

ANDRZEJ UHRYNOWSKI

537.63/438/, 1957—1971"

Izopory magnetycznego pola Ziemi w Polsce w okresie 1957—1971

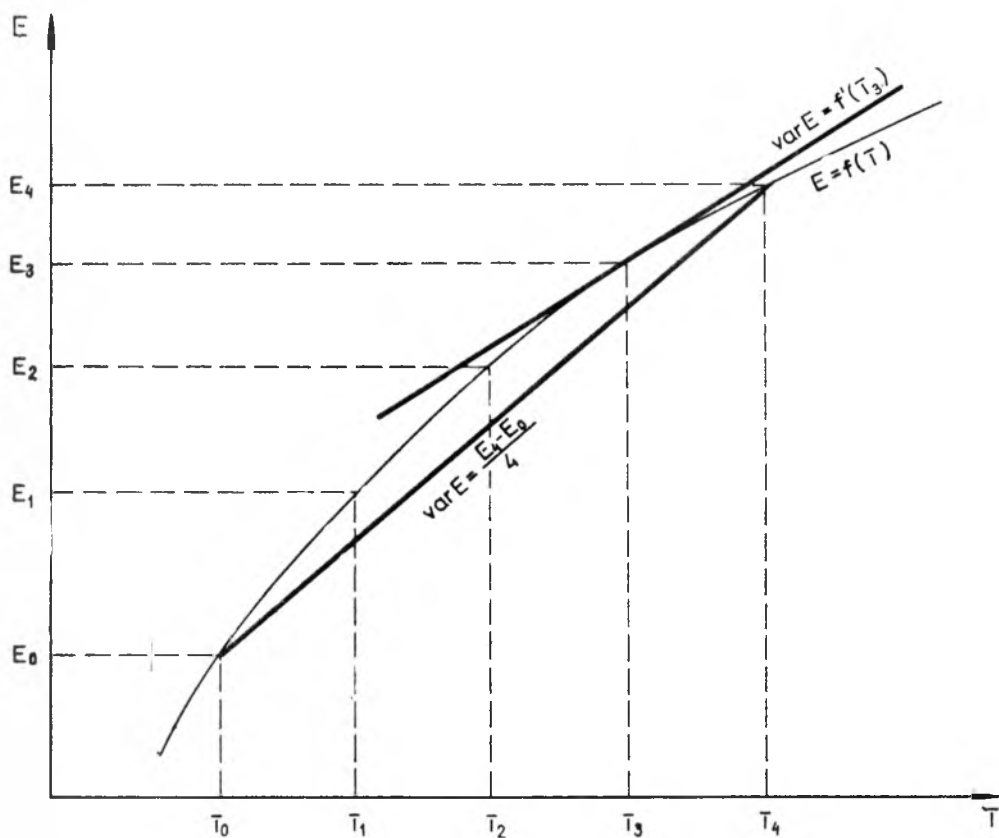
Pomiary magnetyczne na sieci punktów wiekowych, wykonywane konsekwentnie od 1957 roku, doprowadziły do zebrania jednorodnego i dość bogatego materiału pomiarowego. Otrzymano bowiem na każdym punkcie wiekowym 13÷15-letnią serię pomiarów, składającą się z kilku, od 5 do 8 wyznaczeń. Zdecydowana większość materiału pomiarowego jest wynikiem prowadzonych przez Instytut Geodezji i Kartografii badań, mających na celu poznanie i opisanie zmian wiekowych na terenie Polski [3], [4], [11]. Pozostała część stanowi materiał uzupełniający, otrzymany z pomiarów przeprowadzanych bądź to w ramach nawiązań granicznych, bądź też w ramach zdjęcia magnetycznego Polski. Osobną grupę danych stanowią pomiary Małoszewskiego, wykonywane w ramach badań geofizycznych, przeprowadzanych przez Akademię Górniczo-Hutniczą w Krakowie [7]. Do wyżej wymienionego materiału pomiarowego należy jeszcze włączyć dane z obserwatoriów magnetycznych: Belsk, Hel, Świder i Niemegk.

Otrzymany w ten sposób zbiór jednorodnych danych umożliwił po raz pierwszy przedstawienie biegu wiekowego na każdym punkcie wiekowym w postaci wykresu. Dało to nie tylko obraz przebiegu zmian wiekowych pola magnetycznego, ale także pozwoliło w wyniku analizy wstępnej stwierdzić, które z obserwacji nie pasują do tego obrazu. Przyczyną rozbieżności może być na przykład zakłócenie pola magnetycznego podczas pomiaru lub ewentualnie jakiś gruby błąd wyznaczenia.

Przedstawienie biegu wiekowego na magnetycznym punkcie wiekowym jako funkcji czasu

Jeżeli na prostokątny układ współrzędnych o osi odciętych, przedstawiającej czas, a osi rzędnych — wielkość elementu E pola magnetycznego Ziemi, naniesione zostaną kolejne średnie wartości roczne elementu E , to po połączeniu naniesionych punktów kolejno odcinkami prostej otrzymamy pewną linię łamaną, przedstawiającą bieg wiekowy badanego elementu E .

Jasne jest, że bieg wiekowy nie ma charakteru skokowego, jakby to wynikało ze sporządzonego w wyżej opisany sposób rysunku. Bieg wiekowy jest zjawiskiem ciągłym i może być przedstawiony jako funkcja ciągła: $E = f(T)$. (rys. 1).



Rys. 1

Odniesienie biegu wiekowego do określonych epok podyktowane jest koniecznością wydzielenia go w trakcie obliczeń spośród innych zmian, które na bieg wiekowy nakładają się. Bieg wiekowy powinien być zatem przedstawiany graficznie nie jako linia łamana, lecz jako krzywa ciągła. Dla krótkich przedziałów czasowych — 1 rok ewentualnie 2 lata, bieg wiekowy może być aproksymowany linią prostą, dla dłuższych przedziałów czasowych powinien być aproksymowany krzywą wyższego rzędu (rys. 2).

Kształt krzywej biegu wiekowego na tak małej powierzchni naszej planety, jakim jest obszar Polski, jest podobny. Do wyboru odpowiedniej krzywej aproksymacji wystarczy zatem prześledzić bieg wiekowy na jed-

nym punkcie, z tym, że punkt taki powinien odznaczać się kompletem średnich wartości rocznych dla całego okresu, w którym bieg wiekowy jest badany. Do tego celu najlepiej nadaje się oczywiście obserwatorium magnetyczne.

Ponieważ istniała obawa, że średnie wartości roczne w obserwatorium w Świdrze są zniekształcone zakłóceniami, jakie powoduje kolej elektryczna na linii Warszawa—Pilawa, zaś obserwatorium w Belsku w latach 1960-1966 nie pracowało, w grę wchodziło tylko obserwatorium w Helu. Dla kontroli przeszedzono także bieg wiekowy w obserwatorium w Niemegk. Podyktowane było to dwiema przyczynami:

Po pierwsze, obserwatorium w Helu leży na półwyspie, w odległości 30 km od lądu i istniała obawa, że średnie wartości roczne w Helu mogą być zniekształcone wpływem efektu brzegowego, stwierdzonego przez Kozłowskiego [2].

Po wtóre, obserwatorium w Niemegk, leży na terenie NRD tylko około 100 km od zachodniej granicy Polski i ma wieloletnią, nieprzerwaną serię średnich wartości rocznych, wszystkich elementów ziemskiego pola magnetycznego.

Na podstawie kształtu linii łamanej biegu wiekowego w Helu i w Niemegk dla D jako funkcję aproksymującą wybrano parabolę 2 stopnia, zaś dla składowej poziomej H i dla składowej pionowej Z parabolę 3 stopnia:

$$\begin{aligned} y &= ax^2 + bx + c && \text{dla } D, \\ y &= ax^3 + bx^2 + cx + d && \text{dla } H \text{ i } Z. \end{aligned} \quad (1)$$

Posługując się wybranymi wzorami, dla każdego punktu wiekowego wykonano aproksymację biegu wiekowego D , H i Z w oparciu o zebrane średnie wartości roczne D , H i Z .

Jako epokę początkową $T = x_0$ przyjęto epokę 1957, 5.

Aproksymację przeprowadzono metodą najmniejszych kwadratów, układając równania poprawek w postaci:

$$\begin{aligned} A_1x^2 + A_2x + A_3 - L_i &= v_i && \text{dla } D \\ B_1x^3 + B_2x^2 + B_3x + B_4 - L_i &= v_i && \text{dla } H \\ C_1x^3 + C_2x^2 + C_3x + C_4 - L_i &= v_i && \text{dla } Z \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie współczynniki A , B i C odnoszą się odpowiednio do równań krzywych D , H i Z , zaś L jest wyrazem wolnym przedstawiającym wartości elementu E w epoce $T = x$, od którego odjęto E_0 w epoce T_0 .

W wyniku obliczeń otrzymano współczynniki krzywych biegu wiekowego dla D , H i Z i ich średnie błędy, poprawki do średnich wartości rocznych jako skutek procesu aproksymującego, sumę kwadratów poprawek oraz wielkość m_0 , charakteryzującą dokładność aproksymacji.

