

ANDRZEJ UHRYNOWSKI

528.2:537.6(438)

Badania zmian wiekowych magnetycznego pola Ziemi na terenie Polski

Wprowadzenie

Badania nad zmianami wiekowymi magnetycznego pola Ziemi na terenie Polski Instytut Geodezji i Kartografii prowadzi od 1957 roku. Celem tych badań jest przede wszystkim określenie wielkości i rozkładu horyzontalnych zmian wiekowych. Zmiany wiekowe przedstawione w postaci odpowiednich map izopor, potrzebne są do redukcji danych magnetycznych na żadaną epokę.

Rozwój aparatury do pomiarów elementów magnetycznego pola Ziemi, a zwłaszcza pojawienie się polowych magnetometrów protonowych i przenośnych magnetycznych wariografów polowych, pozwoliło podnieść dokładność pomiarów i redukcji. Powstała możliwość nie tylko lepszego poznania przebiegu i rozkładu zmian wiekowych, ale także użycia otrzymanych wyników, jako dodatkowych elementów zbioru danych, do interpretacji budowy wnętrza Ziemi.

Jednakże warunkiem pełnego wykorzystania możliwości, jakie stwarza nowoczesna aparatura jest zmiana stosowanych poprzednio metod pomiaru i redukcji, a także opracowywania i przedstawiania wyników. Chodzi tu głównie o zmniejszenie lub uwzględnienie wpływu tych czynników, które dotychczas traktowane były jako zaniedbywalne, lub które były źródłem nie uwzględnianych błędów systematycznych.

Pomiary na punktach wiekowych, wielokrotnie od 1957 roku powtarzane, pozwoliły zebrać doświadczenia i sformułować wnioski, dotyczące nie tylko metod pomiaru i redukcji, ale także zagadnień dokładności otrzymywanego materiału przejściowego i końcowego. Interpretacja bowiem wyników badań musi być oparta na dokładnym rozeznaniu, w jakim stopniu opracowywany materiał jest wiarygodny i z jakim prawdopodobieństwem zaobserwowane zjawiska odpowiadają rzeczywistym zjawiskom geofizycznym.

Celem niniejszego opracowania nie jest interpretacja zmian wiekowych, lecz przede wszystkim zakreszenie jej ram i ustalenie ograniczeń

wynikających z błędów, jakimi jest obarczony pomiarowy materiał końcowy, czyli średnie wartości roczne elementów magnetycznego pola Ziemi na punktach wiekowych.

Charakterystyka materiału pomiarowego otrzymanego na punktach wiekowych w okresie 1957—1971

Pierwsze pomiary na zastabilizowanej w 1955 roku sieci punktów wiekowych były wykonane w roku 1957 [5]. Na wszystkich dwudziestu punktach była wyznaczana deklinacja magnetyczna D , inklinacja magnetyczna I oraz natężenie składowej poziomej H . O pomiarach tych właśnie elementów, jak również o przyjęciu metody Gaussa-Lamonta do wyznaczania H , decydowała posiadana aparatura: polowy teodolit magnetyczny z deklinatorem niciowym i nasadkami do wahań i wychyleń magnesu oraz nasadzany na ten sam teodolit induktor ziemski. Pomiary wykonywane były w ciągu kilku dni po kilka serii dziennie. Natężenie składowej pionowej Z na punkcie wiekowym obliczano jako funkcję pomierzonego H i I , co oczywiście rzutowało na niższą dokładność wyznaczenia Z w porównaniu z dokładnością wyznaczenia H . Redukcje przeprowadzano według magnetogramów obserwatorium w Świdrze.

Pomiary H , w 1957 roku, mimo użytej metody Gaussa-Lamonta, miały charakter względny, gdyż na punkcie wiekowym wyznaczany był oprócz kąta wychylenia i okresu wahan magnesu tylko współczynnik torsyjny nici suspensyjnej w nasadce do wahań, będący również funkcją H . Pozostałe parametry, jak współczynniki termiczne, indukcyjne i stałe instrumentalne C , przyjęte zostały na podstawie wyznaczeń w obserwatoriach Fürstenfeldbruck w 1954 roku, Świdrze w 1956 roku i Krasnej Pachrze w 1958 roku, gdzie w granicach dokładności wyznaczeń nie stwierdzono zmian ich wielkości.

