

Grawimetryczne prace badawczo-metodyczne, przeprowadzone w południowej części Morza Bałtyckiego

1. Wprowadzenie

Początek badań grawimetrycznych na morzu przypada na koniec ubiegłego stulecia, kiedy to w 1898 roku Hecker uzyskał wartość przyspieszenia siły ciężkości na morzu dzięki obserwacjom wysokości słupka rtęci, utrzymywanego w stałej temperaturze. Następnie badania grawimetryczne na morzu podejmowali tacy uczeni, jak Duffield, Briggs, Noergaard, Haalek i inni, stosując różne metody pomiaru [7]. Zasadniczy krok naprzód w tej dziedzinie nastąpił na początku lat trzydziestych dzięki badaniom Felixa A. Vening Meinesza, którego metody badawcze oraz uzyskane wyniki uznawane są również i dziś.

Właściwy rozwój grawimetrii morskiej nastąpił jednak po drugiej wojnie światowej, kiedy podjęto intensywne prace nad skonstruowaniem instrumentów umożliwiających wykonanie pomiarów grawimetrycznych na morzu z wysoką dokładnością.

Wymagania dotyczące dokładności i szczegółowości poznania pola siły ciężkości szczególnie silnie wzrosły w okresie ostatniego dwudziestolecia, co wiąże się z ogromnym postępem technicznym, zagadnieniem poznania wokółziemskiej przestrzeni kosmicznej, dokładnym określeniem w jednolitym systemie współrzędnych wzajemnego położenia poszczególnych punktów powierzchni Ziemi i znajomością wewnętrznej budowy Ziemi.

Pomiary grawimetryczne na morzu prowadzone są intensywnie na świecie przez poszczególne kraje lub w ramach współpracy naukowej kilku państw. Badaniami tego rodzaju objęte są morza i oceany, przy czym wyniki tych prac mają zarówno aspekt naukowy, jak i praktyczny. Największy program grawimetrycznych ekspedycji morskich oraz osiągnięcia w zakresie uzyskanych danych mają: Związek Radziecki, Stany Zjednoczone, RFN, Włochy i Japonia [9], [10], [17], [18].

W Polsce badania grawimetryczne na morzu przeprowadzono po raz pierwszy dopiero w 1970 r. Do tego czasu polski akwen Morza Bałtyckiego pod względem znajomości pola siły ciężkości stanowił praktycznie białą plamę. Należy zaznaczyć, że w 1963 roku, w czasie tzw. „zimy stulecia”, Instytut Geodezji i Kartografii wykonał pewne badania na łodzi pokry-

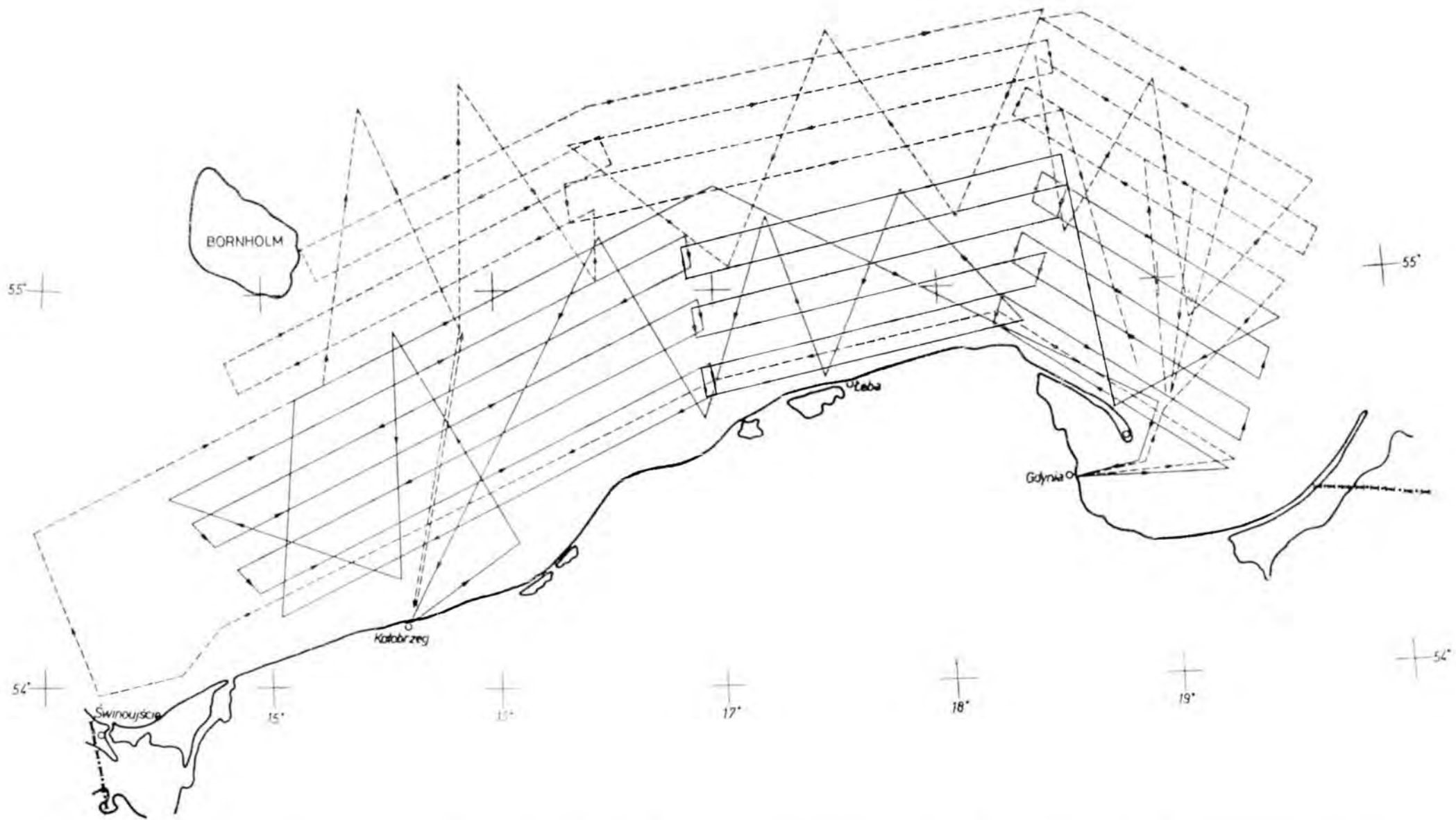
wającym Bałtyk. Użyto w tym celu grawimetru lądowego Askania GS-11 [3]. Ze względu na szybko postępujące topnienie lodu, dokonano wówczas pomiaru zaledwie w kilku punktach.

Zwykle morskie pomiary grawimetryczne wykonuje się przy użyciu specjalnie do tego celu przystosowanej aparatury albo opuszczanej bezpośrednio na dno morza (grawimetry denne), albo też instalowanej w łodziach podwodnych bądź na pokładach statków (grawimetry pokładowe). Aparaturę wahadłową stosuje się bardzo rzadko. Obecnie na świecie wykonuje się pomiary grawimetryczne na morzu głównie przy użyciu grawimetrów morskich, zainstalowanych na statkach będących w ciągłym ruchu. Metoda ta umożliwia wykonanie badań szybko i dokładnie w wielu punktach pomiarowych. Aktualnie do pomiarów względnych przyspieszenia siły ciężkości na morzu wykorzystywane są instrumenty o różnych konstrukcjach mierzących, wyprodukowane przez szereg krajów, głównie przez USA, RFN, ZSRR i Japonię [9], [10]. Najczęściej stosuje się następujące typy grawimetrów morskich:

- 1) grawimetry morskie firmy Askania typ GSS-2 i GSS-3,
- 2) La Coste i Romberg Air-Sea Gravity Meter,
- 3) radzieckie grawimetry kwarcowe typu GAŁ oraz SZ-M i pochodne,
- 4) Vibrating String Accelerometer produkcji USA,
- 5) Bell Aerosystem Gravity Meter,
- 6) TSSG (the Tokyo Surface Ship Gravity Meter),
- 7) radziecki grawimetr strunowy MAGISTR (Morskiej Awtomatizirowanyj Girostabilizirowanyj Strunnyj).

Statek płynąc określonym kursem wykonuje w rzeczywistości postępujący ruch orbitalny, podczas którego środek ciężkości statku zakreśla w przestrzeni spiralę, lecz równocześnie podlega on ruchowi skręcającemu, który stanowi sumę trzech składowych, tj. pochyłeń poprzecznych, podłużnych oraz pionowych wznoszeń na fali. Te zakłócenia ruchu statku mają różną częstotliwość i amplitudę, której wartość zawiera się zwykle w granicach od kilkudziesięciu tysięcy miligali przy spokojnym morzu do setek tysięcy w czasie sztormu. Na grawimetr, zainstalowany na statku, oddziałują pochylenia statku oraz szybko zmieniające się w czasie poziome i pionowe przyspieszenia zakłócające.

