, 1997]

Pochodzenie	Efekt pływowy [m/s ²]
Księżyc	$1,37 \cdot 10^{-6}$
Słońce	$0,50 \cdot 10^{-6}$
Merkury	$3,64 \cdot 10^{-13}$
Wenus	$5,88 \cdot 10^{-11}$
Mars	$1,18 \cdot 10^{-12}$
Jowisz	$6,54 \cdot 10^{-12}$
Saturn	$2,36 \cdot 10^{-13}$
Uran	$3,67 \cdot 10^{-15}$
Neptun	$1,06 \cdot 10^{-15}$
Pluton	$7,61 \cdot 10^{-20}$

Wektorowe pole sił pływowych ma potencjał, zwany potencjałem pływowym. Jest on zmienny w czasie, co wynika z faktu, że odległość zenitalna do ciała niebieskiego zmienia się w czasie. W związku z ruchem obrotowym Ziemi i ruchem orbitalnym te zmiany mają charakter cykliczny. Zmienność tę można określić falami pływowymi.

2.2. Typy fal pływowych

Trzy główne typy fal pływowych wynikają z przybliżonego wzoru na potencjał pływowy [Barlik, 1996]:

$$V_p = \frac{3}{4} \frac{G m R^2}{r^3} \left(\cos^2 \varphi \cos^2 \delta \cos 2t + \cos 2\varphi \cos 2\delta \cos t + 3 \left(\sin^2 \varphi - \frac{1}{3} \right) \left(\sin^2 \delta - \frac{1}{3} \right) \right) \quad (1)$$

gdzie:

G – stała grawitacyjna,

M, R – parametry Ziemi: masa, średni promień,

m, r – masa i odległość do ciała niebieskiego,

δ, t – deklinacja i kąt godzinny ciała niebieskiego,

φ – szerokość astronomiczna punktu na powierzchni Ziemi.

Trzy elementy prawej strony powyższego wzoru wyrażają odpowiednio: falę harmoniczną powierzchniową pół-dobową i dobową oraz falę zonalną (strefową).

Pierwszy człon oznacza harmoniczną sektorową i odpowiada za fale pół-dobowe. Pływy te sięgają maksimum na równiku i zero na biegunach. Główne fale pół-dobowe oznaczane są symbolami M2 (główna fala Księżycowa) i S2 (główna fala Słoneczna). Biorąc pod uwagę wyrazy wyższego rzędu V_p można wyróżnić fale związane z ruchem ciał niebieskich po elipsie (fale eliptyczne) oraz ze zmianą nachylenia orbity (fale deklinacyjne) i wiele innych.

Drugi typ fal to fale tesseralne o okresie około dobowym osiągające maksimum dla szerokości 45° . Fale główne oznaczone są symbolami O1 dla Księżyca i P1 dla Słońca. Występują również tesseralne fale eliptyczne i deklinacyjne.

Trzeci typ to długookresowe fale strefowe. Osiągają maksimum na biegunach, a okres zależy od zmiany deklinacji ciał niebieskich. Główne fale to stała zonalna fala Słoneczna i Księżycowa (S0 i M0) o okresach nieskończonych oraz fale Mf i Ssa o okresach odpowiednio 14 dni i 6 miesięcy. Fale długookresowe wynikają również z ruchu perigeum (okres 9 lat) i węzła (okres 18,6 lat) orbity Księżyca.

Istnieją również fale pływowe ter-dobowe (o okresie ok. 8 h) oraz wiele innych o mniejszych okresach, wynikające z harmonicznymi wyższych rzędów. Tabela 2.2. zestawia rząd funkcji harmonicznnej z odpowiadającym jej typem fali pływowej.

Tabela 2.2: Typy fal pływowych [na podstawie: Wenzel, 1997]

Rząd harmonicznej sferycznej	Przybliżony okres fali	Typ
m=0	14 ^d ... 18,6 ^a	fale długookresowe
m=1	24h	fale dobowe
m=2	12h	fale pół-dobowe
m=3	8h	fale ter-dobowe
m=4	6h	
m=5	4,8h	
m=6	4h	

Fale pływową można scharakteryzować wykorzystując liczbę Doodsona. Według *Dictionary of Geophysics, Astrophysics, and Astronomy* jest to liczba wyznaczona przez powiązanie sześciu zmiennych Doodsona ($d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6$) unikalnych dla danego składnika pływu z sześcioma funkcjami astronomicznymi:

- τ – średni czas księżycowy (średni kąt godzinny Księżyca + 12 h) – 24,83 h (okres zmian),
- s – średnia długość Księżyca – 27,3 d,
- h – średnia długość Słońca – 365,25 d,
- p – średnia długość perygeum orbity Księżyca – 8,8 lat,
- $-N'$ - średnia długość węzła wstępującego orbity Księżyca – 18,6 lat,
- p_s – średnia długość perigeum orbity Słońca – 20942 lat.

Przy użyciu tych wielkości można daną falę pływową o częstotliwości ω i fazie β zapisać w postaci:

$$\omega + \beta = d_1 \tau + (d_2 - 5) s + (d_3 - 5) h + (d_4 - 5) p + (d_5 - 5) N' + (d_6 - 5) p_s \quad (2)$$

Pływy długookresowe mają $d_1=0$, dobowe $d_1=1$, a pół-dobowe $d_1=2$. Liczba d_1 wskazują na typ fali np. największa fala pół-dobowa M2 ma liczbę Doodsona 255.555, a największa fala dobową K1 165.555, z kolei fala ter-dobowa M3 355.555. Przykłady fal pływowych przedstawia tabela 2.3.

Tabela 2.3: Przykłady fal pływowych [na podstawie: Wenzel, 1997]

symbol Darwina	Rodzaj	liczba Doodsona	okres [h]
Pływy długokresowe			
S0	Stały pływ Słoneczny	055.555	
M0	Stały pływ Księżycowy	055.555	
Sa	Pływ eliptyczny S0	056.555	8766,15
Ssa	Pływ deklinacyjny S0	057.555	4383,07
Mm	Pływ eliptyczny M0	065.455	661,31
Mf	Pływ deklinacyjny M0	075.555	327,85
Pływy dobowe			
O1	Główny pływ Księżycowy	145.555	25,82
P1	Główny pływ Słoneczny	163.555	24,07
Q1	Pływ eliptyczny O1	135.655	26,87
K1	Pływ deklinacyjny Księżycowo-Słoneczny	165.555	23,93
Pływy pół-dobowe			
M2	Główny pływ Księżycowy	255.555	12,42
S2	Główny pływ Słoneczny	273.555	12,00
N2	Pływ eliptyczny M2	245.655	12,66
K2	Pływ deklinacyjny Księżycowo-Słoneczny	275.555	11,97
Pływy ter-dobowe			
M3	Główny pływ Księżycowy	355.555	8,28

W przypadku pływów dobowych i pół-dobowych deklinacyjna fala Słoneczna i Księżycowa są słabo oddzielane, dlatego wyróżnia się pływy kombinowane Księżycowo-Słoneczne. Katalog fal pływowych obliczył jako pierwszy prawdopodobnie Darwin (1883) i nadał nazwy głównym falom.

2.3. Analiza i interpretacja obserwacji pływowych

Obserwacje pływowe to głównie ciągłe obserwacje grawimetryczne, ale również pomiary zmian położenia punktów. Istnieją różne metody analizy pływów, w których należy uwzględnić wiele czynników wpływających na wartości amplitud i faz fal pływowych.

2.3.1. Obliczanie pływów

Istniejące równania potencjału pływowego wskazują prosty sposób obliczania pływów z wykorzystaniem obserwacji astronomicznych. Pierwszym krokiem jest przekształcenie położenia Słońca i Księżyca w układzie niebieskim (możliwe jest również uwzględnienie planet) do postaci współrzędnych geograficznych punktu na powierzchni Ziemi i odległości do ciała niebieskiego używając odpowiedniej transformacji [IERS Conventions, 2010]. Dokładność bezpośrednich obliczeń zależy wyłącznie od dokładności efemeryd. Taka metoda jest czasem stosowana do wyznaczenia poprawki pływowej do pomiarów grawimetrycznych.

Najbardziej popularnym sposobem, pozwalającym na analizę i predykcję pływów, jest rozkład harmoniczny potencjału pływowego, czego efektem jest opisanie każdej fali za pomocą amplitudy A , częstotliwości f i fazy φ [Wenzel, 1997]. Taka analiza jest możliwa dzięki zastosowaniu szybkiej transformaty Fouriera (FFT) lub wyrównaniu metodą najmniejszych kwadratów i podlegają jej obserwacje grawimetryczne.

Transformata Fouriera prowadzi do analizy spektralnej zjawiska. Jest to przekształcenie liniowe zbioru danych (sygnału) w dziedzinie czasu do sygnału w dziedzinie częstotliwości. Obserwacje pływowe mają charakter dyskretny i zawierają w sobie wiele częstotliwości, dlatego wykorzystuje się dyskretne przekształcenie Fouriera. Polega ono na tym, że dla każdego sygnału wejściowego wyznaczone są współczynniki, reprezentujące go w dziedzinie częstotliwości, a więc jest to częstotliwość i amplituda. Takie przekształcenie jednak jest mało efektywne, ponieważ nie zmienia rozmiaru analizowanych danych (ilość sygnałów odpowiada ilości ich odpowiedników po przekształceniu), dlatego stosuje się modyfikację tego algorytmu w postaci Szybkiej transformaty Fouriera.

Wykorzystując FFT można uzyskać widmo fal, prezentujące ogólny charakter zjawiska pływów. Jednak technika ta nie pozwala na precyzyjne analizy, ponieważ nie jest możliwe wyznaczenie faz poszczególnych fal.

Tego typu analizy wykorzystują katalogi potencjału pływowego, czyli tabele zawierające wartości amplitud, częstotliwości i faz dla poszczególnych fal pływowych. Obecnie dostępnych jest kilka takich katalogów, różniących się liczbą wyszczególnionych fal oraz dokładnością (tabela 2.4)

Tabela 2.4: Katalogi potencjału pływowego [Wenzel, 1997]

autor	data	liczba fal	dokładność [nm/s ²]
Doodson	1921	377	1,0408
Cartwright	1971,1973	505	0,3844
Büllesfeld	1985	656	0,2402
Tamura	1987	1200	0,0834
Xi	1989	3070	0,0642
Tamura	1993	2060	0,0308
Roosbeek	1996	6499	0,0200
Hartmann, Wenzel	1995a,b	12935	0,0014
Kudryavtsev	2004	28806	0,0003

Podana w powyższej tabeli dokładność oznacza błąd pływów grawimetrycznych obliczonych z danego katalogu potencjału w porównaniu z wzorcem BFDE403A (pływy grawimetryczne z interwałem godzinny obliczone z efemeryd DE403). Najdokładniejszym i najczęściej używanym jest

catalog Hartmann-Wenzel. Kudryavtsev [2004] opracował katalog zawierający 28806 fal pływowych, ale przy obecnej dokładności pozyskiwania danych pływowych nie jest wymagana, aż tak duża liczba fal.

Najpowszechniejszą metodą analizy pływów grawimetrycznych jest metoda opracowana przez Chojnickiego [1973] i udoskonalona przez Schuellerera [1976] i Wenzla [1996], która wykorzystuje wyrównanie metodą najmniejszych kwadratów do estymacji parametrów fal pływowych. Faza i współczynnik grawimetryczny nie mogą być wyznaczone dla każdej fali wyszczególnionej w katalogu potencjału pływowego, dlatego są obliczane dla grup fal zestawionych wg kryterium Rayleigha. Ta metoda wykorzystywana jest w pakiecie programów ETERNA. Pozwala ona na analizę niemal nieograniczonej liczby danych pływowych różnego rodzaju. Model wyrównania w tej metodzie wygląda następująco [Xu, 2010]:

$$l(t) + v(t) = \sum_{j=1}^q (X_j C O_j + Y_j S I_j) + \sum_k D_k T_k(t_n) + \sum_m R_m z_m(t) \quad (3)$$

gdzie: $l(t)$ – sygnał obserwowany, $v(t)$ – poprawka do obserwacji, X_j, Y_j – zależności liniowe nieznanych parametrów (amplituda, faza), CO_j, SO_j – współczynniki związane z teoretycznymi wartościami amplitudy i fazy, D_k, T_k – parametry i współczynniki związane z wyznaczeniem dryftu, R_m, z_m – parametry i współczynniki regresji.

Zalety metody najmniejszych kwadratów, w stosunku do FFT są następujące:

- serie obserwacji mogą zawierać nieciągłości,
- możliwe jest wykrycie błędów grubych, błędów systematycznych (np. dryft), ale również efektów niemodelowanych (związanych np. z wpływem jądra Ziemi),
- dostarcza informację o średnim błędzie zarówno obserwacji jak i wyznaczanych parametrów.

W dobie współczesnych komputerów stosuje się metody o większej złożoności obliczeniowej niż FFT, ale również oparte na transformacie Fouriera, np. periodogram Lomby-Scargla.

2.3.2. Pływy Ziemi sztywnej

Aby opisać reakcje Ziemi na działanie sił pływowych należy przyjąć pewien model. Zaburzenia równowagi oceanów stanowią mniej niż 1/3 zjawisk pływowych [Agnew, 2007]. Dlatego, żeby dobrze opisać inne efekty należy w pierwszym kroku przyjąć model zakładający brak oceanów, a następnie dodać do tego efekty związane z pływami oceanicznymi. Zniekształcenie Ziemi pod wpływem sił pływowych opisują liczby Love'a.

Pierwsza liczba Love'a oznaczana jako h określa stosunek rzeczywistego przemieszczenia elementu masy Ziemi wzdłuż promienia wodzącego, w stosunku do przemieszczenia elementu masy Ziemi płynnej. Liczba ta przyjmuje wartość od 0 (dla Ziemi sztywnej) do 1 (dla Ziemi płynnej).

Stosunek potencjału deformacyjnego do potencjału pływowego jest oznaczany przez k i nazywany drugą liczbą Love'a. Potencjał deformacyjny V_D jest opisywany jako zmiana potencjału pływowego wywołana zmianą rozkładu mas Ziemi w wyniku naprężeń pływowych.

Miernikiem reakcji Ziemi jest też l , czyli liczba Shidy. Jest to stosunek przemieszczenia poziomego elementu masy Ziemi do jego odpowiednika na Ziemi płynnej. Dla liczb Love'a i Shidy zakłada się jednorodność modelu i izotropię warstw poziomych, w związku z tym l zmienia się wraz z głębokością.

Przykładowo, dla standardowego modelu Ziemi PREM (*Preliminary Reference Earth Model*) [Dziewonski i Anderson, 1981] liczby te przyjmują wartości $h_2=0,6032$, $k_2=0,2980$, $l_2=0,0839$ i niewiele różnią się w porównaniu ze starszym modelem Ziemi Gutenberga-Bullena, dla którego wynoszą $h_2=0,6114$, $k_2=0,3040$, $l_2=0,0832$. Indeks przy oznaczeniach, wynika z tego jaki rząd harmonicznym sferycznym został wykorzystany do obliczenia tych wartości. Wszystkie trzy liczby h , k i l w dalszej części pracy dla uproszczenia będą nazywane liczbami Love'a.

Najłatwiej opisać reakcje Ziemi na potencjał pływowy dla modelu SNREI (*Spherical, Non-Rotating, Elastic and Isotropic*). Za pomocą pewnych kombinacji liczb Love'a można scharakteryzować zmiany ciężkości, wysokości, odchylenia pionu i przemieszczenia poziome mas Ziemi.

Pływowe zmiany przyspieszenia siły ciężkości oraz pływowa zmiana wysokości powierzchni ekwipotencjalnej mogą być opisane z użyciem tzw. współczynników amplitudy fal pływowych, czyli δ – współczynnik grawimetryczny i γ – współczynnik niwelacyjny [Agnew, 2007]. Dla modelu PREM wynoszą $\delta_2=1,1562$, $\gamma_2=0,6948$. Mogą być one wyznaczone za pomocą liczb Love'a:

$$\delta = 1 - \frac{3}{4}k + h \qquad \gamma = 1 + k - h \qquad (4, 5)$$

Natomiast zmianę wysokości Δh i zmianę ciężkości Δg można wyznaczyć w przybliżeniu jako:

$$\Delta h = \gamma \frac{V}{g} \qquad \Delta g = \delta \frac{2V}{R} \qquad (6, 7)$$

Wykorzystując liczbę Shidy i warunki jakie jej wprowadzenie narzuca na model można wyznaczyć dwa pozostałe efekty zjawisk pływowych. Zmianę odchylenia pionu opisuje się za pomocą wzoru [Czarnecki, 1997]:

$$\delta\theta = -\lambda\theta = -(1+k-l)\theta \qquad (8)$$

Zmiany odchylenia pionu wywołują zmiany szerokości geograficznej do 0,01". Parametr Λ jest zwany współczynnikiem astronomicznym.

Przemieszczenia poziome na powierzchni Ziemi najłatwiej zdefiniować we współrzędnych sferycznych wykorzystując liczby h i l :

$$u_r = \frac{hV}{g} \quad u_\varphi = \frac{l}{g} \frac{\partial V}{\partial \varphi} \quad u_\lambda = \frac{l}{g \sin \varphi} \frac{\partial V}{\partial \lambda} \quad (9, 10, 11)$$

Z kolei z przyjęcia modelu Ziemi w kształcie zbliżonym do elipsoidy i wirującej wokół własnej osi wynikają następujące konsekwencje [Wang, 1997]:

1. Rotacja i elipsoidalny kształt powoduje swobodną oscylację w jądrze oraz w płaszczu Ziemi. Jest to zjawisko zwane swobodną nutacją jądra NDFW (około dobowe drgania swobodne – *nearly diurnal free wobble*). Jego częstotliwość jest bliska pasmu pływów dobowych i powoduje okresową zmianę liczb Love'a. Pływy dobowe powodują też zmianę osi obrotu Ziemi (precesja i nutacja), w związku z tym wpływają również na nutację jądra.
2. Elipsoidalność i rotacja wymusza wykorzystanie wyższego stopnia harmonicznych sferycznych i nadaje deformacjom charakter toroidalny. W rezultacie liczby Love'a są zależne od szerokości geograficznej.
3. Niepełna elastyczność płaszcza Ziemi powoduje wzrost amplitudy i opóźnienie fazy reakcji bryły Ziemi. Jest to efekt zanedbywalny ponieważ zmienia obie liczby Love'a w równym stopniu, w związku z czym zmiana współczynnika grawimetrycznego jest niemal zerowa.

W celu uwzględnienia tych efektów można użyć stabilaryzowanych wartości liczb Love'a dla konkretnych harmonicznych lub posłużyć się analityczną aproksymacją zgodnie ze standardami IERS.

2.3.3. Pływy oceaniczne i efekty pośrednie

Obserwacje pływów Ziemi zawierają w sobie sygnały powodowane przez pływy oceaniczne. Zjawisko okresowych zmian poziomu mórz i oceanów jest znane od dawna, jednak modelowanie pływów oceanicznych jest trudniejsze niż pływów ziemi sztywnej. Powodem tych trudności jest konieczność posiadania szczegółowych informacji o głębokości dna, szczególnie na niespokojnych wodach, gdzie występują wysokie fale. Tego typu dane pozyskiwane są głównie z altimetrii satelitarnej. Dzięki temu obecnie istnieją globalne modele pływów oceanicznych. Dla niektórych zbiorników wodnych, gdzie oscylacje poziomu wód są bardzo duże (np. Zatoka Fundy, na której odnotowano rekordowe wysokości pływu) modele globalne nie są adekwatne i tworzy się modele lokalne. Do obliczania efektów pośrednich są one potrzebne tylko w przypadku danych zbieranych blisko brzegu danego zbiornika, w pozostałych przypadkach wystarczające są modele globalne.

Wyróżnia się dwa pośrednie efekty oceaniczne, czyli zmiany przyspieszenia siły ciężkości powodowane przez pływy oceaniczne. Pierwszy efekt wynika ze zmian rozkładu mas wód w morzach i oceanach na skutek pływu i dotyczy głównie punktów obserwacyjnych położonych blisko brzegu (część newtonowska). Jednak zmienne obciążenie skorupy ziemskiej jest też przyczyną jej ugięcia, które wpływa na przyspieszenie także w głębi kontynentu (drugi efekt – *loading*).

Obliczenie efektów oceanicznych odbywa się w trzech krokach [Jentzsch, 1997]:

1. Obliczenie liczb Love'a związanych z warunkami brzegowymi na obciążenie powierzchni (*load Love numbers*) przez sumowanie harmonicznych sferycznych wyższych stopni. Farrel [1972] wyznaczył je do stopnia $n=10000$.
2. Całkowanie funkcji Greena. Istnieją tabularyzowane wartości funkcji Greena dla różnych modeli Ziemi, np. opracowane przez Farrela [1972] dla Ziemi Gutenberga lub Jentzscha [1997] dla PREM.
3. Złożenie scałkowanych wartości funkcji Greena z modelem oceanu i skorygowanie wartości amplitud i faz głównych fal pływowych.

2.3.4. Inne czynniki powodujące pływowe zmiany przyspieszenia

Pozostałe elementy jakie trzeba uwzględnić przy grawimetrycznym obserwowaniu pływów to wpływ atmosfery i ruchu bieguna.

Barlik [1996] opisuje dwa efekty wpływu atmosfery na przyspieszenie siły ciężkości. Zmiana ciśnienia w stosunku do warunków normalnych wpływa na zmianę przyspieszenia i ten efekt jest eliminowany przez zastosowanie poprawki do obserwacji grawimetrycznych. Ponadto zmiana ciśnienia atmosferycznego oznacza zmianę rozkładu mas powietrza i podobnie jak w przypadku oceanów powoduje deformacje skorupy ziemskiej. To zjawisko nazywane jest pośrednim efektem atmosferycznym. Pływy atmosferyczne oblicza się analizując zmiany ciśnienia metodą najmniejszych kwadratów.

Ruch bieguna jest przyczyną zmiany odległości punktu obserwacyjnego od osi obrotu, w związku z tym również zmianę siły odśrodkowej. Wywołuje to efekt podobny do przyciągania ciał zewnętrznych, dlatego traktowane jest jako pływ [Wang, 1997]. Największe pływy biegunowe pochodzą z największego ruchu bieguna czyli nutacji Chandlera o okresie 14 miesięcy. Maksymalne zmiany wysokości wynoszą kilka centymetrów. Ten efekt jest uwzględniany przy badaniu pływowych przemieszczeń poziomych, a w przypadku pływów oceanicznych jest praktycznie bez znaczenia.

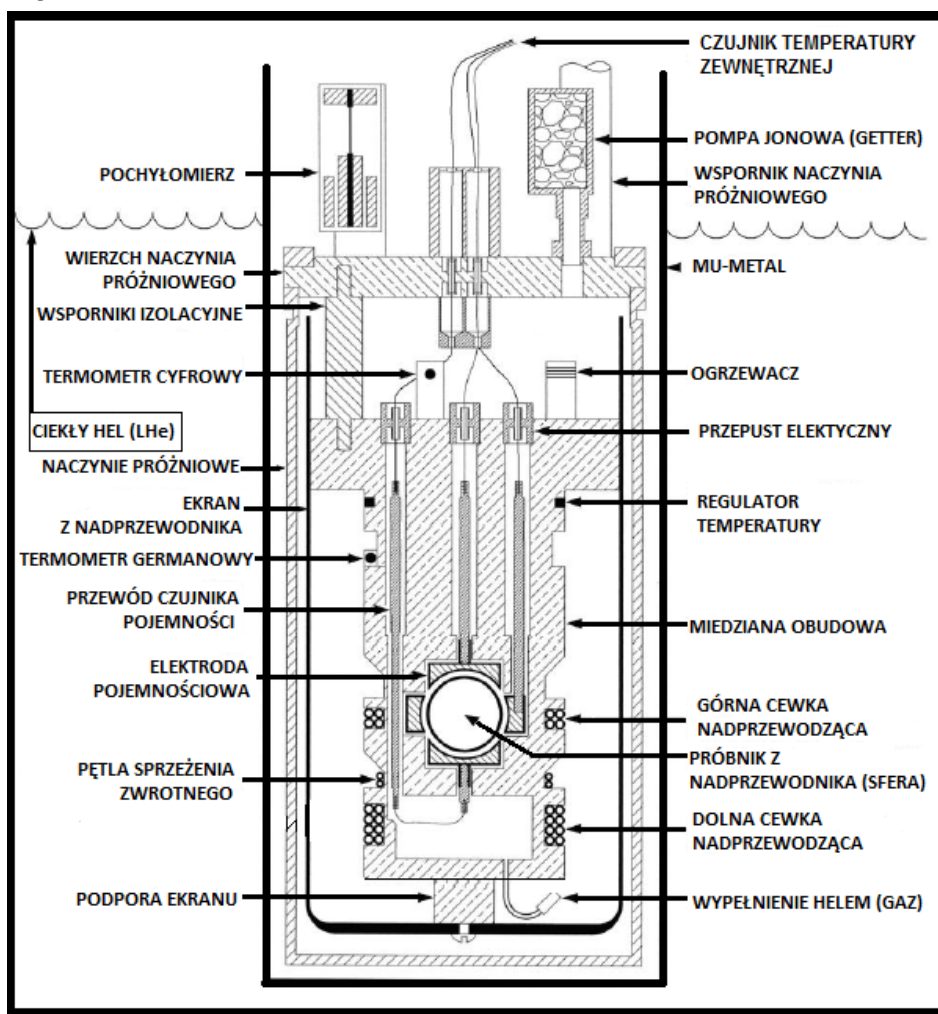
Jest też wiele czynników powodujących niepływową zmianę ciężkości takie jak aktywność wulkaniczna, ruchy tektoniczne, zmiany poziomu wód gruntowych czy ruch środka masy Ziemi. Przy analizowaniu pływów te efekty są zaniedbywane lub eliminuje się obciążone nimi obserwacje.

3. Grawimetry nadprzewodnikowe

Nadprzewodnik [Czyżak i Stankowski, 1999] to metal, który poniżej pewnej krytycznej temperatury (zwanej temperaturą przejścia) wykazuje zerową rezystancję. Podczas przejścia w stan nadprzewodzący dochodzi do zaniku (wypchnięcia z objętości) pola magnetycznego (efekt Meisnera), dzięki czemu namagnesowane ciało może lewitować nad nadprzewodnikiem. Zjawisko nadprzewodnictwa wykorzystywane jest w wielu dziedzinach nauki i techniki, w tym również grawimetrii.

3.1. Zasada działania instrumentu

Pierwszy grawimetr nadprzewodnikowy został skonstruowany w 1986 roku na Uniwersytecie w San Diego przez Prothero i Goodkind'a. Od tego czasu konstrukcja instrumentu została udoskonalona, ale podstawowa zasada działania nie uległa zmianie. Budowa grawimetru zostanie szczegółowo opisana na przykładzie instrumentu firmy GWR Instruments, Inc. Schemat konstrukcji przedstawia rysunek 3.1.



Rysunek 3.1: Schemat budowy grawimetru nadprzewodnikowego [na podstawie: *Operating Principles of the SG Meter*]

Trzy główne elementy grawimetru wykonane z nadprzewodnika to masa próbna w kształcie sfery, dwa solenoidy oraz ekran magnetyczny. Sfera o średnicy ok. 2,5 cm lewituje w zewnętrznym polu magnetycznym wytwarzanym przez prąd przepływający przez cewki, wykazujące właściwości nadprzewodzące poniżej temperatury 9,2 K. Powstałe w ten sposób pole magnetyczne charakteryzuje się wysoką stabilnością, która wynika z zerowej rezystancji nadprzewodnika. Masa próbna zmienia położenie wraz ze zmianą siły ciężkości, co z kolei determinuje zmianę pojemności elektrycznej układu. Specjalne elektrody wykrywają tę zmianę i przetwarzają ją na impuls elektryczny. Układ sprzężony zwrotny przywraca sferę do pierwotnego położenia i zwraca informację o zmianie natężenia na kondensatorze, które bezpośrednio świadczy o zmianie siły ciężkości.

W związku z tym, że proces oparty jest na zjawisku lewitacji w polu magnetycznym ważna jest izolacja od pola magnetycznego Ziemi, którą zapewnia zastosowany ekran magnetyczny wykonany z nadprzewodnika oraz osłona z MU-metalu [www.mu-metal.com]. Jest to stop niklu i żelaza z domieszką miedzi i molibdenu skuteczny przy ekranowaniu wielozmiennych pól magnetycznych.

