

ANDRZEJ UHRYNOWSKI

Wyznaczenie zmiany wiekowej magnetycznego pola Ziemi na Bałtyku w interwale 1982–1985

Z a r y s t r e ś c i. W pracy omówiono metodę pomiarów na morskich magnetycznych punktach wiekowych oraz przedstawiono wyniki badań zmian wiekowych pola geomagnetycznego (F , H , i Z), jakie prowadzono w latach 1981–1985 na 17 punktach na Bałtyku Południowym. Otrzymane wyniki porównano z danymi z satelity MAGSAT z lat 1980 i 1981, i na podstawie tego porównania przeprowadzono ocenę dokładności przyjętej metody pomiarów.

Wstęp

Osiągnięcia w tworzeniu globalnych modeli magnetycznego pola Ziemi na podstawie danych uzyskanych z pomocą sztucznych satelitów, a zwłaszcza satelity MAGSAT [7], [11], nie zmniejszyły znaczenia pomiarów wykonywanych na powierzchni naszej planety. Przeciwnie, każdy nowy model, opracowany przy użyciu nowych danych lub przy przyjęciu nowych założeń, wymaga sprawdzenia i oceny, jak dalece odtwarza on rzeczywisty kształt magnetycznego pola Ziemi. W dalszym ciągu aktualne są naziemne metody badania anomalii magnetycznych, zwłaszcza lokalnych, gdyż nie tylko techniki satelitarne, ale również i lotnicze nie mają tu zastosowania. Odnosi się to zarówno do elementów pola magnetycznego, jak i do jego zmian wiekowych. Zmiany te, a zwłaszcza ich anomalie, budzą wśród specjalistów coraz większe zainteresowanie. Ich analiza bowiem, pozwala uzyskać wiele informacji o procesach zachodzących we wnętrzu Ziemi, co umożliwia tworzenie i weryfikację hipotez, dotyczących mechanizmu dynamy ziemskiego i innych zjawisk w jądrze, płaszczu i skorupie ziemskiej. Ponadto znajomość zmian wiekowych jest niezbędna do prawidłowej redukcji pomiarów, co jest szczególnie ważne dla kartografii magnetycznej, znajdującej coraz szersze zastosowania. Te czynniki sprawiają, że do bezpośrednich pomiarów na powierzchni naszego globu przywiązuje się ciągle dużą wagę.

Zmiana wiekowa elementu magnetycznego pola Ziemi

Wartość elementu E pola magnetycznego w dowolnym punkcie naszego globu może być wyrażona jako funkcja czasu i przedstawiona jako suma pola wewnętrznego, którego źródło znajduje się wewnątrz Ziemi, i którego zmiany przebiegają powoli oraz pola zewnętrznego, pochodzącego od źródeł poza ziemskich, głównie od Słońca i charakteryzującego się szybkozmiennymi wariacjami:

$$E(T) = f_z(T) + f_s(T) \quad (1)$$

Zmiana wiekowa jest równa przyrostowi wielkości pola wewnętrznego, jaki miał miejsce w pewnym interwale czasu, nie mniejszym od jednego roku. Zatem przy określaniu tej zmiany należy pozbyć się wpływu zewnętrznej części pola lub przynajmniej zmniejszyć ten wpływ do minimum. W obserwatoriach magnetycznych dokonuje się tego drogą uśrednienia wartości rejestrowanego pola magnetycznego w interwale jednego roku. Średnia wartość elementu pola E dla epoki e wyrazi się wzorem:

$$E^e(T) = \frac{1}{k-p} \left[\int_p^k f_z(T) dT + \int_p^k f_s(T) dT \right] + E_B \quad (2)$$

gdzie funkcje $f_z(T)$ i $f_s(T)$ przedstawiają odpowiednio przebieg części wewnętrznej i zewnętrznej elementu E w rocznym przedziale czasu $k-p$, zarejestrowany w postaci ich sumy na magnetogramie o wartości bazy równej E_B .

Ponieważ zmienność części zewnętrznej z uwagi na swoje główne źródło ma charakter cykliczny w ciągu roku, to można przyjąć, że:

$$\int_p^k f_s(T) dT = 0 \quad (3)$$

Zatem przyrost elementu E od epoki e' do epoki e'' , badany przy użyciu średnich wartości rocznych, będzie równy przyrostowi części wewnętrznej pola czyli zmianie wiekowej elementu E .

W latach o dużej aktywności Słońca, tak obliczona zmiana wiekowa może być zniekształcona wpływem zaburzeń pola magnetycznego. Z tego względu często stosuje się obliczenie średniej wartości tylko z okresów niezaburzonych.

Na punktach wiekowych wyznaczenie średniej wartości rocznej elementu E dokonuje się albo bezpośrednio, wykorzystując dane z obserwatorium magnetycznego – w wypadku punktów niezbyt odległych od niego, albo drogą pośrednią, poprzez magnetogramy wariacyjnej stacji polowej – w wypadku punktu położonego daleko.

Metoda postępowania przedstawiona była w Pracach IGiK w 1977 r. [8], [9].

Specyfika badań zmian wiekowych na morzu

W przeciwieństwie do badań zmian wiekowych na lądzie, które nie przysparzają specjalnych kłopotów, badania na morzach i oceanach napotykają na szereg poważnych problemów. Rozwiązanie tych problemów, lub nawet zmniejszenie ich znaczenia jest szczególnie istotne z uwagi na to, że jak wiadomo, wody pokrywają dwie trzecie powierzchni naszego globu.

Spośród tych problemów omówmy pokrótce trzy, które mają podstawowe znaczenie dla otrzymania wyników o dokładnościach porównywalnych z dokładnościami wyników uzyskiwanych na lądzie.

Pierwszy problem, to istnienie własnego pola magnetycznego statku i urządzeń na nim zainstalowanych, które wpływa zakłócająco na wskazania

magnetometrów. Wpływ ten jest szczególnie uciążliwy, gdyż zmienia się wraz ze zmianą kursu statku i polem magnetycznym Ziemi. Tylko Związek Radziecki dysponuje obecnie odpowiednim statkiem, którym jest niemagnetyczny szkuner „Zaria” – jedyny w świecie statek specjalny tego typu, na którym wpływ pól zakłócających jest minimalny. Lecz nawet użycie statku niemagnetycznego nie rozwiązuje w pełni tego problemu, bo choć statek jest zbudowany z materiałów niemagnetycznych, niemożliwe jest uniknięcie zainstalowania na nim urządzeń, które wytwarzają pola magnetyczne, na przykład silników elektrycznych, transformatorów itp. Pojawiająca się stąd dewiacja magnetometrów zniekształca wyniki pomiarów. Problem ten mógłby być rozwiązany drogą użycia magnetometru wektorowego, którego czujniki holowane na odpowiednio długiej linie nie byłyby wrażliwe na zakłócający wpływ pól pochodzących od statku. System czujników takiego magnetometru musiałby mieć zdolność automatycznej orientacji względem południka magnetycznego oraz musiałby zachować automatycznie stałe położenie względem pionu. W taki magnetometr wyposażony był satelita MAGSAT, ale skonstruowanie przyrządu do szerokiego stosowania na morzach okazało się jednak bardzo trudne i podejmowane próby, między innymi także w ZSRR, nie dały, jak dotąd, pożądanego rezultatu.