Podstawowa trudność morskich pomiarów grawimetrycznych polega na tym, że element mierzący grawimetru reaguje nie tylko na zmianę przyspieszenia siły ciężkości, ale również przejmuje przyspieszenia związane z ruchem statku. Na podstawie wielu badań wykonanych w różnych warunkach okazało się, że zarówno wielkość, jak i charakter przyspieszeń zakłócających zmieniają się w zależności od rodzaju statku, miejsca, w którym zainstalowano aparaturę grawimetryczną, charakterystyki akwenu, kierunku wiatru i fali w stosunku do osi podłużnej statku oraz innych czynników [7], [8], [18], [19], [21].



Rys. 1. Szkice rejsów statku badawczego podczas wykonywania ogólnych pomiarów grawimetrycznych. Linia ciągłą oznaczono profile grawimetryczne pomierzone w 1971 r.; linią przerywaną pokazano rejsy statku w czasie badań prowadzonych w 1972 r.

2. Program badań grawimetrycznych na Morzu Bałtyckim wzdłuż polskiego wybrzeża

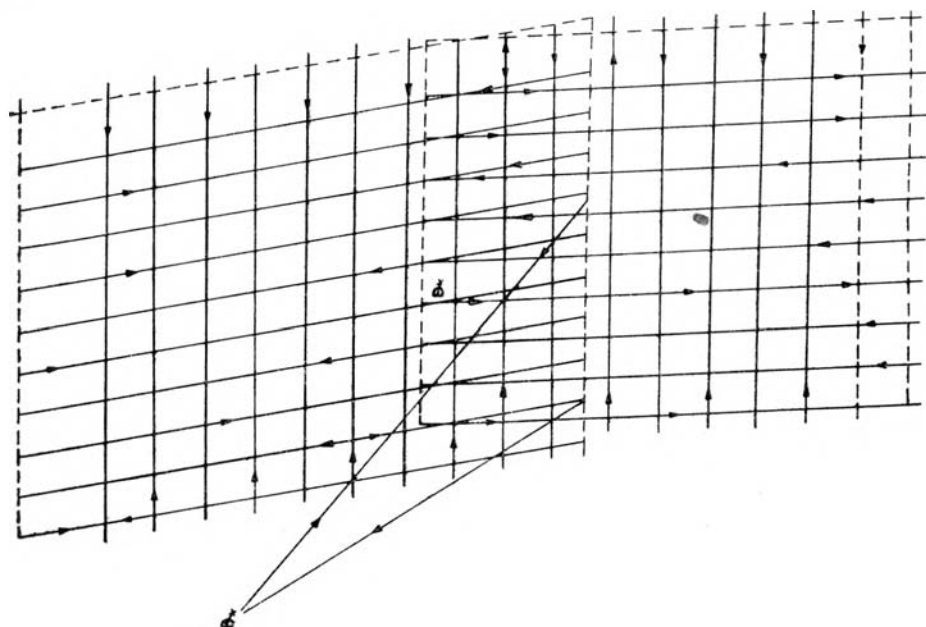
Począwszy od 1970 r. Instytut Geodezji i Kartografii zorganizował cztery grawimetryczne ekspedycje badawcze na Morzu Bałtyckim, które prowadzone były w ramach współpracy z Instytutem Fizyki Ziemi Akademii Nauk ZSRR oraz częściowo z Instytutem Magnetyzmu Ziemskiego i Propagacji Fal w Leningradzie.

Celem tych prac było zbadanie pola siły ciężkości w południowej części Morza Bałtyckiego i opracowanie metodyki prowadzenia grawimetrycznego zdjęcia powierzchniowego na morzu przy użyciu grawimetrów pokładowych i określonego systemu nawigacji.

Pierwsze badania miały charakter doświadczalny, a zakres prowadzonych prac był niewielki [14]. Zasadniczą część zaplanowanych prac stanowiły dwie następne ekspedycje, prowadzone w latach 1971 i 1972. Miały one na celu określenie charakteru pola siły ciężkości w polskim akwenie Morza Bałtyckiego, w którym tego typu badań dotychczas nie prowadzono. Naszym zadaniem było uzyskanie materiałów grawimetrycznych niezbędnych dla prowadzenia pewnych prac, głównie geodezyjnych. W czasie omawianych badań dzielono cały obszar na trzy, częściowo pokrywające się, poligony pomiarowe [4]. W ramach tych poligonów zaprojektowano profile pomiarowe, przebiegające w przybliżeniu równolegle do linii brzegowej, oddalone wzajemnie o około 5 mil morskich. Poza tym badany obszar przecięto poligonami kontrolnymi, które w punktach przecięć z trasami wymienionymi powyżej utworzyły wiele punktów węzłowych (rys. 1). Ogółem badaniami grawimetrycznymi objęty został obszar wzdłuż całego polskiego wybrzeża. Wykorzystano radziecki statek badawczy „Zaria”, na którym prowadzono równocześnie pomiary grawimetryczne i magnetyczne.

Uzyskane doświadczenia oraz wyniki pomiarów stanowiły podstawę do podjęcia następnej ekspedycji, której zadaniem było przeprowadzenie grawimetrycznych badań eksperymentalnych na niewielkim obszarze około 1300 km², położonym na północny wschód od Łeby. Prace te miały charakter półszczegółowego zdjęcia grawimetrycznego o zwiększonej gęstości i dokładności pomiarów w stosunku do poprzednich badań. Aparaturę grawimetryczną zainstalowano na polskim statku szkolnym „Jan Turlejski”. Obszar badań został podzielony na dwa poligony pomiarowe, pokrywające się wzajemnie w około 30%. Każdy z nich stanowił regularną siatkę profili w przybliżeniu równoleżnikowych i południkowych (rys. 2). Odległość między profilami wynosiła odpowiednio 1 i 1,5 Mm. Szereg profili pomie-

rzono dwukrotnie w innych warunkach atmosferycznych w celu porównania wyników i dokonania oceny dokładności przeprowadzonych pomiarów.



Rys. 2. Schemat profili pomiarowych w obrębie obszaru grawimetrycznego zdjęcia półszeregowego

3. Morskie pomiary grawimetryczne i najważniejsze źródła ich błędów

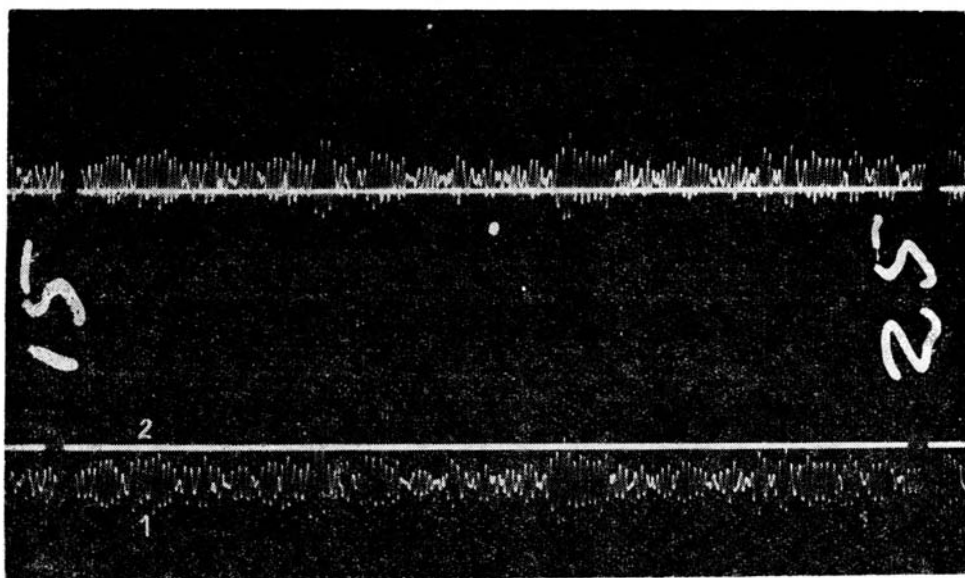
3.1. Aparatura grawimetryczna

Podczas omawianych czterech ekspedycji morskich posługiwano się analogiczną aparaturą grawimetryczną, którą stanowił komplet instrumentów, składający się z trzech równolegle pracujących grawimetrów morskich typu GAŁ-M i TGG-1 [16], [19], [21]. Są to instrumenty o podwójnym systemie kwarcowym, zatopionym w gęstej cieczy tłumiącej przyspieszenia zakłócające, jakim podlega statek, i kompensującej zarazem zewnętrzne wpływy termiczne. W celu zapewnienia stałej temperatury układu mierzającego zastosowano podwójne termostaty, które w przypadku naszych badań utrzymywały system pomiarowy w temperaturze $+35^{\circ}\text{C}$.