Istotne jest również utrzymanie stałej bardzo niskiej temperatury. Jest to osiągnięte za pomocą systemu wymiany ciepła złożonego z termometrów, czujników i regulatorów, a także przede wszystkim ze zbiornika z ciekłym heliem (o temperaturze ok. 3-5 K), w którym zanurzona jest większość aparatury.

Wysoka czułość pomiaru wynika z faktu, że nawet małe zmiany ciężkości powodują wyraźną zmianę położenia sfery. Prąd płynący w obu cewkach wyrównuje się tak, że zmiany pola magnetycznego są bardzo małe i można przyjąć, że na położenie masy próbnej wpływa wyłącznie pole grawitacyjne. System pomiarowy znajduje się w komorze próżniowej.

Opisany instrument jest wykorzystywany jako grawimetr stacjonarny. Poza znacznymi rozmiarami i wagą konstrukcji do użytkowania wymagana jest izolacja od wibracji podłoża (obudowa), chłodziarka służąca utrzymaniu helu w stanie ciekłym (rys. 3.2) oraz komputer odczytujący i rejestrujący zmiany ciężkości.



Rysunek 3.2: Instrument iGrav SG Meter [www.gwrinstruments.com]

Grawimetry nadprzewodnikowe, podobnie jak inne grawimetry względne muszą być kalibrowane [Hinderer i Crossley, 2004]. Bezpośrednio mierzoną wielkością jest napięcie, podczas kalibracji należy więc wyznaczyć precyzyjnie jej zależność od przyspieszenia grawitacyjnego. Oddzielnie kalibruje się amplitudę i fazę. Kalibracji amplitudy dokonują się przez porównanie pomiarów z grawimetrem absolutnym, natomiast współczynnik kalibracji fazy wyznacza się dzięki podłączeniu innego (znanego napięcia) i wyznaczenie opóźnienia fazowego obu fal.

Instrumenty te charakteryzują się znikomym dryftem, ponieważ nie występują żadne mechaniczne elementy utrzymujące masę próbną, które mogłyby ulegać jakimś zmianom. Parametry techniczne instrumentu prezentuje poniższa tabela.

Tabela 3.1: Specyfikacja techniczna instrumentu iGrav SG Meter [na podstawie: www.gwrinstruments.com]

Masa próbna	Sfera z niobu (Nb)
Średnica masy próbnej	2,54 cm
Wysokość	102 cm
Średnica	36 cm
Waga	30 kg
Objętość	16l ciekłego helu (LHe)
Obudowa	średnica - 55 cm, waga – 7 kg 21,5 in
Temperatura otoczenia (w celu poprawnego działania)	od 4 do 38 °C
Precyzja odczytu	1 η Gal (10^{-3} μ Gal)
Dryft	poniżej 10.5 μ Gal/miesiąc
Kalibracja	Współczynnik kalibracji pozostaje stabilny przez ok 1 rok
Zużycie prądu	Poniżej 1,4 KW, 100-220 VAC, 50/60 Hz

Pierwszy w Polsce grawimetr nadprzewodnikowy został zainstalowany w Obserwatorium Geodezyjno - geofizycznym Borowa Góra w kwietniu 2016 r. Jest to instrument iGrav i ma posłużyć badaniom w zakresie grawimetrii i metrologii grawimetrycznej [www.igik.edu.pl].

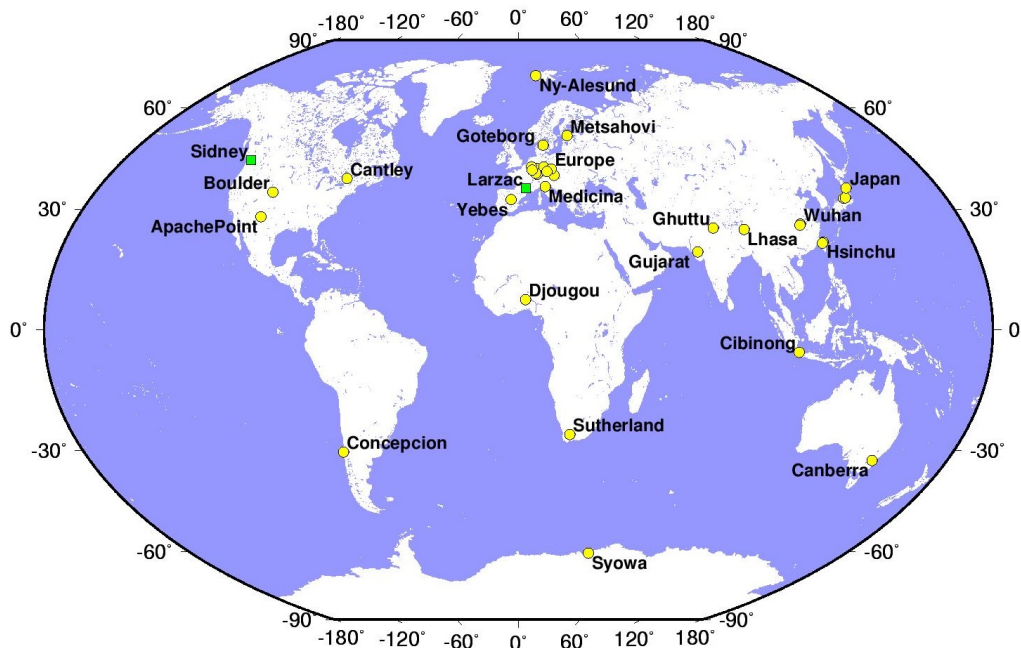
Wykorzystanie grawimetrów nadprzewodnikowych nie ogranicza się tylko do stacjonarnych pomiarów pływowych. Produkowane są również precyzyjne instrumenty przenośne. W tym przypadku dryft jest nieco wyższy, do 1 μ gal/tydzień.

3.2. Global Geodynamics Project (GGP)

Projekt GGP działa od 1997 roku i został włączony do Międzynarodowej Asocjacji Geodezji (IAG) podczas Generalnego Zgromadzenia Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki (IUGG) w Sapporo w 2003 roku. Od tego czasu funkcjonuje jako wspólny projekt komisji 2. i 3. (*The Gravity Field – Pole grawitacyjne* oraz *Earth Rotation and Geodynamics – Ruch obrotowy Ziemi i Geodynamika*).

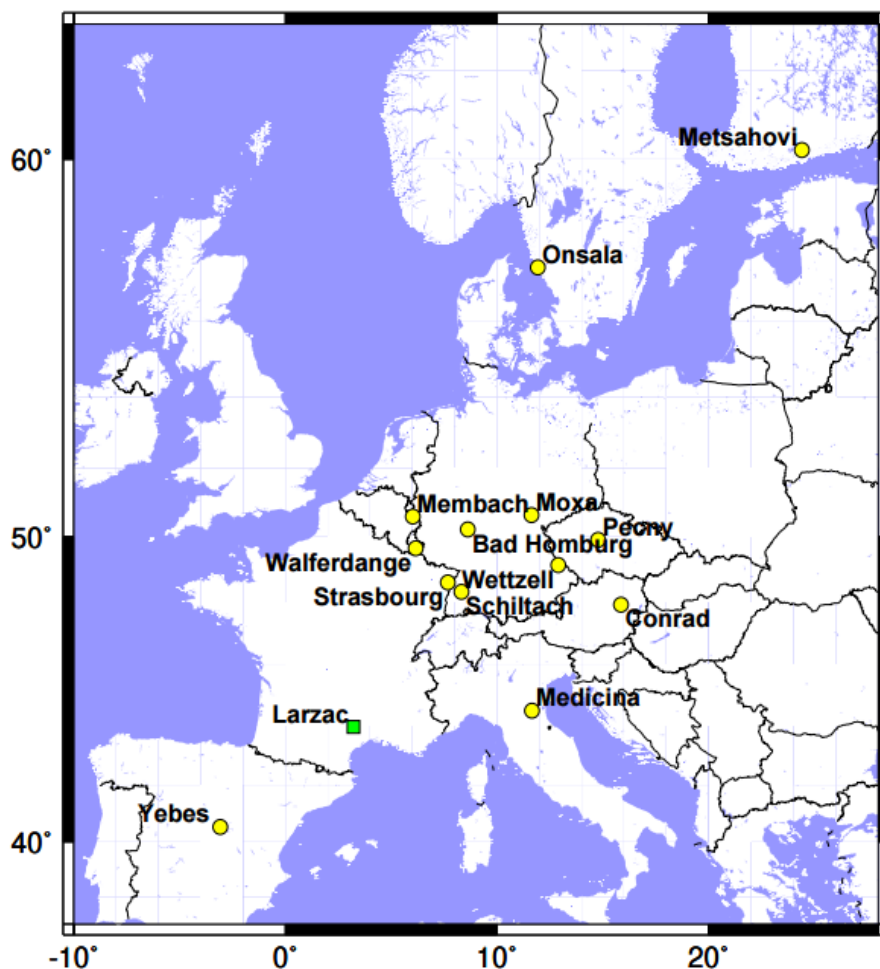
Głównym celem projektu jest badanie pola grawitacyjnego Ziemi z dużą dokładnością w oparciu o światową sieć stacji grawimetrów nadprzewodnikowych (rys. 3.3). Na każdym z kontynentów jest przynajmniej jedno obserwatorium wyposażone w tego rodzaju instrument, a najwięcej jest ich w Europie (rys. 3.4). Niektóre europejskie państwa mają więcej niż jedną stację pomiarów grawimetrem nadprzewodnikowym (np. Niemcy).

Poniższe rysunki przedstawiają rozmieszczenie stacji GGP na świecie z wyniesieniem obszaru Europy środkowej (ze względu na dużą gęstość punktów). Mapy te są aktualne na rok 2013, kolorem żółtym zaznaczono stacje już istniejące, a zielonym nowo powstałe.



Rysunek 3.3: Rozmieszczenie stacji GGP na świecie [www.eas.shu.edu/GGP]

Pokrycie stacjami na półkuli południowej jest dużo słabsze, ponadto większość z nich została zainstalowana przez członków GGP z Japonii (stacje w Australii, Indonezji i Antarktydzie) i Niemiec (Ameryka Południowa i RPA). Można wyróżnić dwie regionalne grupy stacji: europejską (rys. 3.4) i japońską, w której skład wchodzi stacje Misuzawa, Kamioka i Matsushiro.



Rysunek 3.4: Rozmieszczenie stacji GGP w Europie [www.eas.slu.edu/GGP]

Obserwatoria pracują niezależnie, a miesięczne zbiory danych są przesyłane do Centrum Danych w ICET (*International Center of Earth Tides*), znajdującego się obecnie na Tahiti (Polinezja Francuska). Przynajmniej dwa razy w roku każdy grawimetr nadprzewodnikowy jest sprawdzany grawimetrem absolutnym w celu kalibracji i wyznaczenia dryftu instrumentu.

Celem projektu GGP jest również utrzymywanie standardów pomiarów grawimetrami nadprzewodnikowymi, poprzez kontrolowanie działania instrumentów, umiejscawianie nowych stacji, zbieranie danych, wydawanie wytycznych do grawimetrów. Działania te są uzgadniane ze wszystkimi członkami GGP.

W przyszłości sieć stacji GGP może służyć walidacji lub kalibracji systemów satelitarnych przeznaczonych do badania pola grawitacyjnego Ziemi. Taki eksperyment przeprowadzono z systemami CHAMP i GRACE. Ponadto stacje GGP mogą dostarczać informacje dotyczące dynamiki jądra zewnętrznego Ziemi, które są potrzebne w badaniach geodynamicznych technikami kosmicznymi VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) i SLR (*Satellite Laser Ranging*).

Obecnie stacje grawimetrów nadprzewodnikowych nie funkcjonują już jako GGP. Podczas generalnego zgromadzenia Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki w Pradze w 2015 roku postanowiono, że działaniami dotychczasowego GGP będzie zajmowało się IGETS (*International Geodynamics and Earth Tide Service*) i przejmie również zadania ICET.

Projekt GGP opisano na podstawie oficjalnych stron internetowych GGP [www.eas.slu.edu/GGP], ICET [www.upf.pf/ICET], IAG [www.iag-aig.org] oraz IGETS [www.igets.u-strasbg.fr].

3.3. Wykorzystanie grawimetrów nadprzewodnikowych w badaniach geodynamicznych

Obserwacje z sieci stacji grawimetrów nadprzewodnikowych skupionych w GGP służą do wielu badań geodynamicznych [www.eas.slu.edu/GGP]. Rozpatrywanymi zagadnieniami są:

- swobodne drgania i pływy Ziemskie,
 - fale grawitacyjne w jądrze Ziemi,
 - pływy oceaniczne,
 - niepływowe efekty oceaniczne i hydrologiczne,
 - wpływ atmosfery na pole grawitacyjne,
 - ruch obrotowy Ziemi i ruch bieguna,
 - zmiany grawitacyjne związane z ruchami płyt tektonicznych,
 - trzęsienia Ziemi
- i inne.

Grawimetry nadprzewodnikowe umożliwiają zarówno badanie pływów ziemskich, jak również procesów sejsmicznych o głównych częstotliwościach fal od 10^{-5} Hz do 5 mHz. Głównymi instrumentami w wykrywaniu trzęsień Ziemi pozostają tradycyjne sejsmografy, ale obserwacje grawimetryczne umożliwiają, na podstawie fal sejsmicznych, badania swobodnych oscylacji Ziemi.

Wysoka czułość i precyzja pomiarów grawimetrami nadprzewodnikowymi pozwala na dokładne badanie zjawisk pływowych [Rosat i in, 2004], w tym wykrycie fal o małych amplitudach, mniejszych niż szum pomiarowy innych grawimetrów pływowych (np. nieliniowe pływy oceaniczne), jak również fal o długich okresach (Mf, Mm, Ssa, Sa) ze względu na dużo mniejszy dryft niż w instrumentach mechanicznych. Lepsze wykrywanie pływów dobowych umożliwia lepsze badanie swobodnej nutacji jądra Ziemi.

Wykrycie wewnętrznych fal grawitacyjnych w jądrze Ziemi jest możliwe dzięki globalnym długookresowym obserwacjom. Oddzielenie lokalnych zmian grawitacyjnych od spójnych sygnałów globalnych pozwala na uzyskanie informacji o równowadze mechanicznej w płynnym jądrze Ziemi, istotnej w teorii geodynamo. Według tej hipotezy pole magnetyczne Ziemi jest wywoływane przez prądy konwekcyjne w jądrze zewnętrznym.

Obserwacje z sieci GGP są używane nie tylko do badań pływów ziemskich, ale również oceanicznych. Rozpatruje się różne aspekty pływów oceanicznych w paśmie dobowym i pół-dobowym z użyciem różnych modeli pływowych i danych dostarczonych z altimetrii satelitarnej. Pływy oceaniczne są trudniejsze do modelowania i nie ma jednego modelu dobrego dla całego globu. Dzięki danym z grawimetrów nadprzewodnikowych można zweryfikować te modele dla danego obszaru oraz ulepszać je przez wprowadzenie dla Ziemi sztywnej poprawnych wartości współczynnika grawimetrycznego i opóźnienia fazowego. Użycie metod oceanograficznych przy opracowaniu obserwacji grawimetrycznych umożliwia wykrycie nieliniowych pływów oceanicznych (fale o małych amplitudach).

Pomiary wykonywane na stacjach GGP pozwalają również na obserwacje zjawisk o niepływowym charakterze, np. zmiany poziomu morza [Hinderer i Crossley, 2004]. Porównanie danych grawimetrycznych z danymi z innych źródeł, takich jak mareografy, stacje meteorologiczne itp. jest pomocne w wyjaśnianiu powodów zmian poziomu morza (procesy polodowcowe, ruchy płyt tektonicznych, globalne ocieplenie itp.). Badanie lokalnych zmian w hydrosferze również wiąże się z pomiarami pływowymi. Modelowaniu podlega związek zmian ciężkości m. in. z poziomem wody gruntowej, opadami czy wilgotnością gleby.

Na każdej stacji GGP poza przyspieszeniem siły ciężkości rejestrowane jest również ciśnienie. Wspólne opracowanie tych pomiarów jest istotne przy obserwowaniu okresowych procesów zachodzących w atmosferze i ocenie wpływu ciśnienia i rozkładu mas atmosfery na pole grawitacyjne Ziemi.

Zmiana orientacji osi obrotu Ziemi wywołuje zmiany pola siły ciężkości. Badanie tego efektu wymaga globalnego rozmieszczenia stacji pomiarowych. Ruch bieguna złożony jest z dwóch podstawowych komponentów, jeden o okresie 435 dni (drżania Chandlera) i drugi roczny. Współrzędne bieguna są monitorowane za pomocą technik kosmicznych przez IERS, co pozwala na zweryfikowanie, zaobserwowanych przez grawimetry nadprzewodnikowe, zmian ciężkości o okresie Chandlera. Aby wyróżnić je od tych o charakterze rocznym potrzeba co najmniej 6,5 roku ciągłych pomiarów. Takie obserwacje zostały wykonane na tylko jednej stacji GGP. Podobne badania pozwolą na estymację zmian ciężkości związanych z ruchem bieguna.

Obserwacje pływowe są również wykorzystywane do monitorowania długoterminowych zmian grawitacyjnych wywołanych aktywnością tektoniczną i związanych z nimi deformacji. Ponadto grawimetry nadprzewodnikowe są jedynymi instrumentami umożliwiającymi jednoczesną obserwację trzęsień ziemi i ruchów tektonicznych. Doskonale wykrywają również wolne i słabe trzęsienia Ziemi.

Pomiary na stacjach sieci GGP zostały wykorzystane przy eksperymencie testowania teorii grawitacji [Shiomi, 2008]. W przeciwieństwie do ogólnej teorii względności, istnieją takie, które dopuszczają anizotropowy charakter stałej grawitacyjnej G . Zmienność G wykryto w pomiarach laboratoryjnych, ale powodowane przez to efekty pływowe mogą być wyznaczone za pomocą grawimetrów nadprzewodnikowych. Instrumenty te użyto też do detekcji fal grawitacyjnych i badania innych elementów teorii grawitacji.

Usytuowanie grawimetru nadprzewodnikowego w odpowiednim miejscu może usprawnić działanie innych precyzyjnych technik geodezyjnych np. VLBI, a stacje przybrzeżne mogą dostarczać dodatkowych informacji o poziomie morza. Instrumenty te znajdują zastosowanie w modelowaniu różnych lokalnych efektów sezonowych (rocznych lub półrocznych).

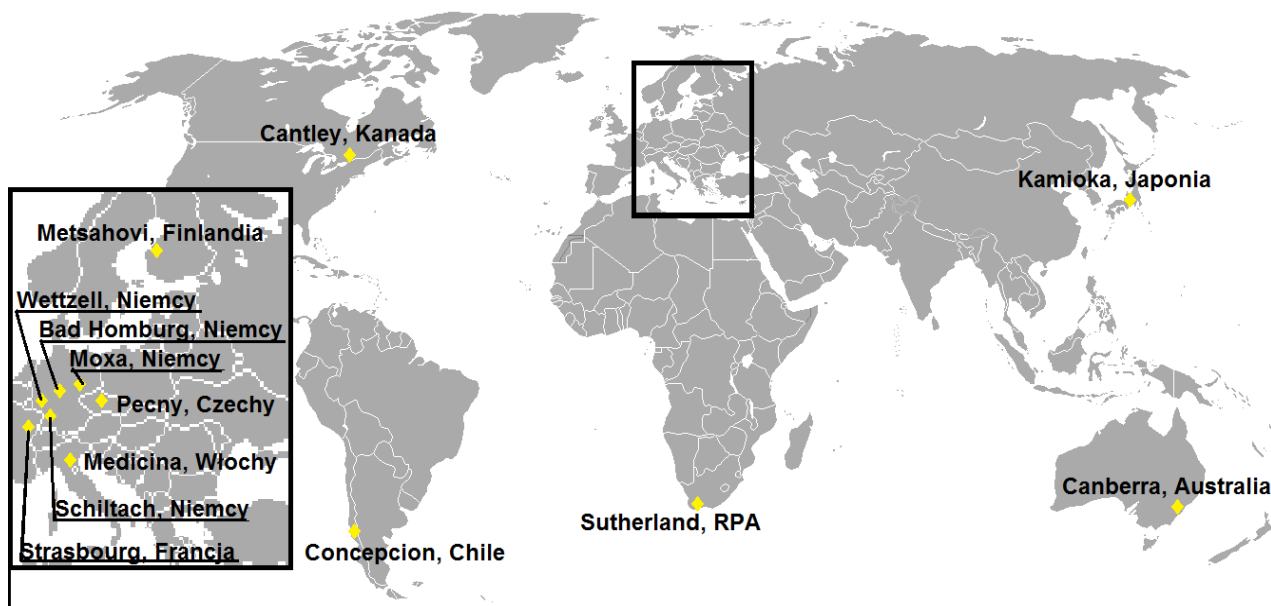
4. Analiza fal pływowych

W tym rozdziale grawimetryczne obserwacje pływowe pochodzące z sieci grawimetrów nadprzewodnikowych zostaną poddane szeregowi obliczeń prowadzących do wyznaczenia współczynników grawimetrycznych i przesunięć fazowych głównych fal pływowych, a także porównaniu ich wartości w różnych punktach obserwacyjnych.

4.1. Dane

Niniejsza analiza pływów oparta jest na danych udostępnianych przez serwis ISDC (Information System and Data Center for geoscientific data) obsługiwanym przez GFZ Potsdam Data Center [www.isdc.gfz-potsdam.de]. W serwisie tym udostępniane są dane z wielu projektów i misji pomiarowych takich jak: CHAMP (badanie pola grawitacyjnego i magnetycznego Ziemi), GRACE (badanie pola grawitacyjnego i rozmieszczenia mas na powierzchni Ziemi), GNSS (satelitarne systemy nawigacyjne), GGP (grawimetry nadprzewodnikowe), GPS-PDR (*Potsdam Dresden Reprocessing*), TerraSAR-X i TanDEM-X (dwie bliźniacze satelity niemieckiej misji pomiarów radarowych).

Analiza obejmuje dane zebrane na 13 stacjach grawimetrów nadprzewodnikowych skupionych w GGP. Niektóre obserwatoria rejestrują obserwacje pływowe na więcej niż jednym instrumencie, co razem daje 18 grawimetrów rozmieszczonych na całym świecie (rys. 4.1).



Rysunek 4.1: Rozmieszczenie stacji GGP poddanych analizie

Grawimetry nadprzewodnikowe, które wykorzystuje ISDC rejestrują zmianę przyspieszenie siły ciężkości z minutowym interwałem. Następnie dane te są korygowane przez centrum obliczeniowe ICET. Wprowadzane są poprawki do obserwacji ze względu na zmiany ciśnienia, dryft instrumentu oraz eliminowane są wszelkie nieciągłości i przerwy w działaniach grawimetru, a także zaburzenia obserwacji związane z trzęsieniami Ziemi. Tak przygotowane dane udostępniane są w interwałem godzinnym.

Pobrane do analizy pliki obserwacyjne obejmują (dla większości stacji) cały 2013 rok. Poniższe zestawienie (tabela 4.1) zawiera podstawowe informacje o wybranych stacjach.

Tabela 4.1: Stacje GGP wybrane do analizy

Nazwa pliku	Stacja	Symbol	Instrument	φ [°]	λ [°]	H [m]	czas obserwacji	
							od	do
B11301H2	Black Forest Observatory, Schiltach, Germany	B1	GWR SG-056_L	48,32983	8,32728	589,2	2013-01-01	2013-09-29
B21301H2	Black Forest Observatory, Schiltach, Germany	B2	GWR SG-056_U	48,32983	8,32728	589,4	2013-01-01	2013-09-29
CA1301H2	Cantley, Quebec Canada	CA	GWR T012 TT70	45,5850	284,1927	269,2	2013-01-01	2013-12-30
CB1301H2	Canberra, Australia	CB	GWR C031	-35,32064	149,00766	762,749	2013-01-01	2013-07-30
H31301H2	Bad Homburg, Germany	H3	GWR SG044	50,2285	8,6113	190	2013-01-01	2013-12-31
KA1301H2	Kamioka, Japan	KA	GWR T016	36,4253	137,3084	358	2013-01-01	2013-07-30
M11301H2	Moxa, Germany	M1	CD034_L	50,645	11,616	455	2013-01-01	2013-12-31
M21301H2	Moxa, Germany	M2	CD034_U	50,645	11,616	455,2	2013-01-01	2013-12-31
MC1301H2	Medicina, Italy	MC	GWR C023	44,5219	11,6450	28	2013-01-01	2013-12-31
ME1301H2	Metsahovi, Finland	ME	GWR T020 TT070	60,2172	24,3958	55,6	2013-02-13	2013-12-30
PE1301H2	Pecny, Czech Republic	PE	GWR OSG-050	49,9137	14,7856	534,58	2013-01-01	2013-12-31
S11301H2	Sutherland, South Africa	S1	GWR D037_L	-32,3814	20,8109	1791	2013-02-10	2013-12-30
S21301H2	Sutherland, South Africa	S2	GWR D037_U	-32,3814	20,8109	1791	2013-02-10	2013-12-30
ST1301H2	Strasbourg, France	ST	GWR C026	48,6217	7,6838	180	2013-01-01	2013-12-31
SU1301H2	Sutherland, South Africa	SU	SG052	-32,3814	20,8109	1791	2013-01-23	2013-12-30
TC1301H2	TIGO Concepcion, Chile	TC	GWR RT038	-36,843760	-73,025649	156,14	2013-01-01	2013-12-31
W31301H2	Wetzell, Germany	W3	GWR CD030_L	49,144	12,878	613,7	2013-01-01	2013-12-31
W41301H2	Wetzell, Germany	W4	GWR CD030_U	49,144	12,878	613,7	2013-01-01	2013-12-31

W tabeli została zachowana oryginalna (podawana przez obserwatorium) precyzja zapisu współrzędnych. Litery L (*low*) i U (*up*) w indeksach instrumentów oznaczają jak są położone względem siebie grawimetry na jednej stacji (różnica wysokości).

Na każdej stacji, razem ze zmianą ciężkości, rejestrowane jest również ciśnienie atmosferyczne. Obie te wielkości mierzone są za pomocą zmian napięcia w układzie pomiarowym, w związku z tym ich wartości podawane są w woltach wraz ze współczynnikami potrzebnymi do przeliczenia na odpowiednie jednostki lub w postaci już przeliczonych wartości. Przykładowy plik obserwacyjny ze stacji GGP przedstawia rysunek 4.2.

```

DATA CORRECTED AT ICET (bf.ducarme@gmail.com)
Filename       : M11301h2.GGP
Station        : Moxa, Germany
Instrument      : CD034_L
Phase Lag (s,tides) : 12.0
N Latitude (deg) : 50.6450  0.0010
E Longitude (deg) : 11.6160  0.0010
Height (m)      : 455.0000  1.0000
Gravity Cal (nms-2/V) : -606.5000  1.0000
Pressure Cal(hPa/V) : 10.0000
Author         : thomas.jahr@uni-jena.de
yyyymmdd hhmss gravity(V) pressure(V)
C*****
INSTR          1.0000    1.0000    12.000    0
7777777       .000     .000
20130101 000000 -877.511  969.597
20130101 010000 -943.188  969.007
20130101 020000 -865.555  968.546
20130101 030000 -655.240  967.925
20130101 040000 -351.989  967.057
20130101 050000 -16.579   966.987
20130101 060000  286.131  967.010
20130101 070000  509.698  966.826
20130101 080000  620.524  966.819
20130101 090000  617.910  966.815
20130101 100000  526.146  966.823

```

Rysunek 4.2: Przykładowy plik obserwacyjny z grawimetru nadprzewodnikowego

Nagłówek pliku zawiera informacje o stacji, a także o działaniu instrumentu w postaci opóźnienia fazowego (czas reakcji układu pomiarowego – *phase lag*) lub opóźnienia zegara układu pomiarowego (*time lag*).