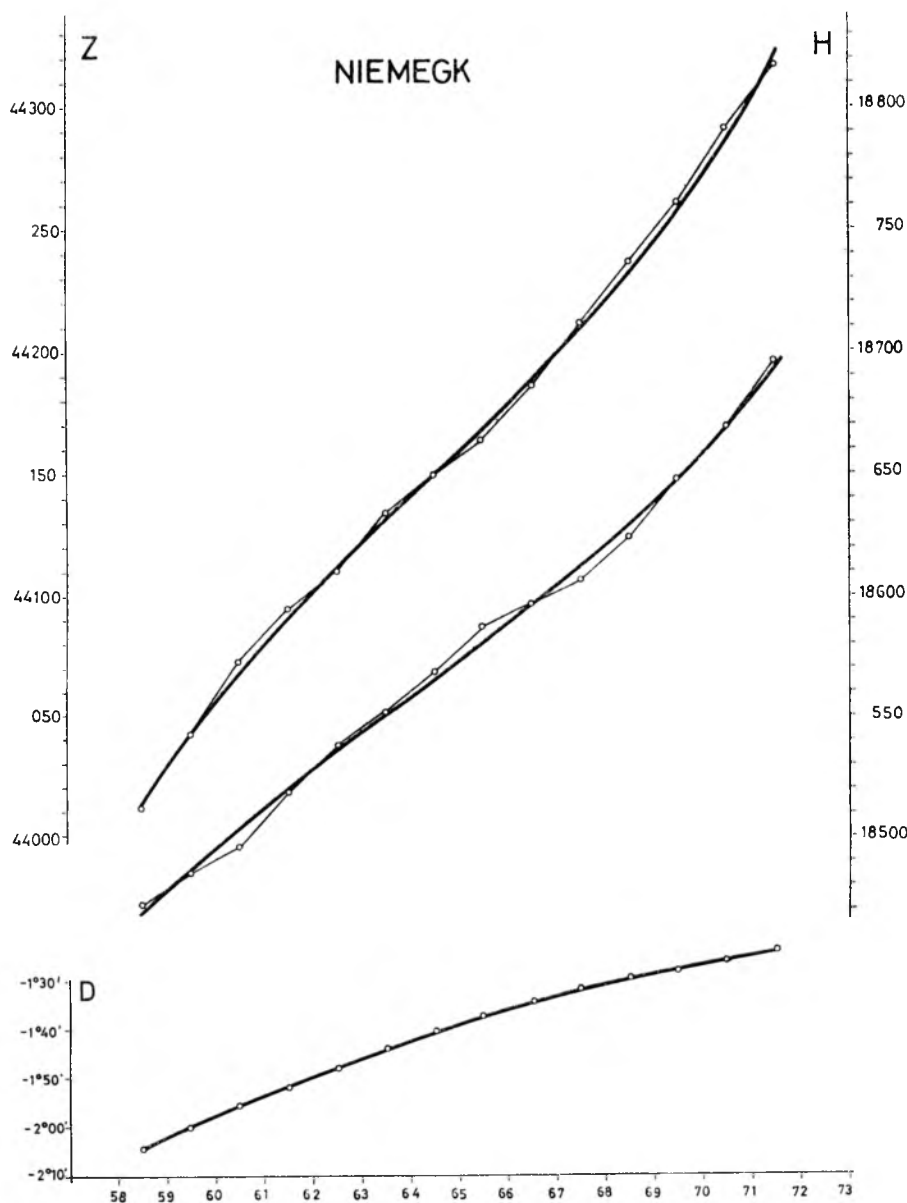
Otrzymany dla każdego punktu wiekowego średni błąd aproksymacji m_0 nie może być utożsamiony ze średnim błędem wyznaczenia biegu wiekowego. Widać to wyraźnie na przykładzie aproksymacji biegu wiekowego krzywą w obserwatorium magnetycznym, np. w Niemegk. Pomiary i rejestracja, jak również obliczenia średniej wartości rocznej są dokonywane w obserwatorium bardzo dokładnie. Można uznać, że dokładność średniej wartości rocznej H i Z w obserwatorium jest rzędu 1γ , zaś D rzędu $0,1'$. Mimo to w Niemegk błąd aproksymacji krzywej Z , obliczanej na podstawie kolejnych średnich wartości rocznych z 14 lat wynosi $\pm 3,4\gamma$, krzywej H $\pm 4,8\gamma$, zaś krzywej D $\pm 0,3'$. Świadczyłoby to o bardziej skomplikowanej funkcji zmian. Jednakże należy wziąć również pod uwagę fakt, że średnia wartość roczna, która w rozpatrywanych tu przez nas zagadnieniach stanowi w pewnej mierze kategorię umowną, podobnie jak kategorią umowną jest np. pole normalne, nie jest wielkością w pełni odpowiednią do badania biegu wiekowego. Powstaje ona z uśrednienia wszystkich średnich wartości godzinnych w danym roku. Jeśli jest to rok magnetycznie niespokojny, to może istnieć podejrzenie, że średnia roczna jest zniekształcona na skutek włączenia do obliczeń okresów, w których pole magnetyczne było zaburzone. Bieg wiekowy, przedstawiony z konieczności jako kolejne średnie roczne wartości E , w konsekwencji także może być zniekształcony. Wygładzenie go drogą aproksymowania funkcją ciągłą ma na celu zmniejszenie wpływu zniekształcenia średnich wartości rocznych, obliczanych ze wszystkich dni w roku — spokojnych i zaburzonych, jak również zmniejszenie lub wyeliminowanie wpływu zmian cyklicznych, związanych 11-letnim cyklem nasilania się aktywności Słońca.

Przy badaniu zmian wiekowych bardziej właściwe wydaje się wzięcie do obliczeń tylko dni spokojnych. Jednak w tym wypadku każda średnia roczna byłaby obliczana z różnej liczby dni skutkiem wyłączenia z obliczeń dni zaburzonych, co przy cyklicznym przebiegu zmian rocznych również może budzić sprzeciw. Uwagi powyższe dotyczą oczywiście także zmian na punkcie wiekowym, gdyż jak wiadomo bieg wiekowy w obserwatorium odniesienia w całości przenosi się także na punkt wiekowy.

Dla celów kartograficznych często zachodzi potrzeba określenia zmiany wiekowej w konkretnej epoce. Obliczana ona była do tej pory na podstawie dwóch kolejnych pomiarów wykonanych na punkcie wiekowym w odstępie kilku lat. (Janowski poleca zachowanie co najmniej 3-letniego odstępu czasu pomiędzy pomiarami [1]). Zmiana wiekowa w danej epoce, czyli wariacja roczna, była więc różnicą wyników tych wyznaczeń podzieloną przez liczbę lat jakie pomiędzy nimi upłynęły. Takie uproszczone postępowanie przyjmowane było z konieczności ze względu na ubogi materiał pomiarowy. Wieloletnia seria wyznaczeń E na punkcie wiekowym, pozwalająca na przedstawienie biegu wiekowego w postaci funkcji, umożliwia

także obliczenie wariacji rocznej w żądanej epoce jako pierwszej pochodnej tej funkcji względem czasu.

Założmy, że rysunek 1 przedstawia fragment krzywej biegu wiekowego od epoki T_0 do epoki T_4 , aproksymowanej na podstawie wieloletniej



Rys. 2

serii pomiarów za pomocą funkcji $E = f(T)$. Załóżmy też, że kolejne pomiary na punkcie wiekowym zostały wykonane również w epokach T_0 i T_4 . Wariacja roczna dla epok T_1 , T_2 , i T_3 była więc poprzednio liczona z wzoru

$$\text{var} E = \frac{E_n - E_0}{n}, \quad (3)$$

gdzie n jest liczbą lat jaka dzieli pomiar E_0 i E_n , czyli w naszym wypadku 4. Wariacja roczna jako pierwsza pochodna funkcji $E = f(T)$ wyniesie:

$$\text{var} E = f'(T_e), \quad (4)$$

gdzie e jest epoką, dla której oblicza się wariację roczną.

Ponieważ do aproksymacji biegu wiekowego przyjęto parabolę 2 stopnia dla D oraz parabolę 3 stopnia dla H i Z , wariację roczną D , H i Z obliczyć można z wzorów:

$$\begin{aligned} \text{var } D &= 2A_1x + A_2, \\ \text{var } H &= 3B_1x^2 + 2B_2x + B_3, \\ \text{var } Z &= 3C_1x^2 + 2C_2x + C_3, \end{aligned} \quad (5)$$

gdzie x jest epoką, dla której oblicza się szukaną wariację roczną.

Łatwo zauważyć, że w drugim wypadku dla każdej epoki T_1 , T_2 i T_3 wariacja roczna będzie inna i wolna od błędu spowodowanego nieuwzględnieniem krzywizny biegu wiekowego.

Wielkość tego błędu zależna będzie od promienia krzywizny biegu wiekowego i odstępów czasu między T_e a pewną średnią epoką T_{sr} . Jedynie w średniej epoce przy krzywej II stopnia wariacja E obliczana obydwojma sposobami będzie taka sama. W innych epokach błąd ten będzie tym większy im bardziej od średniej epoki się oddalimy. Wpływ nieuwzględnienia krzywizny biegu wiekowego przy obliczaniu wariacji rocznej z wzoru (3) szczególnie fałszować będzie rozkład powierzchniowy zmian wiekowych jeżeli do ich obliczenia użyty zostanie materiał pomiarowy z różnych lat.