W latach 1953—1960 Stanisław Małoszewski (Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie) wielokrotnie wykonał na punktach wiekowych pomiary D , H i Z , posługując się magnetometrami QHM i BMZ oraz teodolitem magnetycznym firmy Mating [11]. Redukcje momentalne Małoszewski przeprowadził według magnetogramów Świdra i Helu, natomiast średnie wartości roczne na punktach wiekowych obliczył w odniesieniu do Świdra.

Ponieważ niniejsze opracowanie obejmuje badania zmian wiekowych od roku 1957, wykorzystano w nim jedynie pomiary Małoszewskiego wykonane w latach 1957—1960.

W 1961 roku sieć punktów wiekowych zaobserwowana została przez IGiK ponownie. Do pomiarów natężenia składowej poziomej H użyte zostały dwa magnetometry HTM, których równania wyznaczono w Krasnej Pachrze w 1958 roku. Do pomiarów natężenia składowej pionowej Z użyto,

wypożyczonego z Zakładu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk magnetometru BMZ. Na wszystkich punktach pomierzone zostały D , H i Z . Ze względu na to, że wypożyczony magnetometr BMZ miał niestabilną poprawkę, dokładność otrzymanych wartości Z jest niższa niż możnaby spodziewać się po magnetometrze tego typu.

Podczas pomiarów w 1961 roku użyto po raz pierwszy wariacyjnych stacji polowych do rejestracji zmian pola magnetycznego w rejonie wykonywanych pomiarów. Redukcje obliczano według magnetogramów stacji polowych, z tym, że średnie wartości roczne, odniesione do Świdra, obliczane były przez godziny nocne. Było to koniecznością, gdyż w innych godzinach doby zakłócenia w Świdrze, spowodowane rozbudową elektrycznej trakcji kolejowej na linii Warszawa—Otwock—Pilawa, tak się zwiększyły, iż wykorzystanie zapisu dziennego, zwłaszcza składowej Z , stało się niemożliwe.

Do rejestracji użyto trzech wariografów: jednego, stanowiącego własność IGiK i dwóch — własność Zakładu Geofizyki Polskiej Akademii Nauk. Lokalizacja stacji polowych ustalona była w porozumieniu z Zakładem Geofizyki tak, aby materiał rejestracyjny można było wykorzystać zarówno do redukcji pomiarów na punktach wiekowych, jak i do prac prowadzonych przez Polską Akademię Nauk.

Wyniki pomiarów D i H w 1961 roku opublikowane zostały w Pracach IGiK w 1963 roku [6].

Następny pomiar sieci punktów wiekowych, również z zastosowaniem wariograficznych stacji polowych, wykonany został w 1963 roku [14]. Pomiar D i H wykonywane były tymi samymi instrumentami co w 1961 roku. Natomiast do pomiarów Z użyto magnetometru BMZ nowego typu, w którym magnes główny można przesuwając wzdłuż pionowej osi instrumentu i za pomocą odpowiedniej skali ustawiać w zależności od wielkości mierzonego pola magnetycznego. Dla każdej działki skali certyfikat przyrządu podaje odpowiednią wartość stałej magnetometru Z_c i współczynnika termicznego α . Takie rozwiązanie konstrukcyjne zwiększa wielokrotnie zakres stosowania BMZ, pozwala bowiem mierzyć pola o natężeniu od 29 000 do 70 000 gamma. Ponadto daje możliwość kontrolowania stałości momentów magnetycznych magnesu obrotowego i magnesów dodatkowych [17].

Redukcje momentalne wprowadzano na podstawie magnetogramów wariograficznych stacji polowych. Średnie wartości roczne na punktach wiekowych odniesione zostały, tak jak w 1961 roku, do obserwatorium w Świdrze. Obliczone one zostały również za pośrednictwem magnetogramów wariacyjnych stacji polowych przez godziny nocne w trzech kolejnych nocach. Wartości baz na godziny nocne interpolowane były na

podstawie wyznaczeń baz, przeprowadzonych na punktach wiekowych w czterech kolejnych dniach.