Do obliczeń niezbędny jest katalog potencjału pływowego. Wykorzystano katalog Hartmann-Wenzel [1995]. Zawiera 12935 fal pływowych i 19300 wyrównanych parametrów. Błąd średni tego katalogu jest oszacowany na 0,14 ngal w dziedzinie czasu i 0,0002 ngal w dziedzinie częstotliwości. W dalszych obliczeniach wykorzystano również inne dane pomocnicze, takie jak model oceanu i pływowe modele Ziemi (szczegóły w dalszej części pracy).

4.2. Wyznaczenie parametrów fal pływowych

ETERNA 3.40 to pakiet programów napisanych przez H.-G. Wenzla (1996) pozwalających na kompleksowe opracowanie obserwacji pływowych (rejestrację danych, obliczenie, analizę i predykcję pływów ziemskich oraz obliczenie pływów oceanicznych). Programy napisane zostały w języku FORTRAN 77/90 i obsługują specjalny format przechowywania i wymiany danych pływowych o wysokiej rozdzielczości [Wenzel, 1995]. Program ANALYZE pozwala na wyrównanie metodą najmniejszych kwadratów parametrów fal pływowych oraz parametrów regresji (ze względu na ruch bieguna i zmiany ciśnienia), a także obliczenie spektrum residuów amplitudy przy zastosowaniu transformaty Fouriera. Pliki wejściowe w programie ANALYZE to plik z danymi (czas obserwacji, ciężkość, ciśnienie) oraz plik z parametrami kontrolnymi (dane stacji, teoretyczne parametry głównych fal pływowych, zdefiniowane grupy fal pływowych).

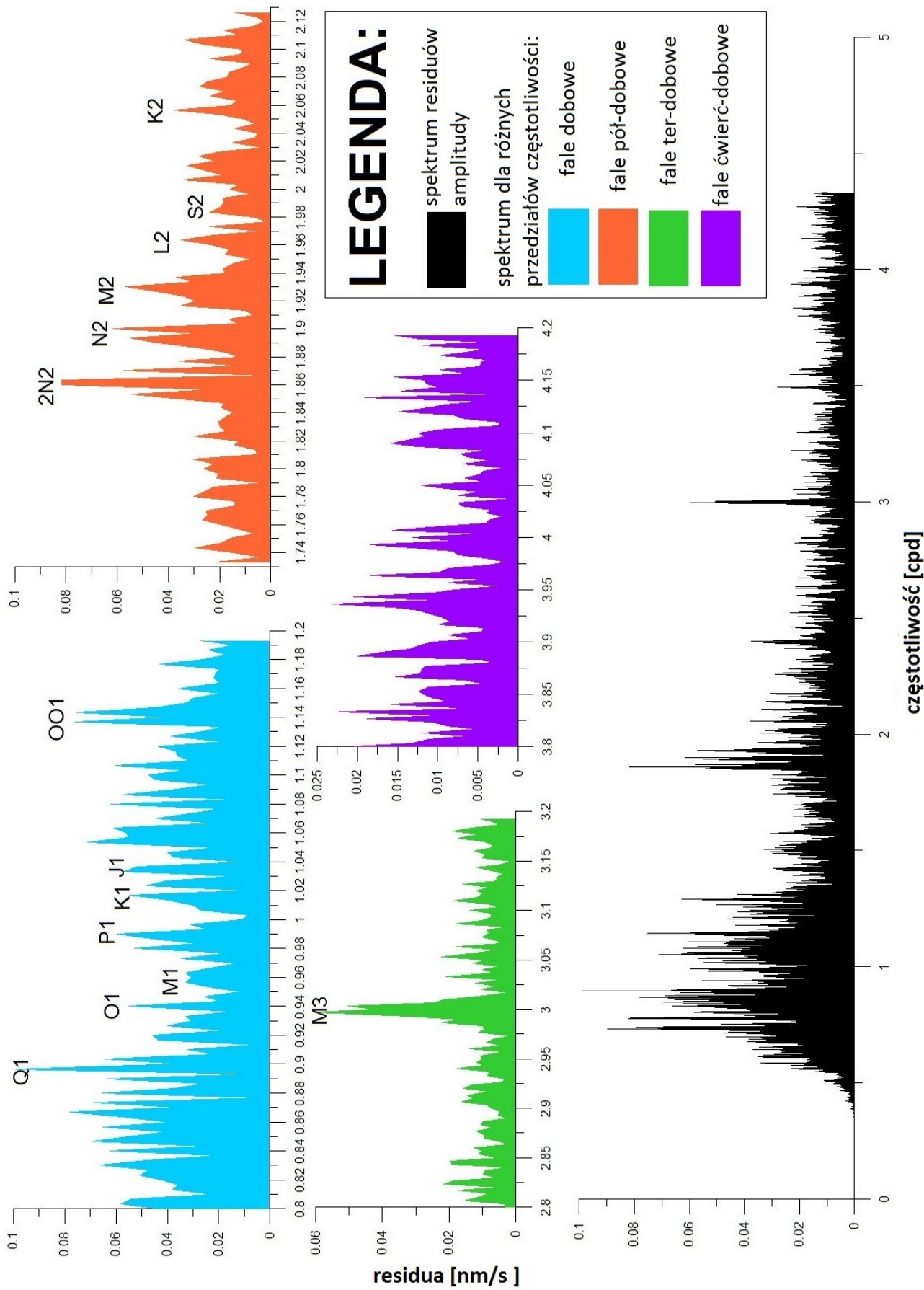
Ze względu na długość obserwacji (dla większości stacji – 1 rok) nie jest możliwa analiza fal długookresowych. W związku z tym nie ma konieczności wyznaczania parametrów regresji związanych z pływem biegunowym oraz zmianą długości doby, ponieważ zjawiska te mają okres większy niż obserwowane pływy. Zatem analiza dotyczy fal o okresach dobowych, pół-dobowych i mniejszych, dlatego zastosowano numeryczny filtr górnoprzepustowy o długości 167 h.

Obliczenia wykonano w oparciu o grupy fal pływowych zdefiniowane przy pomocy przykładowych plików dołączonych do pakietu ETERNA (obliczenia dla podobnych obserwacji). Sposób zgrupowania fal przedstawia tabela 4.2.

Tabela 4.2: Grupy fal pływowych

częstotliwość [cpd]		nazwa
od	do	(symbol Darwina)
0,501370	0,911390	Q1
0,911391	0,947991	O1
0,947992	0,981854	M1
0,981855	0,998631	P1
0,998632	1,001369	S1
1,001370	1,004107	K1
1,004108	1,006845	PSI1
1,006846	1,023622	PHI1
1,023623	1,057485	J1
1,057486	1,470243	OO1
1,470244	1,880264	2N2
1,880265	1,914128	N2
1,914129	1,950419	M2
1,950420	1,984282	L2
1,984283	2,002736	S2
2,002737	2,451943	K2
2,451944	3,381478	M3
3,381379	4,347615	M4
4,347616	7,000000	M5M6

Wykorzystując technikę FFT można uzyskać widmo fal. W związku z zastosowaniem filtru górnoprzepustowego analiza ta nie ma zastosowania dla częstotliwości mniejszych niż 0,8 cpd. W wyniku transformaty takie fale otrzymują ok. zerowe amplitudy. Dla pozostałych fal można wyznaczyć spektrum residuów amplitudy z interwałem 0,1°/h, co jest równoznaczne z 0,00666 cpd. Oznaczenie cpd oznacza ilość cykli na dobę (cycle per day).



Rysunek 4.3: Widmo residuów dla stacji PECNY

Rysunek 4.3 przedstawia uzyskane spektrum na stacji Pecny. Wartości residuów nie przekraczają $0,1 \text{ nm/s}^2$, co świadczy o dobrym przekształceniu sygnału z użyciem FFT. Fale pływowe zaznaczono na podstawie uzyskanych częstotliwości. Ich zbieżność z pewnymi ekstremalnymi wartościami widma świadczy o tym, że dla dużych fal część mocy sygnału nie została przekształcona i ujawnia się jako residua. Natomiast niskie wartości residuów stanowią szum sygnału, który służy do estymacji błędów. Polega to na wyznaczeniu poziomu szumu sygnału dla następujących grup fal:

12,0-17,9°/h = 0,800-1,193 cpd – fale dobowe,

26,0-31,9°/h = 1,733-2,127 cpd – fale pół-dobowe,

42,0-47,9°/h = 2,800-3,193 cpd – fale ter-dobowe,

57,0-62,9°/h = 3,800-4,193 cpd – fale ćwierć-dobowe.

Średnie wartości tych szumów oraz biały szum (o całkowicie płaskim widmie) są wykorzystywane do skalowania odchyłeń standardowych w wyrównaniu metodą najmniejszych kwadratów w następujący sposób:

$$skala = \frac{\text{poziom szumu dla danej częstotliwości}}{\text{biały szum}}$$

Otrzymane w analizie spektralnej szumy przedstawia poniższa tabela 4.3.

Tabela 4.3: Poziom szumu obserwacji grawimetrycznych

stacja	ŚREDNI POZIOM SZUMU [nm/s ²]				biały szum
	pasmo				
	1,0 cpd	2,0 cpd	3,0 cpd	4,0 cpd	
B1	0,0499	0,0263	0,0122	0,0075	0,0141
B2	0,0610	0,0307	0,0144	0,0109	0,0179
CA	0,1268	0,0810	0,0654	0,0578	0,0480
CB	0,0862	0,0649	0,0176	0,0154	0,0231
H3	0,0362	0,0233	0,0111	0,0083	0,0115
KA	0,1350	0,0654	0,0355	0,0204	0,0311
M1	0,0399	0,0236	0,0120	0,0083	0,0136
M2	0,0449	0,0313	0,0214	0,0217	0,0170
MC	0,0787	0,0453	0,0139	0,0082	0,0160
ME	0,1202	0,0427	0,0292	0,0172	0,0260
PE	0,0373	0,0214	0,0113	0,0093	0,0103
S1	0,0539	0,0528	0,0212	0,0153	0,0161
S2	0,0542	0,0532	0,0206	0,0149	0,0160
ST	0,0412	0,0245	0,0132	0,0077	0,0107
SU	0,1289	0,0594	0,0277	0,0274	0,0303
TC	0,0675	0,0614	0,0281	0,0154	0,0211
W3	0,0532	0,0258	0,0145	0,0087	0,0120
W4	0,0433	0,0234	0,0126	0,0062	0,0110

Najmniejsze wartości szumów odnotowano w paśmie ćwierć-dobowym, ale porównanie ich z wartościami residuów amplitudy Fouriera pokazuje, że niemal wszystkie obserwacje w tym paśmie częstotliwości są traktowane jako szum. Analizując wartości szumów można stwierdzić, że najlepszej jakości obserwacje grawimetryczne są na stacji PECNY (PE), a najgorsze na stacji CANTLEY (CA).

Precyzyjną analizę pływów grawimetrycznych przeprowadzono z wykorzystaniem metody Chojnickiego (opisanej w rozdziale 2.3). Zastosowanie metody najmniejszych kwadratów prowadzi do wyrównania parametrów fal pływowych, wyznaczenia residuów obserwacji i parametrów regresji wraz z analizą dokładności.

W tabeli 4.4 zaprezentowano wyrównane wartości współczynników grawimetrycznych (δ) i faz (γ) głównych fal pływowych zaobserwowanych na stacji PECNY. W opracowaniu przyjęto konwencję, że opóźnienie fazowe ma znak ujemny. Podobne tabele dla pozostałych stacji zawiera załącznik nr 1.

Tabela 4.4: Wyrównane parametry fal pływowych na stacji PECNY

częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza ϕ [°]	błąd m ϕ [°]
od	do						
0,501370	0,911390	Q1	58,6382	1,14765	0,00058	-0,1692	0,0287
0,911391	0,947991	O1	306,2613	1,15011	0,00011	0,1314	0,0056
0,947992	0,981854	M1	24,0736	1,15610	0,00138	0,2379	0,0683
0,981855	0,998631	P1	142,4780	1,15014	0,00022	0,1293	0,0110
0,998632	1,001369	S1	3,3684	1,18466	0,01336	8,6556	0,6435
1,001370	1,004107	K1	430,5378	1,13679	0,00008	0,1862	0,0040
1,004108	1,006845	PS1	3,3700	1,26476	0,00944	0,6175	0,4283
1,006846	1,023622	PH1	6,1311	1,17216	0,00519	0,4473	0,2540
1,023623	1,057485	J1	24,0823	1,15718	0,00157	0,0393	0,0777
1,057486	1,470243	OO1	13,1735	1,15775	0,00362	0,1007	0,1789
1,470244	1,880264	2N2	9,5335	1,16583	0,00159	2,1437	0,0781
1,880265	1,914128	N2	59,6917	1,18122	0,00031	1,8588	0,0151
1,914129	1,950419	M2	311,7614	1,18511	0,00005	1,2349	0,0026
1,950420	1,984282	L2	8,8129	1,17523	0,00116	0,4722	0,0563
1,984283	2,002736	S2	145,0334	1,18217	0,00012	0,1639	0,0059
2,002737	2,451943	K2	39,4105	1,18263	0,00052	0,4161	0,0254
2,451944	3,381478	M3	3,9484	1,07409	0,00211	0,2218	0,1124
3,381379	4,347615	M4	0,0464	0,51141	0,14228	26,3192	15,9405

Błąd wyznaczenia współczynników grawimetrycznych dla poszczególnych fal nie przekracza 0,015 nm/s² i świadczy o poprawnym wyznaczeniu tych parametrów. Wyjątkiem jest fala M4, duży błąd wynika z bardzo małej amplitudy tej fali.

Zarówno na stacji PECNY jak również na pozostałych stacjach gorszą, ale wystarczającą przy opracowaniu, dokładnością charakteryzuje się fala S1. Ma to swoje wyjaśnienie w teorii pływów, ponieważ fala S1 jest słabo oddzielana od M1, dlatego wyznacza się falę księżycowo-słoneczną K1, będącą ich połączeniem. Błąd wyznaczenia współczynników grawimetrycznych dla tej fali nie prze-

kracza $0,00020 \text{ nm/s}^2$ z wyjątkiem stacji KAMIOKA (Japonia). Na niektórych stacjach można odnotowano gorszą dokładność wyznaczenia parametrów również dla fal PS11 oraz OO1 (np. KAMIOKA, CANBERRA).

Dodatkowo, w analizie metodą najmniejszych kwadratów został wyznaczony pośredni efekt atmosferyczny w postaci współczynników regresji liniowej dla poszczególnych stacji (tabela 4.5).

Tabela 4.5: Pośredni efekt atmosferyczny - parametry regresji

stacja	współczynnik regresji atmosferycznej	błąd
	nm/s ² /hPa	
B1	-3,31918	0,01278
B2	-3,30144	0,01468
CA	-3,47852	0,02723
CB	-3,32759	0,02703
H3	-3,33702	0,00843
KA	-2,86282	0,02142
M1	-3,35732	0,01034
M2	-3,40459	0,01292
MC	-3,61542	0,01535
ME	-3,74973	0,01459
PE	-3,30321	0,00832
S1	-2,79414	0,02272
S2	-2,73404	0,02276
ST	-3,43663	0,00779
SU	-2,94098	0,03129
TC	-3,60945	0,02024
W3	-3,38193	0,00937
W4	-3,38386	0,00865

Do obliczeń został przyjęty teoretyczny parametr regresji liniowej dla ciśnienia równy $-3,20 \text{ nm/s}^2/\text{hPa}$. Wartości te zostały wyznaczone w jednym procesie wyrównania razem z parametrami fal pływowych, jako ostatnia niewiadoma. W celu zobrazowania istotności tego zagadnienia, dla przykładowej stacji (METSARHOVI) zostało przeprowadzone wyrównanie bez uwzględnienia pośredniego efektu atmosferycznego. Wyniki tych obliczeń przedstawia tabela 4.6.

Tabela 4.6: Porównanie wyników na stacji METSAHOVI

fala	δ_{WD}	bez korekcji atmosferycznej				z korekcją atmosferyczną			
		δ	$m\delta$	φ [°]	$m\varphi$ [°]	δ	$m\delta$	φ [°]	$m\varphi$ [°]
Q1	1,15192	1,14303	0,00668	-0,0997	0,3351	1,14499	0,00213	-0,0050	0,1069
O1	1,15171	1,15445	0,00130	0,2478	0,0644	1,15321	0,00042	0,2497	0,0206
M1	1,15111	1,16293	0,01464	-0,6397	0,7219	1,15933	0,00468	0,0895	0,2318
P1	1,14618	1,15644	0,00275	-0,0096	0,1362	1,15403	0,00088	-0,0639	0,0436
S1	1,14275	1,14700	0,16423	6,6139	8,1998	1,20130	0,05249	4,8998	2,5021
K1	1,13070	1,13836	0,00098	0,1687	0,0492	1,13989	0,00031	0,0930	0,0158
PSI1	1,23640	1,12130	0,11591	-1,6084	5,9327	1,27217	0,03714	1,5938	1,6719
PHI1	1,16662	1,18993	0,06475	-0,6740	3,1190	1,18465	0,02069	-0,2738	1,0012
J1	1,15372	1,16908	0,01864	0,0621	0,9133	1,15404	0,00596	0,2088	0,2957
OO1	1,15300	1,15879	0,04248	-1,9477	2,0994	1,15958	0,01358	0,1799	0,6715
2N2	1,15631	1,16751	0,00953	0,9269	0,4676	1,16856	0,00532	1,0190	0,2608
N2	1,15631	1,17936	0,00187	1,0204	0,0909	1,18067	0,00104	1,0758	0,0507
M2	1,15631	1,18166	0,00033	0,6820	0,0158	1,18134	0,00018	0,7041	0,0088
L2	1,15631	1,17171	0,00666	0,4108	0,3255	1,17219	0,00372	0,3351	0,1816
S2	1,15631	1,18197	0,00072	0,1993	0,0348	1,17475	0,00040	0,0188	0,0196
K2	1,15631	1,17559	0,00319	0,5869	0,1558	1,17295	0,00178	0,2281	0,0872
M3	1,06803	1,07532	0,01690	0,3382	0,9007	1,08019	0,01185	0,6201	0,6288
M4	1,03446	0,51928	1,02331	-131,2269	112,9351	0,67993	0,73975	-148,9793	62,3577

Uwzględnienie wpływu obciążeń atmosferycznych znacząco poprawiło dokładność wyznaczanych parametrów, szczególnie w przypadku fal S1, czy PSI1. Wartości współczynników grawimetrycznych w wyniku korekcji atmosferycznej zbliżyły się do wartości modelowych δ_{WD} w modelu Wahr-Dehant. Na tej podstawie można stwierdzić, że pływy atmosferyczne mają istotne znaczenie w analizie pływów ziemskich.

Jakość wyrównania metodą najmniejszych kwadratów można określić na podstawie charakterystyki statystycznej tego rozwiązania. Tabela 4.7 przedstawia zestawienie wielkości statystycznych wyznaczonych dla poszczególnych stacji. Odchylenie standardowe jest utożsamiane z błędem średnim wyrównania i najlepiej odzwierciedla dokładność wykonanych obliczeń, ale również maksymalne wartości residuów dobrze pokazują wpasowanie do modelu wyrównania. Wielkości takie jak liczba stopni swobody (ilość obserwacji nadliczbowych) czy wskaźnik uwarunkowania macierzy świadczą o jakości układu równań normalnych. Wskaźnik uwarunkowania macierzy oznacza w jakim stopniu błąd danych wejściowych wpływa na błąd wyniku. Niska wartość wskaźnika oznacza dobrze uwarunkowaną macierz, to znaczy taką, której odwrotność może być obliczona z wysoką dokładnością [Encyclopedia of Mathematics].

Tabela 4.7: Dokładność analizy metodą najmniejszych kwadratów

stacja	odchylenie standardowe	liczba stopni swobody	max. residuum	wskaźnik uwarunkowania macierzy
	nm/s ²		nm/s ²	
B1	0,610	5866,000	3,860	20,616
B2	0,710	6069,000	8,274	14,806
CA	1,429	2742,000	19,157	196,785
CB	0,863	4349,000	5,940	194,403
H3	0,594	8303,000	3,899	2,403
KA	1,181	4477,000	5,418	203,999
M1	0,609	6256,000	6,578	7,086
M2	0,754	6172,000	7,614	7,044
MC	0,802	7836,000	5,687	4,372
ME	1,188	6529,000	8,351	3,027
PE	0,532	8281,000	3,492	2,222
S1	0,750	6828,000	3,324	7,295
S2	0,747	6814,000	3,225	7,344
ST	0,542	8086,000	3,459	2,452
SU	0,990	6197,000	10,216	7,328
TC	1,089	8336,000	6,811	3,823
W3	0,607	8013,000	6,922	2,313
W4	0,567	8267,000	4,936	2,304

Gorsza dokładność na stacjach KAMIOKA (KA) i CANBERRA (CB) wynika z mniejszej liczby obserwacji, analizie zostały poddane dane z okresu 7 miesięcy, a nie 1 roku tak jak dla większości innych stacji. Duży błąd na stacji CANTLEY (CA) ma związek z małą liczbą obserwacji nadliczbowych i jest to spowodowane częstymi, kilkudniowymi przerwami w obserwacjach. Błąd średni wyrównania nie przekracza 1,5 nm/s², więc dokładność wykonanych obliczeń można uznać za wystarczającą do dalszej analizy pływów.

4.3. Pośredni efekt oceaniczny

Istotnym czynnikiem wpływającym na parametry fal pływowych jest ugięcie skorupy ziemskiej wynikające z obciążeń oceanicznych, czego efektem jest dodatkowa zmiana przyspieszenia siły ciężkości, która również ma charakter pływowy. Zjawisko to zwane jest pośrednim efektem oceanicznym, czyli *ocean tidal loading*. Jest to znaczący czynnik zarówno w przypadku stacji przybrzeżnych, jak i położonych w głębi kontynentu.

Do obliczeń wpływu pośredniego efektu oceanicznego wykorzystano program spotl [Agnew, 1996] oraz serwis obliczeniowy *Onsala Space Observatory* (holt.oso.chalmers.se), a także różne modele pływów oceanicznych.

4.3.1. Modele pływów oceanicznych

Istnieje wiele modeli pływów oceanicznych globalnych i lokalnych, które są wyznaczone na podstawie różnych technik obserwacyjnych. W celu obliczenia pośredniego efektu oceanicznego, dla porównania, zostały wykorzystane cztery modele globalne:

- FES2004,
- DTU10,
- EOT11a,
- HAMTIDE11a.

FES2004 (*Finite Element Solution*) jest najnowszą wersją modelu, którego autorem jest Christian Le Provost [1994]. Jest to model całkowicie hydrodynamiczny. W pierwotnej wersji (FES94.1) pływy oceaniczne były modelowane jedynie na podstawie obserwacji z mareografów, a model globalny utworzony był dzięki połączeniu rozwiązań obliczanych dla kilku basenów oceanicznych oddzielnie. W kolejnych wersjach tego modelu wykorzystano dane z altimetrycznej misji satelitarnej TOPEX/POSEIDON, które zostały odpowiednio dostosowane do hydrodynamicznego charakteru modelu, a obliczenia wykonano dla globalnej sieci grid. FES2004 jest modelem o rozdzielczości przestrzennej $0,125^\circ$ i zawiera fale pływowe M2, S2, K2, N2, 2N2, O1, P1, K1, Q1, Mf, Mtm, Mm, Msqm i M4.

Model DTU10 (*Technical University of Denmark*) [Cheng i Andersen, 2010] jest rozszerzeniem FES2004 o dane z kilku altimetrycznych misji satelitarnych (TOPEX/POSEIDON, Jason-1, Jason-2) obejmujących obserwacje od września 1992 do grudnia 2009. Zawiera 10 komponentów w częstotliwościach pływowych pół-dobowych M2, S2, K2, N2, dobowych S1, K1, O1, P1, Q1 oraz M3 dla wód powierzchniowych.

EOT11a (*Empirical Ocean Tide Model*) [Savcenko i Bosch, 2012] jest to model zbudowany na podstawie analizy harmonicznej danych z wielu misji altimetrycznych (TOPEX/POSEIDON, Jason-1, Jason-2, ERS-1, ERS-2, ENVISAT) z okresu od września 1992 do kwietnia 2010. Analizie poddano wartości residualne względem modelu FES2004, z związku z tym ich rozdzielczość przestrzenna jest identyczna. Zawiera pływy grawimetryczne M2, S2, N2, K2, 2N2, O1, K1, P2 i Q1, nieliniowy składnik pływu M4 oraz pływ radiacyjny S1.

Model HAMTIDE11a (Hamburg direct data Assimilation Methods for TIDEs) bazuje na tych samych danych altimetrycznych, co EOT11a, które zostały dostosowane do obliczenia modelu odwrotnego za pomocą metody opracowanej na uniwersytecie w Hamburgu (*generalized inverse methods*). W efekcie utworzono [Taguchi i in., 2014] model hydrodynamiczny zawierający fale M2, S2, N2, K2 O1, Q1, P1 i 2N2.

4.3.2. Wyznaczenie poprawionych wartości współczynników grawimetrycznych

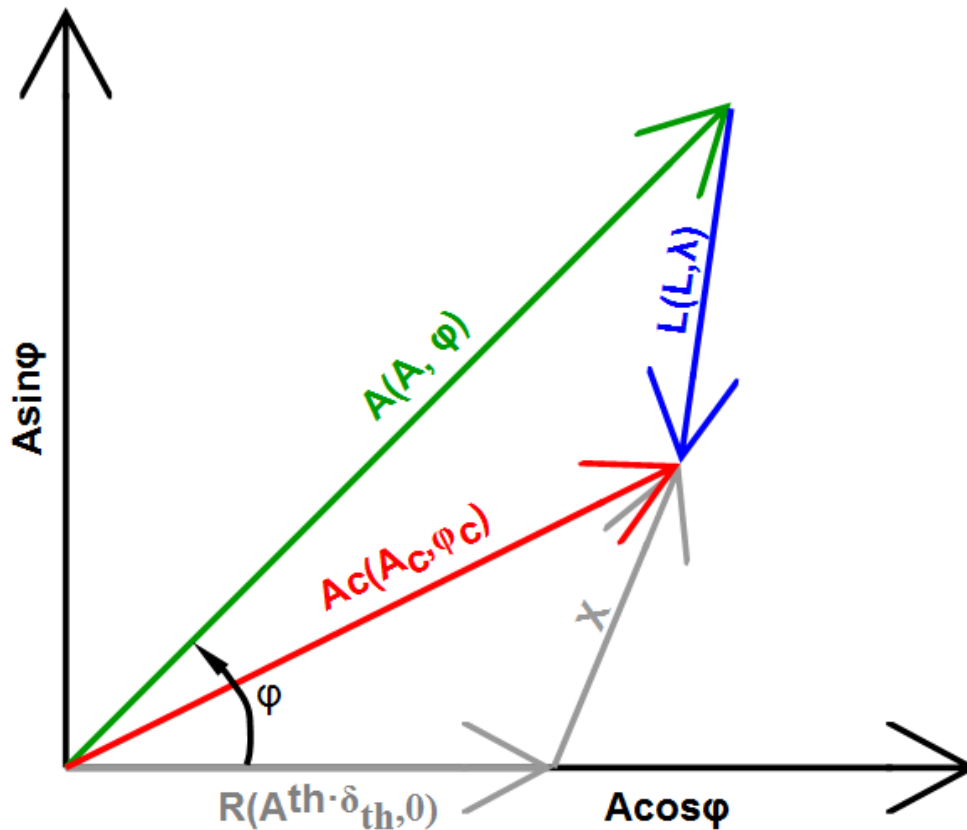
Pośredni efekt oceaniczny został obliczony w programie SPOTL, który w tym celu wykorzystuje scałkowane wartości funkcji Greena. W wyniku przeprowadzonych obliczeń wyznaczono wielkość wpływu obciążeń oceanicznych na zmianę przyspieszenia ziemskiego w częstotliwościach pływowych w postaci amplitud (L) i faz (λ). W poniższej tabeli przedstawiono wartości tych parametrów dla dwóch wybranych stacji położonych najbliżej linii brzegowej oceanu (TC – Conception, Chile) oraz najdalej w głąb lądu (PE – Pecny, Czechy). Obliczony efekt oceaniczny dla pozostałych stacji stanowi załącznik nr 2.