Rozkład powierzchniowy zmian wiekowych jako funkcja współrzędnych geograficznych

Zmiany wiekowe elementów magnetycznego pola Ziemi na danym obszarze przedstawia się w postaci map izopor. Podstawą ich opracowania są wartości wariacji rocznych E dla danej epoki lub zmiany E w pewnych interwałach czasowych na punktach, na których pomiary zostały wykonane co najmniej dwukrotnie w odstępie czasu równym zazwyczaj temu interwałowi. Do czasu założenia zastabilizowanej sieci punktów wiekowych, badania zmian wiekowych na terenie Polski nie były ujęte żadnym zorga-

nizowanym programem. Autorzy kolejnych opracowań, mimo stosunkowo licznych pomiarów, dysponowali raczej ubogim materiałem do badania zmian wiekowych na terenie całego kraju. Brak bowiem stabilizacji punktów powodował w wielu wypadkach wątpliwości co do ścisłej lokalizacji pomiarów powtarzanych. W konsekwencji wyznaczenia takie musiały być wyeliminowane ze zbioru danych, stanowiących podstawę opracowania mapy izopor. Przebieg izopor ustalano graficznie drogą interpolacji, co przy małej liczbie punktów, choć w pełni uzasadnione, było mało dokładne.

Wzrost liczby punktów, na których pomiary były powtarzane, umożliwił przedstawienie rozkładu zmian wiekowych na terenie Polski jako funkcji współrzędnych geograficznych: $\text{var } E = F(\varphi \lambda)$. Tego rodzaju zależność przedstawiana jest w postaci wielomianu, podobnie jak przedstawia się pole normalne magnetyzmu ziemskiego dla niewielkich obszarów globu ziemskiego.

W celu określenia rozkładu zmian wiekowych wystarczające jest zastosowanie wielomianu 1 stopnia:

$$\text{var}_1 E = a_1 + a_2 \Delta \varphi + a_3 \Delta \lambda, \quad (6)$$

reprezentującego płaszczyznę, za pomocą której aproksymuje się metodą najmniejszych kwadratów przebieg rozkładu powierzchniowego zmian wiekowych. Rozkład ten przedstawiony w postaci mapy izopor powinien pasować do ogólnego obrazu rozkładu zmian, opracowanego dla obszarów większych, np. dla Europy. Można wówczas uznać, że otrzymana z aproksymacji powierzchnia 1 stopnia mapa izopor przedstawia rozkład normalny zmian wiekowych, czyli rozkład sumy zmian planetarnych i kontynentalnych. W celu wyznaczenia nieregularności w przebiegu izopor, czyli określenia rozkładu zmian regionalnych lub lokalnych, można do obliczeń użyć ponadto wielomianu drugiego lub trzeciego stopnia. Stopień wielomianu ograniczony jest liczbą punktów, bowiem w miarę jego wzrostu, zwiększa się liczba wyznaczanych współczynników wielomianu, co powoduje szybkie zmniejszanie się ilości danych nadliczbowych.

Metodę badania rozkładu zmian wiekowych za pomocą wielomianu 1, 2 i 3 stopnia zastosował Małoszewski do opracowania map izopor D , H , Z , F , I , X i Y na epoki 1901,0, 1928,5, 1935,0, 1958,5 i 1959,0 które opublikowane zostały w 1965 roku [7].

W Instytucie Geodezji i Kartografii także zastosowano tę metodę przy opracowaniu map izopor D , H , Z , F i I dla zdjęcia magnetycznego Polski na epokę 1965,0. [6]. Mapy izopor opracowane zostały podobnie jak to zrobił Małoszewski w trzech wersjach, przy zastosowaniu wielomianu 1, 2 i 3 stopnia. Wariacja roczna na epokę 1965,0 dla D , H i Z wyznaczona została dla każdego punktu wiekowego graficznie z krzywej biegu wiekowego, a dla F i I z wzorów dyferencjalnych. Otrzymane z aproksymacji m_0 i suma

kwadratów odchyłek posłużyły jako kryterium wyboru najkorzystniejszej wersji mapy izopor dla danego elementu E .

Kilkunastoletnia seria pomiarów na punktach wiekowych wraz z pomiarami uzupełniającymi pozwoliła na określenie biegu wiekowego za pomocą funkcji $E = f(T)$, jak również na przedstawienie wariacji rocznej E w epoce e jako pierwszej pochodnej tej funkcji: $\text{var } E = f'(T_e)$. Przy obliczaniu rozkładu powierzchniowego zmian wiekowych zaistniała zatem możliwość zastąpienia wariacji rocznej określanej graficznie lub obliczanej sposobem uproszczonym według wzoru (3), wartością tej wariacji obliczonej w sposób ścisły według wzoru (4).

Wykorzystując zebrany materiał z lat 1957-1971 obliczono wariacje roczne na punktach wiekowych według wzoru (4), a następnie posługując się, jak poprzednio, wielomianem 1, 2 i 3 stopnia wyznaczono w trzech wersjach rozkład zmian wiekowych D , H , i Z w epokach 1965,5 i 1970,5 oraz w interwale 1961-1971 dla D i H , natomiast dla Z w interwale 1963-1971. Obliczenia zostały wykonane podobnie jak dla epoki 1965,0 r., z tą różnicą, że wariacje E w obserwatorium w Belsku otrzymały wagę 100. Było to podyktowane potrzebą usztywnienia niejako powierzchni aproksymującej w punkcie, który dla obszaru Polski jest punktem odniesienia.

Pierwszą wersję rozkładu zmian wiekowych policzono według wzoru (6), natomiast drugą i trzecią według wzorów:

$$\text{var}_{II}E = b_1 + b_2 \Delta\varphi + b_3\Delta\lambda + b_4\Delta\varphi^2 + b_5\Delta\lambda^2 + b_6\Delta\varphi\Delta\lambda, \quad (7)$$

oraz

$$\begin{aligned} \text{var}_{III}E = c_1 + c_2 \Delta\varphi + c_3\Delta\lambda + c_4\Delta\varphi^2 + c_5\Delta\lambda^2 + c_6\Delta\varphi\Delta\lambda + \\ + c_7\Delta\varphi^3 + c_8\Delta\lambda^3 + c_9\Delta\varphi^2\Delta\lambda + c_{10}\Delta\varphi\Delta\lambda^2, \end{aligned} \quad (8)$$

w których:

$$\Delta\varphi = \varphi - 49^\circ, \quad \text{zaś} \quad \Delta\lambda = \lambda - 12^\circ.$$

W wyniku przeprowadzonych obliczeń otrzymano współczynniki równań powierzchni aproksymujących i ich średnie błędy, poprawki do danych wyjściowych, czyli do wariacji rocznych na punktach wiekowych, oraz średnie aproksymacji m_0 . Otrzymane w trzech wersjach współczynniki równań powierzchni aproksymujących pozwoliły obliczyć wyrównane wartości wariacji rocznych na punktach wiekowych. Na ich podstawie wykreślone zostały mapy izopor D , H i Z w epokach 1965,5 i 1970,5 oraz w interwałach 1961-1971 dla D i H , i 1963-1971 dla Z . Mapy te przedstawione zostały na rysunkach 3, 4 i 5. Na rysunku 6 przedstawione zostały mapy izopor D , H i Z , w tych samych epokach, wykreślone na podstawie danych wyjściowych, czyli wariacji rocznych na punktach wiekowych, otrzymanych z pomiarów.

Mapy izopor

Wykreślone mapy izopor deklinacji magnetycznej D oraz natężenia składowych poziomej H i pionowej Z , o których wspomniano w rozdziale poprzednim, zostały przedstawione odpowiednio na rysunkach 3, 4 i 5 w ten sposób, iż w kolumnach znajdują się mapy opracowane drogą aproksymacji wielomianem tego samego stopnia, zaś w wierszach mapy opracowane dla tej samej epoki. Na mapach podane zostały także wielkości średnich błędów aproksymacji m_0 . Błędy te są najmniejsze dla epoki 1965,5, która przypada w środku badanego okresu, w związku z czym wariacje E zostały obliczone najdokładniej. W epoce 1970,5 m_0 są mniej więcej dwukrotnie większe niż w epoce 1965,5. Tłumaczy się to tym, że epoka 1970,5 przypada pod koniec okresu objętego badaniami i otrzymane wartości wariacji rocznych E , jako wartości brzegowe, obarczone są błędami większymi. Ma to oczywiście wpływ na wynik obliczeń rozkładu tych wariacji w epoce 1970,5, drogą aproksymacji wielomianem.

Zmiany wiekowe deklinacji magnetycznej na terenie Polski w badanym okresie przebiegały w dość nietypowy sposób. Po stosunkowo równomiernym wzroście wartości deklinacji na początku lat pięćdziesiątych, nastąpiło stopniowe zmniejszanie się dodatniej wariacji rocznej D , która we wschodnich rejonach kraju osiągnęła wartość zerową w roku 1966, a następnie przybrała wartość ujemną, osiągając w 1971 roku wielkość ponad $-1'$. Dało się przy tym zauważyć przemieszczanie się na zachód izopory zerowej z szybkością $0,3 \div 0,4'$ na rok. W zachodniej części kraju wariacja D choć stale się zmniejszała, jeszcze w 1971 roku była dodatnia i wynosiła $+1'$. Gradient terytorialny¹ wariacji D zwiększył się w ciągu pięciolecia 1965-1970 o około $0,5'$ i zmienił kierunek o ok. 15° .

Na mapach aproksymowanych wielomianem wyższych stopni izopory D , które w południowej części kraju biegną południkowo, w centrum kraju zakręcają na północny zachód, przy czym w 1965 roku zwrot ten jest nieznaczny, podczas gdy w 1970 roku już zupełnie wyraźny. Na mapach izopor dla interwału 1961-1971 zwrotu tego nie widać.