W 1964 i 1965 roku, przy okazji wykonywania zdjęcia magnetycznego Polski [8], na wszystkich punktach wiekowych wykonano pomiary D , H i Z . Pomiary przeprowadzono na każdym punkcie wiekowym w ciągu jednego dnia, w którym wykonywano po dwie serie wyznaczeń. Redukcje momentalne obliczane były również według magnetogramów wariograficznych stacji polowych, których rozmieszczenie w obydwóch latach uwzględniało pomiary na sieci punktów wiekowych. Bazy magnetogramów na godziny nocne interpolowano na podstawie pomiarów wykonanych na punkcie wiekowym oraz dryftu wyznaczonego z pomiarów na wariograficznej stacji polowej i sprawdzonego metodą pośrednią [9].

Rezultaty zredukowano na epokę 1965.0, zaś jako obserwatorium odniesienia przyjęto Hel, ze względu na to, że zakłócenia w Świdrze wzrosły do takiego poziomu, iż magnetogramy świderskie stały się do celów redukcyjnych bezużyteczne.

W roku 1966 na zakończenie zdjęcia magnetycznego Polski sieć punktów wiekowych pomierzona została ponownie. W tym roku, ze względu na fakt, że w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym PAN w Belsku uruchomiona została bardzo dobra rejestracja zmian pola magnetycznego, postanowiono nie instalować w terenie stacji polowych. Spowodowało to obniżenie się dokładności wyznaczeń średnich wartości rocznych na punktach wiekowych. Pomiary przeprowadzane były, podobnie jak w latach poprzednich, w ciągu czterech dni, podczas których wykonywano po osiem serii obserwacji D , H i Z na każdym punkcie wiekowym. Pomiary redukowane były według magnetogramów obserwatorium w Belsku, jak również średnia wartość roczna na epokę 1966.5 odniesiona została do Belska.

Wyniki pomiarów przeprowadzanych na sieci punktów wiekowych od 1957 roku pozwoliły na zgromadzenie materiału, który był w stanie scharakteryzować przebieg zmian wiekowych na poszczególnych punktach. W związku z tym odpadła konieczność wykonywania pomiarów na wszystkich punktach wiekowych w ciągu jednego roku. Analiza kształtu krzywej biegu wiekowego wykazała, że pomiary na punkcie wiekowym nie powinny być wykonywane rzadziej niż raz na cztery lata. Taka minimalna częstotliwość pomiarów na wniosek IGiK została przyjęta przez Grupę Roboczą 1.6. KAPG (Komisja Współpracy Akademii Nauk Krajów Socjalistycznych „Planetarne Badania Geofizyczne”), jako obowiązująca kraje uczestniczące w pracach KAPG. Pozwoliło to tak zorganizować pracę, aby rocznie było do pomierzenia przynajmniej pięć punktów. Zgodnie z powyższym założeniem, w 1968 roku wykonano pomiary na pięciu punktach, w 1969 roku na jednym, w 1970 roku na dziesięciu i w 1971 roku na siedmiu punktach wiekowych.

Wszystkie pomiary wykonywane były według takiego samego programu jak w 1966 roku i w taki sam sposób były przeprowadzane obliczenia i redukcje. Ponadto mierzona była wartość natężenia pola magnetycznego za pomocą magnetometru protonowego, który od 1968 roku został włączony do kompletu przyrządów używanych do pomiarów na punktach wiekowych. Magnetometr BMZ potraktowany został jako przyrząd dodatkowy.

Wyznaczenie średniej wartości rocznej elementu E na punkcie wiekowym

Wyznaczenie średniej wartości elementu E pola magnetycznego Ziemi dla danego punktu może być przeprowadzone w sposób ścisły tylko przez uśrednienie rocznego przebiegu tego elementu na punkcie. Średnią wartość roczną elementu E wyraża się wzorem:

$$E_e^{\text{obs}} = \frac{1}{k-p} \int_p^k f(T) dT + E_B, \quad (1)$$

gdzie funkcja $f(T)$ przedstawia przebieg elementu E w rocznym przedziale czasu p, k , zarejestrowany na magnetogramie o wartości bazy równej E_B .

Wzór (1) realizuje się w praktyce w ten sposób, że okres roczny zostaje podzielony na odcinki godzinne i dla każdej godziny znajduje się średnią wartość elementu E . Następnie z otrzymanych średnich godzinnych liczy się średnie dobowe, miesięczne i roczną.