Tabela 4.8: Wartości obciążeń oceanicznych w częstotliwościach pływowych na wybranych stacjach

stacja	fala	FES2004		DTU10		EOT11a		HAMTIDE11a	
		L[nm/s ²]	λ [°]	L[nm/s ²]	λ [°]	L[nm/s ²]	λ [°]	L[nm/s ²]	λ [°]
Conception, TC	Q1	3,4160	168,8032	3,0610	168,9202	3,0950	167,3681	3,2600	168,7034
	O1	15,9590	153,4280	15,8320	153,5362	15,8270	153,3787	15,7140	152,3297
	P1	6,8800	128,6226	6,9440	128,0636	7,0270	132,3329	6,8340	126,8719
	K1	20,8570	128,4219	20,9650	127,5483	21,1460	126,7796	20,7670	126,5451
	N2	5,6500	154,2561	5,3690	151,1508	5,4430	150,6267	5,3920	150,3555
	M2	22,4930	113,0799	22,2930	111,7042	22,2900	113,4149	22,2940	112,5926
	S2	8,4810	83,2946	9,1790	79,7538	8,6370	77,7056	8,5200	80,0451
	K2	2,2820	86,1590	2,4870	80,9084	2,6670	87,6045	2,2630	81,8318
Pecny, PE	Q1	0,5890	-168,8366	0,5140	-162,9584	0,4140	-144,6075	0,5380	-161,3171
	O1	1,5460	171,6695	1,4320	161,8197	1,4210	166,4950	1,4540	160,4902
	P1	0,3430	73,8325	0,4190	82,3161	0,3060	83,2476	0,4410	91,7854
	K1	1,1110	75,4962	1,3380	82,5697	1,2550	80,1646	1,4230	86,9144
	N2	2,3210	107,3149	2,3460	98,3283	2,3410	98,5836	2,3450	96,4336
	M2	9,7800	79,9761	10,3840	77,6397	10,3670	79,5302	10,5680	77,1417
	S2	3,3630	51,3501	3,2530	50,5964	3,3030	50,9204	3,4920	47,1581
	K2	0,9590	47,4946	0,9030	46,4225	0,9250	52,7122	0,9360	45,3825

Otrzymane wyniki amplitud potwierdzają fakt, że obciążenia oceaniczne są dużo większe dla punktów położonych bliżej linii brzegowej oceanu, jak również to, że jest to zjawisko istotne także dla dalszych stacji. Obliczenia z wykorzystaniem różnych modeli pływów oceanicznych dają zbliżone wyniki. Nie dotyczy to jednak wartości faz. Lepszą zgodność modeli zaobserwowano na stacji TC, co może oznaczać, że modelowanie obciążeń jest łatwiejsze, dla punktów położonych bliżej oceanu.

W celu skorygowania obserwowanych parametrów fal pływowych należy wektorowo odjąć wpływ efektu oceanicznego L od wartości obserwowanych A , zgodnie z poniższym rysunkiem [Neumeyer, J. i in., 2005] sporządzonym na płaszczyźnie zespolonej, gdzie R jest wektorem modelowym, natomiast X wynika z rozbieżności związanych z lokalnym charakterem badanych parametrów, a także z błędów.



Rysunek 4.4: Korygowanie wpływu efektu oceanicznego

Równanie wektorowe można zapisać następująco [Melchior, 1978]:

$$A_c(A_c, \varphi_c) = A(A^{th} \delta, \varphi) - L(L, \lambda) \quad (12)$$

następnie przekształcić, wyznaczając wektor wartości skorygowanych o efekt oceaniczny A_c , za pomocą składowych rzeczywistej i urojonej

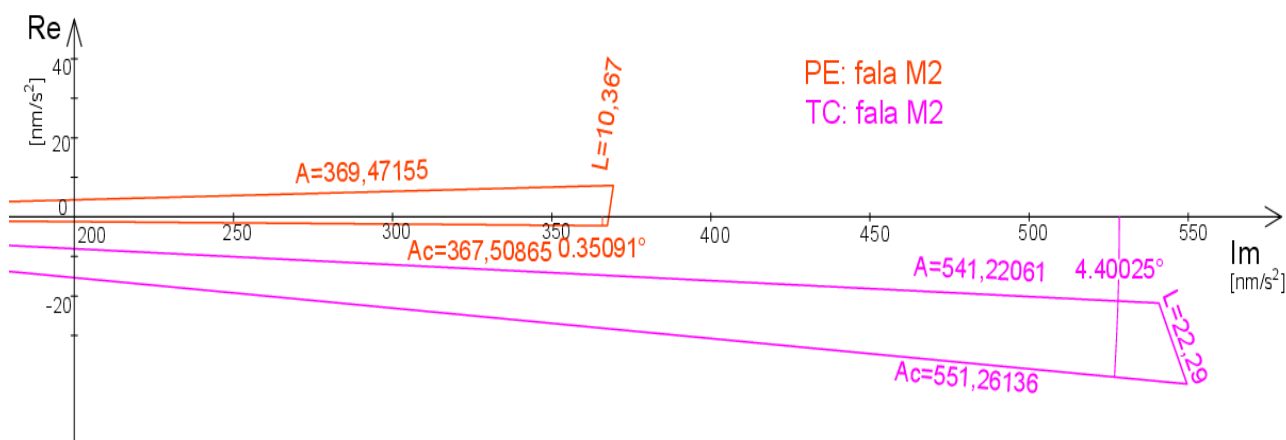
$$\begin{aligned} Re(A_c) &= A \cos \varphi - L \cos \lambda \\ Im(A_c) &= A \sin \varphi - L \sin \lambda \\ A_c &= \sqrt{Re(A_c)^2 + Im(A_c)^2} \end{aligned} \quad (13, 14, 15)$$

oraz obliczyć skorygowane wartości faz i współczynników grawimetrycznych.

$$\begin{aligned} \delta_c &= \frac{A_c}{A^{th}} \\ \varphi_c &= \arctg \frac{Im(A_c)}{Re(A_c)} \end{aligned} \quad (16, 17)$$

Powyższe wielkości można również wyznaczyć metodą graficzną zgodnie z Rysunkiem 4.4. Dla porównania dla wybranych stacji wykonano obliczenia sposobem analitycznym i graficznym wykorzystując model pływów oceanicznych EOT11a dla fali Q1. Na rysunku 4.5 zaprezentowano wykresy obliczeń dla fal, dla których wartości amplitud dla obu stacji są najbardziej zróżnicowane.

Zarówno na tym rysunku, jak i w dalszych wyliczeniach przyjęto następujące oznaczenia: symbole z indeksem t – wartości teoretyczne, c – wartości skorygowane o efekt oceaniczny, bez indeksu – wartości obserwowane. Rysunki wykonano w programie AutoCad 2017 firmy Autodesk.



Rysunek 4.5: Wyznaczenie parametrów fali M2 skorygowanych o efekt oceaniczny dla stacji PE i TC

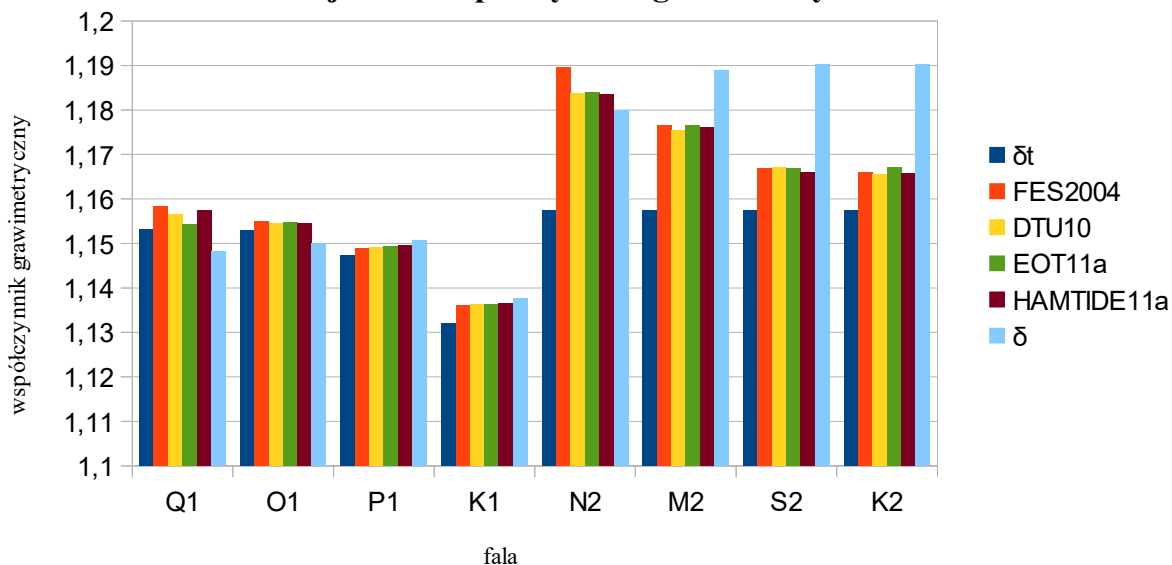
Wyniki uzyskane graficznie są identyczne, jak te obliczone analitycznie. Ze względu na to, że sposób graficzny jest dużo bardziej czasochłonny, parametry dla pozostałych stacji wyznaczono jedynie analitycznie. Wyniki obliczeń zostaną przedstawione poniżej, na przykładzie stacji BAD HOMBURG (H3). Skorygowane wartości dla poszczególnych modeli przedstawia tabela 4.9.

Tabela 4.9: Parametry skorygowane o pośredni efekt oceaniczny - stacja H3

fala	Wartości skorygowane – model FES2004			Wartości skorygowane – model DTU10			Wartości skorygowane – model EOT11a			Wartości skorygowane – model HAMTIDE11a		
	Ac [nm/s ²]	δc	φc [°]	Ac [nm/s ²]	δc	φc [°]	Ac [nm/s ²]	δc	φc [°]	Ac [nm/s ²]	δc	φc [°]
Q1	67,7783	1,1582	-0,1277	67,6799	1,1565	-0,0893	67,5422	1,1542	-0,0207	67,7327	1,1574	-0,0886
O1	353,0388	1,1550	0,0647	352,8467	1,1544	0,0297	352,9046	1,1546	0,0453	352,8882	1,1546	0,0208
P1	163,3591	1,1489	0,0192	163,4093	1,1492	-0,0098	163,4355	1,1494	0,0353	163,4566	1,1495	-0,0112
K1	488,0834	1,1359	0,0681	488,2202	1,1362	0,0417	488,1998	1,1362	0,0485	488,2951	1,1364	0,0280
N2	70,0799	1,1896	0,2032	69,7309	1,1837	0,0753	69,7444	1,1839	0,0615	69,7187	1,1835	0,0908
M2	362,0119	1,1766	-0,1917	361,6247	1,1753	-0,2959	361,9666	1,1764	-0,2964	361,8483	1,1760	-0,2960
S2	167,0094	1,1668	-0,6019	167,0430	1,1670	-0,5944	167,0321	1,1669	-0,6080	166,8867	1,1659	-0,6089
K2	45,3543	1,1661	-0,2657	45,3341	1,1655	-0,2456	45,3963	1,1671	-0,3968	45,3394	1,1657	-0,2567

Na podstawie powyższej tabeli stworzono wykres (rys. 4.6), który prezentuje skorygowane współczynniki grawimetryczne w porównaniu do wartości obserwowanych i teoretycznych w modelu WAHR-DEHANT.

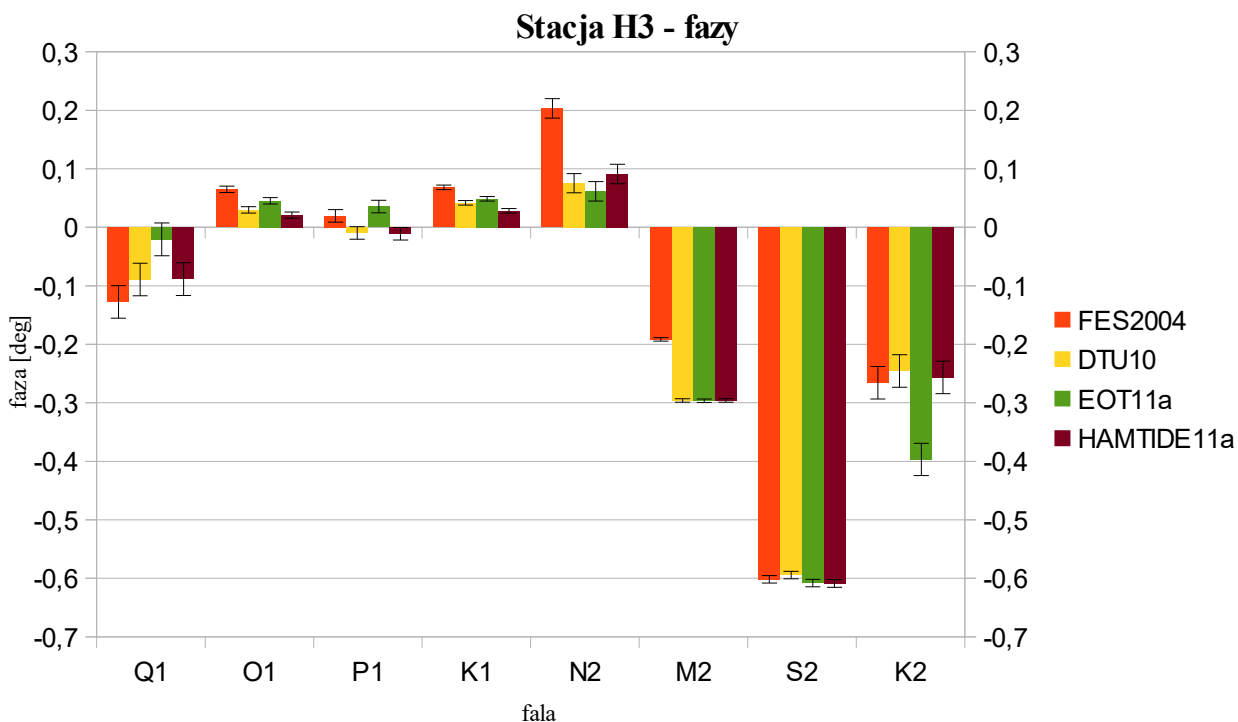
Stacja H3 - współczynniki grawimetryczne



δ_t - teoretyczny współczynnik grawimetryczny w modelu WAHR-DEHANT
 δ - współczynnik grawimetryczny obserwowany
 [nazwa modelu] - współczynnik grawimetryczny po korekcji z użyciem danego modelu

Rysunek 4.6: Skorygowane współczynniki grawimetryczne - stacja H3

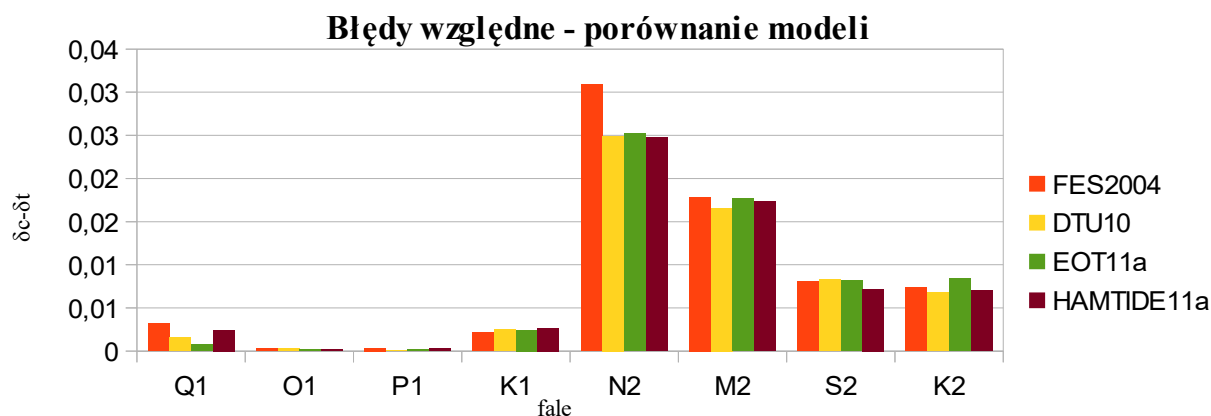
Podobny wykres (rys. 4.7) sporządzona dla faz, zestawiając wartości skorygowane różnymi modelami. Na rysunku zaznaczono również błędy obserwowanych wartości.



[nazwa modelu] - wartość fazy skorygowana z użyciem danego modelu

Rysunek 4.7: Skorygowane wartości faz - stacja H3

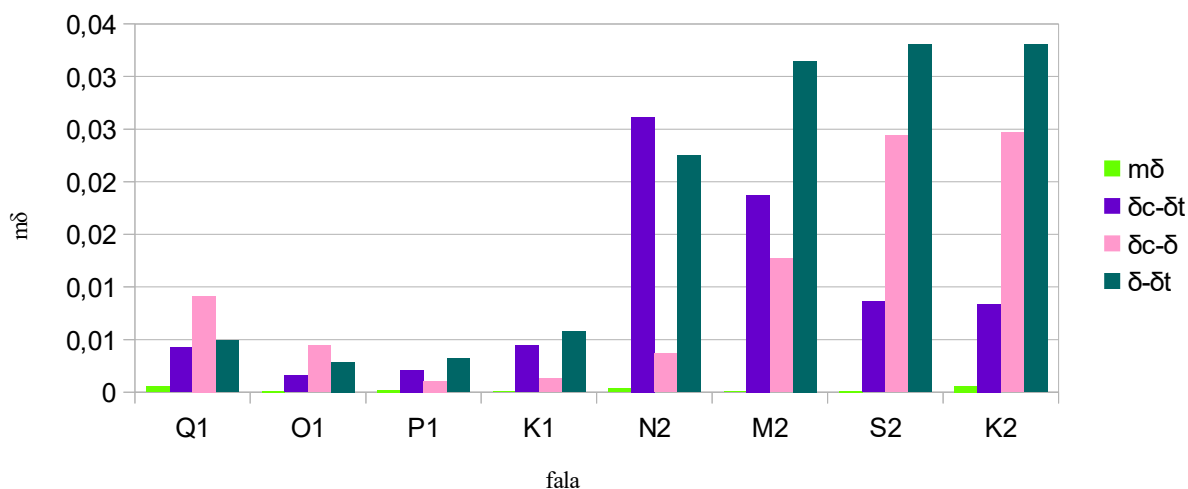
Współczynniki grawimetryczne skorygowane na podstawie różnych modeli pływów oceanicznych uzyskują podobne wartości, bliższe teoretycznym niż współczynniki obserwowane (z wyjątkiem fali N2). Fazy wyznaczone z poszczególnych modeli są bardziej zróżnicowane, ale również bliższe 0 niż wartości obserwowane, których nie zaznaczono na wykresie, ponieważ są dużo większe i przez to obraz byłby nieczytelny. Na podstawie uzyskanych faz nie można stwierdzić, który model jest najlepszy. Dlatego w tym celu porównano błędy względne współczynników grawimetrycznych (rys. 4.8)



$\delta c - \delta t$ - różnica między skorygowanym a teoretycznym współczynnikiem grawimetrycznym [nazwa modelu] - wartość tej różnicy dla korekcji z użyciem danego modelu

Rysunek 4.8: Błędy względne skorygowanych współczynników grawimetrycznych - stacja H3

Najgorszym z wybranych modeli jest FES2004, jednak trudno określić, który jest najlepszy, ponieważ trzy pozostałe mają bardzo zbliżone wartości błędów. Do dalszej analizy przyjęto model HAMTIDE11a, ze względu na to, że wykazuje średnio najmniejsze błędy względne na poszczególnych stacjach. Poniżej (rys. 4.9) zestawiono również różnice, między otrzymanymi wartościami współczynników grawimetrycznych wraz z błędem uzyskanym z metody najmniejszych kwadratów.



$m\delta$ - błąd wyznaczenia obserwowanego współczynnika grawimetrycznego
 δ_c - współczynnik grawimetryczny skorygowany o efekt oceaniczny
 δ_t - współczynnik grawimetryczny teoretyczny w modelu WAHR-DEHANT
 δ - współczynnik grawimetryczny obserwowany

Rysunek 4.9: Residua współczynników grawimetrycznych - model HMTIDE11a

Błąd względny skorygowanych współczynników, jest mniejszy niż obserwowanych dla wszystkich fal z wyjątkiem N2. Błędy te są mniejsze dla fal dobowych. Dla wszystkich analizowanych fal błąd średni obserwacji jest mniejszy niż wartość korekty ($\delta_c - \delta$), co potwierdza teorię, że pośredni efekt oceaniczny jest istotny również dla punktów położonych w głębi kontynentu (jakim jest stacja H3).

Wartości parametrów fal pływowych ostatecznie przyjęte do dalszej analizy zawiera tabela 4.10.

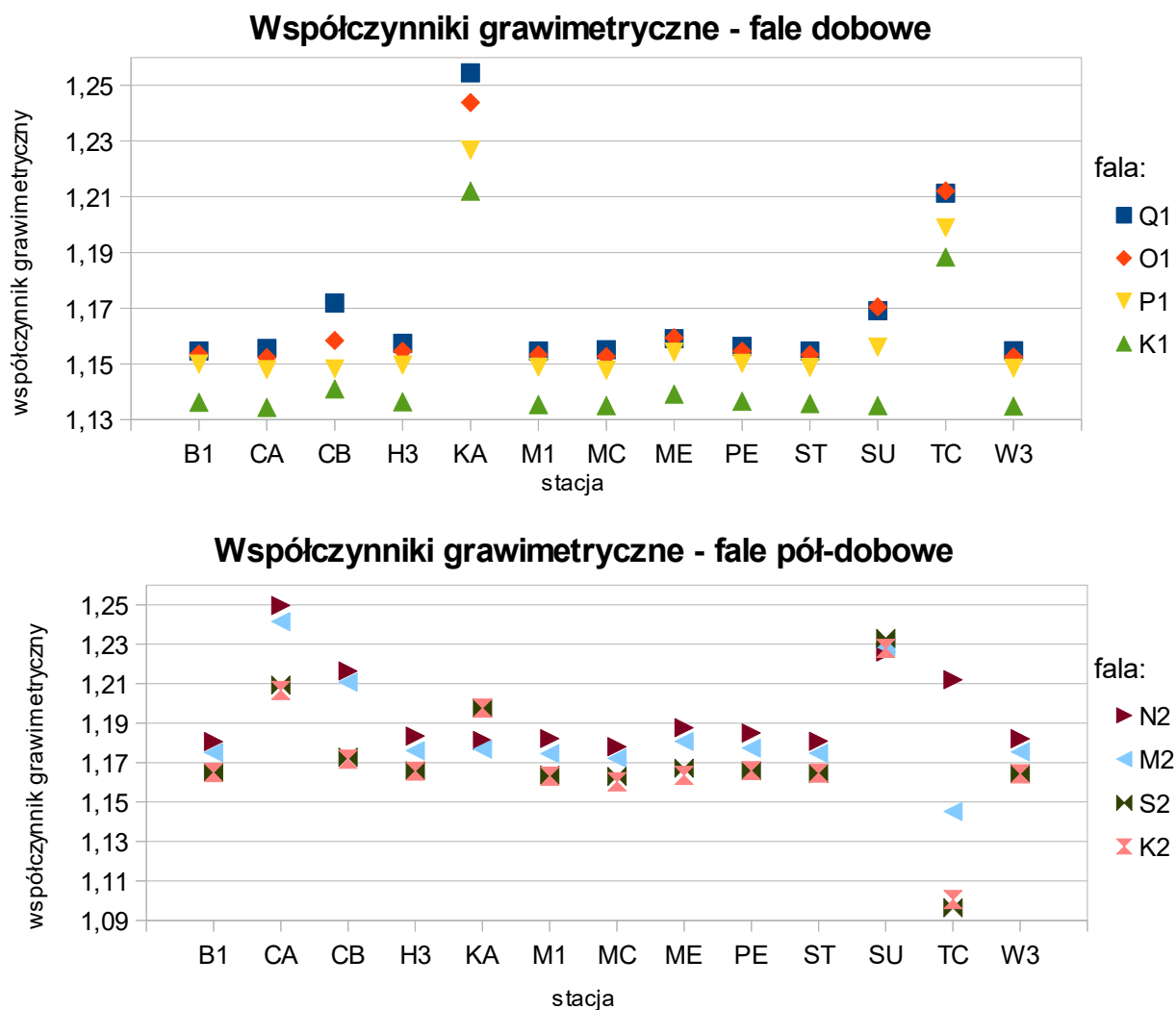
Tabela 4.10: Ostateczne wartości parametrów fal pływowych

	fala	STACJA																	
		B1	B2	CA	CB	H3	KA	MI	M2	MC	ME	PE	S1	S2	ST	SU	TC	W3	W4
amplituda teor. [nm/s ²]	Q1	59,1049	59,1049	59,4815	56,1015	58,5209	56,8195	58,3615	58,3615	59,4797	51,3364	58,6382	53,7727	53,7727	59,0288	53,7727	57,0691	58,8880	58,8880
	O1	308,6992	308,6992	310,6661	293,0123	305,6489	296,7625	304,8165	304,8165	310,6564	268,1251	306,2613	280,8492	280,8492	308,3014	280,8492	298,0660	307,5661	307,5661
	P1	143,6121	143,6121	144,5271	136,3143	142,1931	138,0590	141,8058	141,8058	144,5227	124,7364	142,4780	130,6558	130,6558	143,4271	130,6558	138,6654	143,0850	143,0850
	K1	433,9650	433,9650	436,7299	411,9125	429,6769	417,1846	428,5067	428,5067	436,7164	376,9265	430,5378	394,8138	394,8138	433,4058	394,8138	419,0170	432,3721	432,3721
	N2	63,6242	63,6242	70,4864	95,7584	58,9111	93,1248	57,8872	57,8872	73,1491	35,5342	59,6917	102,5539	102,5539	62,8934	102,5539	92,1180	61,5994	61,5994
	M2	332,3003	332,3003	368,1403	500,1326	307,6841	486,3775	302,3369	302,3369	382,0474	185,5902	311,7614	535,6243	535,6243	328,4833	535,6243	481,1192	321,7250	321,7250
	S2	154,5882	154,5882	171,2613	232,6649	143,1366	226,2660	140,6491	140,6491	177,7309	86,3378	145,0334	249,1759	249,1759	152,8126	249,1759	223,8198	149,6686	149,6686
	K2	42,0069	42,0069	46,5375	63,2230	38,8951	61,4842	38,2191	38,2191	48,2955	23,4609	39,4105	67,7096	67,7096	41,5244	67,7096	60,8194	40,6700	40,6700
amplituda [nm/s ²]	Q1	68,2440	68,2806	68,7370	65,7417	67,7327	71,2802	67,3850	67,4019	68,7061	59,5013	67,8055	62,9406	62,9417	68,1566	62,8637	69,1264	68,0022	67,9510
	O1	356,0880	356,1374	357,9702	339,4247	352,8882	369,1101	351,5365	351,4847	358,0731	310,8661	353,6039	328,8405	328,8572	355,5689	328,7197	361,2825	354,4797	354,1568
	P1	165,1470	165,1701	165,9056	156,5203	163,4566	169,3597	162,9147	162,8577	165,8682	143,9685	163,8830	151,0429	151,0416	164,7549	151,0426	166,2443	164,3336	164,2048
	K1	493,0865	493,1562	495,4101	469,9966	488,2951	505,6321	486,5302	486,6588	495,6963	429,3666	489,3519	447,9871	448,0150	492,2293	448,1365	497,9199	490,6783	490,1940
	N2	75,1195	75,1149	88,0836	116,4827	69,7187	110,0011	68,4342	68,4237	86,1742	42,2037	70,7347	125,7110	125,7159	74,2678	125,7383	111,6437	72,8145	72,7452
	M2	390,4967	390,5628	457,0277	605,5421	361,8483	572,3883	355,0997	355,0572	447,8475	219,1385	367,0414	658,0525	658,0957	385,8826	658,0755	550,9792	378,1701	377,7906
	S2	180,1186	180,1206	207,1097	272,8694	166,8867	270,9988	163,6623	163,6673	206,7139	100,7746	169,0916	307,2025	307,2164	177,9412	307,2141	245,4008	174,2748	174,1204
	K2	48,9390	48,9460	56,1515	74,0815	45,3394	73,6354	44,4539	44,4710	56,0380	27,2968	45,9506	83,1525	83,1475	48,3603	83,1382	66,9386	47,3510	47,2745
współczynnik grawimetryczny	Q1	1,1546	1,1552	1,1556	1,1718	1,1574	1,2545	1,1546	1,1549	1,1551	1,1590	1,1563	1,1705	1,1705	1,1546	1,1691	1,2113	1,1548	1,1539
	O1	1,1535	1,1537	1,1523	1,1584	1,1546	1,2438	1,1533	1,1531	1,1526	1,1594	1,1546	1,1709	1,1709	1,1533	1,1704	1,2121	1,1525	1,1515
	P1	1,1500	1,1501	1,1479	1,1482	1,1495	1,2267	1,1489	1,1485	1,1477	1,1542	1,1502	1,1560	1,1560	1,1487	1,1560	1,1989	1,1485	1,1476
	K1	1,1362	1,1364	1,1344	1,1410	1,1364	1,2120	1,1354	1,1357	1,1351	1,1391	1,1366	1,1347	1,1348	1,1357	1,1351	1,1883	1,1349	1,1337
	N2	1,1807	1,1806	1,2497	1,2164	1,1835	1,1812	1,1822	1,1820	1,1781	1,1877	1,1850	1,2258	1,2259	1,1809	1,2261	1,2120	1,1821	1,1809
	M2	1,1751	1,1753	1,2414	1,2108	1,1760	1,1768	1,1745	1,1744	1,1722	1,1808	1,1773	1,2286	1,2287	1,1747	1,2286	1,1452	1,1754	1,1743
	S2	1,1652	1,1652	1,2093	1,1728	1,1659	1,1977	1,1636	1,1637	1,1631	1,1672	1,1659	1,2329	1,2329	1,1644	1,2329	1,0964	1,1644	1,1634
	K2	1,1650	1,1652	1,2066	1,1717	1,1657	1,1976	1,1631	1,1636	1,1603	1,1635	1,1659	1,2281	1,2280	1,1646	1,2279	1,1006	1,1643	1,1624
faza [°]	Q1	-0,0443	-0,0468	0,7521	0,9005	-0,0886	0,2124	-0,0005	-0,0127	-0,0358	0,1579	-0,0223	1,4260	1,4253	-0,1145	1,4231	1,7134	-0,0670	-0,0550
	O1	0,0306	0,0279	0,8014	0,3395	0,0208	-0,5160	0,0388	0,0343	0,0515	0,1006	0,0522	0,4179	0,4127	0,0132	0,4175	0,5892	0,0618	0,0637
	P1	-0,0537	-0,0674	1,0218	-0,0964	-0,0112	-1,6758	-0,0088	0,0304	0,0339	-0,1383	-0,0248	-0,9340	-0,9337	0,0073	-0,8462	-1,0867	0,0012	0,0014
	K1	0,0044	-0,0008	0,6732	-0,1742	0,0280	-1,5788	0,0309	0,0289	0,0756	0,0257	0,0199	-0,9546	-0,9578	0,0225	-0,9437	-1,1130	0,0460	0,0471
	N2	0,1805	0,1721	1,1783	0,4584	0,0908	1,2655	-0,0239	-0,0361	0,0547	-0,1285	-0,0350	2,0894	2,0825	0,1794	2,0925	-3,7271	0,0570	0,0504
	M2	-0,2182	-0,2169	0,0070	-0,4329	-0,2960	1,9925	-0,3296	-0,3287	-0,2198	-0,3029	-0,3653	1,5645	1,5570	-0,2236	1,5698	-4,4130	-0,2753	-0,2766
	S2	-0,6092	-0,5930	-1,2734	-0,9633	-0,6089	1,4162	-0,6488	-0,6654	-0,6545	-0,5933	-0,7014	-0,2411	-0,2502	-0,6196	-0,2390	-3,8202	-0,6587	-0,6543
	K2	-0,3401	-0,3087	-0,9057	-0,7793	-0,2567	1,8267	-0,3594	-0,3508	-0,2829	-0,4095	-0,4087	0,1312	0,1277	-0,2870	0,1490	-3,8471	-0,3573	-0,3546