Kolejnym ważnym problemem jest uwzględnienie wariacji krótkookresowych czyli zewnętrznej części pola geomagnetycznego. Na lądzie można zainstalować w pobliżu punktu wiekowego polową stację wariograficzną i wykorzystać zarejestrowane na niej wariacje pola do obliczenia odpowiednich poprawek do wyników pomiarów. Na morzu wariografu ustawić się nie da. Podejmowane próby umieszczenia na dnie morza automatycznej i samoorientującej się wektorowej stacji wariograficznej MBC-3M, będącej kolejnym prototypem takiego urządzenia, skonstruowanego w ZSRR, jak do tej pory nie dały zadowalających wyników, zwłaszcza, że czynnikiem ograniczającym użycie takiej stacji jest głębokość morza. Redukcja pomiarów według najbliższego obserwatorium magnetycznego może być stosowana tylko w wypadku obszarów niezbyt odległych od takiego obserwatorium. Na oceanie jest to oczywiście niemożliwe.

Trzecim wreszcie problemem jest trudność z powtórzeniem pomiarów dokładnie w tym samym miejscu co pomiary wykonane poprzednio. Niewielki nawet gradient horyzontalny pola geomagnetycznego w rejonie punktu wiekowego, przy nieprecyzyjnej lokalizacji kolejnych pomiarów, może spowodować zniekształcenia oczekiwanego wyniku. Dokładność oznaczenia pozycji statku, a właściwie wprowadzenia statku na żadaną pozycję, osiągnięta za pomocą istniejących w naszej dyspozycji systemów nawigacyjnych, jest niewystarczająca. Można mieć nadzieję, że w niedalekiej przyszłości wejdzie do powszechnego użytku system satelitarny GPS lub podobny i problem wpływu błędów lokalizacji na wyznaczenia elementów pola magnetycznego na punktach wiekowych na morzu zostanie rozwiązany.

Przedstawione wyżej trzy główne problemy, związane z otrzymaniem dokładnych wartości zmian wiekowych na akwenach morskich, nie wyczerpują

zagadnienia. Istnieje ponadto szereg innych problemów o mniejszym już znaczeniu, jak na przykład wpływ prądów morskich, indukujących pola elektromagnetyczne lub zmiany współczynników dewiacji w trakcie wykonywania pomiarów i inne. Jednakże wpływ tych czynników jest znacznie mniejszy i praktycznie niemożliwy do wyselekcjonowania, a tym samym i do uwzględnienia. Rezultat ich oddziaływania musi być zatem, jak na razie, potraktowany jako jeden ze składników sumarycznego błędu przypadkowego wyznaczeń.

Jak z powyższego, krótkiego z konieczności, przeglądu wynika, zagadnienie badania zmian wiekowych na morzach jest bardzo złożone. Należy przy tym podkreślić, że badania wymagają szczególnej precyzji przy pomiarach, jak również przy uwzględnianiu wpływu tych czynników, które mogą zniekształcać wyniki wyznaczeń. Każdy bowiem błąd o charakterze systematycznym, czy to instrumentalny, czy pomiarowy, czy też wprowadzony przy redukcjach, w całości wejdzie do zmiany wiekowej, a w konsekwencji do wszystkich wartości poprawianych o tę zmianę.

Metoda pomiarów na morskim punkcie wiekowym

Przedstawione wyżej problemy można rozwiązać w znacznym stopniu za pomocą metody, opracowanej w Leningradzkim Oddziale Instytutu Ziemskiego Magnetyzmu Jonosfery i Propagacji Fal Radiowych Akademii Nauk ZSRR (LO IZMIR AN) przez doktora Kasjanienko [5].

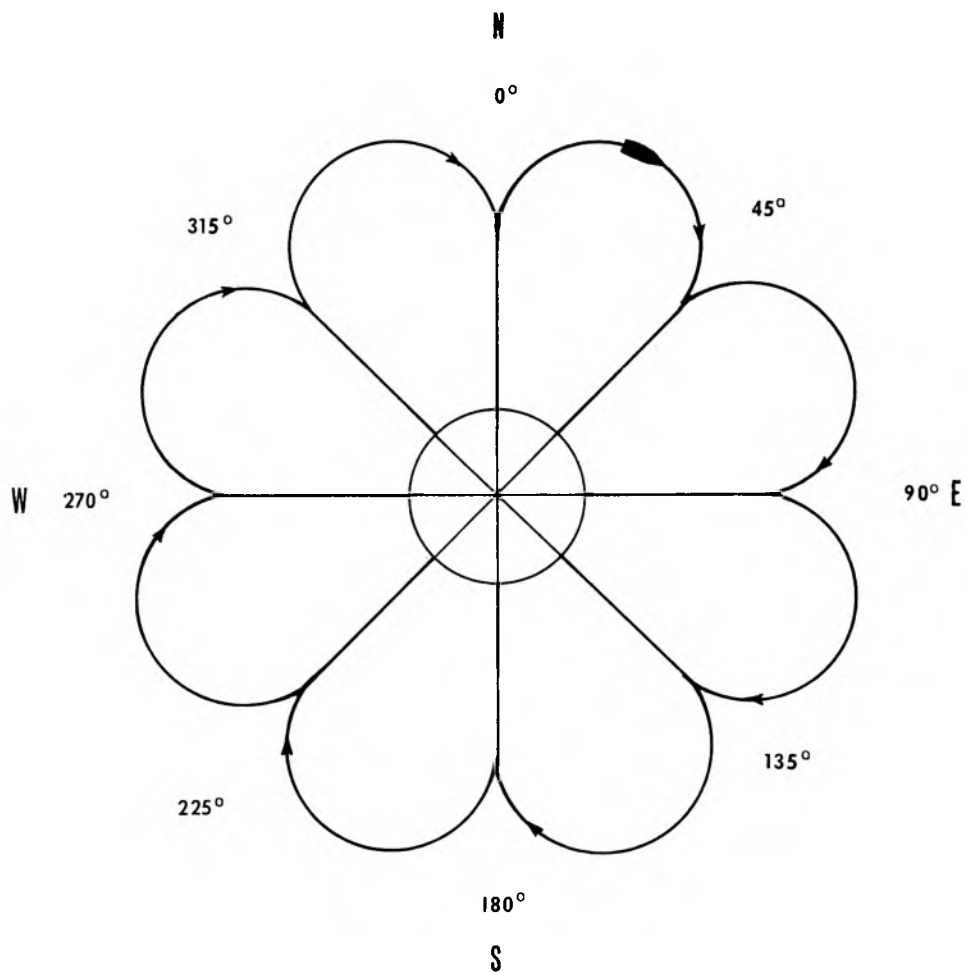
Metoda oparta jest na zasadzie randomizacji pomiarów i polega na takim planowo zorganizowanym przeprowadzeniu serii pomiarów, aby błędy, które mają charakter systematyczny dla pojedynczego wyznaczenia, po uśrednieniu wyników całej serii, całkowicie lub częściowo przekształciły się w błędy przypadkowe.