Natężenie składowej H w całym badanym okresie wzrastało z szybkością kilkunastu gamma na rok. Jednakże w latach 1965-1967 dało się zauważyć zmniejszenie szybkości wzrostu H do $10 \div 12$ gamma na rok, przy jednoczesnym zmniejszeniu się gradientu terytorialnego z ok. dziesięciu gamma do trzech. W 1970 roku wariacja H wzrosła do około dwudziestu gamma przy jednoczesnym nieznacznym wzroście gradientu. Nastąpiła także zmiana kierunku gradientu z zachodniego na południowo-zachodni.

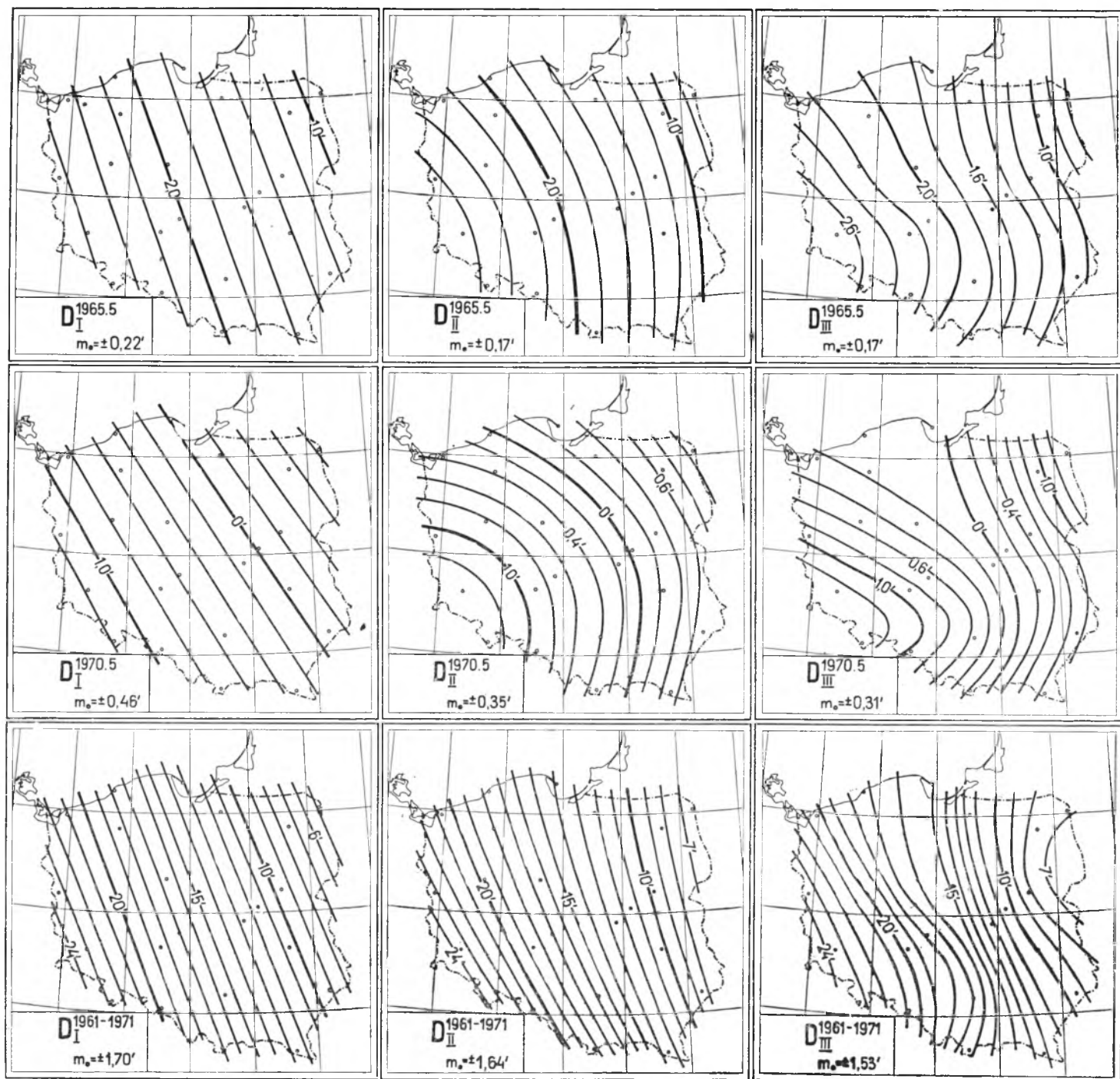
¹ Pod tym terminem rozumiemy maksymalną zmianę wariacji danego elementu E na terytorium obejmującym cały obszar kraju.

Na mapach izopor aproksymowanych wielomianami wyższych stopni widać zwrot izopor, które idąc od południowego zachodu w centrum kraju zakręcają na północny zachód. W 1970 roku skręt ten jest znacznie ostrzejszy, jak również widać wzrost gradientu terytorialnego z sześciu do dziesięciu gamma. Na mapach tych obserwuje się także zawijanie się niejako powierzchni aproksymującej na brzegach badanego obszaru, zwłaszcza w wypadku zastosowania wielomianu 3 stopnia. To zjawisko jest jednak raczej wynikiem procesu obliczeniowego, w związku z czym, do celów praktycznych mapy opracowane przy użyciu wielomianu 3 stopnia nie powinny być stosowane.

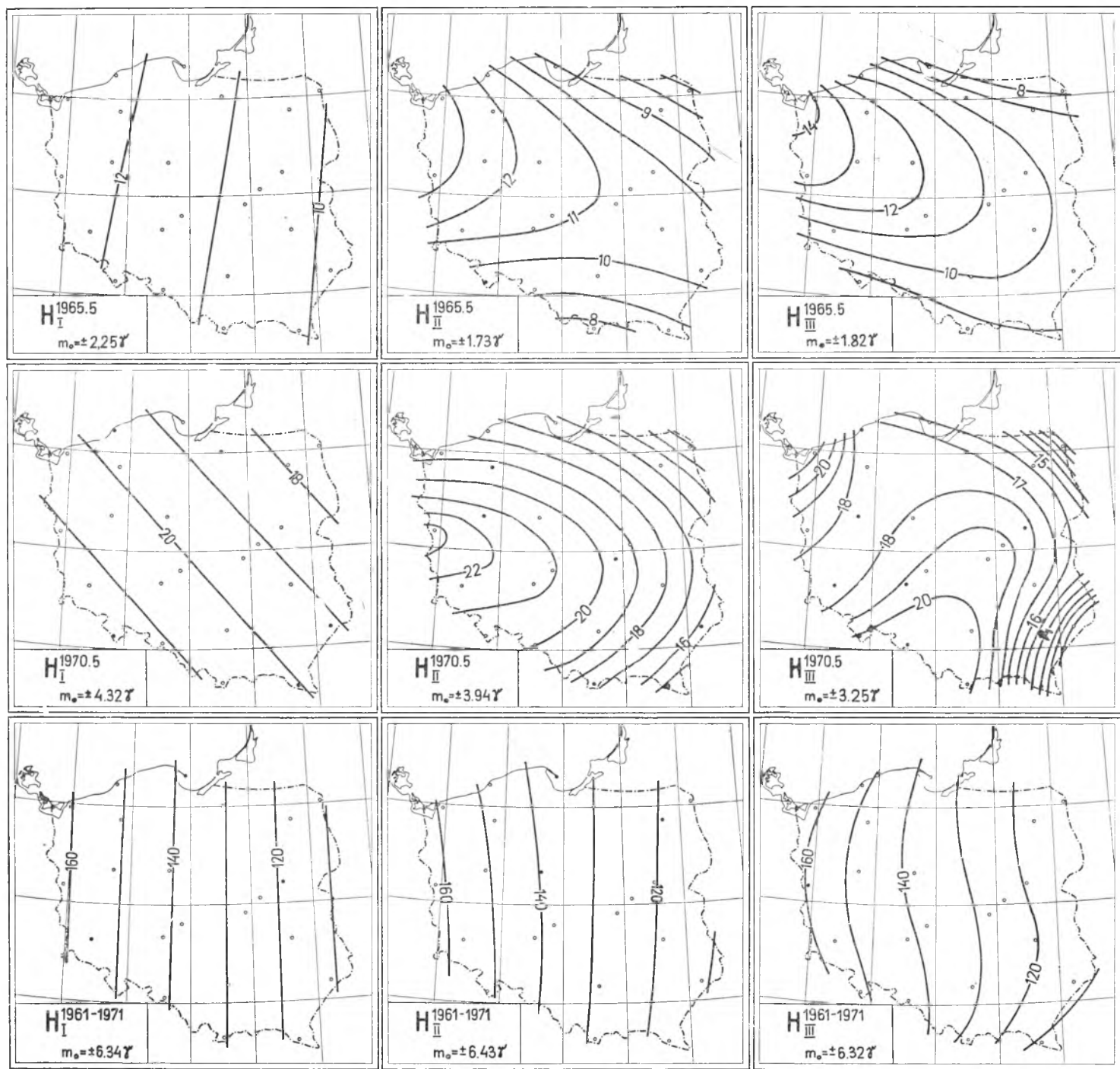
Mankament ten mógłby być usunięty przez włączenie do obliczeń danych z punktów wiekowych położonych w rejonach przygranicznych w krajach sąsiednich.

Mapy izopor H dla całego interwału 1961-1971 we wszystkich trzech wersjach są do siebie bardzo podobne.