W celu znalezienia średniej wartości rocznej na punkcie wiekowym, na którym pomiary wykonuje się tylko kilkakrotnie w przeciągu kilku dni, trzeba zastosować inne postępowanie. Przyjmuje się mianowicie założenie, że zmiany magnetycznego pola Ziemi na punkcie wiekowym i w obserwatorium magnetycznym w ciągu całego roku przebiegają jednako. Przyjęcie takiego założenia umożliwia potraktowanie różnicy elementu E na punkcie wiekowym i w obserwatorium, obliczonej dla dowolnego momentu i w danym roku, jako wartości stałej:

$$\Delta E = E_i^{\text{pom}} - E_i^{\text{obs}} = \text{const.} \quad (2)$$

gdzie: E_i^{pom} jest średnią wartością serii pomiarów E na punkcie wiekowym, zredukowanych do momentu i ; E_i^{obs} jest wartością E w obserwatorium w tym samym momencie i .

Zatem różnicę ΔE dla dowolnego momentu i , np. dla momentu pomiaru na punkcie wiekowym, przy założeniu (2) można utożsamić z różnicą

średnich wartości rocznych tego elementu na punkcie wiekowym i w obserwatorium magnetycznym. Średnia wartość roczna na punkcie wiekowym wyrazi się więc wzorem

$$E_e^{\text{pkt}} = E_e^{\text{obs}} + \Delta E, \quad (3)$$

gdzie: E_e^{obs} jest średnią wartością roczną elementu E w obserwatorium, obliczoną na epokę e na podstawie całorocznego zapisu przebiegu elementu E , według wzoru (1); ΔE jest różnicą elementu E na punkcie wiekowym i w obserwatorium, wyznaczoną na podstawie pomiarów na punkcie wiekowym, zgodnie z wzorem (2).

Wartości redukcyjne oblicza się, jak wiadomo, na podstawie pomiarów zmian elementów pola magnetycznego, zapisanych na magnetogramach obserwatorium magnetycznego lub wariograficznej stacji polowej według wzoru

$$\delta E = \varepsilon (h_k - h_i) + q\varepsilon_t (r_k - r_i), \quad (4)$$

gdzie: ε jest wartością skali krzywej E na magnetogramie; h_k i h_i są rzędnymi krzywej E w momencie pomiaru k i we wspólnym momencie odniesienia i , wyrażonymi w milimetrach; q jest współczynnikiem termicznym wariometru E ; ε_t jest wartością skali krzywej termografu t na magnetogramie; r_k i r_i są rzędnymi krzywej t w momencie pomiaru k i we wspólnym momencie i , wyrażonymi w milimetrach.

Jak widać z powyższego wzoru, w celu wprowadzenia poprawek redukcyjnych ze względu na niejednoczesność wykonywania obserwacji, znajomość baz E_B i t_B jest niepotrzebna.

Obliczenie niemierzonego elementu jako funkcji dwóch innych elementów podlegających pomiarom, np. obliczenie Z na podstawie pomierzonych wartości H i F musi być poprzedzone sprowadzeniem obydwóch wielkości — H i F do jednego momentu, za pomocą tego samego wzoru (4).

W wypadku gdy poprawkę redukcyjną trzeba wprowadzać do elementu mierzonego na punkcie, ale nie rejestrowanego w obserwatorium, wielkość tej poprawki oblicza się na podstawie dwóch innych odpowiednich elementów rejestrowanych w obserwatorium. Ma to miejsce na przykład wtedy, gdy na punkcie mierzone jest F , zaś poprawka redukcyjna ma być wyznaczona według magnetogramu, nie zawierającego rejestracji zmian F , a tylko zmiany H i Z . Posługujemy się wówczas wzorem różniczkowym

$$\delta F = \frac{H}{F} \delta H + \frac{Z}{F} \delta Z \quad (5)$$

przy czym δH i δZ wyznaczane są z wzoru (4).

Wiadomo, że zmiany pola magnetycznego w różnych miejscach nie przebiegają jednakowo. Przyjęcie zatem założenia (2) spowoduje, że obli-

czona wartość ΔE będzie zniekształcona. Na wielkość tego zniekształcenia złoży się kilka zjawisk, z których należy wyróżnić przynajmniej dwa: istnienie horyzontalnego gradientu zmian wiekowych na kierunku obserwatorium — punkt oraz różna amplituda długookresowych zmian cyklicznych w ciągu roku na punkcie wiekowym i w obserwatorium.