Podstawowym czułym elementem grawimetru tego typu są dwa symetrycznie umieszczone wahadła, utrzymywane w położeniu niemal poziomym za pomocą kwarcowego systemu sprężystego, łączącego je z korpusem

instrumentu. Każde z wahadeł zaopatrzone jest w lusterko. Pod wpływem zmian przyspieszenia siły ciężkości lub przyspieszeń ruchu, wahadła odchylają się w przeciwnych kierunkach w stosunku do nici poziomych, na których są zawieszane. Padające na lustra promienie świetlne, emitowane przez źródło światła, odbijają się od luster i poprzez system optyczny docierają na przesuwającą się taśmę filmową, na której rejestruje się w postaci linii falistej obraz zmian kąta pochylenia wahadła. Równocześnie zostaje zarejestrowany na filmie (jako linia ciągła) obraz promienia świetlnego, odbitego przez zwierciadło nieruchome, przymocowane wewnątrz do obudowy grawimetru. Miarą zmiany przyspieszenia siły ciężkości jest odległość między powstałą na filmie linią ciągłą a zapisem kątów pochylenia wahadeł.

Dzięki zastosowaniu trzech źródeł światła, rzucanego na lustra, na przesuwającym się filmie powstają trzy obrazy pracy jednego systemu wahadeł. Rysunek 3 przedstawia powiększony fragment rejestracji wskazań



Rys. 3. Fragment rejestracji wskazań jednego grawimetru (powiększenie): 1 — obraz, jaki powstał wskutek odbicia się światła od luster związanych z wahadłami systemu kwarcowego; 2 — obraz podstawy czasu

jednego grawimetru, obejmujący 10-minutowy okres czasu (znaczkę czasową stanowią przerwy w zapisie obserwacji). Zasadniczo rejestracja pracy grawimetrów może odbywać się w sposób ciągły w okresie całej doby. Pracę instrumentów przerywa się w czasie wykonywania zwrotów statku. Zmiana filmu małoobrazkowego w kasecie jest bardzo prosta. Czas niezbędny na tę operację nie przekracza 3 minut (jest on uzależniony od usy-

tuowania na statku ciemni fotograficznej w stosunku do laboratorium grawimetrycznego).

W celu odczytania zapisu grawimetrów niezbędny jest mikroskop. Zalecane jest dokonywanie wstępnych odczytów wskazań grawimetru podczas trwania rejsu.

Przy obliczeniach wartości różnic przyspieszenia siły ciężkości w poszczególnych punktach, realizowano wzór

$$\Delta g' = k(m - m_w) + c \cdot \Delta t,$$

gdzie

$\Delta g'$ — zmiana przyspieszenia siły ciężkości między punktem mierzonym i punktem wyjściowym (w mgal);

k — stała grawimetru (współczynnik wyznaczany w procesie cechowania metodą nachylania lub na punktach, między którymi znana jest dokładnie wartość Δg (w mgal/mm);

m — uśrednione w interwale 10 minut wskazania grawimetru na punkcie morskim (w mm);

m_w — wskazanie instrumentu na taśmie filmowej w punkcie wyjściowym w określonym tzw. momencie zerowym (w mm);

c — wartość dryftu grawimetru na dobę (w mgal/dobę);

Δt — interwał czasu między obserwacjami na wyznaczanym punkcie i punkcie wyjściowym (w dobach).

W dalszym etapie opracowania posługiwano się już średnimi wartościami Δg , uzyskanymi na podstawie obserwacji trzech grawimetrów.

Istotną wadą grawimetru GAŁ-M jest złożoność procesu opracowania wyników. Dlatego ostatnio dokonuje się prób automatyzacji opracowania wyników, jak również otrzymywania wyników w formie cyfrowej [19], ułatwiającej dalsze etapy opracowania na elektronicznych maszynach cyfrowych.

3.2. Stabilizacja grawimetru morskiego

W celu wykonania pomiaru przyspieszenia siły ciężkości niezbędne jest — jak wiadomo — ustawienie grawimetru w pionie. Na morzu można ten warunek spełnić jedynie z pewnym przybliżeniem. Realizacja tego warunku następuje zwykle przez umieszczenie grawimetru morskiego w zawieszeniu Cardana lub zastosowanie żyroskopów. Instrumenty GAŁ-M i TGG-1 ustawiono na płytach, z których każda stabilizowana była za pomocą czterech żyroskopów. Płyta taka zachowuje orientację w przestrzeni i dzięki temu oś instrumentu ustawionego na niej zachowuje stały kierunek w stosunku do siły ciężkości, a zatem można przyjąć, że grawimetr reje-

struje sumę przyspieszenia siły ciężkości i pionowej składowej przyspieszenia wynikającego z ruchu statku. Praktycznie, z powodu braku dostatecznie dokładnej aparatury, umożliwiającej dokonanie dokładnej oceny jakości stabilizacji grawimetru i określenie wartości składowych przyspieszeń zakłócających, błędy spowodowane nimi wchodzą w skład błędu określonego przyspieszenia siły ciężkości.

3.3. Podstawowe poprawki do obserwacji morskich

Ze względu na warunki, w jakich wykonuje się pomiary grawimetryczne na morzu, do zaobserwowanych wartości należy wprowadzić szereg poprawek, gdyż nie wszystkie czynniki zniekształcające wyniki pomiarów można wyeliminować za pomocą aparatury czy też określonej metodyki prowadzenia prac.

Do wyznaczenia poprawek, a także anomalii grawimetrycznych, niezbędna jest znajomość takich danych, jak: szybkość i kurs statku, współrzędne statku oraz głębokość morza w punkcie pomiarowym. Elementy te określone są z dokładnością maksymalną w danych warunkach, gdyż ich wpływ na ostateczną wartość przyspieszenia siły ciężkości i anomalii jest bardzo duży. Poprawki niekiedy osiągają wartość kilkudziesięciu miligali.

Zmniejszenie wpływu pionowych przyspieszeń zakłócających uzyskuje się głównie przez wydłużenie czasu obserwacji grawimetrycznych, natomiast poziome składowe przyspieszenia ruchu, trudne do zmierzenia, są w znacznym stopniu eliminowane dzięki zastosowaniu ciągle udoskonalanych sposobów żyroskopowej stabilizacji grawimetrów morskich.

Występowanie przyspieszeń zakłócających (ruchu), oddziałujących na grawimetr morski w kierunku pionowym oraz w płaszczyźnie poziomej, jest źródłem największych i najtrudniejszych do wyznaczenia błędów obserwacji tego rodzaju. Łączny wpływ tych przyspieszeń nosi nazwę „efektu cross-coupling” (efekt CC) lub efektu ruchu orbitalnego i może być wyrażony wzorem

$$\Delta g_c(t) = \dot{X}(t) \cdot \varphi(t),$$

gdzie

\dot{X} — składowa poziomego przyspieszenia zakłócającego, działająca w płaszczyźnie wahań wahadła,

φ — odchylenie wahadła grawimetru od położenia poziomego, występujące pod wpływem składowej przyspieszenia zakłócającego, działającej w kierunku pionowym,

t — czas.

Wielu uczonych z różnych krajów prowadziło i prowadzi nadal prace eksperymentalne, które umożliwią ocenę wielkości efektu CC oraz jego

zależności od warunków obserwacji [2], [7], [8], [12], [20]. Wykonuje się w tym celu badania modelowe oraz stosuje cyfrowe i analogowe maszyny liczące.

W wyniku przeprowadzonych badań okazało się, że „efekt cross-coupling” może być zaniedbywalny tylko wówczas, gdy pomiary grawimetryczne były wykonane na spokojnym morzu, gdyż np. przy większej fali, gdy pionowa składowa przyspieszenia ruchu osiąga wartość 80 gali, efekt CC jest rzędu 30 mgali. W przypadku zastosowania grawimetru morskiego z dwoma wahadłami skierowanymi wzajemnie pod kątem 180° , średnia ze wskazań obydwu wahadeł jest wolna od wpływu efektu CC.

Na wskazania grawimetru zainstalowanego na statku poruszającym się ze stałą prędkością wpływa tzw. efekt Eötvösa wynikający z faktu, że siła odśrodkowa, spowodowana dobowym obrotem Ziemi i będąca częścią składową siły ciężkości, może być zwiększona lub zmniejszona przez szybkość statku.