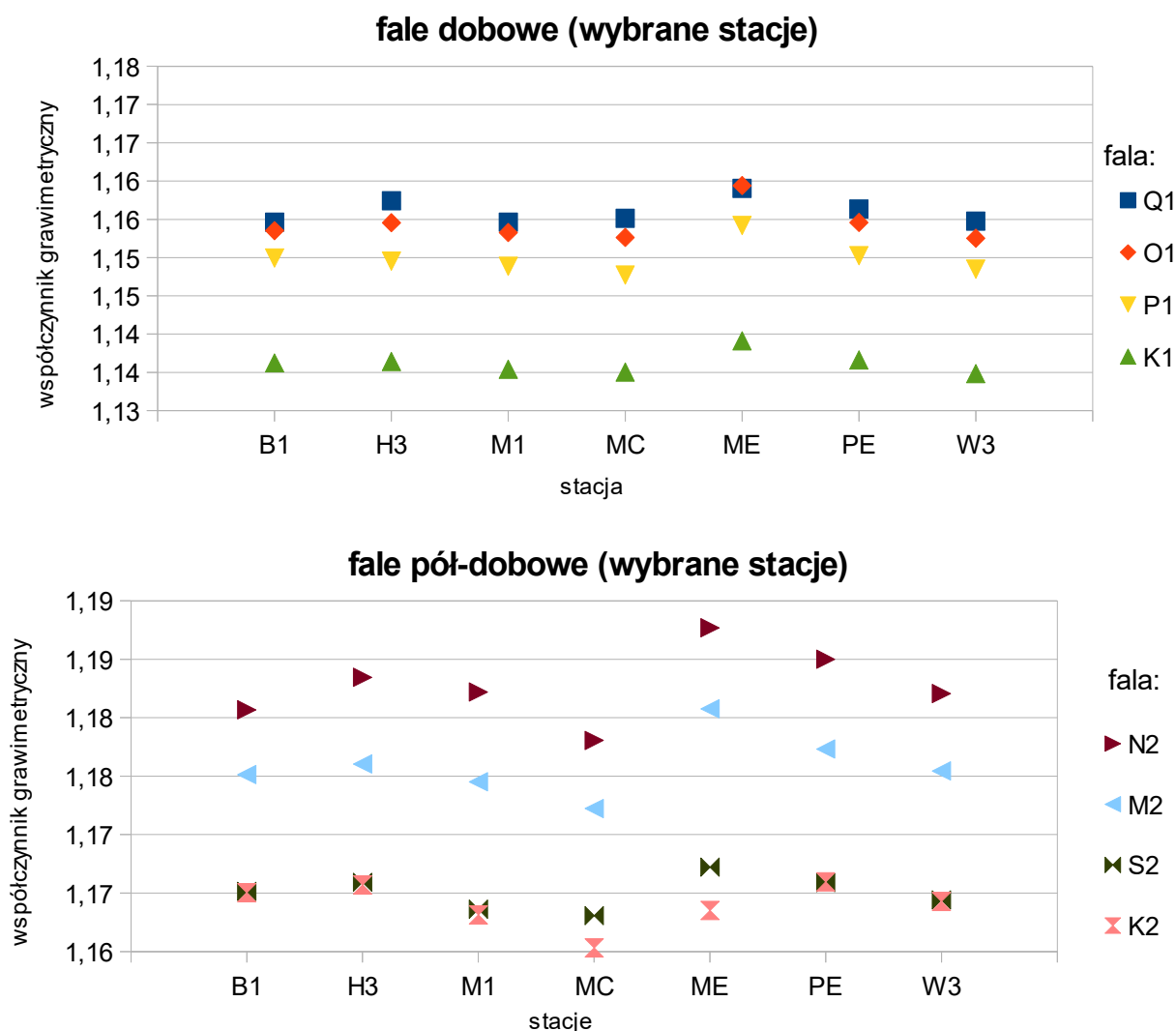
4.4. Analiza wyznaczonych parametrów

Poniższa analiza otrzymanych współczynników grawimetrycznych i faz fal pływowych dotyczy wielkości skorygowanych o pośredni efekt oceaniczny (zestawionych w tabeli 4.10).

Otrzymane wartości współczynników grawimetrycznych można porównać ze względu na położenie stacji obserwacyjnej. Poniższe wykresy przedstawiają zestawienie wyznaczonych współczynników grawimetrycznych dla wszystkich punktów. W przypadku stacji, na których prowadzone są obserwacje kilkoma instrumentami, wybrano tylko jeden z nich. W celu uczynienia rysunku podzielono współczynniki ze względu na charakter fali (rys. 4.10). Następnie wyodrębniono wartości wyraźnie odstające od większości tj. współczynniki na stacjach KA i TC dla fal dobowych oraz dodatkowo CA, CB i SU dla fal pół-dobowych. Pozostałe przedstawiono na rys. 4.11.



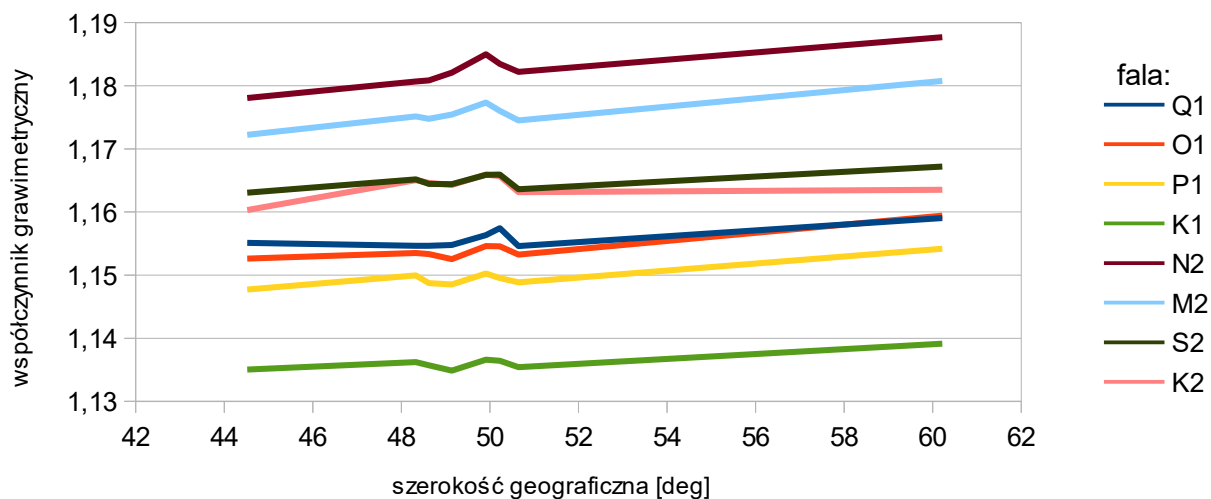
Rysunek 4.10: Wyznaczone współczynniki grawimetryczne dla wszystkich stacji



Rysunek 4.11: Wyznaczone współczynniki grawimetryczne dla wybranych stacji

Wybrane w ten sposób stacje znajdują się w Europie. Ponadto punkty odrzucone znajdują się stosunkowo blisko linii brzegowej oceanu. W związku z tym trudno określić konkretną zależność wartości współczynnika grawimetrycznego od szerokości geograficznej.

Współczynniki na stacji KA wyraźnie odstają dla wszystkich fal w paśmie dobowym, natomiast w przypadku pływów pół-dobowych N2 i M2 (księżycowych) zachowują się podobnie jak na stacjach europejskich. Z kolei współczynniki dla fal K2 i S2 najbardziej odbiegają na stacji TC, gdzie osiągają minimalne wartości dla całego opracowania. Zagęszczenie stacji w Europie pozwala na bardziej konkretną analizę zależności od szerokości geograficznej. Na rys. 4.12 widać, że wartości współczynników grawimetrycznych wzrastają w kierunku północnym.



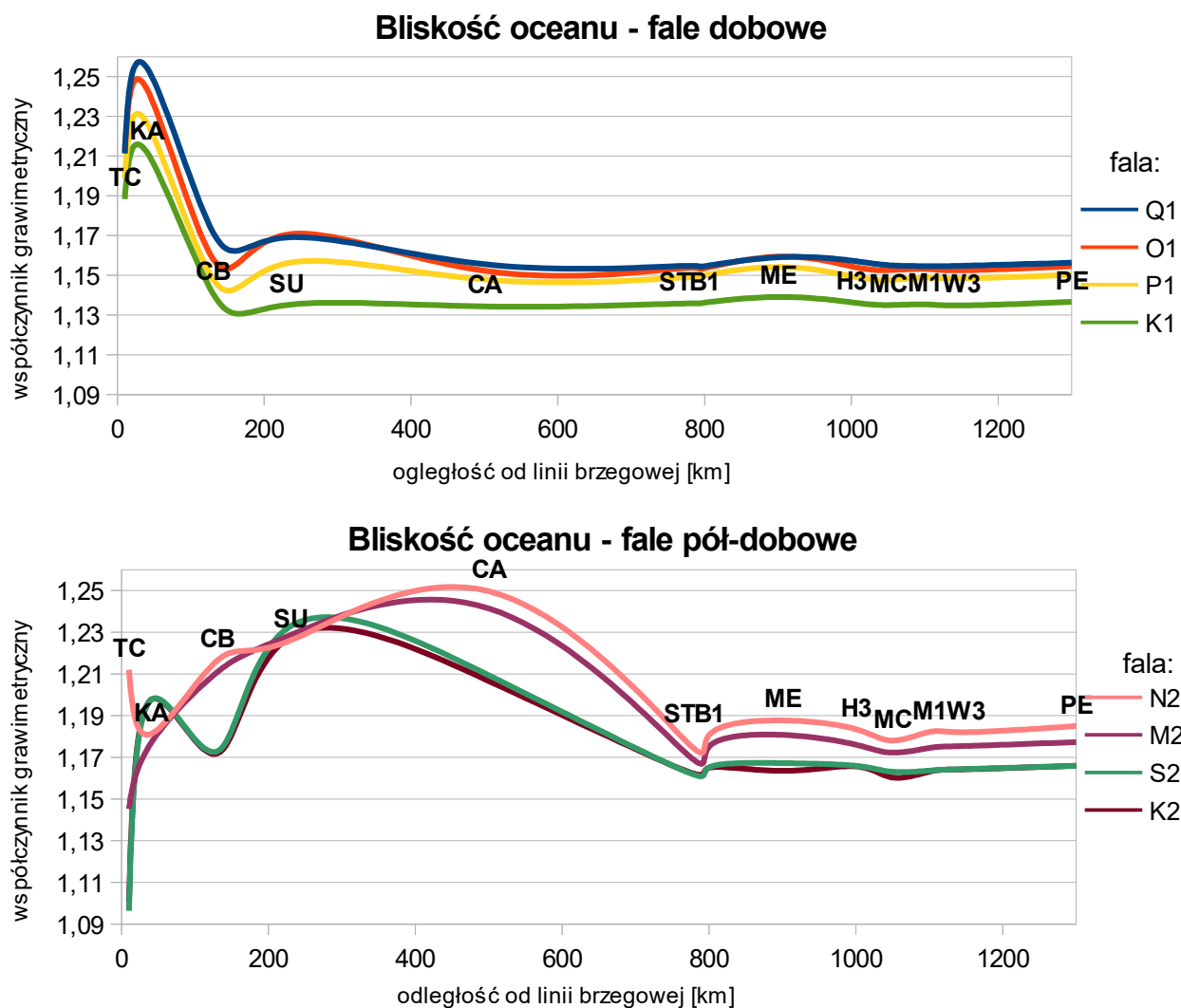
Rysunek 4.12: Współczynniki grawimetryczne - zależność od szerokości geograficznej dla stacji europejskich

Jednak te odizolowane wartości współczynników grawimetrycznych, bardziej zależą od rozkładu mas, a co za tym idzie od bliskości oceanów. Odległość poszczególnych stacji od linii brzegowej określono w sposób przybliżony z wykorzystaniem aplikacji Google Earth (google.pl/intl/pl/earth/) i zamieszczono w tabeli 4.11.

Tabela 4.11: Odległości stacji od linii brzegowej oceanu [km]

B1	CA	CB	H3	KA	MI	MC	ME	PE	ST	SU	TC	W3
900	500	130	1000	40	1100	1050	900	1300	760	230	10	1150

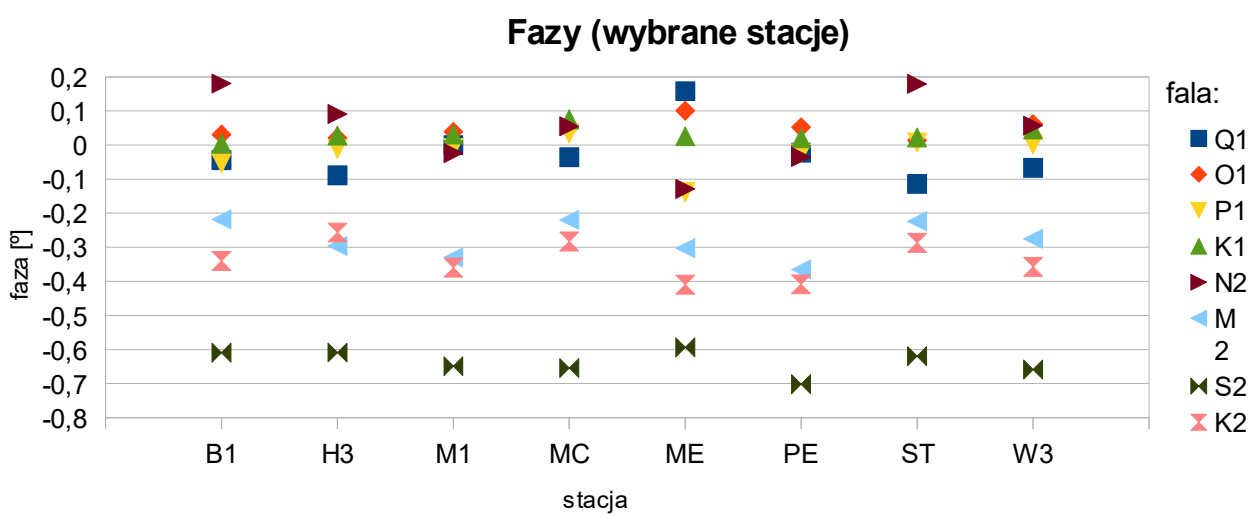
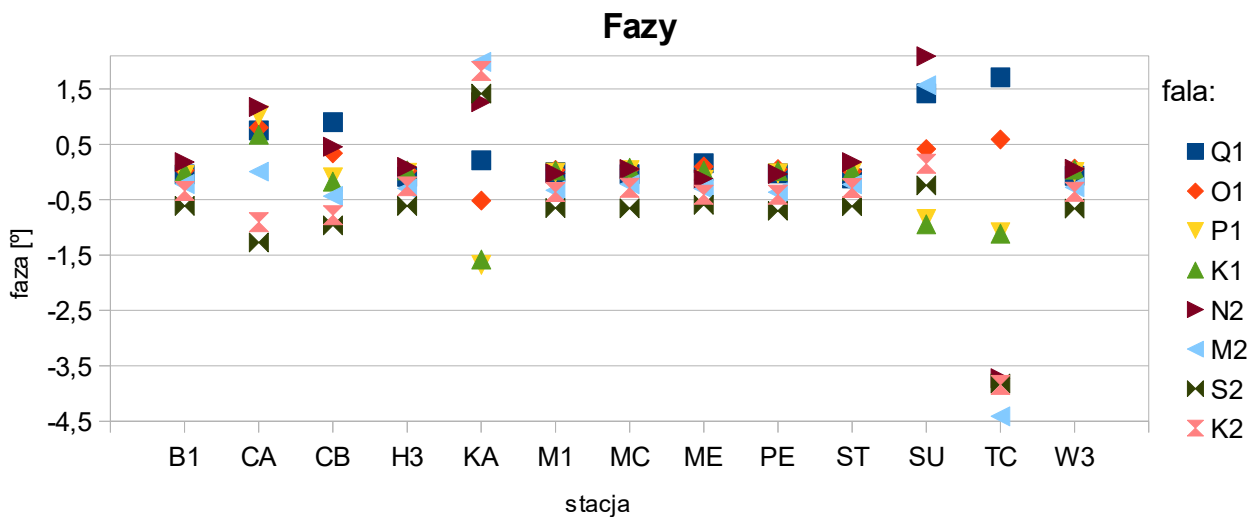
Podobnie jak powyżej podzielono wyniki na grupy fal i sporządzono wykresy zależności współczynników grawimetrycznych od odległości do oceanu (rys. 4.13).



Rysunek 4.13: Współczynniki grawimetryczne - zależność od bliskości oceanu

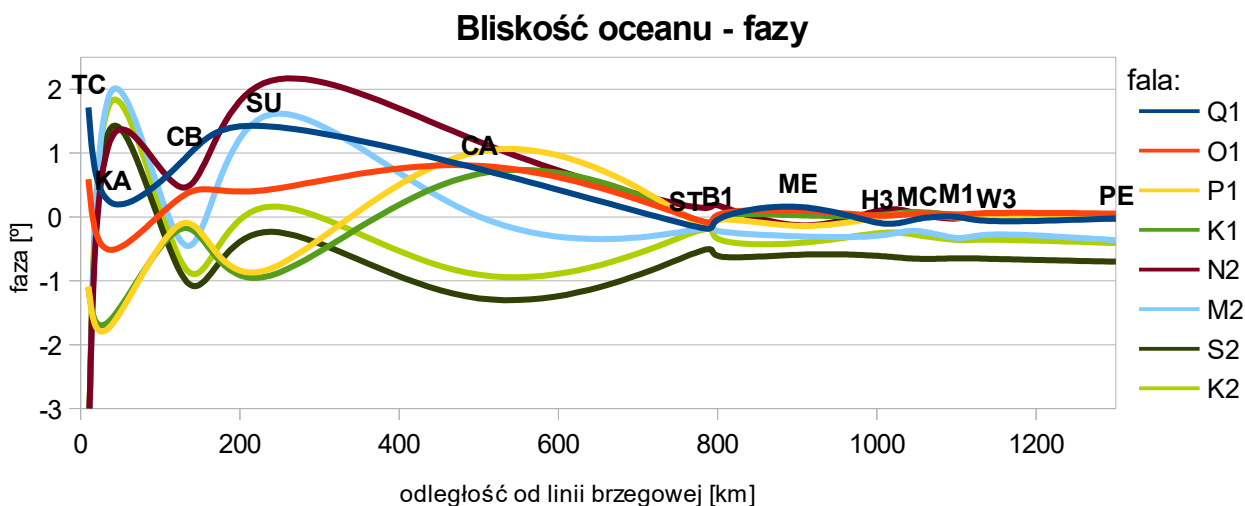
Na powyższych wykresach można zaobserwować, że wpływ mas oceanicznych na wartość współczynnika grawimetrycznego jest największy dla punktów położonych do 100 km od linii brzegowej w przypadku pływów dobowych, oraz do 500 km w przypadku pływów pół-dobowych. Zmiana współczynników wraz z odległością od oceanu świadczy o niepełnej korekcji oceanicznej, co wynika z niedoskonałości wykorzystanego programu SPOTL.

Podobnych zależności od okresowości fali nie stwierdzono dla faz. Jednak fazy uzyskane dla pływów pół-dobowych są bardziej zróżnicowane. Poniższe wykresy (rys. 4.14) stanowią zestawienie wyznaczonych faz dla wszystkich stacji.



Rysunek 4.14: Wyznaczone fazy fal pływowych

Analogicznie jak w przypadku współczynników grawimetrycznych zaobserwowano odstające wartości faz w punktach bliskich linii brzegowej oceanu. Jednak nie stwierdzono takiej samej zależności od odległości do oceanu. W tych punktach fazy osiągają ekstremalne wartości, odbiegające od pozostałych, co widać na poniższym wykresie (rys. 4.15).



Rysunek 4.15: Zależność fazy fal pływowych od odległości do oceanu

Średnia wartość współczynnika grawimetrycznego wynosi 1,1714, maksymalna 1,2545 oraz minimalna 1,0964. Odchylenie standardowe dla poszczególnych fal waha się od 0,0203 do 0,0325, co stanowi 1,8-2,8% wartości średniej. Jest to dość duże zróżnicowanie, jednak należy wziąć pod uwagę fakt, że opracowaniu podlegają punkty rozlokowane globalnie.

Analizy te pokazują, że nie można interpretować obserwacji pływowych niezależnie od wyżej opisanych czynników. Będą one miały również znaczenie podczas weryfikacji modeli pływowych w dalszej części pracy.

5. Porównanie z modelami geofizycznymi

Wyznaczone uprzednio współczynniki grawimetryczne porównano z wartościami teoretycznymi pochodzącymi z kilku modeli pływów ziemskich, w tym jednego empirycznego. Wybrane modele teoretyczne zostały obliczone w oparciu o różne założenia dotyczące budowy Ziemi, figury Ziemi i geodynamiki. Weryfikacja modeli polega na ocenie zgodności teoretycznych parametrów fal pływowych ze stanem faktycznym, czyli z wartościami uzyskanymi z obserwacji grawimetrycznych.

5.1. Opis wybranych pływowych modeli Ziemi

Analizie zostały poddane cztery modele pływów Ziemi:

- WD – model Wahr-Dehant,
- DDW99,
- M2001,
- GEMGT – model empiryczny.

W modelu Wahr-Dehant [Dehant, 1987] parametry pływowe zostały wyznaczone przy założeniu jednostajnie wirującej elipsoidalnej Ziemi z nieelastycznym płaszczem, płynnym jądrem zewnętrznym, elastycznym jądrem wewnętrznym, bez oceanów. Współczynniki grawimetryczne oraz liczby Love'a zostały obliczone w oparciu o opracowanie Wahr'a [1981], w której wyznaczono jak rotacja i kształt poszczególnych warstw Ziemi wpływają na deformacje Ziemi. Poprawiono również estymację nutacji jądra w paśmie prawie-dobowym. Wyniki tej pracy wykorzystala Dehant tworząc model pływowy, w którym parametry stały się zależne od szerokości geograficznej, możliwe do wyznaczenia dla dowolnej fali pływowej. Współczynniki grawimetryczne z modelu WD zostały wykorzystane jako wartości estymowane w procesie wyrównania metodą najmniejszych kwadratów.

DDW99 [Dehant i in., 1999] jest modelem opracowanym dla dwóch wirujących, niesferycznych modeli Ziemi. Pierwszym (1), o hydrostatycznej powierzchni Ziemi oraz elastycznym płaszczu i jądrze. W drugim (2) o elipsoidalnym kształcie z nieelastycznym płaszczem oraz założeniem niehydrostatycznego stanu początkowego, przy czym wzięto pod uwagę skutki konwekcji w płaszczu Ziemi i wynikające z niego odkształcenia. W modelu pływowym wyznaczono współczynniki grawimetryczne oraz liczby Love'a dla pływowych deformacji skorupy ziemskiej oraz przemieszczenia mas Ziemi. Wartości tych parametrów określono dla poszczególnych częstotliwości pływowych oraz poszczególnego stopnia i rzędu potencjału pływowego dla fal długookre-

sowych, dobowych oraz kilku fal o wyższych częstotliwościach. Podczas opracowywania tego modelu wykryto i poprawiono pewne błędy w wynikach przedstawionych wcześniej przez Wahr'a (1981).

Model M2001 [Mathews, 2001] dotyczy liczb Love'a i współczynników grawimetrycznych jedynie dla pływów dobowych. Większość z tych wartości określono w oparciu o sejsmologiczny model Ziemi tj. wyznaczony na podstawie równań deformacji pływowych. Dla pozostałych zastosowano iteracyjne wyrównanie w celu jak najlepszego dopasowania wartości teoretycznych i obserwowanych oraz zachowaniu zależności między pływami Ziemi sztywnej, pływami oceanicznymi oraz swobodną nutacją jądra Ziemi. Wykorzystano model Ziemi PREM z założeniem równowagi hydrostatycznej.

Globalny eksperymentalny model grawimetrycznych pływów Ziemi [GEMGT] jest modelem empirycznym opracowanym na podstawie obserwacji z grawimetrów nadprzewodnikowych [Xu i in., 2014]. Wykorzystano dane z 19 stacji GGP obejmujące łącznie okres od 1997 do 2002 roku. Obserwacje odpowiednio oczyszczono, wyeliminowano błędy oraz skorygowano ze względu na efekty oceaniczne, atmosferyczne wpływ swobodnych drgań jądra i wyznaczono współczynniki grawimetryczne dla fal dobowych o określonych częstotliwościach. Określono również różnice faz dla poszczególnych fal, jednak pod tym względem model nie jest zbyt dokładny, ze względu na słabą kalibrację niektórych instrumentów.