Ponadto, w rejonach nadmorskich przyczyną różnic przebiegu zmian pola magnetycznego w dwóch miejscach, nawet niezbyt od siebie oddalonych, może być indukowany w wodzie prąd elektryczny. Zjawisko to badał w rejonie Helu w 1959 roku Kozłowski [4]. Stwierdził on, że w pewnych porach doby istnieją różnice w przebiegu zmian pola magnetycznego o okresie około 10 minut i amplitudzie kilku, a nawet kilkunastu gamma, nazwane efektem brzegowym. Różnice o takim okresie rzutują oczywiście przede wszystkim na redukcje momentalne. Ale na przykład w Japonii, Tazima [12] stwierdził różny przebieg zmian pola magnetycznego, zwłaszcza w składowej pionowej, pomiędzy usytuowanymi nad Pacyfikiem obserwatoriami Shimosato a Kakioka, o okresie jednego roku i amplitudzie około 15 gamma. Tazima wiąże to zjawisko z obecnością morskiego prądu Kurosiwo, którego prędkość i temperatura zmieniają się sezonowo.

Można zatem spodziewać się, że zależnie od rozpatrywanego rejonu, oprócz wspomnianego gradientu zmian wiekowych i różnic amplitud zmian cyklicznych, istnieją jeszcze inne zjawiska, związane na przykład z obecnością morza, czy też z aktywnością sejsmiczną rejonu, które również mogą wpływać na zniekształcenie wartości ΔE .

Najprościej jest wyznaczyć i uwzględnić wpływ istniejącego gradientu zmian wiekowych na obliczaną wartość ΔE . Będzie on bowiem funkcją odstępu czasu pomiędzy momentem pomiaru na punkcie wiekowym a epoką opracowania, którą jest zazwyczaj średni moment roku oraz funkcją wielkości różnicy rocznej zmiany wiekowej na punkcie i w obserwatorium. Dla tak małego obszaru Ziemi jak Polska można przyjąć, że funkcja ta jest liniowa i da się wyrazić wzorem

$$W_1 = \frac{\delta \Delta E}{12} \Delta T, \quad (6)$$

gdzie: $\Delta T = T_0 - T$ i jest odstępem czasu, dzielącym moment pomiaru od średniego momentu roku, wyrażonym w miesiącach, zaś $\delta \Delta E$ jest różnicą wariacji rocznej pomiędzy punktem wiekowym a obserwatorium w danej epoce.

Wyznaczenie ΔT nie stanowi problemu. Natomiast w celu wyznaczenia $\delta \Delta E$ najwygodniej sporządzić mapkę izopor na daną epokę na podstawie przybliżonych wartości wariacji rocznych na punktach wiekowych, a następnie z mapki tej wyznaczyć wielkości $\delta \Delta E$ pomiędzy poszczególnymi punktami a obserwatorium. Dokładność takiego wyznaczenia będzie w zupełności wystarczająca.

Wpływ niejednakowego przebiegu długookresowych zmian cyklicznych będzie także funkcją ΔT oraz wielkości i rozkładu powierzchniowego różnic amplitud tych zmian w ciągu roku na badanym obszarze:

$$W_2 = f(\Delta T, \Delta \varphi, \Delta \lambda, \Delta A). \quad (7)$$

Jednakże wyznaczenie W_2 bez dokładnej znajomości wielkości i rozkładu ΔA jest obecnie niemożliwe. Do tego celu niezbędne jest bowiem wykonanie specjalnych, długotrwałych badań, polegających między innymi na przeprowadzeniu w wybranych rejonach rejestracji magnetycznego pola Ziemi w długim okresie czasu. Obecnie można natomiast podjąć jedynie próbę zbadania jakiego rzędu wielkości W_2 mogą zniekształcać wyznaczane ΔE .

W tym celu obliczone zostały dla lat 1968 i 1973 różnice średnich wartości dobowych, pomiędzy obserwatoriami w Belsku i w Helu (kierunek południkowy) oraz Belsk — Niemegk (kierunek równoleżnikowy). W celu wyeliminowania, jako możliwej przyczyny istnienia różnic przebiegu pola magnetycznego między obserwatoriami, dryftów baz, spowodowanych niedoskonałością aparatury, do porównania wzięto okresy czasu, w których pomiary bazowe wykonywane były różnymi magnetometrami i rejestrację przeprowadzano różnymi wariometrami.