Poprawkę Eötvösa oblicza się zwykle na podstawie wzoru

$$\delta g_E = 7,5 \cdot v_c \cdot \sin A \cdot \cos \varphi,$$

gdzie

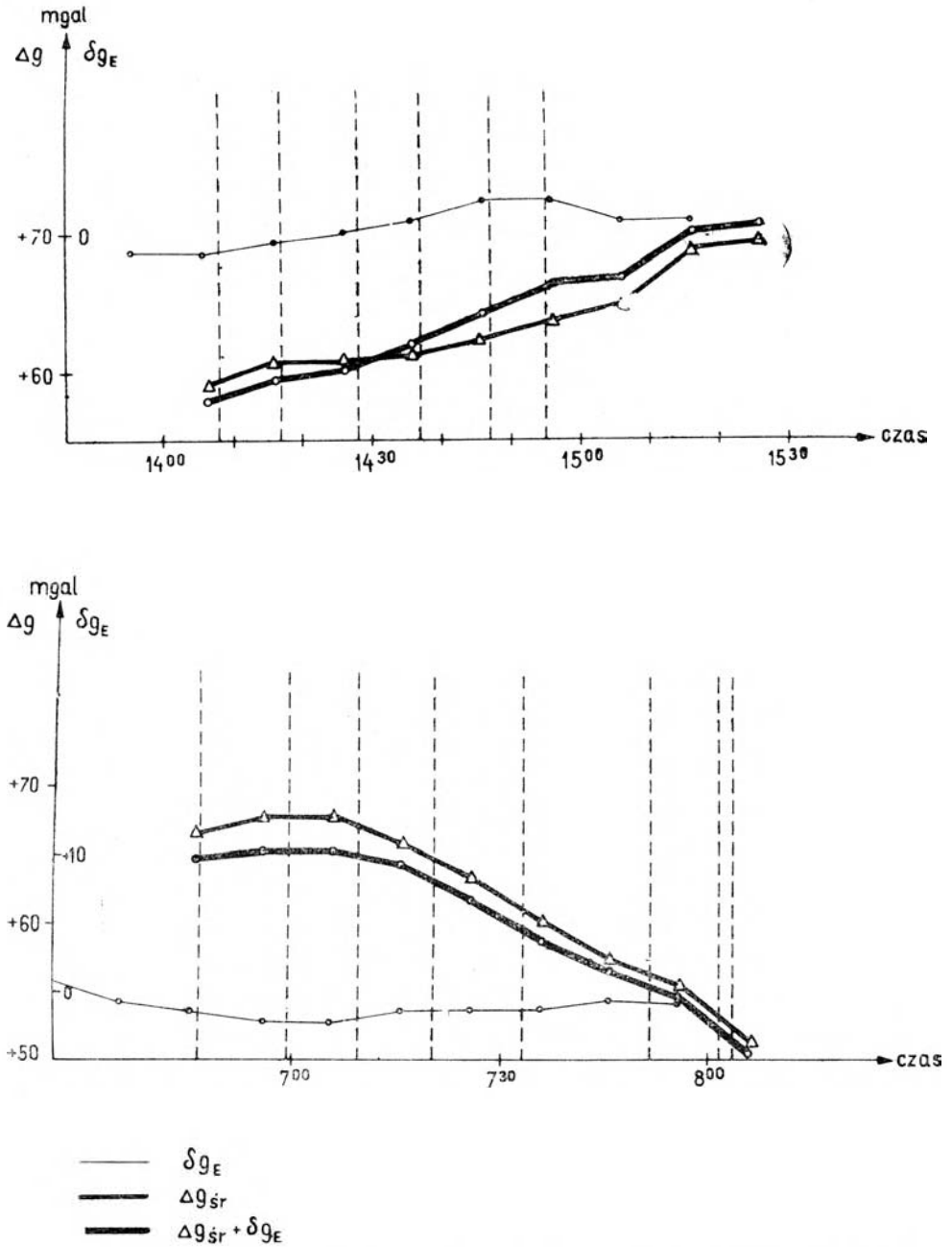
- v_c — szybkość statku wyrażona w węzłach,
- A — kurs statku,
- φ — szerokość geograficzna miejsca obserwacji.

Wzór ten jest dostatecznie dokładny, gdy szybkość statku nie przekracza 15 węzłów [7].

Podczas ruchu statku wzdłuż równoleżnika w kierunku wschodnim z prędkością 10 węzłów, w szerokości geograficznej odpowiadającej obszarowi naszych badań, wartość poprawki Eötvösa jest rzędu 45 miligali. Zmiana szybkości o 1 węzeł powoduje zmianę wartości poprawki o około 4 miligale. Z podanych tu przykładów widać, że właściwe określenie poprawki Eötvösa w istotny sposób wpływa na dokładność wyznaczanego przyspieszenia siły ciężkości. Problem polega głównie na wyznaczeniu rzeczywistej szybkości statku w stosunku do dna morskiego, gdyż ogólnie stosowane logi wyznaczają prędkość statku w stosunku do wody będącej w ciągłym ruchu.

Zastosowany przez nas radionawigacyjny system określania pozycji statku oraz ciągła rejestracja czasu obserwacji umożliwiły zastosowanie w procesie opracowywania omawianych pomiarów innego wzoru na poprawkę Eötvösa, w którym nie występuje element szybkości statku, a mianowicie

$$\delta g_E = 7,5 \cdot \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{t_2 - t_1} \cdot \cos^2 \varphi,$$



Rys. 4. Wpływ poprawki Eötvösa na wartość wyznaczanego przyspieszenia siły ciężkości

gdzie

$(\lambda_2 - \lambda_1)$ — różnica długości geograficznych między sąsiednimi punktami (w minutach łuku),

$(t_2 - t_1)$ — interwał czasu między pomiarami grawimetrycznymi w sąsiednich punktach (w godzinach).

W tym przypadku na dokładność wyznaczenia poprawki Eötvösa w sposób decydujący wpływa dokładność określenia współrzędnych poszczególnych punktów pomiarowych.

Wykresy podane na rysunku 4 pozwalają zorientować się, jaki wpływ ma poprawka Eötvösa na wartość różnicy przyspieszenia siły ciężkości, zaobserwowaną w strefie przybrzeżnej na tym samym fragmencie profilu pomierzonego dwukrotnie w przeciwnych kierunkach.

4. Nawigacja statków podczas prowadzenia badań grawimetrycznych

Ze względu na fakt, że pomiary grawimetryczne przeprowadza się w sposób ciągły w okresie całej doby, najbardziej przydatne są systemy radionawigacyjne, umożliwiające uzyskanie z wysoką dokładnością współrzędnych nieskończenie dużej liczby punktów [11].

W przypadku ogólnego zdjęcia grawimetrycznego wykorzystywany był radionawigacyjny system hiperboliczny Decca, zaś w czasie wykonywania półszczegółowego zdjęcia grawimetrycznego rejestrowano pozycje wyznaczone równocześnie przez aparaturę odbiorczą Decca i Sea-fix.

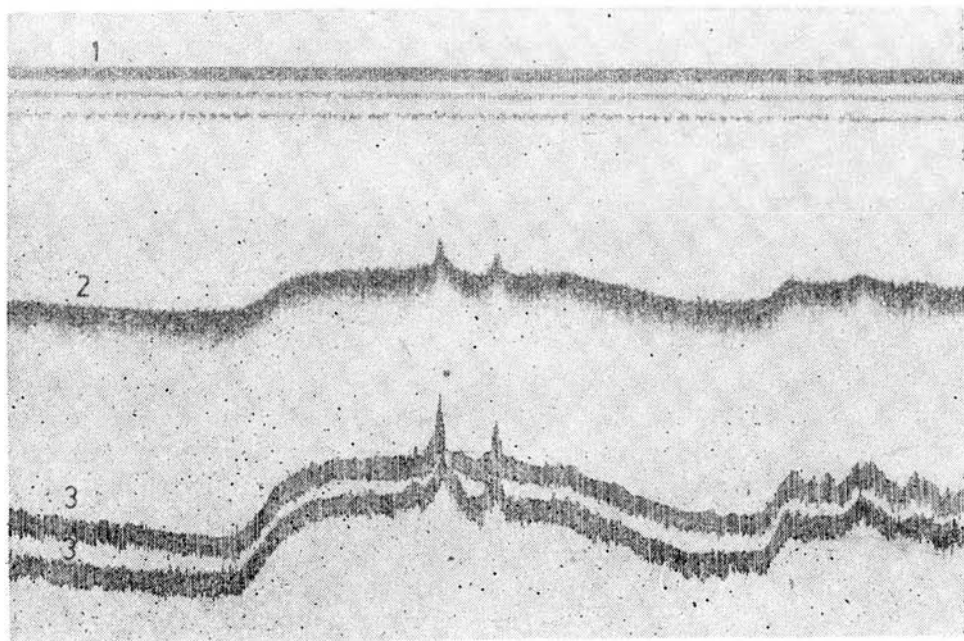
System Decca pracuje w okresie całej doby. Jego zasięg wynosi do 300 Mm wokół stacji głównej. W czasie prowadzonych badań uzyskano pozycje statku z dokładnością od 50 do 1000 m w zależności od obszaru i pory doby. Korzystano z uruchomionego latem 1970 zespołu nadajników południowo-szwedzkiego łańcucha Decca Navigator nr OA, którego stacje nadawcze obejmują swym zasięgiem całe polskie wybrzeże. Południowa część Bałtyku pokryta jest dwiema rodzinami hiperbol pozycyjnych tego łańcucha. W momencie przeprowadzania pomiarów nie były jeszcze udostępnione dane dotyczące tego łańcucha, a więc nie posiadaliśmy ani odpowiednich map, ani tabel poprawek.