Powyższa zasada realizowana jest w ten sposób, że po wyborze punktu wiekowego w rejonie o możliwie małym gradiencie pola magnetycznego, statek przechodzi przez ten punkt różnymi kursami, co 45° . Pomiaru wykonywane są na określonym obszarze o średnicy 2 mil morskich, zwanym strefą pomiarową. Punkt wejścia w strefę, przejście przez jej środek i punkt wyjścia ze strefy są lokalizowane za każdym razem niezależnie, za pomocą urządzeń nawigacyjnych zainstalowanych na statku. Przejście przez strefę pomiarową trwa około 20 minut. W tym czasie wykonywane są nieprzerwanie pomiary magnetyczne. Wyniki pomiarów, uśrednione automatycznie dla każdej minuty, są rejestrowane, po czym dla wszystkich wyznaczeń obliczana jest ponownie średnia, która reprezentuje wartość E dla środka strefy. Pomiary na morskim punkcie wiekowym trwają 2 doby, przy czym statek przechodzi przez strefę pomiarową co półtorej godziny. Na punkcie otrzymuje się zatem 32 niezależne pomiary, z których każdy stanowi uśrednioną wartość kilkunastu wyznaczeń, i które wykonane są w różnych porach doby, na różnych kursach i przy wielokrotnym zlokalizowaniu miejsca wykonanych pomiarów. Uśrednienie 32 wartości pomierzonych w ten sposób elementów magnetycznego pola Ziemi pozwala przyjąć, że

błędy systematyczne lokalizacji, dewiacji i wariacji dobowej przekształciły się w błędy przypadkowe i że otrzymana wartość reprezentuje średnią dwudobową.

Nadmienić należy, że okres dwóch dób, w jakim pomiary są wykonywane, jak również półtoragodzinny odstęp czasu pomiędzy pomiarami w 2 milowej strefie oraz przyjęcie 45° jako interwału kąтового dla kursu statku przechodzącego przez strefę, wynikają z analizy charakteru wariacji dobowych, znajomości praw rządzących zjawiskiem dewiacji oraz parametrów eksploatacyjnych statku „Zaria” [3].

Na rysunku 1 pokazano schemat trasy statku podczas pomiarów na morskim punkcie wiekowym.



Rys. 1

Zastosowanie metody

Opracowana metoda po raz pierwszy została zastosowana do badania zmian wiekowych na Bałtyku Południowym. W 1981 roku na akwenu przylegającym do wybrzeża polskiego i rozciągającym się około stukilometrowym pasem od Zatoki Gdańskiej do Zatoki Pomorskiej, została założona sieć 10 morskich punktów wiekowych, na której przeprowadzono pomiary elementów magnetycznego pola Ziemi: modułu wektora indukcji magnetycznej F , jego składowej poziomej H i pionowej Z [6]. Mierzono także deklinację magnetyczną D , ale wyniki nie były opracowywane z uwagi na to, że do badania zmian wiekowych deklinacji potrzebna jest znacznie wyższa dokładność wyznaczeń D , niż można uzyskać za pomocą aparatury stanowiącej wyposażenie statku.

W 1982 roku założono i pomierzono 7 punktów na akwenu przylegającym do wybrzeża NRD i rozciągającym się od Zatoki Pomorskiej do Zatoki Meklemburskiej [6]. Rozmieszczenie punktów przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2

Do prac pomiarowych został użyty następujący zestaw magnetometrów:

- magnetometr protonowy z czujnikiem holowanym za statkiem w odległości 70 metrów, do pomiaru modułu wektora indukcji F ;
- magnetometr kwantowy z czujnikiem umieszczonym wewnątrz cewki Helmholtza i ustawiony na żyrowahadle, do pomiaru składowej poziomej H ;
- magnetometr wektorowy SFZM z systemem czujników zamontowanym na żyroplatformie, do pomiaru H i Z oraz zmian D odniesionych do kursu żyroskopowego statku.

Do obliczeń wykorzystano wyniki pomiarów otrzymanych z pierwszych dwóch magnetometrów. Wyniki z magnetometru SFZM stanowiły awaryjny materiał dublujący.

W 1985 roku na wszystkich 17 punktach pomiary zostały powtórzone [4], zaś w roku 1988 planuje się wykonanie pomiarów po raz trzeci.

Prace na Bałtyku są prowadzone w ramach działalności Komisji do Wielostronnej Współpracy Akademii Nauk Krajów Socjalistycznych nad Kompleksowym Problemem „Planetarne Badania Geofizyczne” – KAPG. W badaniach uczestniczą trzy instytuty: wspomniany już LO IZMIR AN, Instytut Badania Atmosfery i Geomagnetyzmu im. Heinricha Hertza Akademii Nauk NRD oraz Instytut Geodezji i Kartografii w Warszawie.

Z ramienia LO IZMIR AN w pracach brali udział dr Karasik, dr Kasjanienko i dr Cuckariew, z ramienia Instytutu im. Heinricha Hertza prof. Mundt i dr Ritter oraz z ramienia IGIK dr Uhrynowski i mgr inż. Mroczek. W ekspedycji na statku „Zaria” w 1981 r. brali udział dr Cuckariew (kierownik ekspedycji), dr Kasjanienko i dr Uhrynowski, zaś w 1985 r. dr Cuckariew (kierownik ekspedycji), którego na wodach NRD zmienił dr Kasjanienko oraz dr Uhrynowski i mgr inż. Mroczek.

Błędy systematyczne wyznaczeń na morskich punktach wiekowych

Rozpatrzmy wyznaczenie elementu E pola magnetycznego na morskim punkcie wiekowym o współrzędnych x_o i y_o , w czasie pojedynczego, i -tego przejścia statku przez strefę pomiarową kursem α_i i przyjmijmy, że dewiacja magnetometru i wariacje krótkookresowe pola nie są znane.

Uśrednione wskazania magnetometru E_i^m na punkcie x_i, y_i , który według urządzeń nawigacyjnych został przyjęty jako środek strefy pomiarowej, można przedstawić w postaci:

$$E_i^m(x_o, y_o, x_i, y_i, \alpha_i, T_i) = E^e(x_o, y_o, T) + P + A + \text{dev}_i(x_i, y_i, \alpha_i) + \text{var}_i(x_o, y_o, T_i) + \text{red}_i(x_o, y_o, x_{obs}, y_{obs}, T_i) + Q_1(x_i, y_i, \alpha_i) + Q_2(x_o, y_o, x_i, y_i, \alpha_i, T_i) + Q_3(x_i, y_i, \alpha_i) + U_1 + U_2 + W_1 + W_2 \pm \Sigma \delta \quad (4)$$

gdzie $E^e(x_o, y_o, T)$ jest prawdziwą wartością elementu E na punkcie wiekowym w epoce e ;

P jest stałą poprawką magnetometru, którą wyznacza się w obserwatorium magnetycznym przed rozpoczęciem i po zakończeniu ekspedycji;

A jest stałą poprawką dewiacyjną, którą wyznacza się na morzu w znanym polu magnetycznym przed rozpoczęciem i po zakończeniu ekspedycji;

$\text{dev}_i(x_i, y_i, \alpha_i)$ jest kursową poprawką wariacyjną dla kursu α_i ;

$\text{var}_i(x_o, y_o, T_i)$ jest poprawką wariacyjną dla momentu T_i .