Współczynniki grawimetryczne teoretyczne dla modelu WD zostały wyznaczone w programie ETERNA. W tabeli 5.1 przedstawiono współczynniki pochodzące z czterech pozostałych opisanych powyżej modeli.

Tabela 5.1: Teoretyczne wartości parametrów z modeli pływowych

fala	DDW99 (1)	DDW99 (2)	M2001	GEMGT	GEMGT ($\Delta\phi$ [°])
Q1	1,15280	1,15425	1,15407	1,15482	0,0104
O1	1,15279	1,15424	1,15398	1,15500	0,0103
P1	1,14777	1,14915	1,14891	1,14992	0,0074
K1	1,13283	1,13489	1,13495	1,13709	0,0061
N2	-	-	-	-	-
M2	1,16030	1,16172	-	1,16246	0,0098
S2	-	-	-	-	-
K2	-	-	-	-	-

Wartości zamieszczone w tabeli 5.1 to składniki stałe δ_s (*spheroidal constant*) dla poszczególnych fal. Współczynniki grawimetryczne są zależne od szerokości geograficznej, dlatego, aby wyznaczyć wartości δ dla konkretnego położenia należy wprowadzić poprawkę ze względu na szerokość zgodnie ze wzorem [na podstawie: Wahr, 1981; Dehant, 1987]:

$$\delta = \delta_s + \delta_+ \frac{\sqrt{6}}{4} (7 \cos^2(90^\circ - \varphi) - 3), \quad \text{dla fal dobowych} \quad (18)$$

$$\delta = \delta_s + \delta_+ \frac{\sqrt{3}}{2} (7 \cos^2(90^\circ - \varphi) - 1), \quad \text{dla fal pół-dobowych} \quad (19)$$

gdzie: δ_+ - współczynnik zależności od szerokości geograficznej (*latitude dependent factor*) pochodzący z modelu oraz φ - szerokość geograficzna. Tabela 5.2 przedstawia wartości δ_+ dla poszczególnych modeli. Twórcy modelu GEMGT wyznaczyli te wartości tylko dla fal O1 i M2.

Tabela 5.2: Latitude-dependent factor δ_+ w modelach pływowych

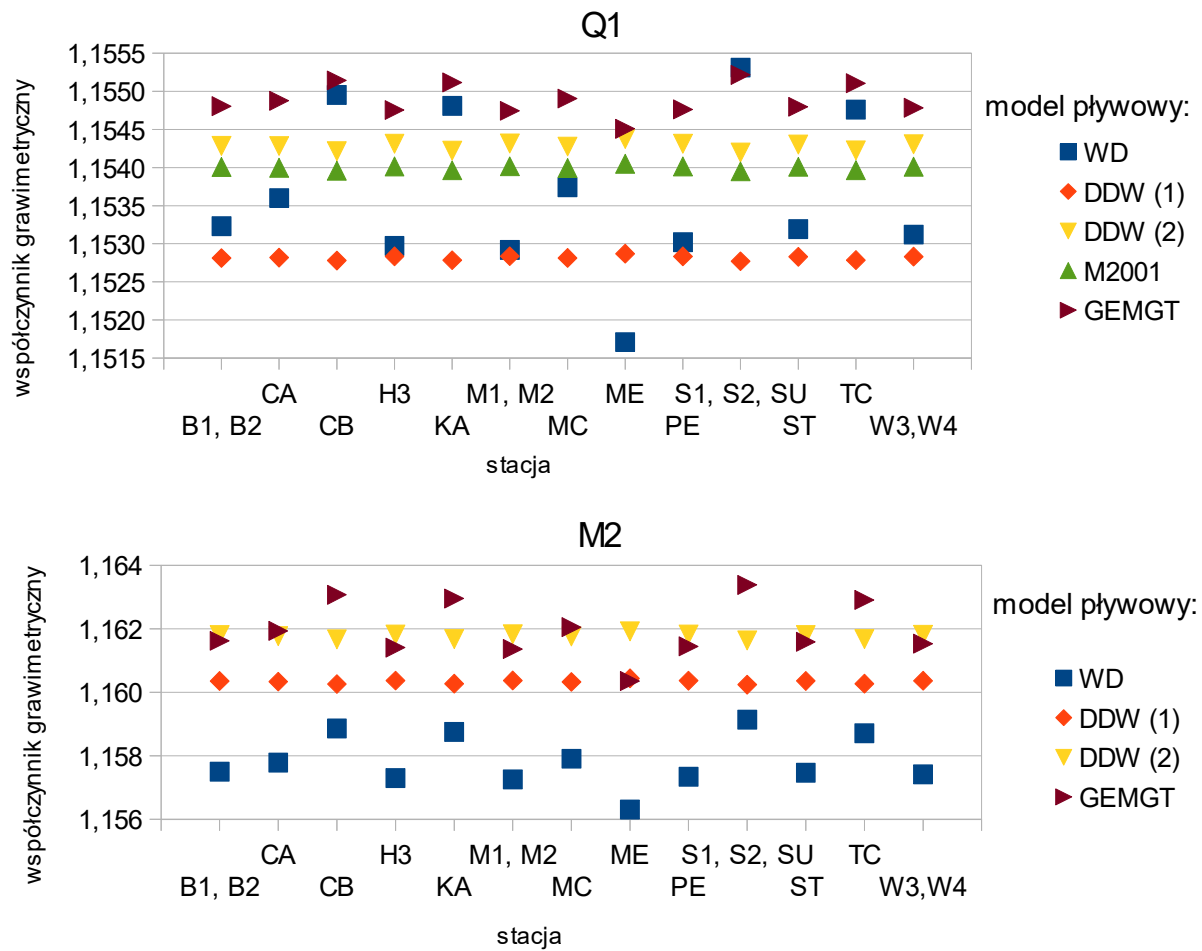
fala	DDW99 (1)	DDW99 (2)	M2001	GEMGT
Q1	0,00005	0,00009	0,00005	-
O1	0,00004	0,00008	0,00005	-0,00025
P1	-0,00013	-0,00010	0,00005	-
K1	-0,00060	-0,00057	0,00005	-
N2	-	-	-	-
M2	0,00007	0,00010	-	-0,00107
S2	-	-	-	-
K2	-	-	-	-

Dla większości modeli wyznaczono współczynniki grawimetryczne tylko dla fal dobowych (oraz fali M2). Dlatego jedynie te wartości zostaną poddane dalszej analizie. Wartości modelowe są względem siebie zgodne z odchyleniem standardowym od 0,0007 (dla fali P1) do 0,0043 (dla fali M2). W tabeli 5.3 przedstawiono wartości modelowe współczynników grawimetrycznych dla wszystkich stacji. Współczynniki w modelu GEMGT, z wyjątkiem O1 i M2, przyjęto jako niezależne od szerokości geograficznej.

Tabela 5.3: Wartości modelowe współczynników grawimetrycznych

model	fala	STACJA												
		B1, B2	CA	CB	H3	KA	MI, M2	MC	ME	PE	S1, S2, SU	ST	TC	W3,W4
WD	Q1	1,1534	1,1538	1,1552	1,1532	1,1550	1,1531	1,1539	1,1519	1,1532	1,1555	1,1534	1,1550	1,1533
	O1	1,1532	1,1536	1,1550	1,1530	1,1548	1,1529	1,1537	1,1517	1,1530	1,1553	1,1532	1,1548	1,1531
	P1	1,1477	1,1481	1,1494	1,1474	1,1493	1,1474	1,1482	1,1462	1,1475	1,1498	1,1477	1,1492	1,1476
	K1	1,1322	1,1326	1,1339	1,1320	1,1338	1,1319	1,1327	1,1307	1,1320	1,1343	1,1322	1,1337	1,1321
	N2	1,1575	1,1578	1,1589	1,1573	1,1588	1,1573	1,1579	1,1563	1,1573	1,1591	1,1575	1,1587	1,1574
	M2	1,1575	1,1578	1,1589	1,1573	1,1588	1,1573	1,1579	1,1563	1,1573	1,1591	1,1575	1,1587	1,1574
	S2	1,1575	1,1578	1,1589	1,1573	1,1588	1,1573	1,1579	1,1563	1,1573	1,1591	1,1575	1,1587	1,1574
	K2	1,1575	1,1578	1,1589	1,1573	1,1588	1,1573	1,1579	1,1563	1,1573	1,1591	1,1575	1,1587	1,1574
DDW (1)	Q1	1,1528	1,1528	1,1528	1,1528	1,1528	1,1528	1,1528	1,1529	1,1528	1,1528	1,1528	1,1528	1,1528
	O1	1,1528	1,1528	1,1528	1,1528	1,1528	1,1528	1,1528	1,1529	1,1528	1,1528	1,1528	1,1528	1,1528
	P1	1,1477	1,1528	1,1528	1,1528	1,1528	1,1528	1,1528	1,1529	1,1528	1,1528	1,1528	1,1528	1,1528
	K1	1,1325	1,1326	1,1331	1,1324	1,1330	1,1324	1,1327	1,1320	1,1324	1,1332	1,1325	1,1330	1,1325
	M2	1,1604	1,1603	1,1603	1,1604	1,1603	1,1604	1,1603	1,1604	1,1604	1,1602	1,1604	1,1603	1,1604
DDW (2)	Q1	1,1543	1,1543	1,1542	1,1543	1,1542	1,1543	1,1543	1,1544	1,1543	1,1542	1,1543	1,1542	1,1543
	O1	1,1543	1,1543	1,1542	1,1543	1,1542	1,1543	1,1543	1,1544	1,1543	1,1542	1,1543	1,1542	1,1543
	P1	1,1491	1,1491	1,1492	1,1491	1,1492	1,1491	1,1491	1,1490	1,1491	1,1492	1,1491	1,1492	1,1491
	K1	1,1346	1,1347	1,1351	1,1345	1,1351	1,1345	1,1347	1,1341	1,1345	1,1352	1,1346	1,1351	1,1345
	M2	1,1618	1,1618	1,1617	1,1618	1,1617	1,1618	1,1618	1,1619	1,1618	1,1616	1,1618	1,1617	1,1618
M2001	Q1	1,1541	1,1541	1,1540	1,1541	1,1541	1,1541	1,1541	1,1541	1,1541	1,1540	1,1541	1,1541	1,1541
	O1	1,1540	1,1540	1,1540	1,1540	1,1540	1,1540	1,1540	1,1540	1,1540	1,1539	1,1540	1,1540	1,1540
	P1	1,1489	1,1489	1,1489	1,1489	1,1489	1,1489	1,1489	1,1490	1,1489	1,1489	1,1489	1,1489	1,1489
	K1	1,1350	1,1350	1,1349	1,1350	1,1349	1,1350	1,1350	1,1350	1,1350	1,1349	1,1350	1,1349	1,1350
GEMGT	Q1	1,1548	1,1548	1,1548	1,1548	1,1548	1,1548	1,1548	1,1548	1,1548	1,1548	1,1548	1,1548	1,1548
	O1	1,1548	1,1549	1,1551	1,1548	1,1551	1,1547	1,1549	1,1545	1,1548	1,1552	1,1548	1,1551	1,1548
	P1	1,1499	1,1499	1,1499	1,1499	1,1499	1,1499	1,1499	1,1499	1,1499	1,1499	1,1499	1,1499	1,1499
	K1	1,1371	1,1371	1,1371	1,1371	1,1371	1,1371	1,1371	1,1371	1,1371	1,1371	1,1371	1,1371	1,1371
	M2	1,1616	1,1619	1,1631	1,1614	1,1630	1,1614	1,1621	1,1604	1,1614	1,1634	1,1616	1,1629	1,1615

Wartości współczynników grawimetrycznych na poszczególnych stacjach są najbardziej zróżnicowane dla modelu WD, co wyraźnie widać na wykresach poniżej (rys. 5.1). Wynika to z faktu, że δ_+ dla tego modelu, jest dużo większy niż w przypadku pozostałych modeli i wynosi ok -0,006 dla fal dobowych i -0,005 dla fal pół-dobowych. Nieco większym zróżnicowaniem charakteryzuje się również model GEMGT, szczególnie w przypadku fali M2. Wykresy na rys. 5.1 przedstawiają współczynniki grawimetryczne uzyskane z różnych modeli dla fal O1 i M2.



Rysunek 5.1: Modelowe współczynniki grawimetryczne dla fal O1 i M2

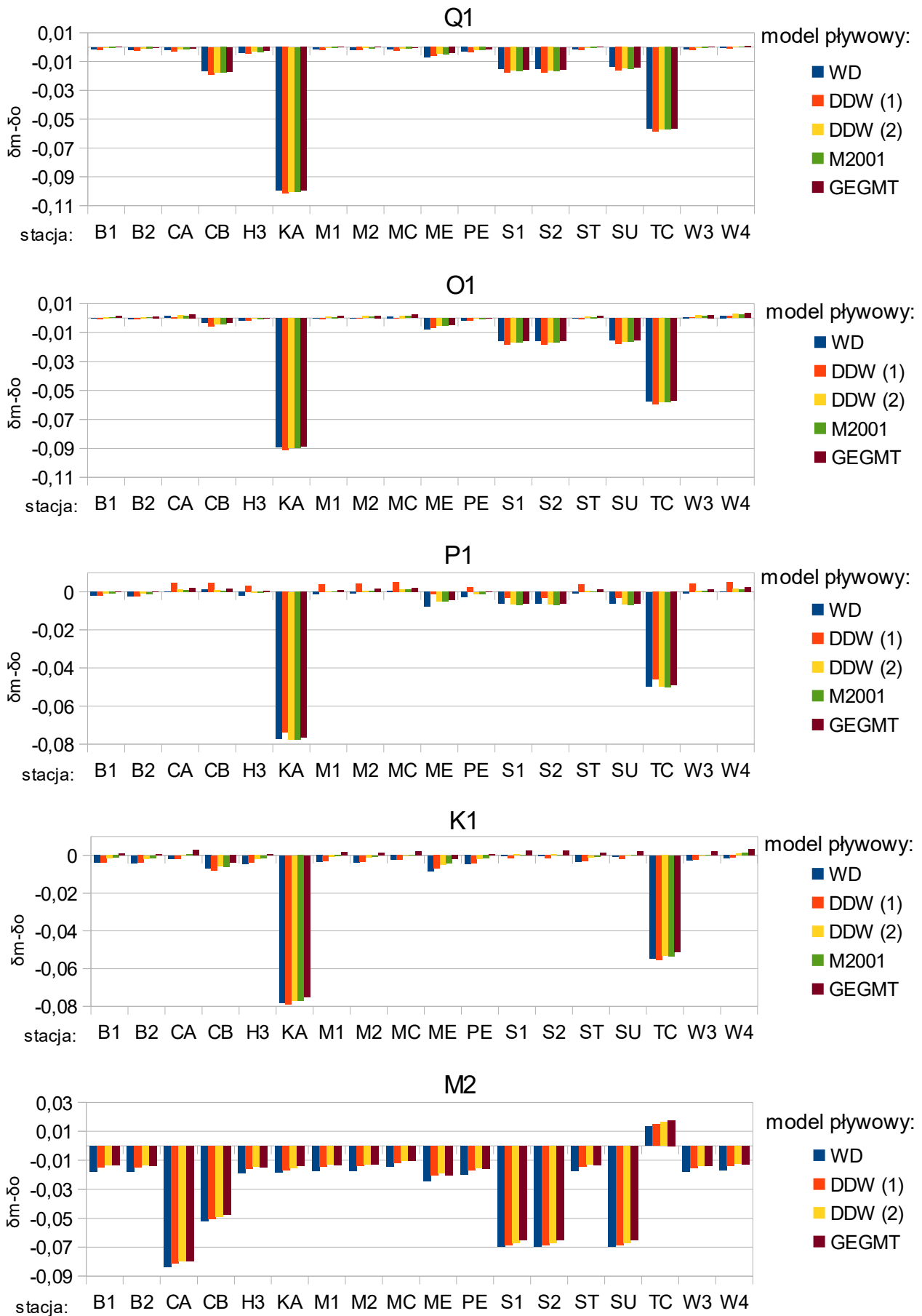
5.2. Weryfikacja modeli

Pochodzące z modeli pływowych współczynniki grawimetryczne zostaną następnie zweryfikowane o wartości uzyskane z pomiaru. Wyznaczone residua współczynników grawimetrycznych w postaci $\delta_m - \delta_o$ (gdzie δ_m – współczynnik teoretyczny dla danego modelu, δ_o – współczynnik wyznaczony z obserwacji) zostały przedstawione na rys. 5.2. W tej analizie również uwydatnia się niedoskonałe opracowanie obserwacji na niektórych stacjach, dlatego, dla poprawy przejrzystości wykresu sporządzono rys. 5.3 dla wybranych stacji, położonych w głębi lądu.

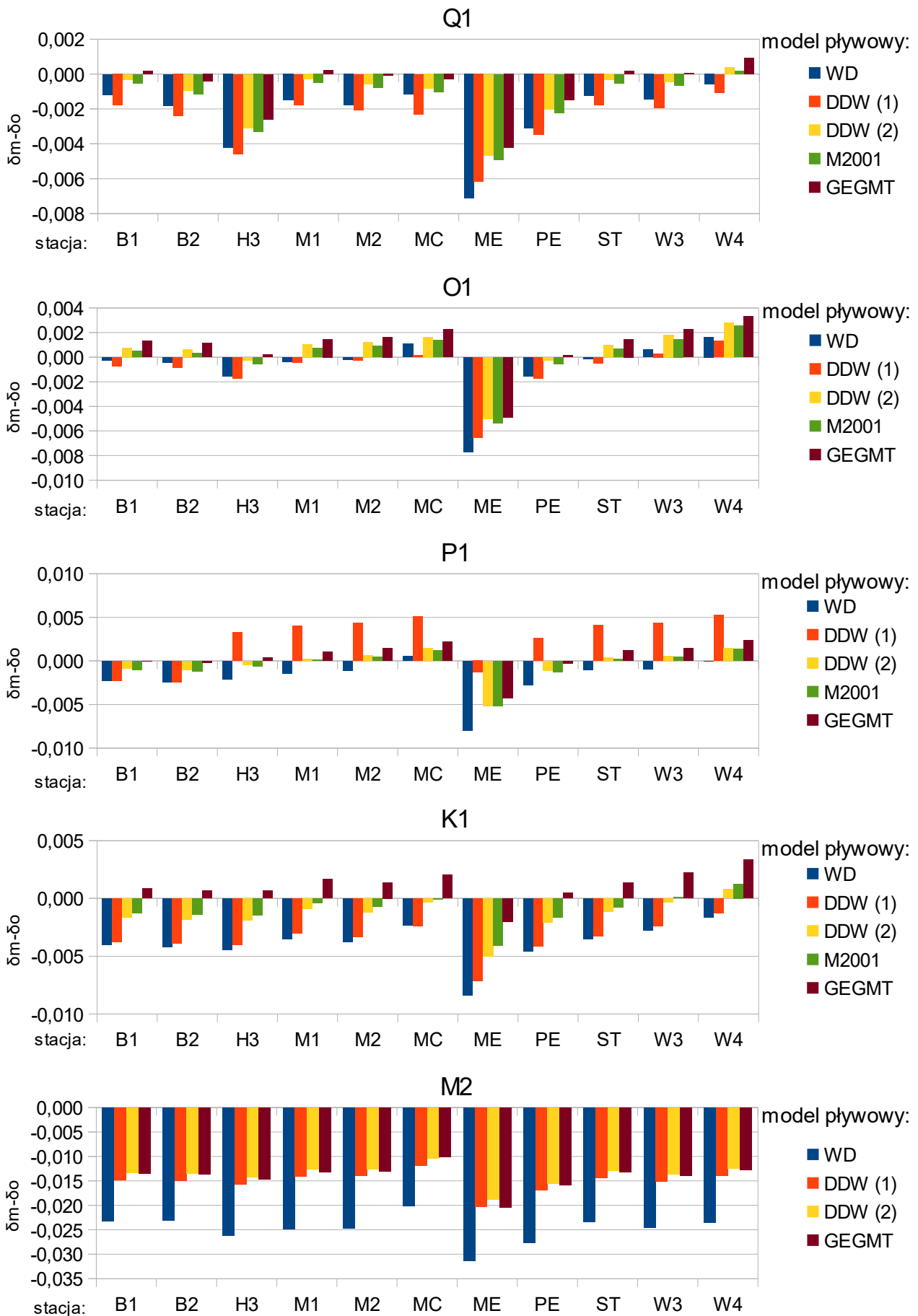
Uzyskane residua są zróżnicowane w zależności od stacji, fali i modelu pływowego, dlatego trudno jednoznacznie stwierdzić, który jest najbardziej zgodny ze stanem obserwowanym. Spośród modeli teoretycznych bardziej realistyczny jest model niehydrostatyczny DDW, co potwierdza się w wartościach residuów. Dla większości przypadków wykazuje on lepszą zgodność z pomiarem niż model hydrostatyczny. Modele DDW (2) i M2001 wykazują zbliżone wartości residuów. W modelu WD dla fali M2 dodatkowo ujawnia się błąd popełniony przez twórców modelu w kodzie obliczającym pływy stopnia $l \pm 2$, który w DDW został wykryty i poprawiony. Model empiryczny GEGMT jest stosunkowo dobrze dopasowany, osiąga najmniejsze residua (poniżej 0,0001), szczególnie w przypadku fali Q1, dla której ten model jest najpewniejszy na stacjach np. M2, W3, ST, które również były wykorzystane do jego opracowania. W pozostałych przypadkach nie wykazuje ekstremalnych wartości residuów i są one podobne do modeli teoretycznych. Wszystkie modele uzyskują maksymalne residua na stacji KA dla wszystkich rozpatrywanych fal dobowych oraz na stacji CA dla fali M2.

Rozbieżności pomiędzy wartościami teoretycznymi a wyznaczonymi z pomiaru wynikają w najmniejszym stopniu z charakteru i błędu modelu i są raczej spowodowane innymi czynnikami, takimi jak jakość wykorzystanego modelu pływów oceanicznych, niedoskonałość obliczenia efektu *loading*, a także słabej kalibracji instrumentów, co widać na przykładzie stacji z dwoma instrumentami (np. W3 i W4).

W przypadku fali M2 uzyskano bardzo duże residua w stosunku do pozostałych fal. Do podobnego wniosku doszli Baker i Bos [2003], wskazując fale O1, jako potencjalnie użyteczną do testowania modeli pływów Ziemi (w przeciwieństwie do M2).



Rysunek 5.2: Residua współczynników grawimetrycznych z różnych modeli dla wszystkich stacji



Rysunek 5.3: Residua współczynników grawimetrycznych z różnych modeli dla stacji w głębi lądu

W celu oszacowania zgodności modeli, dla każdego wyznaczono błąd średni kwadratowy w postaci:

$$MSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\delta_m - \delta_o)^2}}{n(n-1)} \quad (20)$$

oraz rozbieżność, opisaną procentowo jako:

$$\frac{|\delta_m - \delta_o|}{\delta_o} 100\% \quad (21)$$

średnią dla każdej fali, gdzie: δ_m – współczynnik grawimetryczny modelowy, δ_o – współczynnik grawimetryczny z pomiaru, n – liczba stacji.

Wyznaczone w ten sposób charakterystyki zamieszczono w tabeli 5.4. Ze względu na wyraźnie odstające wartości residuów, które istotnie zwiększają błąd modelu, wyłączono z obliczeń stacje KA i TC.

Tabela 5.4: Błędy i rozbieżności modeli pływowych

fala	błędy – MSR					rozbieżności [%]				
	WD	DDW1	DDW2	M2001	GEGMT	WD	DDW1	DDW2	M2001	GEGMT
Q1	0,00205	0,00239	0,00214	0,00217	0,00205	0,467	0,552	0,430	0,445	0,396
O1	0,00182	0,00210	0,00192	0,00195	0,00182	0,357	0,400	0,388	0,384	0,390
P1	0,00094	0,00098	0,00086	0,00089	0,00080	0,231	0,317	0,195	0,196	0,200
K1	0,00103	0,00098	0,00058	0,00052	0,00055	0,295	0,292	0,136	0,112	0,166
N2	0,01154	-	-	-	-	3,219	-	-	-	-
M2	0,01077	0,01035	0,01007	-	0,00991	2,810	2,596	2,475	-	2,462
S2	0,00908	-	-	-	-	1,898	-	-	-	-
K2	0,00849	-	-	-	-	1,764	-	-	-	-

Na podstawie uzyskanych błędów i rozbieżności można stwierdzić, że modele osiągają podobny poziom zgodności z obserwacjami grawimetrycznymi. Biorąc pod uwagę otrzymane i szacowane wcześniej błędy wyznaczonych parametrów fal pływowych (dokładność pomiarów i ich opracowania, błąd OTL itp.), a także to, że modele względem siebie są rozbieżne od 0,06% do 0,40%, można uznać, że modele są zgodne z pomiarem.

6. Podsumowanie

Przedmiotem niniejszej pracy było opracowanie obserwacji z grawimetrów nadprzewodnikowych prowadzące do wyznaczenia parametrów fal pływowych, głównie współczynników grawimetrycznych i faz. W tym celu wykorzystano dane z 13 stacji rejestrujących w sposób ciągły (z godzinnym interwałem) wartości zmian przyspieszenia siły ciężkości oraz ciśnienia atmosferycznego. Wyeliminowano efekty pośrednie atmosferyczny i oceaniczny (*loading*), a następnie porównano skorygowane współczynniki grawimetryczne z wartościami teoretycznymi, pochodzącymi z modeli pływowych. Analiza wyników tych obliczeń prowadzi do następujących wniosków:

1. Długość obserwacji grawimetrycznych wynosząca 1 rok nie jest wystarczająca do wyznaczenia pływów długookresowych. Materiał obserwacyjny nie pozwala również na obliczenie pływu M4 ze względu na duży szum obserwacyjny w stosunku do bardzo małej amplitudy tej fali. Względnie gorzej wyznaczana jest fala S1, ponieważ jest słabo oddzielana od M1, a także dlatego, że ma okres równy dobie słonecznej i jest zaburzana przez efekty temperaturowe.
2. Wartości parametrów fal pływowych skorygowane o pośredni efekt atmosferyczny zbliżyły się znacząco do wartości teoretycznych w modelu Wahr-Dehant. W związku z tym można stwierdzić, że efekty atmosferyczne mają istotny wpływ na mierzone przyspieszenie siły ciężkości.
3. Pośredni efekt oceaniczny ma duże znaczenie nie tylko dla punktów położonych blisko linii brzegowej oceanu. Obliczone wartości *ocean tidal loading* wskazują na to, że również dla stacji w głębi lądu nie można zignorować wpływu oceanu. Przy obliczaniu *OTL* ważne jest odpowiednie dobranie modelu pływów oceanicznych, gdyż zaobserwowano istotne różnice między różnymi modelami. Jako najlepszy wybrano HAMTIDE11a.
4. Dla punktów położonych blisko oceanu niedopasowany model pływów oceanicznych lub niedoskonałe obliczenie *OTL* generuje duże rozbieżności w stosunku do wartości teoretycznych. Różnice te są większe dla fal pół-dobowych. Zaobserwowano zależność dokładności wyznaczenia współczynników grawimetrycznych od odległości od linii brzegowej. W przybliżeniu, najbardziej czułe na dokładność wyznaczenia *OTL* są punkty położone do ok. 100 km od oceanu dla fal dobowych i ok. 500 km dla fal pół-dobowych. Nie stwierdzono podobnej zależności dla faz.
5. Wartości współczynników są zależne od szerokości geograficznej, co ma swoje potwierdzenie w teorii modelowania pływów ziemskich.