W związku z wysokimi wymaganiami dotyczącymi dokładności wyznaczenia pozycji i celowością wykorzystania szwedzkiego łańcucha Decca przy nawigacji statków podczas wykonywania badań grawimetrycznych na Bałtyku, zaistniała konieczność przeprowadzenia szeregu prac badawczych, mających między innymi na celu zbadanie stabilności tego łańcucha oraz wyznaczenie teoretyczne i skontrolowanie praktyczne jego dokładności wzdłuż polskiego wybrzeża. Prace te zostały przeprowadzone przez grupę specjalistów z Wyższej Szkoły Morskiej w Gdyni.

Poza błędami charakterystycznymi dla danego łańcucha systemu radiolokacyjnego oraz błędami instrumentalnymi, największe błędy określenia współrzędnych statku powstają na skutek zmian propagacji fal w ciągu doby. I tak np. średni błąd wyznaczenia pozycji nocą jest około 10-krotnie większy od błędu takich pomiarów wykonanych w ciągu dnia w tym samym rejonie. Ze względu na konieczność wykonania badań grawimetrycznych w szerokim zakresie i krótkim okresie czasu niezbędne było prowadzenie pomiarów w ciągu całej doby. Sygnały stacji nadawczych odbierane były za pomocą aparatury Decca Mark-12.

Sea-fix jest systemem radionawigacyjnym z małym zasięgiem około 20 Mm nad powierzchnią morza. Stanowi on odmianę systemu Hi-fix. Zespół stacji tego systemu może pracować w układzie hiperbolicznym lub kołowym, lecz jedynie w ciągu dnia. Maksymalna dokładność wyznaczenia pozycji przy jego zastosowaniu wynosi 2 metry. W czasie omawianych tu badań wykorzystanie tego systemu pozwoliło uzyskać pozycje statku z błędem średnim, zawartym w granicach od ± 10 do ± 40 metrów, zależnie od warunków atmosferycznych i położenia stacji brzegowych w stosunku do odbiornika.

Wskazania odbiorników obydwu zastosowanych systemów radionawigacyjnych oraz chronometrów były fotografowane bądź filmowane co 2 mi-



Rys. 5. Echogram: 1 — lustro wody; 2 — obraz dna, tj. właściwa głębokość morza (w punkcie początkowym echogramu wynosi ona 30 metrów); 3 — echo wtórne

nuty lub 15 minut, w zależności od rodzaju prowadzonych badań grawimetrycznych.

Podczas wykonywania pomiarów grawimetrycznych obydwie statki posuwały się ze stałą szybkością 7 węzłów.

Określenie głębokości morza było możliwe dzięki pracującym na zmianę dwóm echosondom. Ich wskazania rejestrowane były graficznie na echogramach (rys. 5). Zapis ten, prowadzony podczas badań bez przerwy, odzwierciedla profil dna morskiego, pokrywający się z grawimetrycznym profilem pomiarowym. Pozwala on określić głębokość morza w dowolnym punkcie profilu grawimetrycznego, a także umożliwia wyciągnięcie wniosków co do charakteru dna. Dokładność wyznaczenia głębokości jest rzędu 1%. W przypadku wykonanych prac błąd ten wynosi średnio $\pm 0,5$ metra.

Konieczność ścisłej współpracy specjalistów prowadzących badania grawimetryczne oraz nawigatorów spowodowała, że między laboratorium grawimetrycznym na statku, kabiną nawigacyjną i ekipą nawigatorów pracującą na lądzie, utrzymywana była stała łączność telefoniczna bądź radiotelefoniczna.

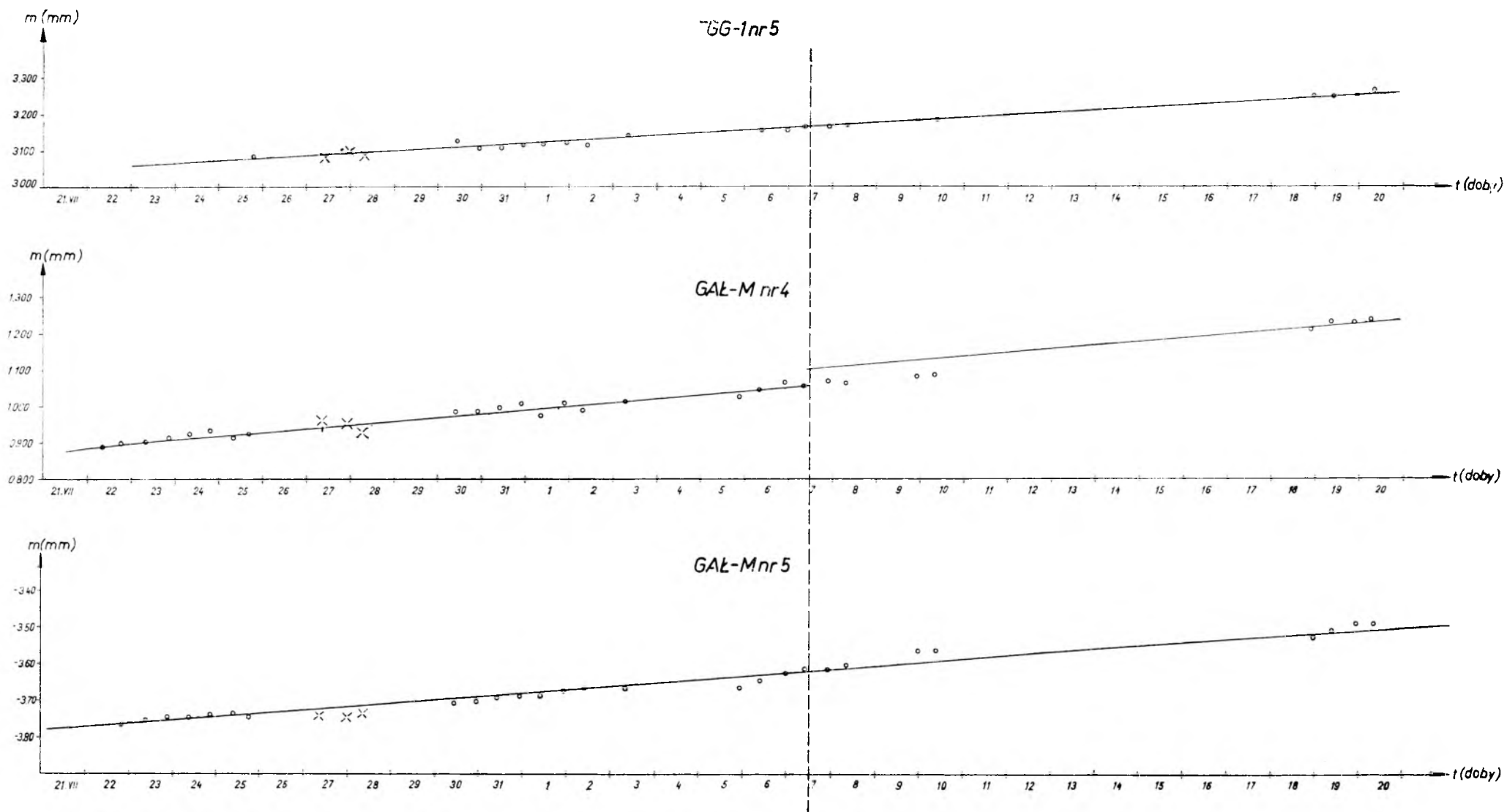
5. Obserwacje wykonywane w portach

Pomiary grawimetryczne wykonywane w portach, a bezpośrednio związane z omawianymi tu badaniami prowadzonymi na morzu, miały głównie na celu:

- 1) wycechowanie grawimetrów morskich,
- 2) ustalenie dryftu każdego z nich w okresie obejmującym całość prac na morzu,
- 3) wyznaczenie współczynników czasu grawimetrów,
- 4) dowiązanie grawimetrycznych pomiarów morskich do sieci lądowej.