Z uwagi na małą odległość między punktem wiekowym a środkiem strefy można przyjąć, że wariacje na obu punktach przebiegają jednakowo, czyli $\text{var}_i(x_o, y_o, T_i) = \text{var}_i(x_i, y_i, T_i)$;

$\text{red}_i(x_o, y_o, x_{obs}, y_{obs}, T_i)$ jest redukcją pomiaru do średniej wartości rocznej na punkcie wiekowym, wyznaczoną według magnetogramu najbliższego obserwatorium magnetycznego;

$Q_1(x_i, y_i, \alpha_i)$ jest systematycznym błędem kursowej poprawki dewiacyjnej;
 $Q_2(x_o, y_o, x_i, y_i, \alpha_i, T_i)$ jest systematycznym błędem wywołanym nieprecyzyjną lokalizacją pomiaru;
 $Q_3(x_i, y_i, \alpha_i)$ jest systematycznym błędem wskazań magnetometru, związanym z jego stabilizacją na żyrowahadle;
 U_1 jest systematycznym błędem poprawki wariacyjnej;
 U_2 jest systematycznym błędem redukcji do epoki e ;
 W_1 jest systematycznym błędem stałej poprawki dewiacyjnej A ;
 W_2 jest systematycznym błędem stałej poprawki magnetometru P ;
 $\Sigma\delta$ jest sumą błędów przypadkowych, obarczających odczytaną z magnetometru wartość E_i^m .

Jeśli przeniesiemy na lewą stronę równania (4) prawdziwą wartość elementu E^e na punkcie oraz obie stałe poprawki P i A , to po prawej stronie zostaną te wszystkie składniki, które zniekształcają wynik wyznaczenia E , i które przyjęta metoda pomiaru ma za zadanie zmniejszyć do minimum. Pogrupujmy je według pewnych wspólnych cech, jakimi się charakteryzują:

- $\text{dev}_i(x_i, y_i, \alpha_i)$, $\text{var}_i(x_o, y_o, T)$, $\text{red}_i(x_o, y_o, x_{obs}, y_{obs}, T_i)$, stanowiące zmienne poprawki, zależne od kursu statku lub od czasu;
- błędy systematyczne typu Q , również zależne od kursu statku lub od czasu;
- błędy systematyczne typu U , które są związane ze sposobem uwzględnienia wariacji;
- błędy systematyczne typu W , które są związane z wyznaczaniem stałych poprawek P i A .

Osobną grupę stanowią błędy przypadkowe, którymi tutaj zajmować się nie będziemy.

Zatrzymajmy się na chwilę przy dewiacji magnetometru. Ogólnie stosowany wzór na obliczenie wpływu dewiacji ma postać:

$$\text{dev}_i = A + B \sin \alpha_i + C \cos \alpha_i + D \sin 2\alpha_i + E \cos 2\alpha_i \quad (5)$$

gdzie A jest wspomnianą wyżej stałą poprawką dewiacyjną, zaś B , C , D i E są współczynnikami kursowymi, zależnymi także od pola geomagnetycznego. Wyznacza się je według specjalnej procedury na morzu w trakcie rejsu. Z uwagi na mały obszar strefy pomiarowej, możemy przyjąć, że zależność tych współczynników od pola geomagnetycznego w naszym wypadku jest stała. Przy takim założeniu można napisać, że:

$$\text{dev}_i = A + f(\alpha_i) \quad (6)$$

czyli, że ma charakter cykliczny przy α zmieniającym się od $-\pi$ do $+\pi$. Prowadzi to do wniosku, że wpływ dewiacji kursowej na mierzony element E , obliczony jako wartość średnia z wyznaczeń przeprowadzonych na wszystkich kursach od 0° do 360° będzie równy zeru:

$$\text{dev} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} f(\alpha) d\alpha = 0 \quad (7)$$

Jak wspomniano wyżej, na punkcie wiekowym pomiary, zgodnie z zaproponowaną metodą, wykonuje się na ośmiu kursach, co 45° (rys. 1). Przyjęcie takiego interwału dla α jest wystarczające z praktycznego punktu widzenia. Oczywiście warto pamiętać, że:

$$\text{dev} = \frac{1}{2\pi} \sum_{-\pi}^{+\pi} f(\alpha) \Delta\alpha \rightarrow 0 \quad \text{jeśli} \quad \Delta\alpha \rightarrow 0 \quad (8)$$

Średnia wartość E obliczona z serii 32 pomiarów wykonanych na różnych kursach, poprawiona o wartość A , będzie praktycznie wolna od wpływu dewiacji. Pozostanie jedynie systematyczny błąd wyznaczenia A , który nazwalibyśmy W_1 , gdyż systematyczny błąd kursowej poprawki dewiacyjnej Q_1 , przekształci się w błąd przypadkowy.

Zatrzymajmy się z kolei przy zagadnieniu wariacji krótkookresowych w dwudobowym przedziale czasu, jaki narzuca przyjęta metoda pomiarów na morskich magnetycznych punktach wiekowych. Jak wspomniano, źródłem ich jest przede wszystkim Słońce, co ma konsekwencję w cyklicznym przebiegu tych zmian nie tylko w skali roku, o czym już była mowa, ale także w skali doby. Zatem średnia wartość dobową w okresach magnetycznie spokojnych (w okresach zaburzonych wykonywanie pomiarów nie ma sensu [8]) wyrazi się wzorem:

$$\text{var}^d(x_o, y_o, T) = \frac{1}{k-p} \int_p^k f^d(T) dT \quad (9)$$

gdzie $k-p$ jest w tym wypadku okresem dwudobowym.

Z uwagi na to, że pomiary według przyjętej metody wykonuje się co półtorej godziny, a otrzymane rezultaty się uśrednia, łączna poprawka wariacyjna dla dwóch dób wyrazi się wzorem:

$$\text{var}^d(x_o, y_o, T) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} f^d(T) \Delta T \quad (10)$$

gdzie $\Delta T = 1\frac{1}{2}$ godziny i $n = 32$. Oczywiście przy $\Delta T \rightarrow 0$, czyli przy $n \rightarrow \infty$, $\text{var}^d \rightarrow 0$.

Jak stwierdzono na podstawie danych uzyskanych w obserwatoriach magnetycznych, taka częstotliwość pomiarów wystarcza, aby różnica pomiędzy średnią wartością elementu E , obliczoną z 32 wyznaczeń a średnią wartością dwudobową, miała wielkość rzędu 1 nT. Jest to błąd systematyczny U_1 dla danego punktu wiekowego.

Jak z powyższego wynika, przyjęta metoda pomiaru umożliwia pozbycie się poprawki wariacyjnej, której uwzględnienie jest zabiegiem żmudnym i zwykle niepewnym, ze względu na oddalenie punktu morskiego od obserwatorium.

W celu zredukowania otrzymanej średniej wartości dwudobowej do średniej wartości rocznej korzystać trzeba, podobnie jak przy pomiarach na lądzie, z danych najbliższego obserwatorium magnetycznego. Należy się przy tym liczyć z możliwością popełnienia błędu systematycznego rzędu kilku nT, spowodowanego niejednakowym przebiegiem zmian o częstotliwości roku w obserwatorium

odniesienia i na punkcie wiekowym. Zagadnienie to było omawiane w przytoczonej już pracy [9].