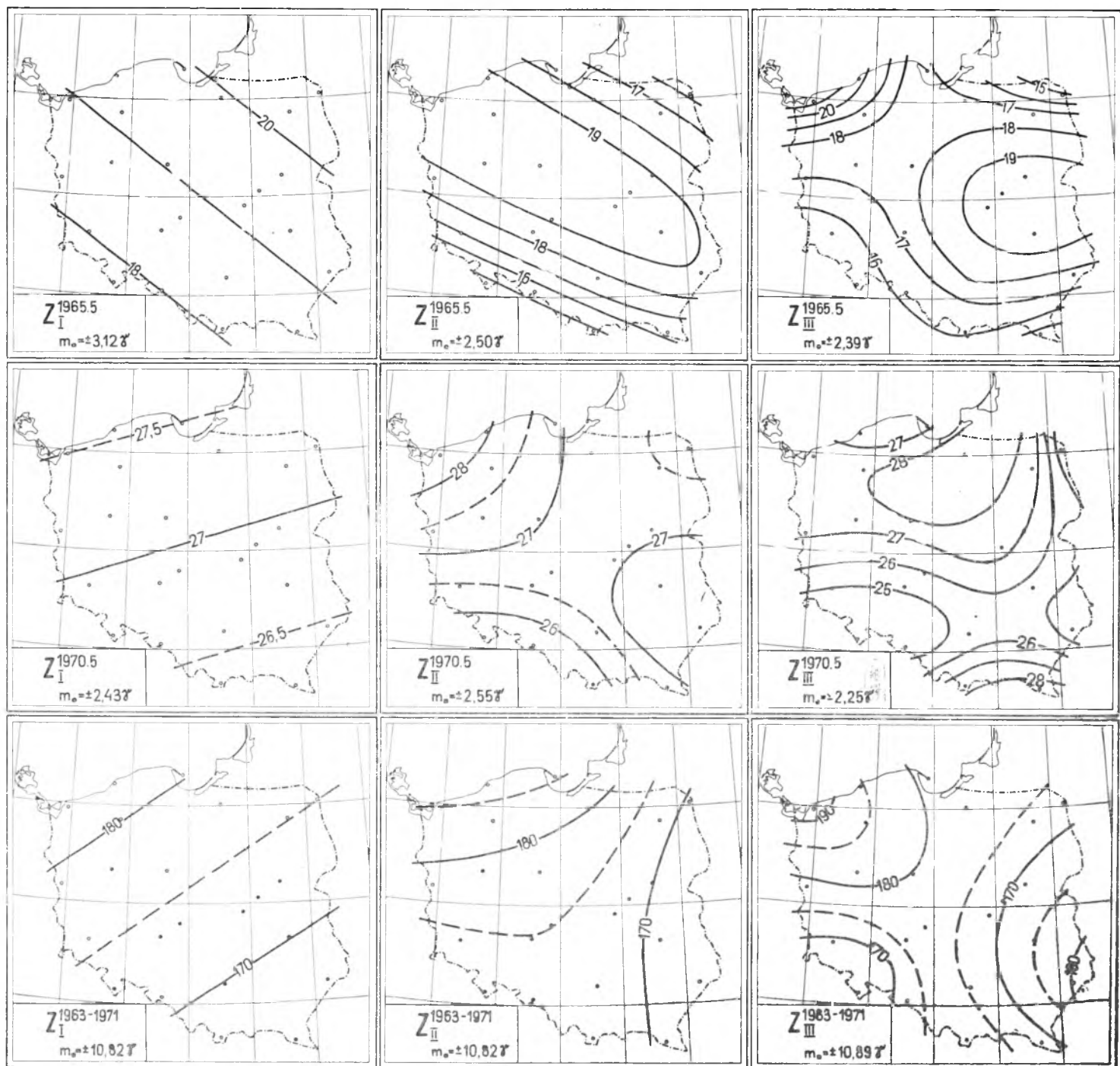
Wariacje roczne Z w badanym okresie, które do 1965 roku wynosiły kilkanaście gamma, uległy następnie przyspieszeniu, osiągając w 1970 roku 28 gamma. Gradient terytorialny izopor Z na mapach opracowanych przy wykorzystaniu wielomianu 1 stopnia jest bardzo mały — 2γ w 1965 r. i 1γ w 1970 roku, jak również 1γ w interwale 1963-1971. Kierunek gradientu zmienia się z północno-wschodniego w 1965 roku na północno-zachodni w roku 1970. Dla interwału 1963-1971 gradient skierowany jest na północny zachód. Nasuwa się w związku z tym przypuszczenie, że taka chwiejność kierunku gradientu terytorialnego jest raczej związana z wielkością średnich błędów materiału wyjściowego, bowiem wstęga błędu przebiegu średniej izopory Z przy tak małym gradiencie tej izopory z pewnością obejmuje sobą całe terytorium kraju. Jest to tym bardziej prawdopodobne, że wyznaczenia Z magnetometrami BMZ są mniej dokładne od wyznaczeń H magnetometrami kwarcowymi i D deklinatorem niciowym. Rozkład izopor obliczony przy wykorzystaniu wielomianu 2 stopnia przedstawia się jako powierzchnia lub fragment powierzchni siodłowej. Gradient terytorialny w 1965 roku wynosi 4γ , zaś w 1970 roku i w interwale 1963-1971 jest rzędu $1\div 2\gamma$. Izopory przedstawione przy wykorzystaniu wielomianu 3 stopnia mają przebieg bardziej skomplikowany. Widać podobnie jak w wypadku H wzrost gradientu i zawijanie się powierzchni aproksymującej w obszarach brzegowych. Wydaje się jednak, że izopory przedstawiają raczej rozkład średnich błędów wyznaczenia wariacji Z na poszczególnych punktach wiekowych niż rzeczywisty przebieg izopor Z , zwłaszcza w 1970 roku. W 1965 roku jak również w interwale 1963-1971 przebieg izopor zbliżony jest do ich przebiegu wyznaczonego przy zastosowaniu wielomianu 2 stopnia.



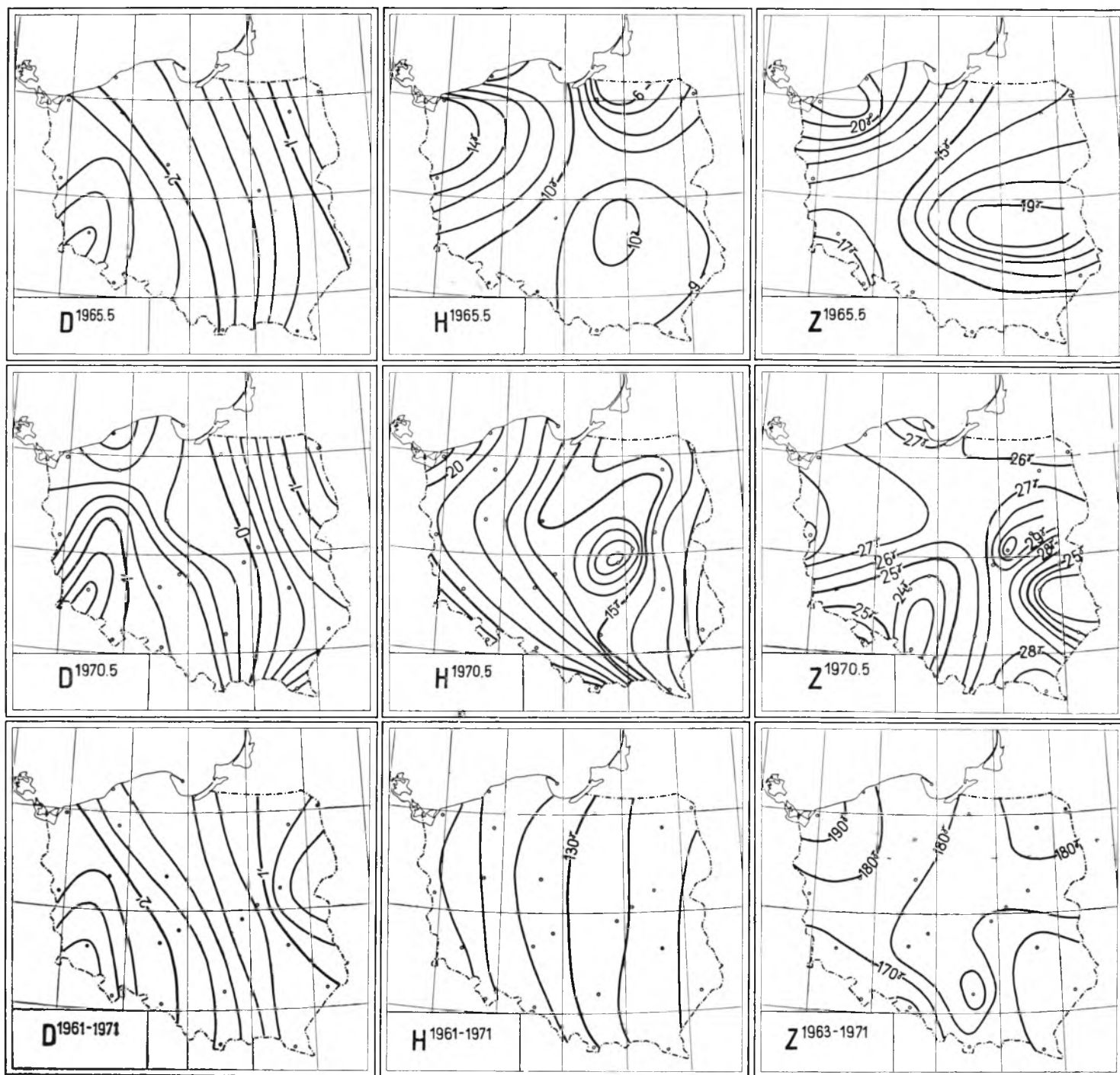
Rys. 3



Rys. 4



Rys. 5



Rys. 6

Przebieg izopor na mapach opracowanych bezpośrednio na podstawie wariacji rocznych (rys. 6) wykazuje dużą zgodność z przebiegiem izopor na mapach opracowanych drogą aproksymacji wielomianem 2, a zwłaszcza 3 stopnia. Świadczy to w znacznej mierze o prawidłowości przyjętej metody przedstawiania rozkładu horyzontalnych zmian wiekowych.