Jak wiadomo, celem cechowania grawimetru jest wyznaczenie jego równania skali. Gdy równanie to dla danego grawimetru ma postać liniową, cechowanie jest równoznaczne z wyznaczeniem współczynnika skali tego instrumentu, tj. ustaleniem związku między zmianą przyspieszenia siły ciężkości a zmianą odczytów na skali. Współczynnik ten, zwany stałą grawimetru (K), wyznaczany jest zwykle laboratoryjnie z zastosowaniem tzw. metody nachylania lub drogą przeprowadzenia wielokrotnych pomiarów grawimetrycznych na punktach o znanych wartościach przyspieszenia siły ciężkości.

W przypadku grawimetrów stosowanych we wszystkich trzech ekspedycjach, wartość działki każdego z grawimetrów określana była głównie na podstawie wyznaczeń dokonanych bezpośrednio w zakresie prowadzo-



Rys. 6. Wykres chodu grawimetrów morskich GAŁ-M

nych pomiarów na trzech przesłach o znanych wartościach Δg . Wartość współczynnika K wyznaczono stosując wzór

$$K = \frac{\Delta g}{\Delta m},$$

gdzie

Δg — znana wartość różnicy przyspieszenia siły ciężkości między dwoma punktami dowiązаныmi do krajowej sieci grawimetrycznej, mgal;

Δm — różnica wskazań grawimetru morskiego w tych punktach z uwzględnieniem poprawki ze względu na dryft punktu zerowego, mm.

Błędy przypadkowe wyznaczonych współczynników skali nie przekraczały 0,1%.

Aby dokonać oceny pracy instrumentów w czasie badań na morzu, niezbędna była obserwacja dryftu (chodu) grawimetrów. Charakter chodu grawimetrów morskich ma istotne znaczenie z powodu długotrwałości obserwacji morskich. Obserwacje grawimetryczne, mające na celu uchwycenie chodu instrumentów, podczas ekspedycji wykonywano przed rozpoczęciem prac w morzu, w ich trakcie oraz po zakończeniu pływania.

W czasie ekspedycji wielokrotnie zawijano do portów, gdzie zawsze w tych samych miejscach cumowania statku regularnie wykonywane były serie obserwacji przy użyciu grawimetrów morskich. Obserwacje te odniesione były do punktu grawimetrycznego położonego przy jednym z nabrzeży portu gdyńskiego.

Grawimetry morskie typu GAŁ odznaczają się dużą stabilnością chodu, mającego charakter liniowy (rys. 6). Średnia dobowa wartość dryftu zawierała się w granicach od 0,7÷1,2 mgal/dobę. Jak widać na wykresie, w jednym przypadku nastąpiła gwałtowna zmiana odczytu (tzw. skok), ale charakter liniowy chodu został nie zmieniony. Przyczyna tego skoku nie została całkowicie wyjaśniona.

Jedną z cech charakterystycznych systemu mierzącego danego grawimetru morskiego jest współczynnik czasu (τ) tego grawimetru, uzależniony od stopnia tłumienia układu pomiarowego. Tłumienie powoduje, że grawimetr morski reaguje na zmianę przyspieszenia siły ciężkości później niż faktycznie nastąpiła ta zmiana. Współczynniki czasu każdego z używanych grawimetrów zostały określone w laboratorium grawimetrycznym na statku bezpośrednio przed rozpoczęciem prac na morzu. W przypadku omawianych badań wartości tych współczynników wynosiły odpowiednio 180, 240 i 300 sekund, co spowodowało konieczność wprowadzenia do obserwacji poprawek ze względu na opóźnienie wskazań grawimetrów zgodnie z wzorem

$$\delta g_{op} = \frac{dg}{dt} \tau,$$

gdzie $\frac{dg}{dt}$, jest szybkością zmian wskazań grawimetru w czasie (w mgal/godz). Wartości te dla naszych badań były rzędu 2 mgal.

Stałe miejsca cumowania obydwu statków w punktach wyjściowych do pomiarów morskich zostały dowiązane do punktów sieci grawimetrycznej Polski, dzięki czemu uzyskano wartości przyspieszenia siły ciężkości w punktach cumowania w Gdyni, Kołobrzegu i Świnoujściu w przyjętym w kraju systemie danych grawimetrycznych. Do nawiązań wykorzystano grawimetr Sharpe 228-G.

6. Wyniki przeprowadzonych badań grawimetrycznych

W efekcie przeprowadzonych badań dysponowaliśmy bardzo dużą ilością materiału pomiarowego.

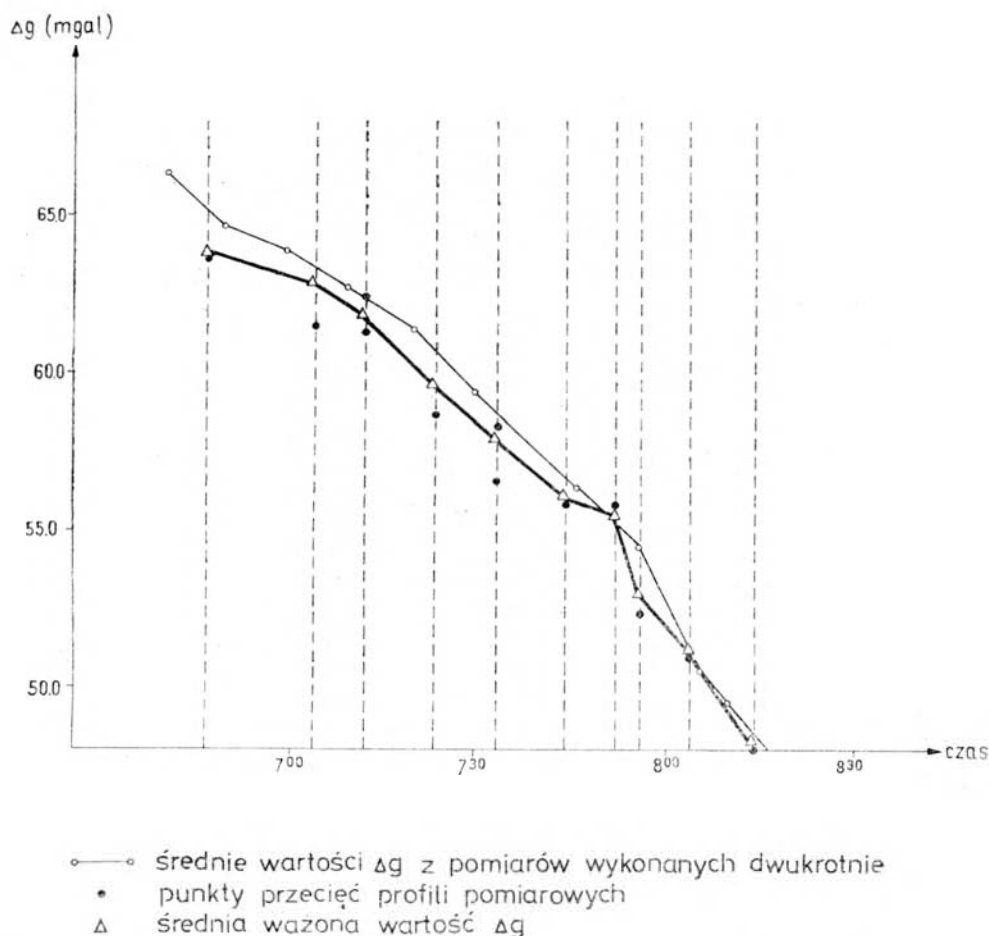
Wszystkie dane grawimetryczne, nawigacyjne i hydrograficzne, jakie powstały w wyniku wykonanych badań, zostały poddane gruntownej analizie. (Ze względu na ograniczoną objętość artykułu szczegółowe omówienie procesu opracowania uzyskanych materiałów może być przedmiotem oddzielnej publikacji). Fakt, że zarówno aparatura pomiarowa, jak i pomocnicza były dublowane (3 grawimetry, 2 systemy nawigacyjne, 2 echosondy), umożliwił dokonanie porównań wyników. Dwukrotne wykonanie pomiarów na pewnych profilach i wiele punktów przecięć profili grawimetrycznych miało za zadanie skontrolowanie wyników przeprowadzonych badań.

W celu dokonania oceny dokładności zdjęcia grawimetrycznego wykonano:

- 1) porównanie wyników uzyskanych na podstawie rejestracji instrumentów na każdym profilu pomiarowym,
- 2) zestawienie powtórnych pomiarów na danym profilu,
- 3) zestawienie otrzymanych wartości Δg w punktach przecięć profili,
- 4) porównanie zdjęcia grawimetrycznego pomierzonego na morzu ze zdjęciami wykonanymi na lądzie,
- 5) porównanie danych grawimetrycznych uzyskanych na podstawie pomiarów przeprowadzonych w ramach poszczególnych ekspedycji morskich.

Rysunek 7 umożliwia zorientowanie się w wielkości rozbieżności pomiędzy wartościami Δg , uzyskanymi z pomiarów wykonanych dwukrotnie na jednym profilu grawimetrycznym oraz wartościami Δg wyznaczonymi w jego punktach przecięć z innymi profilami.