Jeśli nie istnieje możliwość wykorzystania danych obserwacyjnych, na przykład gdy pomiary są wykonywane na oceanie, należy tak zaplanować pomiary następne, aby przypadają one na ten sam okres roku co pierwsze. Roczny bowiem przebieg zmian pola zewnętrznego w kolejnych latach jest zbliżony i przyjęcie takiej zasady sprawi, że błąd obliczonej w ten sposób zmiany wiekowej będzie najmniejszy.

Rozpatrzmy teraz wpływ błędu lokalizacji. Wyznaczanie pozycji statku dokonuje się obecnie głównie za pomocą radiowych systemów nawigacyjnych naziemnych i satelitarnych. Wprawdzie na statku „Zaria” był odbiornik sygnałów satelitarnego systemu TRANSIT, ale potrzeba ciągłego kontrolowania pozycji przy naprowadzaniu statku na środek strefy zadany kurs, ograniczała jego przydatność. Korzystano więc, przede wszystkim, ze szwedzkiego południowego łańcucha OA systemu hiperbolicznego DECCA.

Jak wiadomo, dokładność określenia pozycji zależy od odległości do stacji emitujących radiosygnały, kąta przecięcia się hiperbolicznej siatki współrzędnych systemu i od warunków propagacji fal radiowych na trasie nadajnik — odbiornik. Ten ostatni czynnik, bardzo zmienny i zależny głównie od pory doby, powoduje, że nie ma możliwości dokładnego określenia błędu lokalizacji pomiarów na morzu. Można jedynie ten błąd oszacować na podstawie danych teoretycznych i doświadczeń, na przykład z lat 1971—72, kiedy to przeprowadzono pierwsze zdjęcie magnetyczne Bałtyku Południowego, na tym samym statku „Zaria” i korzystano także z systemu DECCA. Pomiary wykonywano wówczas bez przerwy w dzień i w nocy. Na ogólną liczbę 2313 punktów, w których wyznaczono pozycję statku, 56% miało błąd mniejszy od 100 m, 23% od 100 do 200 m, 12% od 200 do 400 m i 9% powyżej 400 m [1]. Wyznaczenie najprawdopodobniejszych błędów było wtedy możliwe, dzięki ustawianiu na brzegu morza w miejscach o znanych współrzędnych, drugiego odbiornika sygnałów DECCA i odczytywaniu jego wskazań synchronicznie z odczytami wykonywanymi na statku. Błąd lokalizacji punktu pomiarowego na morzu był ekstrapolowany na podstawie rozbieżności pomiędzy wskazaniami drugiego odbiornika a znanym miejscem jego usytuowania.

Jeśli chodzi o pomiary na morskich punktach wiekowych, można oszacować, że w ciągu dnia błąd lokalizacji nie powinien przewyższać 150 m, o zmroku i o brzasku nie powinien być większy niż 300 m, zaś w nocy miejscami może dochodzić do 1000 m, zwłaszcza tam gdzie siatka współrzędnych przecina się pod ostrym kątem, czyli w rejonie Zatoki Pomorskiej.

Wspomniano już, że wszystkie punkty wybierano w miejscach o możliwie małym gradiencie horyzontalnym pola geomagnetycznego. Rejestracja wyników pomiarów w trakcie przechodzenia przez strefę pomiarową wykazała, że na większości punktów gradient jest bardzo mały. Tylko na kilku punktach stwierdzono gradient nieco większy. Ponieważ lokalizację strefy wyznaczano niezależnie 32 razy w ciągu dwóch dób, idąc różnymi kursami, wpływ błędu

systematycznego Q_2 , na wyznaczany element pola E , przyjmie charakter błędu przypadkowego. Tam gdzie gradient jest niemierzalny błąd lokalizacji nie wpłynie na dokładność wyznaczenia E .

Błąd systematyczny wskazań magnetometru, związany z jego stabilizacją na żyrowahadle Q_3 , po uśrednieniu 32 wyznaczeń, również przekształci się w błąd przypadkowy.

Z powyższych rozważań widać, że zastosowanie opisanej metody umożliwia uwolnienie się od konieczności obliczania i wprowadzania kursowej poprawki dewiacyjnej i poprawki wariacyjnej oraz sprawia, że systematyczne błędy, zależne od α lub od T_i (typu Q) przekształcają się w błędy przypadkowe. Pozostają błędy systematyczne U_1 i U_2 , związane z zaburzeniami przebiegu zmian zewnętrznego pola geomagnetycznego oraz błędy systematyczne W_1 i W_2 , związane z wyznaczaniem stałych poprawek P i A .

Średnia wartość roczna elementu E^e wyrazi się zatem wzorem:

$$E^e(x_o, y_o, T) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} E_i^m(x_o, y_o, T_i) + \quad (11)$$

$$+ P + A + \text{red}(x_o, y_o, x_{obs}, y_{obs}, T) + \Sigma S \pm \Sigma \delta$$

gdzie ΣS jest sumą błędów systematycznych U_1, U_2, W_1, W_2 .

Z uwagi na to, że poprawka P jest wyznaczana w obserwatorium magnetycznym szczególnie starannie i jej wielkości otrzymywane z kolejnych wyznaczeń w ciągu szeregu lat są wnikliwie analizowane, wartość W_1 powinna być mniejsza od teoretycznej dokładności wskazań magnetometru. Określenie W_2 jest trudniejsze, bo wyznaczanie poprawki A wymaga skomplikowanej procedury. Pewnego rodzaju kryterium stanowiącym o wielkości W_2 może być stopień powtarzalności poprawki A , otrzymywanej z kolejnych wyznaczeń w dłuższym okresie czasu. W naszym wypadku, od 1981 roku do roku 1985 poprawka A zmieniła się o 1 nT, pomimo remontu statku, jaki był przeprowadzony w roku 1983 [4]. Wskazywałoby to na niewielką wartość W_2 .

Zainteresowanie może budzić rząd wielkości sumy błędów przypadkowych, jakie obarczają otrzymane wyniki wyznaczeń średniej wartości rocznej na morskich punktach wiekowych. Aby to obliczyć, wyznaczenia H , otrzymane z pojedynczych przejść statku przez strefę pomiarową zostały poprawione o kursową poprawkę dewiacyjną, obliczoną według nowo przyjętej metody, podnoszącej co najmniej o rząd jej dokładność, oraz o poprawkę wariacyjną, obliczoną na podstawie magnetogramów obserwatorium w Helu. Wyznaczenia F , wykonywane magnetometrem protonowym z holowanym czujnikiem, poprawiono tylko o wpływ wariacji.