Pomiary na punktach wiekowych i opracowanie ich wyników, które w końcowym efekcie prowadzi do wykreślenia map izopor, ma na celu otrzymanie możliwie najdokładniejszych danych, na podstawie których zredukować można na żadaną epokę mapy i inne materiały magnetyczne. Redukcja taka polega zazwyczaj na liniowej ekstrapolacji biegu wiekowego. Przy omawianiu dokładności mapy izopor należałoby w związku z tym odróżnić dokładność mapy w epoce opracowania, która zależy od szeregu czynników omówionych już w pracach IGiK [12], od dokładności mapy izopor, wyrażającej jej przydatność w czasie do redukcji danych drogą ekstrapolacji biegu wiekowego. Tak rozumiana przydatność mapy zależy oczywiście przede wszystkim od wielkości krzywizny biegu wiekowego w okresie przeprowadzania ekstrapolacji. Oznacza to, że im bardziej krzywa biegu wiekowego jest zbliżona do prostej, tym dłużej mapa izopor może być wykorzystywana. W epoce, w której błąd określenia ekstrapolowanej wartości zmiany wiekowej wykracza poza przyjęte granice tolerancji, tzn. przekroczy trzykrotny średni błąd opracowania lub granicę błędu wynikającego z wymagań stawianych przez użytkownika, staje się konieczne opracowanie nowej mapy izopor. Zazwyczaj opracowuje się od nowa nie tylko mapę izopor, ale także mapę danego elementu E . Przyjęło się uważać, że mapa izopor D zabezpiecza żadaną dokładność wyznaczenia deklinacji z mapy magnetycznej przez okres 5 lat, zaś mapy izopor pozostałych elementów przez 10 lat.

Zagadnienia te łączą się z problemem prognozowania zmian wiekowych, który wykracza poza ramy niniejszego opracowania. Nadmienić można, że jest to między innymi związane z 11-letnim cyklem aktywności słonecznej i bez szczegółowego badania jego wpływu na przebieg zmian pola magnetycznego na danym obszarze, nie da się określić zasad prognozowania tych zmian. Przy wykreślaniu map izopor musimy zatem ograniczyć się obecnie do podawania takich wartości wariacji rocznej E , jaka była w epoce opracowania.

Powracając do zagadnienia dokładności mapy izopor w epoce opracowania trzeba zwrócić uwagę, że zależy ona od dwóch grup czynników: jednej obejmującej te, których wpływ da się wyrazić liczbowo oraz drugiej obejmującej czynniki, których wpływ jest jeszcze nieznany i może być, przynajmniej obecnie, jedynie oszacowany z większym lub mniejszym przybliżeniem.

Omówmy pokrótce ważniejsze czynniki, wpływające na dokładność opracowania mapy izopor:

1. Średni błąd wyznaczenia poprawek magnetometrów QHM lub HTM oraz BMZ, który w wyniku wielokrotnych pomiarów kontrolnych przeprowadzanych w ciągu wielu lat można określić na nie większy niż $\pm 1 \gamma$.

2. Średnie błędy wyznaczenia średnich wartości rocznych E na punktach wiekowych, które są funkcją średnich błędów pomiaru, redukcji momentalnych i redukcji do epoki. (Błędy te były już omawiane [12]).

3. Nierównoległy przebieg zmian dobowych oraz zmian cyklicznych w ciągu roku, objawiający się różną amplitudą tych zmian w różnych rejonach. Brak dostatecznej liczby danych nie pozwala na wyeliminowanie jego wpływu, ani nawet na określenie wielkości błędu jaki wnosi do wartości ΔE^2 . Wyniki badania różnic amplitud E między obserwatoriami Belsk—Hel i Belsk—Niemegk mogą sugerować, że błąd ten jest rzędu kilku gamma w H i Z zaś około $1'$ w D [12].

4. Wygładzenie biegu wiekowego za pomocą aproksymacji krzywą. Operacja ta ma na celu otrzymanie bardziej prawdopodobnego kształtu krzywej biegu wiekowego i w związku z tym nie należałoby jej rozpatrywać jako źródła błędu wpływającego na rozkład izopor. Jednakże przy zbyt małej częstotliwości pomiarów na punkcie wiekowym wygładzenie biegu wiekowego może być przeprowadzone fałszywie.

W celu zorientowania się jakiego rzędu błędy mogą być w takim wypadku popełniane, przeprowadzono aproksymację biegu wiekowego natężenia składowej poziomej H i pionowej Z w obserwatorium w Niemegk w trzech wersjach: przy użyciu do obliczeń wszystkich średnich rocznych w okresie 1957-1971, co drugiej i co trzeciej. Obliczone współczynniki biegu wiekowego dla tych trzech wersji w wypadku Z różnią się od siebie nieznacznie. W wypadku H różnice między nimi są większe. Przyczyną tego jest trochę bardziej urozmaicony kształt linii łamanej biegu wiekowego H niż linii łamanej biegu wiekowego Z . Na podstawie otrzymanych współczynników równań obliczono następnie wszystkie wygładzone średnie wartości roczne. Odchyłki między nimi a wartościami średnich rocznych podanych przez obserwatorium w poszczególnych wersjach są niewielkie. W składowej pionowej Z nie przekraczają trzech gamma, zaś w składowej poziomej H tylko w pierwszej, drugiej i ostatniej (czternaściej) epoce są większe niż trzy gamma.

Częstotliwość pomiarów na punkcie wiekowym powinna być dostosowana do kształtu krzywej biegu wiekowego. W wielu krajach, np. w Japonii, w Rumunii pomiary na punktach wiekowych wykonuje się co dwa

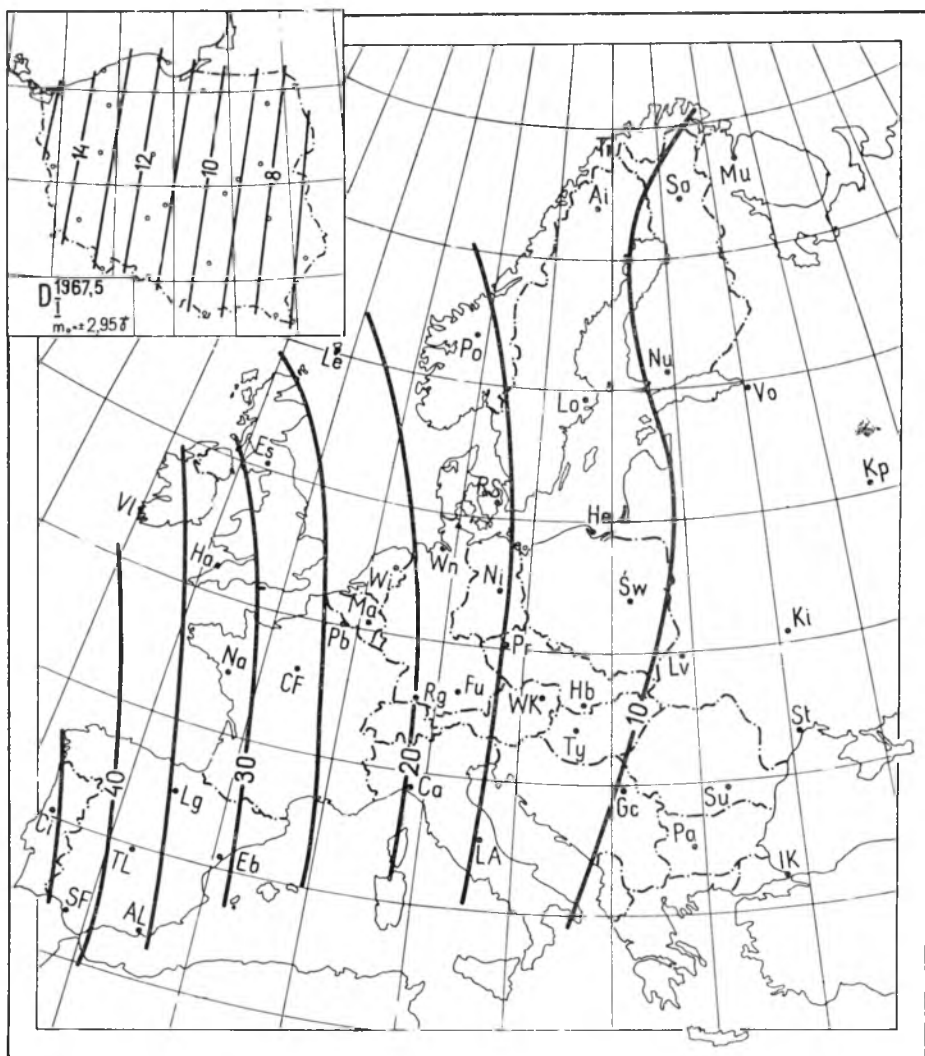
² ΔE jest różnicą między wartościami E na punkcie wiekowym i w obserwatorium w danym momencie lub w danej epoce.