Różnice ΔD , ΔH i ΔZ między Belskiem a Helem oraz między Belskiem a Niemegk, jak również wartości D , H i Z w Belsku zostały użyte do sporządzenia wykresów ilustrujących ich przebieg w roku 1968 i 1973.

Otrzymany materiał jest zbyt ubogi, aby można było na jego podstawie sformułować zasady uwzględniania poprawki W_2 . Jednakże analiza nawet takiego materiału pozwala stwierdzić, że wielkość nieuwzględnianej z konieczności poprawki W_2 może osiągnąć, zależnie od rejonu i pory roku, kilka gamma.

Średnią wartość roczną na punkcie wiekowym E_e^{pkt} należy więc obecnie obliczać z wzoru:

$$E_e^{\text{pkt}} = E_e^{\text{obs}} + \Delta E_e + W_1. \quad (8)$$

Jeśli zaś chodzi o poprawkę W_2 , to zanim szczegółowe badania, o których wspomniano wyżej, nie zostaną przeprowadzone, trzeba przyjąć, że W_2 oraz wpływ innych jeszcze nieznanym nam zjawisk, zniekształcających ΔE w skali roku i w skali badanego obszaru, przejawiają się jako składniki błędu przypadkowego wyznaczenia ΔE na punktach wiekowych.

Analiza dokładności wyznaczenia średniej wartości rocznej elementu E na punkcie wiekowym

Średnią wartość roczną elementu E na punkcie wiekowym oblicza się z wzoru (8). Ponieważ wszystkie średnie wartości roczne E dla wszystkich

punktów wiekowych obliczane są względem jednego obserwatorium odniesienia, bieg wiekowy w tym obserwatorium, a więc i średnie wartości roczne E przyjmuje się za bezbłędne. Średni błąd wyznaczenia poprawki W_1 jest tak mały, że może być w rozważaniach pominięty. W związku z tym analizą dokładności objęta zostanie tylko wielkość ΔE .

Redukcję zmierzonego elementu E do średniej wartości rocznej obliczano dwiema metodami — przez bezpośrednie znalezienie różnicy ΔE w momencie pomiaru na punkcie wiekowym oraz przez wykorzystanie magnetogramów wariograficznej stacji polowej w celu wyznaczenia wartości ΔE w wybranych godzinach nocnych. Badanie przeprowadzimy zatem dla obydwóch metod postępowania.

Zbadajmy najpierw dokładność określenia średniej wartości rocznej przy bezpośrednim wyznaczeniu ΔE .

ΔE obliczane jest z wzoru (2), przy czym jest ono średnią wartością arytmetyczną obliczoną z kilku serii wyznaczeń. ΔE jest więc równe:

$$\Delta E = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} (E_i^{\text{pom}} - E_i^{\text{obs}}), \quad (9)$$

gdzie: E_i^{pom} jest średnią arytmetyczną wartości E_k , otrzymanych w jednej serii wyznaczeń E , po uprzednim zredukowaniu ich do jednego momentu i ;

E_i^{obs} jest wartością E w momencie i w obserwatorium odniesienia;
 n jest liczbą serii wyznaczeń E .

Średnia arytmetyczna wartość E obliczona z serii pomiarów wyrazi się wzorem

$$E_i^{\text{pom}} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^{k=m} (E_k - \delta E_k), \quad (10)$$

gdzie: E_k jest wartością E otrzymaną z pojedynczego wyznaczenia;

δE_k jest wyznaczoną z magnetogramu poprawką redukcyjną, wprowadzającą wynik pomiaru E_k do momentu i .