Po uśrednieniu poprawionych wyników F i H , obliczono dla każdego punktu średni błąd pojedynczego wyznaczenia F i H , według wzoru:

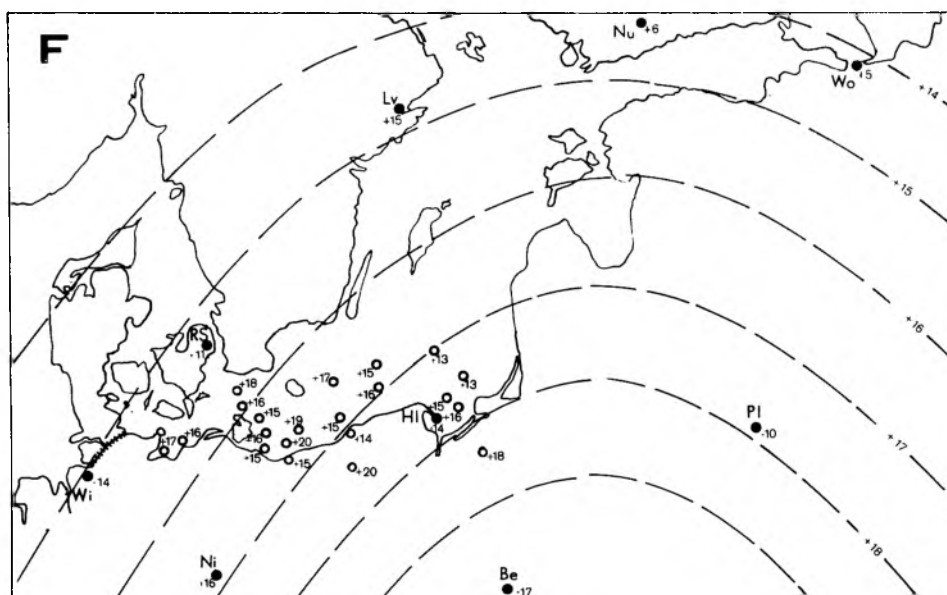
$$m = \pm \sqrt{\frac{\Sigma v v}{n - 1}}$$

oraz średnie błędy średnich arytmetycznych F i H według wzoru:

$$m_o = \pm \sqrt{\frac{\sum v v}{n(n-1)}}$$

Wspomnieć należy, że na kilku punktach serie pomiarowe zostały skrócone.

Dla ilustracji w tablicy 1 zestawiono wartości poprawek redukcyjnych sprowadzających rezultaty pomiarów w okresie pracy na morskim punkcie wiekowym (ok. 2 doby) do średniej wartości rocznej według obserwatorium magnetycznego w Helu. Ponadto w tablicy 1 podano liczbę wykonanych pomiarów na każdym punkcie oraz otrzymane błędy, jak również dane dotyczące warunków wykonywania pomiarów (stanu morza, zaburzeń magnetycznych i gradientu). Warunki pomiarów zostały ocenione według 4-stopniowej skali (0—3), przy czym 0 oznacza, że warunki były dobre, zaś 3, że były złe.

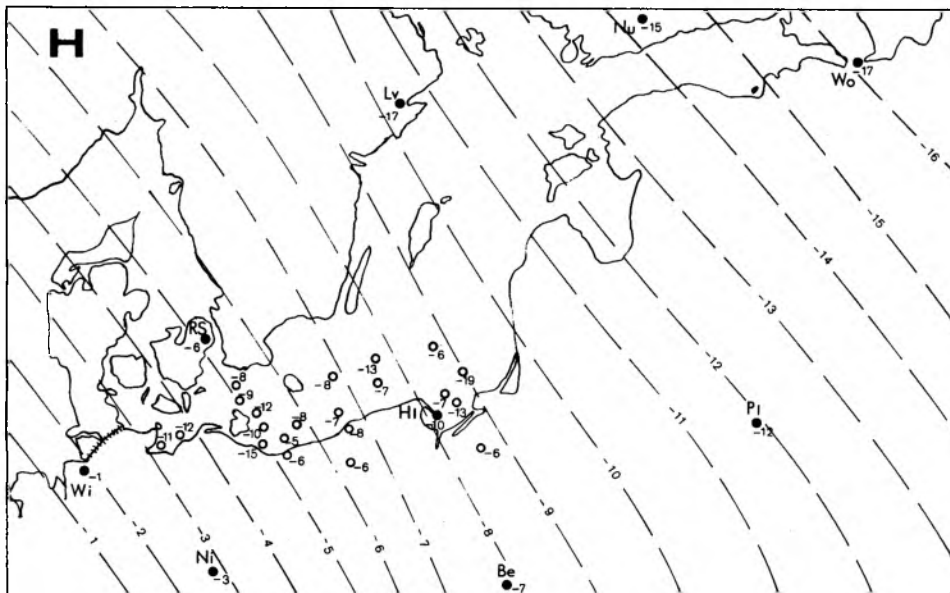


Rys. 3

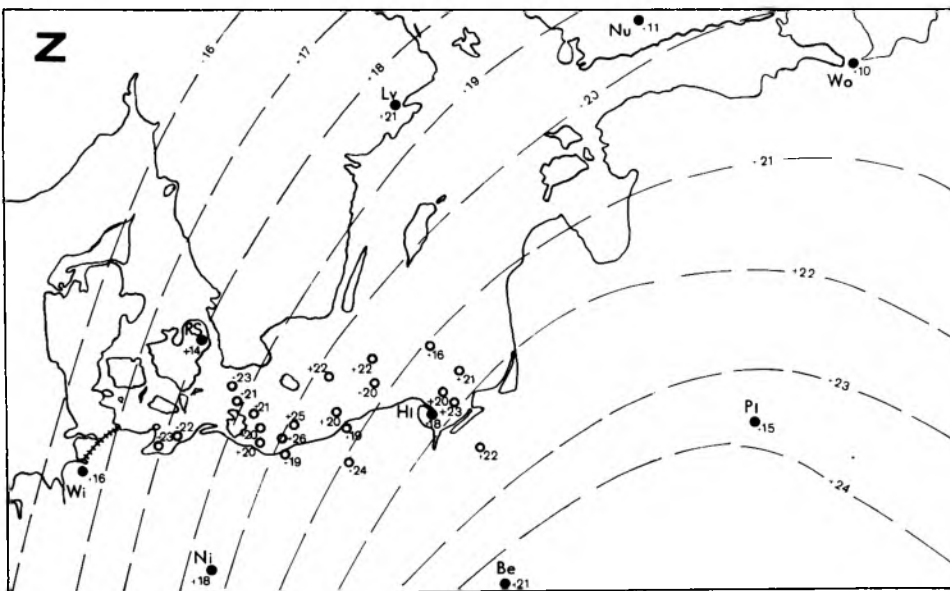
Wyniki pomiarów

Wyniki pomiarów przedstawiono w tablicy 2, która zawiera: współrzędne punktów, średnie wartości elementów F i H dla epok 1982.5 i 1985.5 oraz obliczoną na ich podstawie wartość elementu Z , a także średnie zmiany wiekowe tych elementów w interwale 1982—1985 [12].