Rys. 7

³ Wynika to z ustaleń Grupy Roboczej 1.6. KAPG.

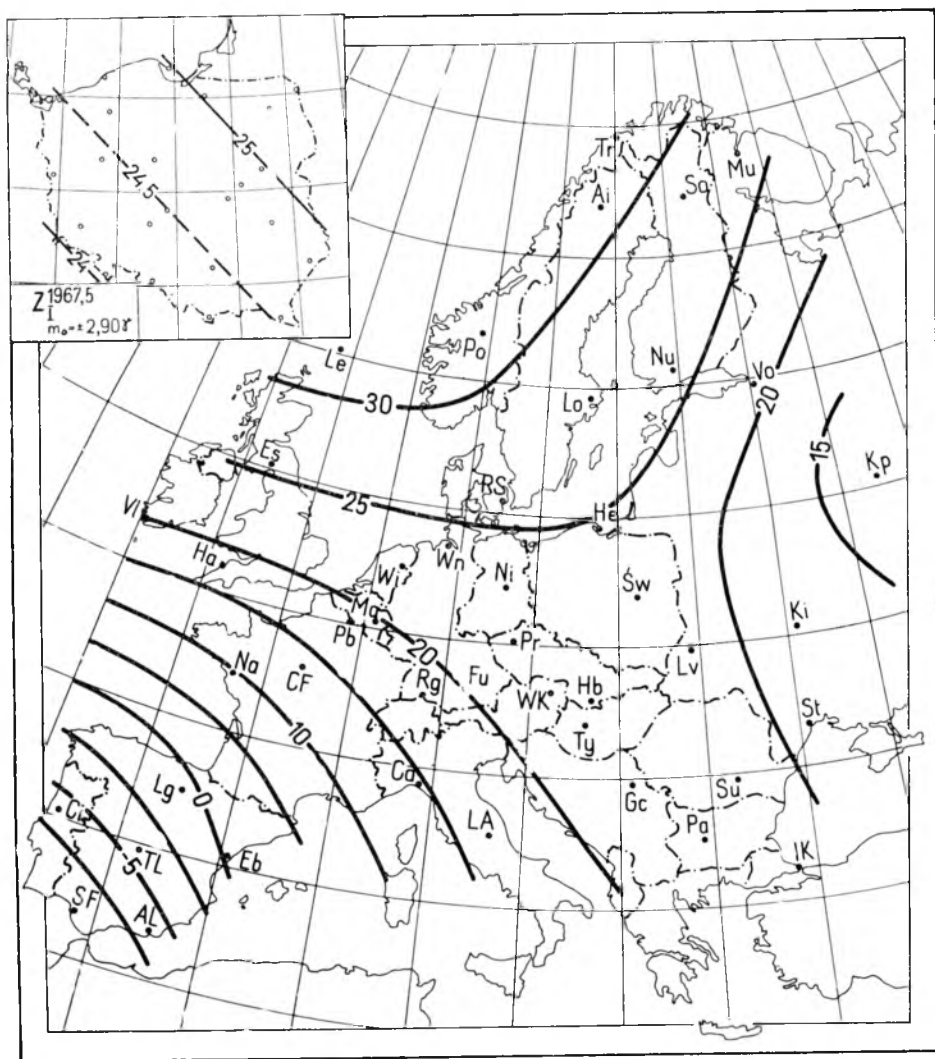
nak, że dopóki powierzchniowy rozkład wpływu cyklicznej aktywności Słońca na obszarze naszego kraju nie zostanie zbadany i wydzielony, żadnych zjawisk wpływających na kształt krzywej biegu wiekowego eliminować nie należy.

5. Określenie rozkładu zmian wiekowych jako funkcji współrzędnych geograficznych za pomocą wielomianu. Ta operacja rachunkowa, podobnie jak rachunkowe wygładzenie biegu wiekowego, ma na celu zwiększenie prawdopodobieństwa określenia powierzchniowego rozkładu zmian



Rys. 8

wiekowych i także nie powinna być traktowana jako źródło błędu, wpływającego na ten rozkład. Jednakże w wypadku, gdy gęstość punktów wziętych do obliczeń jest za mała, wygładzony i wyrównany rozkład zmian może być fałszywy. Pewnym miernikiem, którym można się posłużyć dla stwierdzenia czy izolinie przebiegają prawidłowo, może być obraz otrzymanego przebiegu izopor na tle mapy izopor większego obszaru. W naszym wypadku do takiego porównania wzięto opublikowane w 1973 roku przez Mundta [8] mapy izopor D , H i Z w Europie na epokę 1967,5 oraz opracowane wyżej opisaną metodą na tę samą epokę mapy izopor D , H i Z w Pol-



Rys. 9

sce przy użyciu wielomianu 1 stopnia. Jak widać z rysunków 7, 8 i 9 normalny przebieg izopor D , H i Z w Polsce jest zgodny z przebiegiem izopor w Europie.

Świadczyłoby to o tym, że w celu określenia rozkładu normalnego zmian wiekowych w Polsce ilość 20 punktów wiekowych wraz z obserwatoriami jest wystarczająca. Jeśli chodzi o stwierdzenie obecności anomalii lokalnych zmian wiekowych, które według Małoszewskiego i Mundta obejmować mogą obszar o średnicy rzędu $100\div 150$ km, to gęstość punktów wiekowych w Polsce jest za mała. Jak już wspomniano, Małoszewski wykrył anomalie zmian wiekowych, wykorzystując wyniki pomiarów na 43 punktach. W NRD planuje się założenie do tego celu i zastabilizowanie około 50 punktów wiekowych. W Japonii badania zmian wiekowych przeprowadza się na 93 punktach wiekowych.

Przedstawione powyżej mapy izopor, zawierające dane do redukcji map i innych materiałów magnetycznych, są w stanie zabezpieczyć wszystkie potrzeby w tym zakresie, z potrzebami służby topograficznej na czele. W wielu jednak dziedzinach, gdzie wymagania co do dokładności danych magnetycznych są mniejsze, nie ma potrzeby posługiwania się takimi dokładnymi mapami izopor, jak to jest niezbędne w wypadku map topograficznych. Na przykład dla celów nawigacji zarówno morskiej, jak i lotniczej wystarcza w zupełności podanie na mapie nawigacyjnej zmiany rocznej D z dokładnością $0,1^\circ$, co przy obecnym gradiencie wariacji rocznej wystarcza, aby umieścić na arkuszu takiej mapy jedną tylko wartość.

Podobnie na mapach magnetycznych w małej skali, z których odczytywanie danych magnetycznych, np. natężenia H , Z lub F , wykonuje się z dokładnością rzędu 100 gamma, można umieścić bardziej zgeneralizowany przebieg izopor.

Przedstawione tutaj mapy izopor stanowią materiał wyjściowy, pozwalający na wybór najwłaściwszej formy zilustrowania zmian wiekowych zależnie od potrzeb i wymagań stawianych przez użytkowników map magnetycznych.

Podsumowanie

Wyznaczenia elementów magnetycznego pola Ziemi polegają na pomiarach wielkości dynamicznych, zmieniających się w czasie, przy czym szybkość zmian i ich kierunek nie jest możliwy do przewidzenia. Konsekwencją tego jest, że pomiarów magnetycznych nie można powtórzyć. Dany element pola magnetycznego można pomierzyć na tym samym punkcie po raz drugi, ale otrzymany wynik będzie inny niż za pierwszym razem i to nie tylko na skutek istnienia błędu przypadkowego pomiaru, lecz także na skutek zmiany jakiej uległ element E od momentu pierwszego pomiaru do momentu pomiaru drugiego. Przy porównywaniu wyników kilku pomia-

rów pojawia się zatem zagadnienie wyznaczenia wielkości tej zmiany czyli redukcji, z taką dokładnością, aby średni błąd tej redukcji był mniejszego lub co najmniej tego samego rzędu co średni błąd wyznaczenia elementu E na punkcie wiekowym. Zagadnienie to nabiera szczególnego znaczenia w wypadku punktów oddalonych od obserwatorium magnetycznego o więcej niż kilkadziesiąt kilometrów.

W wypadku redukcji momentalnych rozwiązaniem jest użycie polowej stacji wariograficznej pod warunkiem, że wartości baz i wartości współczynników termicznych stacji są znane. Metoda pośredniego, jednoczesnego wyznaczenia dryftów baz i wartości współczynników termicznych wariograficznej stacji polowej pozwala w prosty sposób spełnić ten warunek [10]. Jeśli natomiast chodzi o redukcję do epoki opracowania, przeprowadzaną za pośrednictwem obliczenia ΔE , to zastosowanie stacji wariograficznych umożliwia obliczenie ΔE w wybranych, magnetycznie spokojnych momentach lub okresach rejestracji.

Taki sposób postępowania, zastosowany w Instytucie Geodezji i Kartografii, jak wykazała analiza dokładności wyznaczenia średniej wartości rocznej elementu E na punkcie wiekowym, pozwala na znaczne zmniejszenie lub nawet wyeliminowanie wpływu nierównoległego przebiegu zmian pola magnetycznego na punkcie wiekowym i w obserwatorium odniesienia, o okresie do kilku dób [12].