W efekcie opracowania wyników pomiarów, wykonanych w polskim akwenie Morza Bałtyckiego, uzyskano wartości przyspieszenia siły ciężkości dla punktów położonych we wzajemnej odległości około 1,7 Mm.



Rys. 7. Wykres wartości Δg otrzymanych w wyniku powtórnych pomiarów na profilu i w punktach przecięć z innymi trasami pomiarowymi

Sieć grawimetryczna, jaka powstała w wyniku przeprowadzonych pomiarów, została wyrównana metodą pośredniczącą przy zastosowaniu elektronicznej maszyny cyfrowej Odra 1204. Po wyrównaniu sieci grawimetrycznej, jaką pomierzono na morzu, błąd średni wyznaczenia wartości g w danym punkcie ma wartość $\pm 1,6$ miligala.

W przypadku półszczęgółowego zdjęcia grawimetrycznego, pomierzonego blisko brzegu, średni błąd wartości przyspieszenia siły ciężkości po wyrównaniu wyniósł $\pm 0,7$ mgal. Gęstość zdjęcia jest znacznie wyższa niż w obszarze zdjęcia ogólnego.

Ostateczną formą wyników badań grawimetrycznych są anomalie grawimetryczne przedstawione zarówno w postaci katalogowej, jak i kartograficznej. Zwykle sporządza się mapy grawimetryczne anomalii Faye'a i Bouguera, znacznie rzadziej anomalii izostatycznych.

Dla celów geodezyjnych bardziej przydatne są mapy anomalii Faye'a, w celu zaś dokonania geologicznej interpretacji danych grawimetrycznych opracowuje się mapy anomalii Bouguera, przyjmując stałą lub zmienną, ściśle określoną gęstość podłoża.

Podczas prowadzenia badań grawimetrycznych z pokładu statku (nie łodzi podwodnej) punkty pomiarowe położone są na powierzchni odniesienia lub w bardzo niewielkiej odległości od niej. Wartość anomalii Faye'a w danym punkcie wyznaczana jest na podstawie wzoru

$$A_F = g_0 - \gamma_0,$$

zaś anomalia Bouguera wyrażona jest wzorem

$$A_B = g_0 - \gamma_0 + \delta g_B,$$

gdzie

g_0 — pomierzona na poziomie morza wartość przyspieszenia siły ciężkości w danym punkcie (w mgal),

γ_0 — normalna wartość przyspieszenia siły ciężkości według przyjętego w kraju wzoru (w mgal),

δg_B — poprawka Bouguera.

W przypadku przeprowadzonych przez nas badań praktycznie poprawkę Bouguera wyznaczono na podstawie wzoru

$$g_B = 0,0418 \cdot (\sigma - \sigma_w) \cdot H,$$

gdzie

H — głębokość morza (w metrach),

σ — gęstość utworów geologicznych pod dnem morza,

σ_w — gęstość wody morskiej.

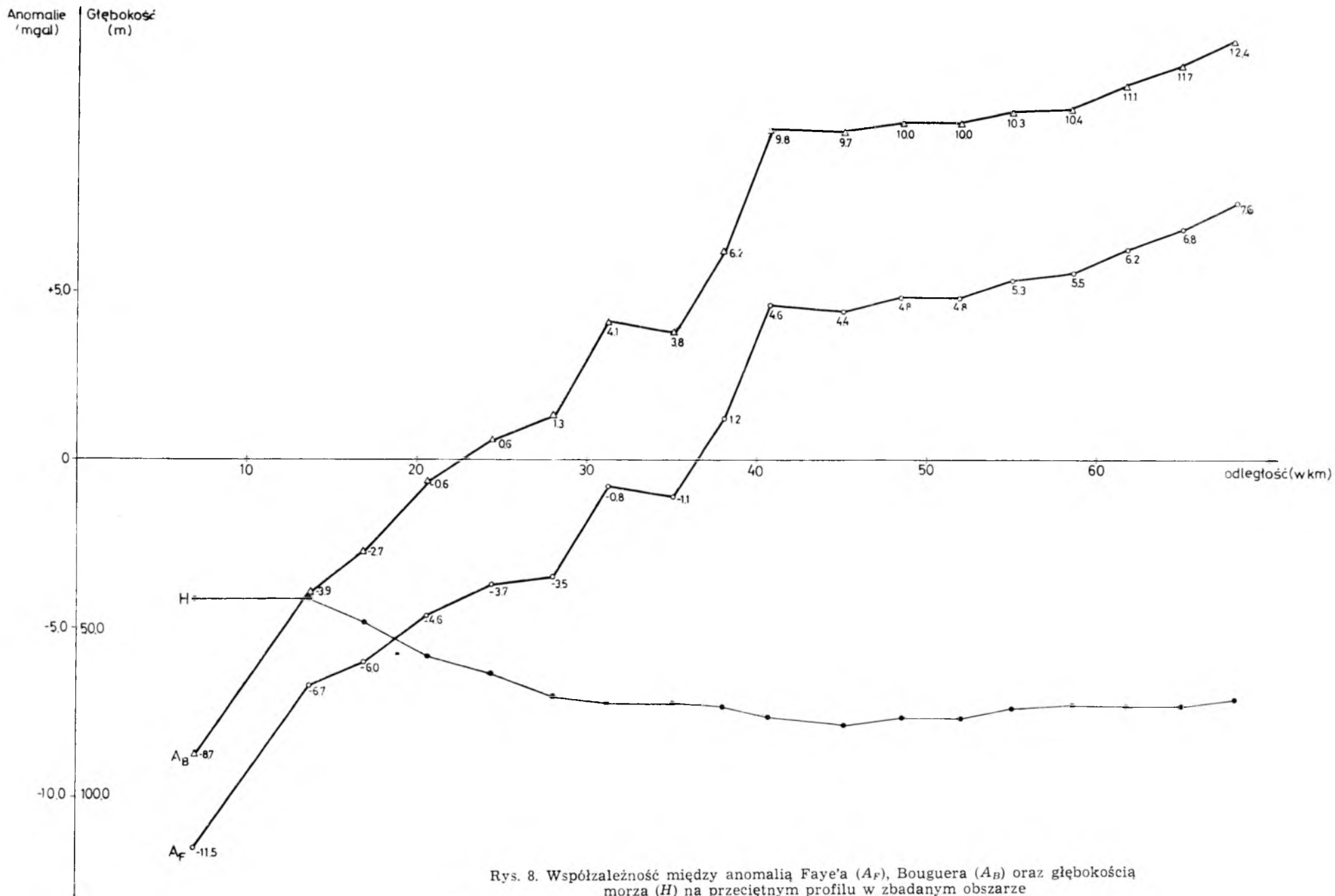
W naszym opracowaniu przyjęto następujące gęstości:

$$\sigma = 2,67 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3},$$

$$\sigma_w = 1,03 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3},$$

co spowodowało, że wyrażenie na poprawkę Bouguera przyjęło postać

$$g_B = 0,0686 \cdot H \quad (\text{w mgal/m}).$$



Rys. 8. Współzależność między anomalią Faye'a (A_F), Bouguera (A_B) oraz głębokością morza (H) na przeciętnym profilu w zbadanym obszarze

Na rysunku 8 podano przykład obrazujący współzależność anomalii Faye'a, Bouguera oraz głębokości dna morskiego wzdłuż profilu pomiarowego, przebiegającego w kierunku południkowym w obszarze o małym gradiencie siły ciężkości.

Dane grawimetryczne, otrzymane w efekcie opracowania wyników pomiarów, pozwoliły na opracowanie map grawimetrycznych całego obszaru zbadanego podczas trzech ekspedycji morskich przeprowadzonych na Bałtyku w 1971 i 1972 roku. Ze względu na osiągniętą dokładność pomiarów grawimetrycznych i dokładność pozycji statku oraz gęstość punktów (omówione poprzednio), na obszarze objętym zdjęciem grawimetrycznym o charakterze ogólnym możliwe było opracowanie map anomalii grawimetrycznych.

Porównanie przebiegu izolinii anomalii grawimetrycznych, opracowanego na podstawie danych uzyskanych z poszczególnych ekspedycji morskich oraz opracowanych dla obszaru polskiego wybrzeża, wykazuje dużą zgodność. W krańcowych przypadkach różnice izoanomalii nie przekraczają połowy cięcia, co jest dopuszczalne dla tego rodzaju mapy.

Omówione powyżej opracowania kartograficzne umożliwiły już dokonanie wstępnej interpretacji geologicznej i pozwoliły wydzielić wszystkie regionalne anomalie siły ciężkości oraz anomalie lokalne znajdujące swoje odpowiedniki na lądzie [5].