Na rysunkach 3, 4 i 5 przedstawiona jest mapa Bałtyku z przyległymi lądami, na której zostały skartowane morskie punkty wiekowe, 9 obserwatoriów



Rys. 4



Rys. 5

Tablica 1

Nr p-tu	Redukcja do średniej wartości rocznej w/g Helu		Liczba pomiarów na punkcie	Błąd średni pojedynczego wyznaczenia		Błąd średni średniej arytmetycznej		Warunki pomiaru			Ocena warunków w skali 0-3
	F	H		F	H	F	H	Stan morza	Zaburzenia pola nT/min.	Gradient nT/Mm.	
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	+ 3	- 6	20	3,6	7,3	0,8	1,6	3-5	10	5	2
2	+ 2	- 3	33	6,0	8,5	1,0	1,5	3-5	10	-	2
3	+ 3	-12	33	5,9	5,9	1,0	1,0	3-5	50	-	3
4	+ 3	-14	17	4,1	6,8	1,0	1,6	1-2	10	-	1
5	+ 7	-13	32	5,4	3,9	1,0	0,7	-	5	-	0
6	+ 4	-14	17	4,0	11,6	1,0	2,8	-	30	10	3
7	+ 7	- 3	33	8,8	9,3	1,5	1,6	-	-	10	1
8	+11	+ 1	14	4,7	4,6	1,3	1,2	-	-	-	0
9	+ 6	-14	27	5,3	7,8	1,0	1,5	-	-	-	0
10	+ 1	+ 9	33	5,8	6,0	1,0	1,0	-	-	3	0
11	+ 3	+ 2	17	9,2	12,1	2,2	2,9	5	-	15	2
12	+ 1	-14	17	8,4	7,1	2,0	1,7	-	-	-	0
13	+ 6	0	33	6,0	6,9	1,0	1,2	4-5	10	-	2
14	+ 2	- 6	17	5,3	6,3	1,3	1,5	4-5	10	-	2
15	+ 4	- 5	17	12,6	11,3	3,0	2,7	-	-	10	1
16	0	+ 1	32	4,0	7,1	0,7	1,3	4-5	20	-	2
17	+ 3	+ 7	32	4,7	8,1	0,5	1,2	4-5	-	-	1

Tablica 2

Nr p-tu	Współrzędne		Średnie wartości na epokę 1982.5 w nT			Średnie wartości na epokę 1985.5 w nT			Średnia zmiana roczna w int. 1982-1985		
	φ	λ	F	H	Z	F	H	Z	F	H	Z
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	54°47'9	19°30'0	49510	17457	46328	49558	17412	46398	+16	-13	+23
2	54°56'4	19°12'6	49544	17590	46314	49589	17568	46373	+15	-7	+20
3	55°18'5	19°36'9	49428	17202	46336	49467	17146	46400	+13	-19	+21
4	55°41'0	18°52'5	49827	16974	46845	49865	16956	46894	+13	-6	+16
5	55°09'5	17°18'8	49681	17229	46596	49729	17207	46657	+16	-7	+20
6	55°29'0	17°12'4	49398	16881	46422	49444	16841	46488	+15	-13	+22
7	55°11'0	15°55'5	49396	17208	46299	49447	17183	46365	+17	-8	+22
8	54°37'1	16°11'7	49828	17679	46584	49874	17658	46643	+15	-7	+20
9	54°11'7	14°41'7	49182	17787	45850	49242	17759	45928	+20	-5	+26
10	54°24'1	15°04'4	49343	17803	46013	49399	17779	46089	+19	-8	+25
11	54°08'4	14°06'4	49238	17749	45925	49282	17705	45986	+15	-15	+20
12	54°26'2	14°06'1	49083	17763	45756	49131	17792	45816	+16	-10	+20
13	54°38'0	13°56'5	49394	17690	46118	49440	17654	46181	+15	-12	+21
14	54°50'5	13°24'7	49144	17369	45972	49192	17341	46034	+16	-9	+21
15	55°03'4	13°24'4	49278	17528	46055	49333	17504	46123	+18	-8	+23
16	54°16'0	11°49'0	49054	17809	45707	49102	17774	45772	+16	-12	+22
17	54°05'0	11°13'0	49015	17815	45663	49067	17782	45732	+17	-11	+23

magnetycznych i 4 lądowe punkty wiekowe. Na mapy te wpisano odpowiednio średnie roczne zmiany wiekowe dla badanego interwału 1982–1985. Ponadto na mapy wrysowano izopory zmian wiekowych F , H i Z opracowane według danych z satelity MAGSAT z lat 1980 i 1981 [12]. Izopory te potraktowano jako model (tło normalne) zmiany wiekowej dla badanego obszaru. W tablicy 3 przedstawiono średnie odchyłki pomiędzy tym modelem a zmianą wiekową otrzymaną na punktach wiekowych i w obserwatoriach magnetycznych. Przez ε oznaczono stałą składową odchyłki, zaś przez σ przypadkową jej część, wyrażoną jako błąd średni.

Tablica 3

Na morskich punktach wiekowych			W obserwatoriach magnetycznych		
F	H	Z	F	H	Z
$\varepsilon = +1$ $\sigma = \pm 2$	$\varepsilon = +4$ $\sigma = \pm 4$	$\varepsilon = 0$ $\sigma = \pm 3$	$\varepsilon = +4$ $\sigma = \pm 4$	$\varepsilon = -1$ $\sigma = \pm 2$	$\varepsilon = +4$ $\sigma = \pm 4$

Zakończenie

Przeprowadzone na Bałtyku w latach 1981–1985 prace i otrzymane wyniki – średnie roczne zmiany pola geomagnetycznego na morskich punktach wiekowych i ich średnie błędy – umożliwiają sformułowanie kilku istotnych wniosków dotyczących zarówno wykonanych prac, jak i przyszłych badań nad poznaniem zmian wiekowych na morzach.

1. Porównanie otrzymanych wyników na morzu z danymi w obserwatoriach magnetycznych i na lądowych punktach wiekowych nie wykazuje rozbieżności.

2. Odniesienie tych rezultatów do przyjętego tła normalnego, jakim jest model obliczony z danych satelity MAGSAT, wskazuje, że średnie odchyłki od modelu obliczone dla punktów wiekowych na morzu są takie same lub mniejsze jak odchyłki obliczone dla obserwatoriów. Świadczy to o prawidłowym wyznaczeniu średnich wartości rocznych na morzu przyjętą metodą.

3. Średnie błędy wyznaczeń otrzymane dla punktów morskich są tego samego rzędu co dla punktów wiekowych na lądzie. Stwarza to możliwość przeprowadzania łącznej analizy zmian wiekowych dla dużych obszarów naszego globu, niezależnie od tego, czy dane dotyczą lądów czy mórz.

Jeśli chodzi o przyszłe prace, to możliwe już jest podanie pewnych rekomendacji co do przeprowadzania pomiarów i obliczeń w celu wyznaczenia średniego biegu wiekowego na morskich punktach wiekowych.

1. Punkt wiekowy powinien być wybrany na obszarze, na którym w promieniu 2–3 mil morskich gradient pola magnetycznego jest bardzo mały.

2. Stan morza w czasie pomiarów nie powinien przekraczać 4–5 stopni.

3. Pomiaru należy przeprowadzać w zasadzie przez dwie doby.

4. Aktywność magnetyczna powinna być mała ($K_p \leq 3$). Byłoby wskazane przyjmowanie na statku drogą radiową prognozy aktywności magnetycznej lub przynajmniej informacji o silniejszych zaburzeniach pola w celu ewentualnego przedłużenia pomiarów ponad zaplanowane dwie doby.

5. Wprowadzanie poprawek wariacyjnych przy dwudobowych pomiarach jest niepotrzebne, co dla prac na oceanie ma bardzo ważne znaczenie.