Pośród zmian długookresowych, których nierównoległy przebieg na punkcie wiekowym i w obserwatorium fałszuje wartość ΔE , uwzględnić można obecnie tylko wpływ gradientu zmian wiekowych.

Poprawka uwzględniająca ten wpływ, była przez autorów poprzednich opracowań pomijana ze względu na jej małą wartość. Wzrost dokładności pomiarów, osiągnięty dzięki zastosowaniu magnetometrów kwarcowych i protonowych, jak również wzrost dokładności wprowadzanych poprawek redukcyjnych, uzyskany dzięki użyciu wariograficznych stacji polowych, przemawiają jednakże za tym, aby poprawkę tę obecnie uwzględniać.

Zagadnieniem, które także wymagało rozwiązania była kontrola stałości standardu magnetycznego obserwatorium odniesienia. Zagadnienie bardzo ważne, bowiem każda nie uwzględniona zmiana standardu w całości wpływa jako błąd systematyczny na określenie średniej wartości rocznej elementu E . Pojawienie się magnetometrów protonowych zmniejszyło jedynie skalę zagadnienia. Magnetometrem protonowym bowiem, można mierzyć dokładnie tylko całkowite natężenie pola magnetycznego Ziemi. Natomiast do pomiaru pozostałych elementów tego pola niezbędne jest użycie bądź to innych przyrządów, bądź też urządzeń pomocniczych, jak np. cewki Helmholtza lub Braunbecka, które mogą być przyczyną istnienia błędów systematycznych elementów wyznaczanych w obserwatorium. Opracowana w IGiK przez Krzemińskiego i Autora metoda kontroli i wy-

równania standardów magnetycznych rozwiązuje to zagadnienie. Metoda została przyjęta we wszystkich państwach uczestniczących w pracach KAPG i jest stosowana w ich obserwatoriach magnetycznych, a Instytutowi Geodezji i Kartografii powierzona została rola koordynatora prac w zakresie kontroli i wyrównania standardów [5].

Wieloletnia seria wyznaczeń na punkcie wiekowym umożliwiła wygładzenie biegu wiekowego zmian wiekowych i przedstawienie go jako funkcji czasu, zaś wariację roczną elementu E w danej epoce, jako pierwszą pochodną tej funkcji. Pozwoliło to na dokładniejsze obliczenie wariacji rocznej elementu E dzięki uwzględnieniu w obliczeniach krzywizny biegu wiekowego, jak również wyeliminowaniu wpływu 11-letniego cyklu aktywności Słońca.

Słuszne wydaje się przedstawienie rozkładu powierzchniowego zmian wiekowych za pomocą aproksymacji wielomianem 1, 2 i 3 stopnia w celu otrzymania rozkładu normalnego i anomalnego.

Użycie wielomianu 3 stopnia wydaje się mniej korzystne, gdyż pojawia się „zawinięcie” powierzchni aproksymującej w obszarach brzegowych. W niektórych rejonach zmienia to rzeczywisty rozkład przebiegu izopor, chociażby przez zwiększenie gradientu w tych obszarach.

Najwłaściwsze wydaje się jednoczesne wykonanie obydwóch wyżej wymienionych operacji obliczeniowych, przy czym materiał wyjściowy powinien być tak przygotowany, aby możliwe było zachowanie go w pamięci maszyny matematycznej i w razie potrzeby wykonanie odpowiednich obliczeń w celu otrzymania danych magnetycznych dla dowolnej epoki i w dowolnej formie, czy to tabelarycznej czy też graficznej.

Wydaje się bardzo celowe kontynuowanie badań anomalnych zmian wiekowych rozpoczętych przez Małoszewskiego z tym, że niezbędne byłoby zwiększenie liczby punktów wiekowych w stosunku do stanu obecnego, tak aby ewentualna anomalia lokalna o średnicy 100÷150 km mogła być stwierdzona wynikami badań otrzymanych co najmniej na dwóch sąsiednich punktach. Dotychczasowe wyniki tych badań wskazują, że anomalny bieg wiekowy związany jest nie tylko z rejonem, ale że jest także funkcją czasu. Dlatego też należałoby mieć na uwadze zwiększenie częstotliwości pomiarów na punktach wiekowych. Może okazać się konieczne, aby w pewnych okresach pomiary na pewnej grupie punktów wykonywane były przez jakiś czas co roku.

Bardzo ważnym zagadnieniem, zwłaszcza dla kartografii magnetycznej byłoby podjęcie badań nad prognozowaniem zmian wiekowych. Opracowanie zasad prognozowania pozwoliłoby prawdopodobnie ustalać optymalny okres przydatności map izopor, co mogłoby dać oszczędności w pracach nad aktualizacją danych magnetycznych na mapach, a zwłaszcza na mapach topograficznych.

L I T E R A T U R A

- [1] Janowski B.M.: *Magnetyzm ziemski*. PWN, Warszawa, 1958.
- [2] Kozłowski M.: *Short Period Variations of the Earth's Magnetic Field in Poland*. Acta Geoph. Pol., vol. IX. Nr 3, str. 205—226, Warszawa, 1961.
- [3] Krzemiński W., Uhrynowski A., Żółtowski A.: *Sieć magnetycznych punktów wiekowych w Polsce*. Prace IGiK, tom. VIII, nr 2(18), str. 93—154, Warszawa, 1961.
- [4] Krzemiński W., Uhrynowski A., Żółtowski A.: *Sieć magnetycznych punktów wiekowych (II)*. Prace IGiK, tom X, nr 2 (22), Warszawa, 1963.
- [5] Krzemiński W., Uhrynowski A.: *Standardy obserwatoriów magnetycznych Europy wschodniej*. Prace IGiK, tom XVI, nr 3(39), str. 65—90, Warszawa, 1969.
- [6] Krzemiński W., Uhrynowski A., Żółtowski A.: *Zdjęcie magnetyczne Polski, mapy elementów D, H, Z, F i I, na epokę 1965, 0*. IGiK, Warszawa, 1971.
- [7] Małoszewski St.: *O zmianach wiekowych natężenia ziemskiego pola magnetycznego na ziemiach Polski oraz ich zależności od współrzędnych geograficznych i budowy geologicznej*. Zeszyty Naukowe AGH, Rozprawy, nr 44, Kraków, 1965.
- [8] Mundt W.: *Der Charakter der geomagnetischen Säkularvariation in Europa im Zeitraum von 1950 bis 1970*. Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Physik der Erde, nr 23, Potsdam, 1973.
- [9] Orlov W.P.: *The Leading Trends of the Secular Variation Investigation*. Journal of Geomagnetism and Geoelectricity, vol. 17, nr 3—4, str. 277—286, Japan, 1965.
- [10] Uhrynowski A.: *Analityczna metoda wyznaczania współczynnika termicznego magnetycznego wariografu polowego*. Prace IGiK, tom XIX, zeszyt 2 (45), str. 3—13, Warszawa, 1972.
- [11] Uhrynowski A.: *Pomiary na sieci magnetycznych punktów wiekowych w Polsce w 1963 r.* Przegląd geodezyjny, Biuletyn IGiK, rok XIV, nr 3, str. 207—208, Warszawa, 1964.
- [12] Uhrynowski A.: *Badania zmian wiekowych magnetycznego pola Ziemi na terenie Polski*. Prace IGiK, tom XXIV, zeszyt 2 (56), Warszawa, 1977.

Recenzował prof. dr Jerzy Bokun

Rękopis złożono w Redakcji w czerwcu 1977 r.

АНДЖЕЙ УХРЫНОВСКИ

ИЗОПОРЫ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ В ПОЛЬШЕ В ПЕРИОД 1957—1971 Г.

Р е з ю м е

Магнитные измерения на стабилизированной сети вековых пунктов, производимые систематически от 1957 года, позволили представить вековой ход магнитного поля как функцию времени, а годовую вариацию как первую производную этой функции. Используя эту возможность, автор вычислил годовые вариации для эпох 1965,5 и 1970,5, а также для интервала 1961—1971 для D и H , а для интервала 1963—1971 для Z . Вычисленные годовые вариации были использованы для составления карт изопор для этих эпох. Карты изопор составлено методом аппроксимации полиномом 1-й, 2-й и 3-й степени, а также путем непосредственного вычерчивания изопор на основе исходных данных.

В работе рассмотрена точность составления карт изопор и факторы, влияющие на пригодность этих карт для экстраполяции вековых изменений магнитного поля. Рассмотрены также выводы, вытекающие из исследований производимых до сих пор, а в особенности, касающиеся густоты вековых пунктов и частоты производимых на них измерений.

ANDRZEJ UHRYNOWSKI

THE EARTH MAGNETIC FIELD ISOPORES IN POLAND IN THE PERIOD 1957—1971

Summary

Results of the measurements at the magnetic secular variation stations in Poland systematically performed since 1957 have given the possibility of defining the secular variations as a function of time and the mean annual variations as derivatives of this function. This possibility has allowed to calculate the adjusted values of the secular variations for the epoch 1965,5 and 1970,5 as well as for the time span 1961—1971 for D and H , and 1963—1971 for Z .

Results of the calculations have been used for drawing the isoporic charts of D , H and Z for these epochs and periods. Isoporic charts have been elaborated using the polynomial approximations of the 1st, 2nd and 3rd order as well as the raw data.

Accuracy of the isoporic charts has been discussed as well as the factors affecting the application of these charts for the extrapolation of the secular variations.

Conclusions arising from the conducted investigations, and particularly the ones concerning the desired location of the secular variation stations and frequency of the measurements have also been discussed.