6. Najbardziej zróżnicowane wartości współczynników grawimetrycznych występują w modelu WD, ponieważ zależność od szerokości geograficznej jest w tym modelu dużo większa niż w pozostałych. Najlepiej dopasowany do obserwacji grawimetrycznych jest model empiryczny GEGMT. Spośród modeli teoretycznych najbardziej realistyczny jest niehydrostatyczny model DDW, co zostało potwierdzone przez otrzymane residua ze współczynnikami obserwowanymi.
7. Najgorsze dopasowanie współczynników uzyskano dla fali M2. Otrzymane wysokie wartości residuów pozwalają stwierdzić, że fala M2 nie nadaje się do weryfikacji modeli pływowych. Zaobserwowano również błąd popełniony przez twórców modelu WD w przypadku współczynników dla fali M2. Modele są najlepiej dopasowane dla fal K1 i P1.
8. Dokładność opracowania danych, w szczególności wyznaczenia współczynników grawimetrycznych uznano za wystarczającą do weryfikacji modeli pływowych. Ze względu na wyraźnie odstające residua dla fal dobowych na stacjach KA i TC wyłączono je z analizy zgodności modeli.
9. Stwierdzono dobrą zgodność teoretycznych współczynników grawimetrycznych z wartościami obserwowanymi na podobnym poziomie dla wszystkich rozpatrywanych modeli.

7. Literatura

- Agnew, D. C. (2007). *Earth Tides w: Treatise on Geophysics - Vol. 3 Geodesy*, Praca zbiorowa pod redakcją Ed. G. Schubert, San Diego, CA, USA: Elsevier B.V., str. 163-195;
- Agnew, D. C. (1996). Spotl: Some programs for ocean-tide loading. SIO, Ref. Ser. 96-8, 35 pp;
- Baker, T. F. i Bos, M. S. (2003). *Validating Earth and ocean tide models using tidalgravity measurements*. Geophys. J. Int., No. 152, str. 468-485;
- Barlik, M. (1996). *Pomiary grawimetryczne w geodezji*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza PW;
- Cheng, Y., Andersen, O. B. (2010). *Improvement in global ocean tide model in shallow water regions*. Poster, SV.1-68 45, OSTST, Lisbon, Oct. str. 8-22;
- Chojnicki, T. (1973). *Ein Verfahren zur Erdzeiten analyse in Anlehnung an das Prinzip der kleinsten Quadrate*. Mitteilungen aus dem Institut fuer Theoretische Geodaesie der Universitaet Bonn, Nr 15;
- Czarnecki, K. (1997). *Geodezja współczesna w zarysie*, Warszawa: Wydawnictwo Wiedza i Życie;
- Czyżak, B., Stankowski, J. (1999). *Nadprzewodnictwo*, Warszawa: Wydawnictwo Naukowo Techniczne;
- Dehant, V., Defraigne, P. i Wahr, J. (1999). *Tides for a convective Earth*. *Geophys. Res.*, 104, B1, str. 1035–1058;
- Dehant, V. (1987). *Tidal parameters for an inelastic earth*. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, No 49, str. 97-116;
- Dziewonski, A. M., Anderson, D.L. (1981). *Preliminary reference Earth model*. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, No. 25, str. 297–356;
- Farrell, W. E. (1972). *Deformation of the earth by surface loads*. *Reviews of Geophysics*, No. 10, str. 761–797;
- GWR Instruments, Inc. (2011): *Operating Principles of the Superconducting Gravity Meter*, San Diego, CA, USA;
- Hartmann, T., Wenzel, H. G. (1995). *Catalogue hw95 of the tide generating potential*. *Bulletin d'informations Marees Terrestres*, 123, str. 9278-9301;
- Hinderer, J. i Crossley, D. (2004). *Scientific achievements from the first phase (1997–2003) of the Global Geodynamics Project using a worldwide network of superconducting gravimeters*. *Journal of Geodynamics*, No. 38, str. 237-262 ;
- Jentzsch, G. (1997). *Earth Tides and Ocean Tidal Loading w: Lecture notes in Earth sciences - Tidal phenomena*, Praca zbiorowa pod redakcją Wilhelm H., Zurn W. i Wenzel H.-G., Heidelberg, Germany: Springer, str. 145-172;
- Kudryavtsev, S. M. (2004): *KSM03 Harmonic development of the Earth tide-generating potential in terrestrial reference frame*, Moscow, Russia;
- Le Provost, C., Genco, M. L., Lyard, F., Vincent, P., i Canceil, P. (1994). *Spectroscopy of the world ocean tides from a finite-element hydrodynamic model*. *J. Geophys. Res.*, 99(C12), str. 24777- 24797;
- Mathews, P. M. (2001). *Love numbers and gravimetric factor for diurnal tides*. *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 47(1), str 231–236;
- Matzner, R. A. (2001). *Dictionary of Geophysics, Astrophysics, and Astronomy*, Boca Raton, Florida, USA: CRC Press;
- Melchior, P. (1978). *The tides of the planet Earth*, Oxford: Pergamon;
- Neumeyer, J. i in. (2005). *Improvement of ocean loading correction on gravity data with additional tide gauge measurements*. *Journal of Geodynamics*, 40, str. 104-111;
- Petit, G., Luzum, B. (2010). *IERS Conventiontons (2010)*, IERS Technical Note, 36, : Frankfurt am Main: Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie;

- Rosat, S. i in. (2004). *Performance of superconducting gravimeters from long-period seismology to tides*. Journal of Geodynamics, No. 38, str. 461-476;
- Savcenko, R., Bosch, W. (2012). *EOT11a - Empirical Ocean Tide Model from Multi-Mission Satellite Altimetry*. Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut (DGFI), München: Deutsches Geodätisches Forschungsinstitut;
- Schueller, K. (1976). *Ein Beitrag zur Auswertung von Erdzeitenregistrierungen*. Deutsche Geodaetische Kommission, Reihe C, Nr 227, Muenchen 1976;
- Shiomi, S. (2008). *Testing Gravitational Physics with Superconducting Gravimeters*. Progress of Theoretical Physics Supplement, No. 172, str. 61-70;
- Taguchi, E., Stammer, D., Zahel, W. (2014). *Inferring deep ocean tidal energy dissipation from the global high-resolution data-assimilative HAMTIDE model*. Journal of geophysical research, Volume 119, Issue 7, str. 4573–4592;
- Wahr, J. M. (1981). *Body tides on an elliptical, rotating, elastic and oceanless Earth*. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, vol. 64, str. 677–703;
- Wang, R. (1997). *Tidal Response of the Solid Earth w: Lecture notes in Earth sciences - Tidal phenomena*, Praca zbiorowa pod redakcją Wilhelm H., Zurn W. i Wenzel H.-G., Heidelberg, Germany: Springer, str. 27-58;
- Wenzel, H. G. (1996). *The nanogal software: Earth tide data processing package ETERNA 3.30*. Bulletin d'Informations Marees Terrestres, Vol.124, str. 9425-9439;
- Wenzel, H. G. (1997). *Analysis of Earth Tide Observations w: Lecture notes in Earth sciences - Tidal phenomena*, Praca zbiorowa pod redakcją Wilhelm H., Zurn W. i Wenzel H.-G., Heidelberg, Germany: Springer, str. 59-76;
- Wenzel, H. G. (1997). *Tide-Generating Potential for the Earth w: Lecture notes in Earth sciences - Tidal phenomena*, Praca zbiorowa pod redakcją Wilhelm H., Zurn W. i Wenzel H.-G., Heidelberg, Germany: Springer, str. 9-26;
- Wenzel, H. G. (1995). *Format and structure for the exchange of high precision tidal data*. Bulletin d'Informations Marees Terrestres, vol. 121, str. 9097-9101;
- Xu, G. (2010). *Sciences of geodesy - I Advances and future directions*, Heidelberg, Germany: Springer;
- Xu, J., Sun, H., Ducarme, B. (2004). *A global experimental model for gravity tides of the Earth*. Journal of Geodynamics, 38, str. 293-306 ;

Źródła internetowe:

- Instytut Geodezji i Kartografii (2016): Instytut Geodezji i Kartografii. Październik 2016, <http://www.igik.edu.pl/pl/a/Instalacja-grawimetru-nadprzewodnikowego-iGrav-w-Observatorium-Geodezyjno-Geofizycznym-Borowa-Gora>;
- Barriot J.-P. (2011): International Centre of Earth Tides. Lipiec 2015, <http://www.upf.pf/ICET/>;
- Boy J.-P. (2015): International Geodynamics and Earth Tide Service (IGETS). Listopad 2015, <http://igets.u-strasbg.fr/index.html>;
- Communication and Outreach Branch of the International Association of Geodesy (2015): International Association of Geodesy. Lipiec 2015, <http://www.iag-aig.org/>;
- Crossley D. i Hinderer J. (2010): The Global Geodynamics Project. Lipiec 2015, <http://www.eas.slu.edu/GGP/ggphome.html>;
- GFZ Potsdam (2015): Information System and Data Center for geoscientific data. Lipiec 2015, <http://isdc.gfz-potsdam.de/>;
- Google Inc. (2016): Google Earth. Lipiec 2016, <http://www.google.pl/intl/pl/earth/>;
- GWR Instruments, Inc. (2015): Superconducting Gravity Meters. Lipiec 2015, <http://www.gwrinstruments.com/index.html>;

Onsala Space Observatory (2014): The free ocean tide loading provider. Grudzień 2015, <http://holt.oso.chalmers.se/loading/index.html>;

Springer and The European Mathematical Society (2012): Encyclopaedia of Mathematics. Marzec 2016, https://www.encyclopediaofmath.org/index.php/Main_Page;

Wickler J. (2012): Magnetic Shield Corp. Listopad 2015, <http://www.mu-metal.com/>;

8. Załączniki

Załącznik 1 – Wyrównane parametry fal pływowych

Wyrównane parametry fal na stacji B1 (Schiltach, Germany)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	59,1049	1,1462	0,0008	-0,2610	0,0379
0,9114	0,9480	O1	308,6992	1,1489	0,0002	0,1043	0,0074
0,9480	0,9819	M1	24,2652	1,1544	0,0019	0,2566	0,0927
0,9819	0,9986	P1	143,6121	1,1507	0,0005	0,1600	0,0223
0,9986	1,0014	S1	3,3952	1,2274	0,0329	9,0974	1,5372
1,0014	1,0041	K1	433,9650	1,1373	0,0002	0,2454	0,0109
1,0041	1,0068	PS11	3,3968	1,3006	0,0229	1,5084	1,0134
1,0068	1,0236	PH11	6,1799	1,1669	0,0105	-0,0924	0,5151
1,0236	1,0575	J1	24,2740	1,1589	0,0021	0,2150	0,1025
1,0575	1,4702	OO1	13,2783	1,1583	0,0045	-0,0371	0,2237
1,4702	1,8803	2N2	10,1616	1,1570	0,0018	3,0044	0,0894
1,8803	1,9141	N2	63,6242	1,1761	0,0004	2,8470	0,0173
1,9141	1,9504	M2	332,3003	1,1866	0,0001	2,0387	0,0030
1,9504	1,9843	L2	9,3935	1,1780	0,0013	0,9155	0,0650
1,9843	2,0027	S2	154,5882	1,1884	0,0002	0,5786	0,0073
2,0027	2,4519	K2	42,0069	1,1885	0,0006	0,7863	0,0308
2,4519	3,3815	M3	4,3447	1,0705	0,0021	0,3728	0,1109
3,3814	4,3476	M4	0,0528	0,4501	0,1016	-158,3837	12,9310

Wyrównane parametry fal na stacji B2 (Schiltach, Germany)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	59,1049	1,1468	0,0008	-0,2634	0,0374
0,9114	0,9480	O1	308,6992	1,1491	0,0002	0,1016	0,0074
0,9480	0,9819	M1	24,2652	1,1538	0,0019	0,2350	0,0924
0,9819	0,9986	P1	143,6121	1,1508	0,0004	0,1463	0,0206
0,9986	1,0014	S1	3,3952	1,2351	0,0290	7,8712	1,3474
1,0014	1,0041	K1	433,9650	1,1374	0,0002	0,2402	0,0094
1,0041	1,0068	PS11	3,3968	1,3076	0,0202	1,5432	0,8890
1,0068	1,0236	PH11	6,1799	1,1629	0,0096	-0,1169	0,4767
1,0236	1,0575	J1	24,2740	1,1592	0,0021	0,2182	0,1017
1,0575	1,4702	OO1	13,2783	1,1598	0,0045	0,0676	0,2240
1,4702	1,8803	2N2	10,1616	1,1553	0,0021	2,9476	0,1023
1,8803	1,9141	N2	63,6242	1,1760	0,0004	2,8388	0,0201
1,9141	1,9504	M2	332,3003	1,1868	0,0001	2,0396	0,0035
1,9504	1,9843	L2	9,3935	1,1785	0,0015	0,9414	0,0750
1,9843	2,0027	S2	154,5882	1,1884	0,0002	0,5945	0,0085
2,0027	2,4519	K2	42,0069	1,1886	0,0007	0,8169	0,0355
2,4519	3,3815	M3	4,3447	1,0678	0,0025	0,5449	0,1314
3,3814	4,3476	M4	0,0528	0,2745	0,1173	-167,0183	24,4757

Wyrównane parametry fal na stacji CA (Cantley, Canada)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	59,4815	1,1652	0,0019	0,6427	0,0924
0,9114	0,9480	O1	310,6661	1,1651	0,0004	0,5624	0,0196
0,9480	0,9819	M1	24,4198	1,1619	0,0054	0,5707	0,2676
0,9819	0,9986	P1	144,5271	1,1612	0,0019	0,6914	0,0916
0,9986	1,0014	S1	3,4168	0,9605	0,2117	32,2976	12,5320
1,0014	1,0041	K1	436,7299	1,1471	0,0015	0,4130	0,0722
1,0041	1,0068	PS11	3,4185	1,6138	0,1480	3,7239	5,2782
1,0068	1,0236	PH11	6,2193	1,1834	0,0443	-3,0391	2,1469
1,0236	1,0575	J1	24,4287	1,1863	0,0056	0,8708	0,2702
1,0575	1,4702	OO1	13,3629	1,1687	0,0116	0,1161	0,5695
1,4702	1,8803	2N2	11,2575	1,2125	0,0050	0,5262	0,2342
1,8803	1,9141	N2	70,4864	1,2112	0,0010	0,0856	0,0494
1,9141	1,9504	M2	368,1403	1,2035	0,0002	-0,4876	0,0088
1,9504	1,9843	L2	10,4066	1,1802	0,0039	-0,5387	0,1911
1,9843	2,0027	S2	171,2613	1,1840	0,0004	-1,1299	0,0202
2,0027	2,4519	K2	46,5375	1,1824	0,0018	-0,7434	0,0860
2,4519	3,3815	M3	5,0657	1,0804	0,0093	-0,1649	0,4930
3,3814	4,3476	M4	0,0647	0,4480	0,6090	24,9245	77,8743

Wyrównane parametry fal na stacji CB (Canberra, Australia)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	56,1015	1,1860	0,0013	-0,6641	0,0607
0,9114	0,9480	O1	293,0123	1,1672	0,0003	-0,7377	0,0133
0,9480	0,9819	M1	23,0321	1,1537	0,0067	0,5349	0,3315
0,9819	0,9986	P1	136,3143	1,1446	0,0014	-0,7927	0,0706
0,9986	1,0014	S1	3,2227	1,1828	0,1564	-24,3964	7,6216
1,0014	1,0041	K1	411,9125	1,1299	0,0011	-0,8888	0,0566
1,0041	1,0068	PS11	3,2242	1,3296	0,1088	-0,3208	4,6693
1,0068	1,0236	PH11	5,8659	1,1504	0,0331	-1,1436	1,6455
1,0236	1,0575	J1	23,0405	1,1440	0,0033	-0,9148	0,1650
1,0575	1,4702	OO1	12,6036	1,1271	0,0094	-0,1799	0,4771
1,4702	1,8803	2N2	15,2938	1,2126	0,0023	-2,2362	0,1099
1,8803	1,9141	N2	95,7584	1,1922	0,0005	-2,4540	0,0238
1,9141	1,9504	M2	500,1326	1,1780	0,0001	-2,4976	0,0050
1,9504	1,9843	L2	14,1377	1,1658	0,0043	-4,4843	0,2091
1,9843	2,0027	S2	232,6649	1,1552	0,0002	-1,3288	0,0179
2,0027	2,4519	K2	63,2230	1,1586	0,0010	-1,0042	0,0504
2,4519	3,3815	M3	8,0193	1,0641	0,0016	0,0147	0,0863
3,3814	4,3476	M4	0,1194	1,2987	0,0913	23,2774	4,0272

Wyrównane parametry fal na stacji H3 (Bad Homburg, Germany)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	58,5209	1,1483	0,0006	-0,2722	0,0279
0,9114	0,9480	O1	305,6489	1,1501	0,0001	0,1139	0,0054
0,9480	0,9819	M1	24,0254	1,1561	0,0013	0,3295	0,0664
0,9819	0,9986	P1	142,1931	1,1506	0,0002	0,1948	0,0107
0,9986	1,0014	S1	3,3617	1,0826	0,0130	5,4068	0,6954
1,0014	1,0041	K1	429,6769	1,1377	0,0001	0,2572	0,0039
1,0041	1,0068	PSI1	3,3633	1,2581	0,0092	1,1796	0,4185
1,0068	1,0236	PHI1	6,1189	1,1700	0,0051	-0,1822	0,2475
1,0236	1,0575	J1	24,0342	1,1570	0,0015	0,0284	0,0758
1,0575	1,4702	OO1	13,1471	1,1582	0,0035	0,0517	0,1743
1,4702	1,8803	2N2	9,4088	1,1577	0,0018	3,2217	0,0864
1,8803	1,9141	N2	58,9111	1,1798	0,0003	2,7973	0,0166
1,9141	1,9504	M2	307,6841	1,1888	0,0001	1,9759	0,0029
1,9504	1,9843	L2	8,6976	1,1777	0,0013	0,8138	0,0617
1,9843	2,0027	S2	143,1366	1,1903	0,0001	0,5480	0,0065
2,0027	2,4519	K2	38,8951	1,1904	0,0006	0,8306	0,0277
2,4519	3,3815	M3	3,8711	1,0716	0,0021	0,4569	0,1134
3,3814	4,3476	M4	0,0452	0,0676	0,1305	-50,0036	110,6827

Wyrównane parametry fal na stacji KA (Kamioka, Japan)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	56,8195	1,2030	0,0021	1,0900	0,0974
0,9114	0,9480	O1	296,7625	1,2007	0,0004	0,5626	0,0198
0,9480	0,9819	M1	23,3269	1,1903	0,0065	0,1584	0,3105
0,9819	0,9986	P1	138,0590	1,1924	0,0022	-0,2277	0,1033
0,9986	1,0014	S1	3,2639	1,5564	0,2450	27,1414	8,9602
1,0014	1,0041	K1	417,1846	1,1813	0,0017	-0,0926	0,0832
1,0041	1,0068	PSI1	3,2655	1,2122	0,1698	0,9256	7,9942
1,0068	1,0236	PHI1	5,9410	1,2459	0,0502	0,8653	2,3050
1,0236	1,0575	J1	23,3354	1,1949	0,0056	-0,9102	0,2688
1,0575	1,4702	OO1	12,7649	1,1664	0,0133	-1,7693	0,6541
1,4702	1,8803	2N2	14,8732	1,1963	0,0029	0,1021	0,1384
1,8803	1,9141	N2	93,1248	1,1882	0,0006	0,0081	0,0284
1,9141	1,9504	M2	486,3775	1,1906	0,0001	0,5154	0,0051
1,9504	1,9843	L2	13,7489	1,1916	0,0024	0,6992	0,1133
1,9843	2,0027	S2	226,2660	1,2000	0,0002	-0,3495	0,0125
2,0027	2,4519	K2	61,4842	1,1986	0,0010	0,0507	0,0497
2,4519	3,3815	M3	7,6907	1,0894	0,0034	0,9481	0,1785
3,3814	4,3476	M4	0,1129	0,9674	0,1280	47,7030	7,5798

Wyrównane parametry fal na stacji M1 (Moxa, Germany)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	58,3615	1,1457	0,0006	-0,1652	0,0303
0,9114	0,9480	O1	304,8165	1,1489	0,0001	0,1275	0,0061
0,9480	0,9819	M1	23,9600	1,1580	0,0015	0,3392	0,0718
0,9819	0,9986	P1	141,8058	1,1494	0,0003	0,1653	0,0141
0,9986	1,0014	S1	3,3525	1,2009	0,0188	4,0145	0,9037
1,0014	1,0041	K1	428,5067	1,1363	0,0001	0,2201	0,0059
1,0041	1,0068	PSI1	3,3541	1,2530	0,0133	0,9237	0,6063
1,0068	1,0236	PHI1	6,1022	1,1674	0,0067	0,3720	0,3277
1,0236	1,0575	J1	23,9687	1,1543	0,0017	0,1029	0,0819
1,0575	1,4702	OO1	13,1113	1,1611	0,0043	-0,0300	0,2133
1,4702	1,8803	2N2	9,2453	1,1610	0,0017	2,6606	0,0826
1,8803	1,9141	N2	57,8872	1,1794	0,0003	2,2706	0,0166
1,9141	1,9504	M2	302,3369	1,1857	0,0001	1,5813	0,0030
1,9504	1,9843	L2	8,5465	1,1736	0,0013	0,5708	0,0626
1,9843	2,0027	S2	140,6491	1,1842	0,0001	0,3358	0,0068
2,0027	2,4519	K2	38,2191	1,1838	0,0006	0,5840	0,0295
2,4519	3,3815	M3	3,7707	1,0722	0,0024	0,4167	0,1265
3,3814	4,3476	M4	0,0437	0,0138	0,1368	-76,2549	569,6562

Wyrównane parametry fal na stacji M2 (Moxa, Germany)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	58,3615	1,1460	0,0007	-0,1775	0,0342
0,9114	0,9480	O1	304,8165	1,1487	0,0001	0,1230	0,0069
0,9480	0,9819	M1	23,9600	1,1567	0,0016	0,4295	0,0810
0,9819	0,9986	P1	141,8058	1,1490	0,0003	0,2045	0,0158
0,9986	1,0014	S1	3,3525	1,2501	0,0211	5,7986	0,9749
1,0014	1,0041	K1	428,5067	1,1366	0,0001	0,2181	0,0066
1,0041	1,0068	PSI1	3,3541	1,2904	0,0149	-0,6037	0,6610
1,0068	1,0236	PHI1	6,1022	1,1761	0,0075	1,1812	0,3656
1,0236	1,0575	J1	23,9687	1,1557	0,0019	0,0584	0,0923
1,0575	1,4702	OO1	13,1113	1,1618	0,0049	-0,0455	0,2389
1,4702	1,8803	2N2	9,2453	1,1613	0,0022	2,6639	0,1102
1,8803	1,9141	N2	57,8872	1,1792	0,0005	2,2587	0,0221
1,9141	1,9504	M2	302,3369	1,1856	0,0001	1,5824	0,0040
1,9504	1,9843	L2	8,5465	1,1723	0,0017	0,6344	0,0835
1,9843	2,0027	S2	140,6491	1,1842	0,0002	0,3194	0,0090
2,0027	2,4519	K2	38,2191	1,1842	0,0008	0,5921	0,0392
2,4519	3,3815	M3	3,7707	1,0689	0,0042	0,5877	0,2268
3,3814	4,3476	M4	0,0437	0,3757	0,3577	29,9996	54,5602

Wyrównane parametry fal na stacji MC (Medicina, Italy)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	59,4797	1,1478	0,0012	-0,1182	0,0588
0,9114	0,9480	O1	310,6564	1,1481	0,0002	0,1624	0,0116
0,9480	0,9819	M1	24,4191	1,1516	0,0030	0,4515	0,1510
0,9819	0,9986	P1	144,5227	1,1468	0,0005	0,3055	0,0234
0,9986	1,0014	S1	3,4167	1,2144	0,0287	5,1192	1,3869
1,0014	1,0041	K1	436,7164	1,1342	0,0002	0,3712	0,0085
1,0041	1,0068	PSI1	3,4184	1,2779	0,0198	0,0607	0,8864
1,0068	1,0236	PHI1	6,2191	1,1663	0,0109	0,1537	0,5346
1,0236	1,0575	J1	24,4279	1,1550	0,0032	0,2974	0,1579
1,0575	1,4702	OO1	13,3625	1,1582	0,0077	0,4203	0,3805
1,4702	1,8803	2N2	11,6828	1,1582	0,0027	2,1419	0,1316
1,8803	1,9141	N2	73,1491	1,1749	0,0005	1,8732	0,0257
1,9141	1,9504	M2	382,0474	1,1802	0,0001	1,2979	0,0045
1,9504	1,9843	L2	10,7997	1,1753	0,0020	0,4738	0,0987
1,9843	2,0027	S2	177,7309	1,1784	0,0002	0,1861	0,0109
2,0027	2,4519	K2	48,2955	1,1770	0,0009	0,5038	0,0440
2,4519	3,3815	M3	5,3552	1,0721	0,0019	0,2820	0,1022
3,3814	4,3476	M4	0,0697	0,3156	0,0838	93,7676	15,2190

Wyrównane parametry fal na stacji ME (Metsahovi, Finland)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	51,3364	1,1450	0,0021	-0,0050	0,1069
0,9114	0,9480	O1	268,1251	1,1532	0,0004	0,2497	0,0206
0,9480	0,9819	M1	21,0759	1,1593	0,0047	0,0895	0,2318
0,9819	0,9986	P1	124,7364	1,1540	0,0009	-0,0639	0,0436
0,9986	1,0014	S1	2,9490	1,2013	0,0525	4,8998	2,5021
1,0014	1,0041	K1	376,9265	1,1399	0,0003	0,0930	0,0158
1,0041	1,0068	PSI1	2,9504	1,2722	0,0371	1,5938	1,6719
1,0068	1,0236	PHI1	5,3677	1,1847	0,0207	-0,2738	1,0012
1,0236	1,0575	J1	21,0835	1,1540	0,0060	0,2088	0,2957
1,0575	1,4702	OO1	11,5331	1,1596	0,0136	0,1799	0,6715
1,4702	1,8803	2N2	5,6753	1,1686	0,0053	1,0190	0,2608
1,8803	1,9141	N2	35,5342	1,1807	0,0010	1,0758	0,0507
1,9141	1,9504	M2	185,5902	1,1813	0,0002	0,7041	0,0088
1,9504	1,9843	L2	5,2463	1,1722	0,0037	0,3351	0,1816
1,9843	2,0027	S2	86,3378	1,1748	0,0004	0,0188	0,0196
2,0027	2,4519	K2	23,4609	1,1730	0,0018	0,2281	0,0872
2,4519	3,3815	M3	1,8139	1,0802	0,0119	0,6201	0,6288
3,3814	4,3476	M4	0,0165	0,6799	0,7398	-148,9793	62,3577

Wyrównane parametry fal na stacji PE (Pecny, Czech Republic)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	58,6382	1,1477	0,0006	-0,1692	0,0287
0,9114	0,9480	O1	306,2613	1,1501	0,0001	0,1314	0,0056
0,9480	0,9819	M1	24,0736	1,1561	0,0014	0,2379	0,0683
0,9819	0,9986	P1	142,4780	1,1501	0,0002	0,1293	0,0110
0,9986	1,0014	S1	3,3684	1,1847	0,0134	8,6556	0,6435
1,0014	1,0041	K1	430,5378	1,1368	0,0001	0,1862	0,0040
1,0041	1,0068	PSI1	3,3700	1,2648	0,0094	0,6175	0,4283
1,0068	1,0236	PHI1	6,1311	1,1722	0,0052	0,4473	0,2540
1,0236	1,0575	J1	24,0823	1,1572	0,0016	0,0393	0,0777
1,0575	1,4702	OO1	13,1735	1,1578	0,0036	0,1007	0,1789
1,4702	1,8803	2N2	9,5335	1,1658	0,0016	2,1437	0,0781
1,8803	1,9141	N2	59,6917	1,1812	0,0003	1,8588	0,0151
1,9141	1,9504	M2	311,7614	1,1851	0,0001	1,2349	0,0026
1,9504	1,9843	L2	8,8129	1,1752	0,0012	0,4722	0,0563
1,9843	2,0027	S2	145,0334	1,1822	0,0001	0,1639	0,0059
2,0027	2,4519	K2	39,4105	1,1826	0,0005	0,4161	0,0254
2,4519	3,3815	M3	3,9484	1,0741	0,0021	0,2218	0,1124
3,3814	4,3476	M4	0,0464	0,5114	0,1423	26,3192	15,9405