6. Nie jest także konieczne wprowadzanie kursowej poprawki dewiacyjnej. W razie potrzeby, na przykład do analizy błędów przypadkowych wyznaczeń, obliczenie tej poprawki może być wykonane na podstawie materiału pomiarowego otrzymanego na jednym lub lepiej na kilku punktach wiekowych, bez potrzeby wykonywania specjalnych wyznaczeń.

7. Przy pomiarach na oceanach, daleko od obserwatorium magnetycznego, można odejść od wyznaczania średniej rocznej, o ile następne pomiary będą wykonywane w tym samym sezonie roku co pierwsze. Utrzymanie co najmniej dwudobowego okresu pomiarów jest wówczas niezbędne.

8. Zastosowanie przedstawionej metody pozwala wypełnić pewną lukę technologiczną, która wstrzymywała rozszerzenie badań zmian wiekowych na obszary mórz i oceanów.

L I T E R A T U R A

- [1] Dąbrowski A., Uhrynowski A.: *Budowa podłoża krystalicznego południowego Bałtyku w świetle wyników zdjęcia magnetycznego z lat 1971–1972*. Kwartalnik Geologiczny, tom 20, nr 3, Warszawa, 1976.
- [2] Hine A.: *Magnetic Compasses and Magnetometers*. Adam Hilger Ltd., London, 1968.
- [3] Iwanow M. M.: *Magnitnaja sjomka okieanow. Rezultaty isledowanii po miedzunarodnym geofizycznym projektam*. Geomagnetizm, nr 7, Moskwa, 1976.
- [4] Mroczek S., Uhrynowski A.: „Pomiary na morskich magnetycznych punktach wiekowych na Bałtyku, lato 1985”. Biul. IGiK, tom XXXI, nr 1/1986.
- [5] Kasjanienko L. G.: *Primienienije principa randomizacji dla opredienienia wiekowowo choda magnitnowo pola na okieanach*. Geomagnetizm i Aeronomia. Tom XIII, nr 5, s. 906–910, 1973.
- [6] Karasik A. M., Mundt W., Uhrynowski A. i inni: *Opyt sozdania morskich punktow wiekowowo choda na akwatorii Baltijskowo moria*. Problemy isledowania elektromagnitnych poliei na akwatoriach. IZMIRAN, s. 297–303, Moskwa, 1983.
- [7] Langel R. A.: *Near Earth Satellite Magnetic Field Measurement: a Prelude to MAGSAT*. EOS Trans. AGU, nr 60, s. 667–668, 1979.
- [8] Uhrynowski A.: „Badanie zmian wiekowych magnetycznego pola Ziemi na terenie Polski”. Prace IGiK, tom XXIV, nr 2/56, 1977.
- [9] Uhrynowski A.: *Izopory magnetycznego pola Ziemi w Polsce w okresie 1957–1971*. Prace IGiK, Tom XXIV, nr 3/57, 1977.
- [10] International Geomagnetic Reference Field 1980 – Charts and Grid Values (IAGA Bulletin No. 47). Geological Survey Circular 873.
- [11] *Fizyka i ewolucja wnętrza Ziemi*. Praca zbiorowa pod red. Romana Teisseyre'a, cz. 2, PWN, Warszawa, 1983.

- [12] Referat na XIX Walne Zgromadzenie IUGG, Vancouver, 1987 r. – Karasik A.M., Mundt W., Uhrynowski A.: *Geomagnetic Secular Variations on the Baltic Sea in the period 1982–1985*.

Recenzował: doc. dr inż. Adam Dąbrowski

Przyjęto do opublikowania w dniu 9 czerwca 1987 r.

ANDRZEJ UHRYNOWSKI

DETERMINATION OF GEOMAGNETIC SECULAR VARIATION ON THE BALTIC SEA IN THE PERIOD 1982–1985

Summary

Research on secular variations of geomagnetic field carried out on seas requires solving numerous methodological and technical problems which are not encountered while working on land. The application of a measurement method elaborated at LO IZMIR AN is the main subject of the presented paper. The method is based on the application of such an organization of measurements on each SV marine point so as to achieve the mean value of measurements free from the majority of systematic errors which usually deform the results of individual measurements. Due to the applied sequence of measurements, systematic errors caused by magnetometer deviation, inaccuracy of positioning of the ship, daily geomagnetic variation as well as some instrumental errors are considerably decreased or transformed into random errors.

The results of investigations carried out in the period 1981–1985 on 17 marine points situated on Southern Baltic have also been presented in the paper. Table 1 contains corrections for converting mean daily values of F and H into respective yearly values for each SV point, number of measurements on each point, errors obtained and description of conditions influencing the measurement and reliability of results (state of the sea, magnetic gradient, geomagnetic disturbances). Measurement conditions have been graded 0–3 according to the decreasing reliability of results. Table 2 contains geographical coordinates of SV points, mean values of F , H and Z for the epochs 1982.5 and 1985.5. and the mean yearly values of secular variation of F , H and Z for the period 1982–1985. The calculated mean yearly values of secular variations have been plotted on the charts (Fig. 3, 4 and 5) against the curves of equal secular variation derived from MAGSAT data.

Assuming that the plotted curves represent a normal (model) field of secular variations; the differences between this model and the obtained values of mean yearly SV have been calculated for the 17 marine points and 9 magnetic observatories situated around the Baltic Sea. The received values of these differences may serve for the evaluation of the applied method for investigating geomagnetic secular variations on seas.

Translation: Wiesława Sujkowska

АНДЖЕЙ УХРЫНОВСКИ

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕКОВОГО ХОДА МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ НА БАЛТИКЕ В ПЕРИОД С 1982 ПО 1985 ГГ

Резюме

При исследовании вековых изменений магнитного поля Земли на акваториях возникает ряд методических и технических проблем, которые не существуют при работах на суше. В статье представлены главные методические проблемы, а также способ их решения методом разработанным специалистами ЛОИЗМИРАН. Метод заключается в такой организации измерений на море (рис. 1), чтобы среднее значение измерений полученное на морском пункте векового хода было свободно от большинства систематических погрешностей, которые значительно искажают однократное измерение. Эти систематические погрешности в результате принятого порядка измерений заметно уменьшаются или переводятся в погрешности случайные. Это касается погрешностей обусловленных девиацией, вариацией геомагнитного поля и локализацией, а также некоторых инструментальных погрешностей. В статье представлены тоже результаты исследований, которые были проведены на южной Балтике в 1981–1985 г.г. на 17 морских пунктах векового хода (рис. 2). Таблица 1 содержит значения поправок из-за приведения к среднему годовому значению F и H , количество измерений на точке, полученные ошибки, условия измерений и их оценку. Таблица 2 содержит географические координаты пунктов, среднегодовые значения F , H и Z в эпохе 1982 и в эпохе 1985, а также вековой ход F , H и Z для этого периода. Средний вековой ход нанесено на карту (рис. 3, 4 и 5), на которую нанесено тоже изопоры F , H и Z по данным МАГСАТ за 1980 и 1981 годы. Считая нанесенные изопоры моделью (нормальным фоном) вековых изменений, вычислено отклонения от этой модели на вековых пунктах и в 9 магнитных обсерваториях, расположенных вокруг измеряемой акватории. Полученные значения можно считать оценкой принятой методики исследований (таб. 3).

Перевод: *Andrzej Uhrynowski*