7. Podsumowanie

Omówione w artykule badania grawimetryczne przeprowadzone w polskim akwenie Morza Bałtyckiego przez Instytut Geodezji i Kartografii stanowią pierwsze tego typu prace wykonane wzdłuż polskiego wybrzeża.

Wyniki badań mają szerokie zastosowanie w praktyce. Są one mianowicie wykorzystywane dla takich potrzeb geodezyjnych, jak: wyznaczanie odchyłań pionu, odstępów geoidy od elipsoidy odniesienia (są to dane niezbędne np. przy modernizacji sieci astronomiczno-geodezyjnej, kartografii grawimetrycznej i innych) oraz opracowanie związane z numerycznym przedstawieniem średnich wysokości i głębokości morza na obszarze Europy środkowej i wschodniej. Przeprowadzone przez nas badania zostały również uwzględnione przez Międzynarodowe Biuro Grawimetryczne przy opracowaniu mapy wykonanych ostatnio na świecie pomiarów i badań grawimetrycznych na morzu — „Recent sea gravity tracks and surveys”, B.G.I., 1975 (Bulletin d'Information, No 38, Mai, 1976). Materiały grawimetryczne, uzyskane w wyniku przeprowadzonych badań, mogą być także wykorzystywane dla celów specjalnych, jak również stanowią materiał do interpretacji geologicznej zdjęć grawimetrycznych wykonanych na morzu i lądzie, programowania prac geologiczno-rozpoznawczych i projektowania poszukiwań surowcowych na Morzu Bałtyckim.

L I T E R A T U R A

- [1] *Anderson O. B. i inni*: Gravity and geological structure of the Fennoscandian Border-Zone in the Southern Baltic-Sea. Bulletin of the Geological Society of Denmark, vol. 24, 1975.
- [2] *Bower D. R.*: The determination of cross-coupling errors in the measurement of gravity at sea. J. Geophys. Res., 71, Nr 2, 1966.
- [3] *Chojnicki T.*: Eksperymentalna metoda pomiarów grawimetrem Askania GS-11 na zamrożonym morzu. Prace Inst. Geod. i Kart. t. XIII, zesz. 1 (28), Warszawa, 1966.
- [4] *Chowańska-Otyś D.*: Pierwsze polskie badania grawimetryczne w południowej części Morza Bałtyckiego. Zbiór referatów na II Symp. Inst. Nawig. i Hydrogr. WSMW, Gdynia, 1975.
- [5] *Chowańska-Otyś D., Dąbrowski A.*: Wgłębna budowa geologiczna podłoża południowego Bałtyku w świetle wyników zdjęcia grawimetrycznego, wykonanego przez Instytut Geodezji i Kartografii w okresie 1970—1972. Kwartalnik Geologiczny, 1977 (w druku).
- [6] *Ewing C. E., Mitchell M. M.*: Introduction to geodesy. Amer. Elsevier Publ. Comp., New York, 1970.
- [7] *Fleischer U.*: Surface-ship gravity measurements in the North-Sea. Geophys. Prosp., 11, Nr 4, 1963.
- [8] *Harrison J. C.*: The measurement of gravity at sea. Methods and Techniques in Geophysics, Interscience Publ. L., 1960.
- [9] International Gravity Commission Meeting, Paryż, 1974 (materiały).
- [10] International Association of Geodesy, Grenoble, 1975 (materiały).
- [11] *Jagodźński Z.*: Systemy radionawigacyjne. MON, Warszawa, 1961.
- [12] *Kuziwanow W. A., Kogan M. G., Magnickaja E. I.*: O sowmiestnom wlijanii gorizontalnych i wiertikalnych uskorienij na pokazanija silno dempfirowannogo grawimetri. Izw. AN SSSR, ser. Fizika Ziemli, Nr 3, 1966.
- [13] *La Coste L. J. B.*: Gravity measurements at sea and in the air. Reviews of Geophys., 5, Nr 3, 1967.
- [14] *Majewska M.*: Doświadczalne pomiary grawimetryczne na Morzu Bałtyckim w rejonie portów Kołobrzeg i Darłowo. Przegl. Geod., Nr 1, 1971.
- [15] *Markow G. S., Popow E. I.*: Morskoje ispytanija grawimietrow. Fizika Ziemli, Nr 11, 1968.
- [16] *Popow E. I.*: Opriedielenije siły tiazesti na podwizhnom osnovanii. Izd. Nauka, Moskwa, 1967.
- [17] Praca zbiorowa — red. Gruszinskij N. P.: Morskije grawimietricheskije issliedowanija. Mosk. Uniw., 1973, 1975.
- [18] Praca zbiorowa — red. Popow E. I.: Apparaturnyje i optyno-mietodicheskije raboty po morskoy grawimetrii. Izd. Nauka, Moskwa, 1973.
- [19] Praca zbiorowa — red. Popow E. I.: Morskoy girostabilizirowanyj grawimetr. Izd. Nauka, Moskwa, 1972.
- [20] *Talvani M., Early W. P., Hayes D. E.*: Continuous analog computation and recording of the cross-coupling and off-levelling errors. J. Geophys. Res., 70, Nr 2, 1965.
- [21] *Wiesielow K. E., Sagitow M. U.*: Grawimietricheskaja razwiedka. Izd. Niedra, 1968.

Recenzował doc. dr Jerzy Bokun

Rękopis złożono w Redakcji we wrześniu 1976 r.

ДАНУТА ХОВАНЬСКА-ОТЫСЬ

ГРАВИМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКО-МЕТОДИЧЕСКИЕ РАБОТЫ, ПРОВЕДЕННЫЕ В ЮЖНОЙ ЧАСТИ БАЛТИЙСКОГО МОРЯ

Резюме

В 1971—72 годах Институтом геодезии и картографии были организованы четыре морские гравиметрические экспедиции. Исследования, имеющие характер общей гравиметрической съёмки, охватили территорию южной части Балтийского моря, простирающуюся вдоль польского побережья в полосе шириной около 100 км от берега. Измерения были произведены по маршрутам расположенным параллельно береговой линии на расстоянии около 5 Мм друг от друга и вдоль профилей пересекающих этот район. Кроме того, на акватории около 1200 км² выполнено более детальную гравиметрическую съёмку в форме регулярной сетки профилей, отдаленных от себя на расстоянии около 2÷3 морских миль, причем многие из них измерено два раза.

Гравиметрическая аппаратура состояла из трех советских гиростабилизированных гравиметров ГАЛ-М. При навигации судов применено систему *Decca*, а в случае детальной съёмки — дополнительно систему *Sea-fix*. В результате обработки наблюдений получено гравиметрические данные для точек, расположенных во взаимном расстоянии около 1,7 Мм, а густота общей гравиметрической съёмки в среднем равняется 1 точка/5 Мм². Средняя квадратическая ошибка определения силы тяжести „*g*” в данной точке после уравнивания составляет ±1,6 миллигала. В случае детальной гравиметрической съёмки средняя квадратическая ошибка определения ускорения силы тяжести после уравнивания составляет ±0,7 мгал. Густота этой съёмки значительно выше, чем на территории общей гравиметрической съёмки, и составляет 1 точка/1,4 Мм².

Гравиметрические данные, полученные для южной части Балтийского моря, дали возможность выполнения ряда дальнейших работ из области геодезии и геологии.

DANUTA CHOWAŃSKA-OTYS

GRAVIMETRIC METHODOLOGICAL RESEARCH WORKS AT THE SOUTH PART OF BALTIC SEA

Summary

In 1971—72 Institute of Geodesy and Cartography organized four gravimetric sea expeditions. Investigations, having character of general gravimetric survey, were carried out at the area of south part of Baltic Sea along the Polish seacoast in the zone of about 100 km from the shore. Measurements were made along the profiles running parallel to the shore in the mutual distance about 5 nm and along the profiles crossing this area. Besides, semidetailed gravimetric survey on the area of 1300 km² was made in the shape of regular network of profiles being 2÷3 nm away one from another. Many of these profiles were measured twice. Gravimetric instrumentation consisted of three strongly suppressed russian gravimeters of GAL-M type, placed on the giroscopically stabilized plates. System Decca was used for ship navigation, and during the semidetailed survey system Sea-fix was utilized additionally.

As a result of measurement elaboration gravimetric data for points placed at mutual distance on the average 1,7 nm were obtained. Rate of general gravimetric survey can be estimated as one point/5 nm². Mean error of determination value g at given point after adjustment is $\pm 1,6$ mGal. For semidetailed gravimetric survey mean error of acceleration gravity value after adjustment was $\pm 0,7$ mGal. The rate of this survey is much higher than at the area of general survey; it is one point/1,4 nm².

Gravimetric data obtained for south part of Baltic Sea have made possible realizing a number of further geodesical and geological works.