Wyrównane parametry fal na stacji S1 (Sutherland, South Africa)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	53,7727	1,1628	0,0009	0,6699	0,0430
0,9114	0,9480	O1	280,8492	1,1629	0,0002	0,0870	0,0088
0,9480	0,9819	M1	22,0761	1,1417	0,0036	-1,1620	0,1824
0,9819	0,9986	P1	130,6558	1,1502	0,0004	-0,5356	0,0188
0,9986	1,0014	S1	3,0889	1,1113	0,0224	-39,2219	1,1668
1,0014	1,0041	K1	394,8138	1,1343	0,0001	-0,4909	0,0067
1,0041	1,0068	PSI1	3,0904	1,2287	0,0158	0,5384	0,7387
1,0068	1,0236	PHI1	5,6224	1,1755	0,0089	-1,0387	0,4332
1,0236	1,0575	J1	22,0841	1,1489	0,0022	-0,1374	0,1094
1,0575	1,4702	OO1	12,0804	1,1349	0,0060	-0,0841	0,3046
1,4702	1,8803	2N2	16,3791	1,1057	0,0020	5,2420	0,1009
1,8803	1,9141	N2	102,5539	1,1362	0,0004	5,3447	0,0195
1,9141	1,9504	M2	535,6243	1,1572	0,0001	5,2582	0,0039
1,9504	1,9843	L2	15,1410	1,1780	0,0033	7,0852	0,1603
1,9843	2,0027	S2	249,1759	1,1988	0,0002	4,3001	0,0111
2,0027	2,4519	K2	67,7096	1,1955	0,0008	4,7190	0,0370
2,4519	3,3815	M3	8,8867	1,0409	0,0018	0,0902	0,0963
3,3814	4,3476	M4	0,1369	2,4402	0,0800	11,2234	1,8782

Wyrównane parametry fal na stacji S2 (Sutherland, South Africa)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	53,7727	1,1628	0,0009	0,6692	0,0433
0,9114	0,9480	O1	280,8492	1,1629	0,0002	0,0818	0,0089
0,9480	0,9819	M1	22,0761	1,1423	0,0037	-1,1459	0,1833
0,9819	0,9986	P1	130,6558	1,1502	0,0004	-0,5353	0,0189
0,9986	1,0014	S1	3,0889	1,1035	0,0225	-39,9953	1,1815
1,0014	1,0041	K1	394,8138	1,1344	0,0001	-0,4941	0,0067
1,0041	1,0068	PSI1	3,0904	1,2303	0,0159	0,6566	0,7410
1,0068	1,0236	PHI1	5,6224	1,1739	0,0089	-1,0892	0,4358
1,0236	1,0575	J1	22,0841	1,1490	0,0022	-0,1304	0,1100
1,0575	1,4702	OO1	12,0804	1,1355	0,0061	-0,0438	0,3057
1,4702	1,8803	2N2	16,3791	1,1059	0,0020	5,2365	0,1018
1,8803	1,9141	N2	102,5539	1,1363	0,0004	5,3371	0,0197
1,9141	1,9504	M2	535,6243	1,1572	0,0001	5,2500	0,0039
1,9504	1,9843	L2	15,1410	1,1788	0,0033	7,0659	0,1616
1,9843	2,0027	S2	249,1759	1,1988	0,0002	4,2906	0,0112
2,0027	2,4519	K2	67,7096	1,1954	0,0008	4,7157	0,0373
2,4519	3,3815	M3	8,8867	1,0406	0,0017	0,0676	0,0938
3,3814	4,3476	M4	0,1369	2,4104	0,0778	11,7076	1,8498

Wyrównane parametry fal na stacji ST (Strasbourg, France)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	59,0288	1,1459	0,0006	-0,3408	0,0316
0,9114	0,9480	O1	308,3014	1,1486	0,0001	0,0876	0,0062
0,9480	0,9819	M1	24,2339	1,1564	0,0015	0,3454	0,0762
0,9819	0,9986	P1	143,4271	1,1495	0,0002	0,2264	0,0122
0,9986	1,0014	S1	3,3908	1,1744	0,0148	2,5570	0,7270
1,0014	1,0041	K1	433,4058	1,1368	0,0001	0,2680	0,0044
1,0041	1,0068	PSI1	3,3925	1,2513	0,0104	0,5561	0,4772
1,0068	1,0236	PHI1	6,1720	1,1710	0,0057	-0,0596	0,2803
1,0236	1,0575	J1	24,2427	1,1581	0,0017	0,0797	0,0854
1,0575	1,4702	OO1	13,2612	1,1562	0,0040	0,0935	0,1970
1,4702	1,8803	2N2	10,0449	1,1541	0,0017	3,2091	0,0856
1,8803	1,9141	N2	62,8934	1,1761	0,0003	2,9762	0,0164
1,9141	1,9504	M2	328,4833	1,1869	0,0001	2,1442	0,0028
1,9504	1,9843	L2	9,2856	1,1783	0,0013	0,9458	0,0614
1,9843	2,0027	S2	152,8126	1,1890	0,0001	0,6271	0,0064
2,0027	2,4519	K2	41,5244	1,1894	0,0006	0,8982	0,0274
2,4519	3,3815	M3	4,2700	1,0663	0,0023	0,2281	0,1227
3,3814	4,3476	M4	0,0515	0,5478	0,1066	-175,5977	11,1511

Wyrównane parametry fal na stacji SU (Sutherland, South Africa)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	53,7727	1,1614	0,0013	0,6661	0,0661
0,9114	0,9480	O1	280,8492	1,1624	0,0003	0,0865	0,0135
0,9480	0,9819	M1	22,0761	1,1422	0,0056	-1,3387	0,2831
0,9819	0,9986	P1	130,6558	1,1502	0,0006	-0,4474	0,0276
0,9986	1,0014	S1	3,0889	1,1003	0,0327	-33,4714	1,7279
1,0014	1,0041	K1	394,8138	1,1347	0,0002	-0,4801	0,0100
1,0041	1,0068	PSI1	3,0904	1,2600	0,0231	1,2164	1,0529
1,0068	1,0236	PHI1	5,6224	1,1527	0,0131	-0,3063	0,6483
1,0236	1,0575	J1	22,0841	1,1470	0,0034	-0,1614	0,1708
1,0575	1,4702	OO1	12,0804	1,1427	0,0093	0,2918	0,4670
1,4702	1,8803	2N2	16,3791	1,1062	0,0022	5,2625	0,1162
1,8803	1,9141	N2	102,5539	1,1365	0,0005	5,3472	0,0226
1,9141	1,9504	M2	535,6243	1,1572	0,0001	5,2636	0,0045
1,9504	1,9843	L2	15,1410	1,1770	0,0038	6,9448	0,1854
1,9843	2,0027	S2	249,1759	1,1988	0,0002	4,3021	0,0127
2,0027	2,4519	K2	67,7096	1,1953	0,0009	4,7380	0,0424
2,4519	3,3815	M3	8,8867	1,0407	0,0024	0,0224	0,1294
3,3814	4,3476	M4	0,1369	2,3732	0,1008	9,6349	2,4334

Wyrównane parametry fal na stacji TC (TIGO Concepcion, Chile)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	57,0691	1,1557	0,0010	2,3510	0,0498
0,9114	0,9480	O1	298,0660	1,1659	0,0002	1,8159	0,0103
0,9480	0,9819	M1	23,4294	1,1744	0,0048	-0,3634	0,2366
0,9819	0,9986	P1	138,6654	1,1692	0,0004	0,8178	0,0201
0,9986	1,0014	S1	3,2783	0,9098	0,0250	-23,9764	1,5568
1,0014	1,0041	K1	419,0170	1,1587	0,0002	0,8276	0,0073
1,0041	1,0068	PSI1	3,2798	1,2805	0,0176	0,9971	0,7852
1,0068	1,0236	PHI1	5,9671	1,1960	0,0097	0,1372	0,4655
1,0236	1,0575	J1	23,4379	1,1714	0,0025	0,0289	0,1237
1,0575	1,4702	OO1	12,8210	1,1521	0,0071	-1,5132	0,3536
1,4702	1,8803	2N2	14,7124	1,1956	0,0025	-1,6840	0,1175
1,8803	1,9141	N2	92,1180	1,1596	0,0005	-2,4629	0,0246
1,9141	1,9504	M2	481,1192	1,1249	0,0001	-2,3097	0,0051
1,9504	1,9843	L2	13,6003	1,1183	0,0045	-1,6344	0,2287
1,9843	2,0027	S2	223,8198	1,1011	0,0002	-1,8504	0,0134
2,0027	2,4519	K2	60,8194	1,1040	0,0010	-1,9212	0,0509
2,4519	3,3815	M3	7,5663	1,0493	0,0027	0,7143	0,1465
3,3814	4,3476	M4	0,1105	1,0847	0,0980	52,3969	5,1770

Wyrównane parametry fal na stacji W3 (Wetzell, Germany)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	58,8880	1,1464	0,0008	-0,2256	0,0405
0,9114	0,9480	O1	307,5661	1,1482	0,0002	0,1366	0,0079
0,9480	0,9819	M1	24,1761	1,1544	0,0020	0,2972	0,0985
0,9819	0,9986	P1	143,0850	1,1486	0,0003	0,1668	0,0157
0,9986	1,0014	S1	3,3828	1,2090	0,0189	8,0453	0,9023
1,0014	1,0041	K1	432,3721	1,1352	0,0001	0,2280	0,0057
1,0041	1,0068	PSI1	3,3844	1,2690	0,0134	1,3698	0,6067
1,0068	1,0236	PHI1	6,1573	1,1596	0,0074	0,1138	0,3645
1,0236	1,0575	J1	24,1849	1,1560	0,0022	0,1194	0,1108
1,0575	1,4702	OO1	13,2296	1,1569	0,0051	0,1210	0,2544
1,4702	1,8803	2N2	9,8382	1,1646	0,0019	2,3612	0,0911
1,8803	1,9141	N2	61,5994	1,1783	0,0004	2,1069	0,0176
1,9141	1,9504	M2	321,7250	1,1840	0,0001	1,4475	0,0031
1,9504	1,9843	L2	9,0945	1,1733	0,0014	0,5910	0,0661
1,9843	2,0027	S2	149,6686	1,1818	0,0001	0,2806	0,0069
2,0027	2,4519	K2	40,6700	1,1821	0,0006	0,5467	0,0296
2,4519	3,3815	M3	4,1391	1,0719	0,0026	0,3112	0,1374
3,3814	4,3476	M4	0,0494	0,5707	0,1240	42,1898	12,4501

Wyrównane parametry fal na stacji W4 (Wetzell, Germany)							
częstotliwość [cpd]		fala	amplituda teoretyczna [nm/s ²]	współczynnik grawimetryczny δ	błąd m δ	faza φ [°]	błąd m φ [°]
od	do						
0,5014	0,9114	Q1	58,8880	1,1455	0,0007	-0,2136	0,0326
0,9114	0,9480	O1	307,5661	1,1471	0,0001	0,1386	0,0065
0,9480	0,9819	M1	24,1761	1,1540	0,0016	0,3426	0,0799
0,9819	0,9986	P1	143,0850	1,1477	0,0003	0,1671	0,0127
0,9986	1,0014	S1	3,3828	1,1932	0,0154	8,1754	0,7433
1,0014	1,0041	K1	432,3721	1,1341	0,0001	0,2293	0,0047
1,0041	1,0068	PSI1	3,3844	1,2711	0,0109	0,9604	0,4921
1,0068	1,0236	PHI1	6,1573	1,1602	0,0060	0,0310	0,2962
1,0236	1,0575	J1	24,1849	1,1553	0,0018	0,1054	0,0895
1,0575	1,4702	OO1	13,2296	1,1580	0,0042	0,0855	0,2084
1,4702	1,8803	2N2	9,8382	1,1636	0,0016	2,3830	0,0808
1,8803	1,9141	N2	61,5994	1,1772	0,0003	2,1023	0,0159
1,9141	1,9504	M2	321,7250	1,1828	0,0001	1,4480	0,0028
1,9504	1,9843	L2	9,0945	1,1728	0,0012	0,5639	0,0596
1,9843	2,0027	S2	149,6686	1,1808	0,0001	0,2857	0,0063
2,0027	2,4519	K2	40,6700	1,1802	0,0006	0,5508	0,0268
2,4519	3,3815	M3	4,1391	1,0683	0,0022	0,3480	0,1196
3,3814	4,3476	M4	0,0494	0,7912	0,0876	27,7853	6,3444

Załącznik 2 – Wartości OTL

stacja	parametr	fala							
		Q1				O1			
		model pływów oceanicznych				model pływów oceanicznych			
		FES2004	DTU10	EOT11a	HAMTIDE11a	FES2004	DTU10	EOT11a	HAMTIDE11a
B1	L [nm/s ²]	0,06	0,05	0,05	0,06	0,16	0,15	0,15	0,15
	λ [°]	-160,05	-150,48	-133,18	-152,93	173,23	163,95	169,66	162,30
B2	L [nm/s ²]	0,06	0,05	0,05	0,06	0,16	0,15	0,15	0,15
	λ [°]	-160,05	-150,48	-133,18	-152,93	173,23	163,95	169,66	162,30
CA	L [nm/s ²]	0,05	0,07	0,09	0,06	0,44	0,43	0,44	0,43
	λ [°]	-7,05	-13,62	-18,74	-12,36	-24,54	-23,31	-24,13	-19,90
CB	L [nm/s ²]	0,19	0,18	0,20	0,20	0,71	0,71	0,73	0,69
	λ [°]	-70,18	-58,65	-56,44	-66,07	-70,98	-70,66	-70,29	-68,34
H3	L [nm/s ²]	0,06	0,05	0,05	0,06	0,15	0,14	0,14	0,15
	λ [°]	-163,86	-156,12	-139,49	-158,17	168,75	158,61	163,02	157,22
KA	L [nm/s ²]	0,32	0,31	0,30	0,31	1,47	1,48	1,46	1,45
	λ [°]	160,82	159,96	161,93	160,57	153,04	152,59	152,71	151,90
M1	L [nm/s ²]	0,06	0,05	0,04	0,06	0,15	0,14	0,14	0,14
	λ [°]	-166,08	-159,57	-141,69	-159,77	170,21	160,18	164,00	157,99
M2	L [nm/s ²]	0,06	0,05	0,04	0,06	0,15	0,14	0,14	0,14
	λ [°]	-166,08	-159,57	-141,69	-159,77	170,21	160,18	164,00	157,99
MC	L [nm/s ²]	0,05	0,04	0,03	0,04	0,17	0,16	0,15	0,16
	λ [°]	-179,47	-170,93	-143,89	-167,38	164,24	154,37	160,26	153,75
ME	L [nm/s ²]	0,08	0,08	0,06	0,07	0,18	0,18	0,17	0,18
	λ [°]	178,65	-179,22	-161,84	-166,81	158,39	152,87	158,28	154,28
PE	L [nm/s ²]	0,06	0,05	0,04	0,05	0,15	0,14	0,14	0,15
	λ [°]	-168,84	-162,96	-144,61	-161,32	171,67	161,82	166,50	160,49
S1	L [nm/s ²]	0,10	0,09	0,09	0,09	0,37	0,31	0,31	0,29
	λ [°]	-118,25	-94,50	-101,12	-115,45	-142,89	-137,42	-131,29	-139,74
S2	L [nm/s ²]	0,10	0,09	0,09	0,09	0,37	0,31	0,31	0,29
	λ [°]	-118,25	-94,50	-101,12	-115,45	-142,89	-137,42	-131,29	-139,74
ST	L [nm/s ²]	0,06	0,05	0,05	0,06	0,16	0,15	0,15	0,15
	λ [°]	-159,74	-150,28	-133,46	-152,63	172,60	163,71	168,60	162,60
SU	L [nm/s ²]	0,10	0,09	0,09	0,09	0,37	0,31	0,31	0,29
	λ [°]	-118,25	-94,50	-101,12	-115,45	-142,89	-137,42	-131,29	-139,74
TC	L [nm/s ²]	0,34	0,31	0,31	0,33	1,60	1,58	1,58	1,57
	λ [°]	168,80	168,92	167,37	168,70	153,43	153,54	153,38	152,33
W3	L [nm/s ²]	0,06	0,05	0,04	0,05	0,15	0,14	0,14	0,14
	λ [°]	-167,15	-160,37	-141,56	-159,34	171,91	161,96	167,24	161,05
W4	L [nm/s ²]	0,06	0,05	0,04	0,05	0,15	0,14	0,14	0,14
	λ [°]	-167,15	-160,37	-141,56	-159,34	171,91	161,96	167,24	161,05

stacja	parametr	fala							
		P1				K1			
		model pływów oceanicznych				model pływów oceanicznych			
		FES2004	DTU10	EOT11a	HAMTIDE11a	FES2004	DTU10	EOT11a	HAMTIDE11a
B1	L [nm/s ²]	0,06	0,07	0,05	0,06	0,18	0,21	0,20	0,21
	λ [°]	69,75	76,23	75,94	80,42	70,39	75,93	74,77	78,03
B2	L [nm/s ²]	0,06	0,07	0,05	0,06	0,18	0,21	0,20	0,21
	λ [°]	69,75	76,23	75,94	80,42	70,39	75,93	74,77	78,03
CA	L [nm/s ²]	0,20	0,20	0,21	0,21	0,58	0,60	0,61	0,60
	λ [°]	-28,75	-22,77	-27,81	-25,77	-28,45	-22,58	-22,67	-21,60
CB	L [nm/s ²]	0,27	0,27	0,24	0,20	0,80	0,78	0,74	0,74
	λ [°]	-126,49	-125,48	-114,34	-104,97	-127,36	-126,04	-127,26	-128,62
H3	L [nm/s ²]	0,06	0,06	0,05	0,06	0,18	0,19	0,19	0,20
	λ [°]	63,36	70,98	68,96	75,31	64,67	71,17	70,02	74,24
KA	L [nm/s ²]	0,62	0,63	0,60	0,63	1,90	1,90	1,87	1,82
	λ [°]	136,09	135,47	134,79	137,34	135,94	134,92	134,73	133,89
M1	L [nm/s ²]	0,04	0,05	0,04	0,05	0,14	0,16	0,15	0,17
	λ [°]	62,39	71,96	68,69	80,61	63,91	72,55	69,34	76,61
M2	L [nm/s ²]	0,04	0,05	0,04	0,05	0,14	0,16	0,15	0,17
	λ [°]	62,39	71,96	68,69	80,61	63,91	72,55	69,34	76,61
MC	L [nm/s ²]	0,07	0,09	0,07	0,08	0,21	0,26	0,25	0,26
	λ [°]	92,17	99,34	105,12	99,74	93,35	100,15	96,74	98,80
ME	L [nm/s ²]	0,03	0,03	0,02	0,02	0,08	0,09	0,08	0,06
	λ [°]	-14,97	3,94	22,51	95,68	-12,34	17,24	-3,48	60,32
PE	L [nm/s ²]	0,03	0,04	0,03	0,04	0,11	0,13	0,13	0,14
	λ [°]	73,83	82,32	83,25	91,79	75,50	82,57	80,16	86,91
S1	L [nm/s ²]	0,08	0,09	0,11	0,13	0,25	0,30	0,31	0,36
	λ [°]	94,50	102,90	106,58	125,27	94,88	99,00	94,74	91,52
S2	L [nm/s ²]	0,08	0,09	0,11	0,13	0,25	0,30	0,31	0,36
	λ [°]	94,50	102,90	106,58	125,27	94,88	99,00	94,74	91,52
ST	L [nm/s ²]	0,06	0,07	0,05	0,06	0,19	0,21	0,20	0,22
	λ [°]	68,12	75,15	74,10	80,07	68,56	74,68	73,21	77,91
SU	L [nm/s ²]	0,08	0,09	0,11	0,13	0,25	0,30	0,31	0,36
	λ [°]	94,50	102,90	106,58	125,27	94,88	99,00	94,74	91,52
TC	L [nm/s ²]	0,69	0,69	0,70	0,68	2,09	2,10	2,11	2,08
	λ [°]	128,62	128,06	132,33	126,87	128,42	127,55	126,78	126,55
W3	L [nm/s ²]	0,04	0,05	0,04	0,05	0,13	0,15	0,14	0,16
	λ [°]	73,63	80,96	82,65	88,93	75,22	81,18	80,08	84,78
W4	L [nm/s ²]	0,04	0,05	0,04	0,05	0,13	0,15	0,14	0,16
	λ [°]	73,63	80,96	82,65	88,93	75,22	81,18	80,08	84,78

stacja	parametr	fala							
		N2				M2			
		model pływów oceanicznych				model pływów oceanicznych			
		FES2004	DTU10	EOT11a	HAMTIDE11a	FES2004	DTU10	EOT11a	HAMTIDE11a
B1	L [nm/s ²]	0,35	0,35	0,36	0,35	1,55	1,60	1,60	1,59
	λ [°]	101,76	96,65	96,68	96,27	76,98	76,52	77,29	77,03
B2	L [nm/s ²]	0,35	0,35	0,36	0,35	1,55	1,60	1,60	1,59
	λ [°]	101,76	96,65	96,68	96,27	76,98	76,52	77,29	77,03
CA	L [nm/s ²]	0,34	0,32	0,32	0,32	1,49	1,45	1,47	1,45
	λ [°]	-149,18	-149,71	-149,03	-147,96	-162,81	-164,58	-164,20	-164,71
CB	L [nm/s ²]	0,64	0,63	0,64	0,63	2,70	2,72	2,71	2,70
	λ [°]	-112,84	-116,77	-114,61	-112,57	-130,38	-129,51	-128,93	-128,71
H3	L [nm/s ²]	0,32	0,33	0,33	0,33	1,43	1,50	1,49	1,49
	λ [°]	101,87	95,40	95,61	95,22	75,64	74,82	76,09	75,65
KA	L [nm/s ²]	0,22	0,23	0,27	0,25	1,57	1,53	1,60	1,63
	λ [°]	-76,84	-78,32	-74,08	-74,40	-66,20	-65,86	-64,21	-64,54
M1	L [nm/s ²]	0,27	0,28	0,28	0,27	1,17	1,24	1,23	1,24
	λ [°]	102,96	95,89	95,01	94,55	75,52	74,91	75,63	74,77
M2	L [nm/s ²]	0,27	0,28	0,28	0,27	1,17	1,24	1,23	1,24
	λ [°]	102,96	95,89	95,01	94,55	75,52	74,91	75,63	74,77
MC	L [nm/s ²]	0,27	0,28	0,28	0,27	1,16	1,23	1,22	1,23
	λ [°]	102,73	96,17	97,51	95,80	78,06	76,24	77,29	76,19
ME	L [nm/s ²]	0,12	0,10	0,10	0,09	0,33	0,39	0,40	0,39
	λ [°]	132,50	121,52	111,10	106,23	99,16	92,12	90,95	88,62
PE	L [nm/s ²]	0,23	0,23	0,23	0,23	0,98	1,04	1,04	1,06
	λ [°]	107,31	98,33	98,58	96,43	79,98	77,64	79,53	77,14
S1	L [nm/s ²]	1,18	1,17	1,16	1,15	5,62	5,62	5,64	5,62
	λ [°]	149,36	147,43	146,95	146,88	136,56	136,14	136,19	136,28
S2	L [nm/s ²]	1,18	1,17	1,16	1,15	5,62	5,62	5,64	5,62
	λ [°]	149,36	147,43	146,95	146,88	136,56	136,14	136,19	136,28
ST	L [nm/s ²]	0,36	0,36	0,37	0,36	1,59	1,65	1,65	1,65
	λ [°]	101,77	96,54	96,73	96,32	77,08	76,38	77,40	77,01
SU	L [nm/s ²]	1,18	1,17	1,16	1,15	5,62	5,62	5,64	5,62
	λ [°]	149,36	147,43	146,95	146,88	136,56	136,14	136,19	136,28
TC	L [nm/s ²]	0,57	0,54	0,54	0,54	2,25	2,23	2,23	2,23
	λ [°]	154,26	151,15	150,63	150,36	113,08	111,70	113,41	112,59
W3	L [nm/s ²]	0,26	0,27	0,27	0,26	1,14	1,19	1,19	1,17
	λ [°]	104,14	97,31	96,92	96,12	77,90	76,75	77,80	77,00
W4	L [nm/s ²]	0,26	0,27	0,27	0,26	1,14	1,19	1,19	1,17
	λ [°]	104,14	97,31	96,92	96,12	77,90	76,75	77,80	77,00

stacja	parametr	fala							
		S2				K2			
		model pływów oceanicznych				model pływów oceanicznych			
		FES2004	DTU10	EOT11a	HAMTIDE11a	FES2004	DTU10	EOT11a	HAMTIDE11a
B1	L [nm/s ²]	0,51	0,50	0,51	0,52	0,14	0,14	0,14	0,14
	λ [°]	47,14	47,50	47,12	46,43	45,81	44,24	48,74	44,86
B2	L [nm/s ²]	0,51	0,50	0,51	0,52	0,14	0,14	0,14	0,14
	λ [°]	47,14	47,50	47,12	46,43	45,81	44,24	48,74	44,86
CA	L [nm/s ²]	0,45	0,45	0,45	0,44	0,12	0,11	0,13	0,11
	λ [°]	172,69	171,76	172,83	172,05	169,19	170,85	172,12	171,21
CB	L [nm/s ²]	0,47	0,45	0,44	0,44	0,10	0,09	0,11	0,09
	λ [°]	-160,78	-152,80	-152,91	-158,23	-167,36	-156,53	-143,41	-161,76
H3	L [nm/s ²]	0,48	0,47	0,48	0,49	0,13	0,13	0,13	0,13
	λ [°]	45,09	45,20	45,44	44,23	43,14	42,02	47,63	42,46
KA	L [nm/s ²]	0,82	0,84	0,87	0,84	0,22	0,23	0,26	0,23
	λ [°]	-87,69	-86,36	-85,57	-85,84	-89,23	-88,04	-83,97	-87,58
M1	L [nm/s ²]	0,39	0,39	0,39	0,41	0,11	0,11	0,11	0,11
	λ [°]	45,64	45,72	45,48	44,27	44,77	42,21	47,88	43,20
M2	L [nm/s ²]	0,39	0,39	0,39	0,41	0,11	0,11	0,11	0,11
	λ [°]	45,64	45,72	45,48	44,27	44,77	42,21	47,88	43,20
MC	L [nm/s ²]	0,40	0,39	0,39	0,41	0,11	0,11	0,10	0,11
	λ [°]	50,01	47,76	48,39	47,97	45,08	41,06	43,68	43,99
ME	L [nm/s ²]	0,12	0,12	0,13	0,13	0,04	0,04	0,04	0,04
	λ [°]	63,57	64,54	58,25	58,65	58,53	50,52	52,32	53,91
PE	L [nm/s ²]	0,34	0,33	0,33	0,35	0,10	0,09	0,09	0,09
	λ [°]	51,35	50,60	50,92	47,16	47,49	46,42	52,71	45,38
S1	L [nm/s ²]	2,56	2,51	2,51	2,55	0,71	0,68	0,71	0,69
	λ [°]	111,79	111,86	110,84	111,51	110,83	111,03	114,16	110,97
S2	L [nm/s ²]	2,56	2,51	2,51	2,55	0,71	0,68	0,71	0,69
	λ [°]	111,79	111,86	110,84	111,51	110,83	111,03	114,16	110,97
ST	L [nm/s ²]	0,53	0,52	0,53	0,54	0,14	0,14	0,15	0,14
	λ [°]	47,15	47,27	47,31	46,24	45,90	43,98	48,84	44,78
SU	L [nm/s ²]	2,56	2,51	2,51	2,55	0,71	0,68	0,71	0,69
	λ [°]	111,79	111,86	110,84	111,51	110,83	111,03	114,16	110,97
TC	L [nm/s ²]	0,85	0,92	0,86	0,85	0,23	0,25	0,27	0,23
	λ [°]	83,29	79,75	77,71	80,05	86,16	80,91	87,60	81,83
W3	L [nm/s ²]	0,38	0,37	0,38	0,39	0,11	0,10	0,10	0,10
	λ [°]	48,75	48,75	48,41	47,68	47,08	44,93	50,03	46,24
W4	L [nm/s ²]	0,38	0,37	0,38	0,39	0,11	0,10	0,10	0,10
	λ [°]	48,75	48,75	48,41	47,68	47,08	44,93	50,03	46,24