Poprawkę redukcyjną δE wyznacza się z wzoru (4). Pierwszy człon tego wzoru określa wielkość zmiany E zarejestrowanej przez wariograf, drugi człon określa wpływ temperatury na wskazania wariografu. Wzór (4) może być napisany w postaci:

$$\delta E = \varepsilon \Delta h + q \Delta t. \quad (11)$$

Pochodne cząstkowe δE względem kolejnych zmiennych wyrażą się wzorami:

$$\frac{\partial \delta E}{\partial \Delta h} = \varepsilon d \Delta h, \quad (12)$$

$$\frac{\partial \delta E}{\partial \varepsilon} = \Delta h d \varepsilon, \quad (13)$$

$$\frac{\partial \delta E}{\partial q} = \Delta t dq, \quad (14)$$

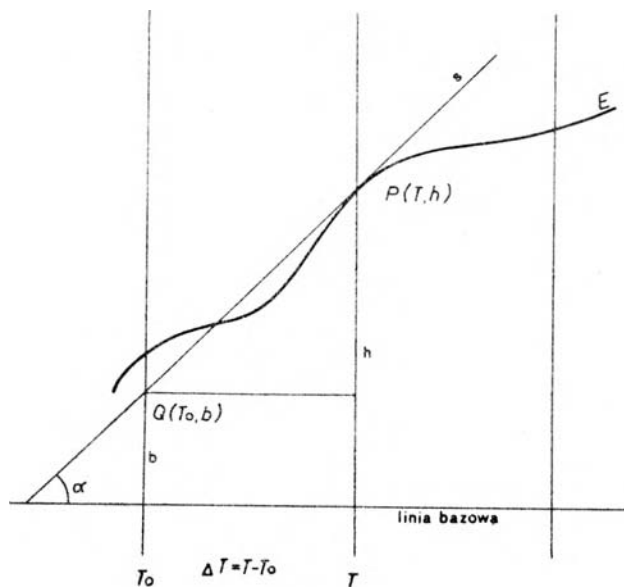
$$\frac{\partial \delta E}{\partial \Delta t} = q dt. \quad (15)$$

Zgodnie z prawem przenoszenia się błędów średni błąd δE będzie równy:

$$m_{\delta E} = \pm \sqrt{\varepsilon^2 m_{\Delta h}^2 + \Delta h^2 m_{\varepsilon}^2 + \Delta t^2 m_q^2 + q^2 m_{\Delta t}^2}, \quad (16)$$

gdzie średnie błędy $m_{\Delta h}$, m_{ε} , m_q i $m_{\Delta t}$ zostały utożsamione z przyrostami zmiennych $d\Delta h$, $d\varepsilon$, dq i $d\Delta t$.

Zbadajmy kolejno wpływ poszczególnych zmiennych na wielkość δE . Dokładność wyznaczenia różnicy rzędnych Δh w momentach T_1 i T_k jest oczywiście zależna od dokładności określenia tych momentów i od szybkości zmian E podczas pomiaru. Na rysunku 1 przedstawiony jest schematycznie fragment magnetogramu, obejmujący jedną godzinę rejestracji. Jeśli przez P oznaczymy punkt przecięcia się krzywej E z prostą T , wyznaczającą moment pomiaru na osi odciętych, którą reprezentuje baza E , zaś przez α kąt, jaki tworzy z osią odciętych styczna s do krzywej E



Rys. 1

w punkcie P , to rzędna punktu P , czyli zmierzona w milimetrach odległość krzywej E od bazy E wyrazi się wzorem:

$$h = \Delta T \operatorname{tg} \alpha + b, \quad (17)$$

gdzie: α — jest miarą szybkości zmian E podczas pomiaru E ;

b — jest rzędną punktu Q , który jest punktem przecięcia się stycznej s z prostą T_0 , wyznaczającą na magnetogramie ostatnią pełną godzinę przed przeprowadzeniem pomiaru;

ΔT — jest odstępem czasu wymierzonym na magnetogramie i jest równe: $T - T_0$.

Gdy w momencie pomiaru α jest równe zeru, to $h = b$.

Pochodna cząstkowa h względem ΔT wyraża się wzorem

$$\frac{\partial h}{\partial \Delta T} = \operatorname{tg} \alpha, \quad (18)$$

który określa zależność średniego błędu wyznaczenia h od dokładności pomiaru ΔT i od szybkości zmian E podczas pomiaru E .

Ze względu na grubość kreski lub znaczka czasowego na magnetogramie, przyłożenie do niego linijki z podziałką milimetrową lub specjalnego szablonu dokładniej niż ze średnim błędem równym $\pm 0,2$ mm jest nie-realne. Również wyznaczenie drogą interpolacji momentu T nie może być wykonane dokładniej niż ze średnim błędem $\pm 0,2$ mm. Sumując wpływy tych dwóch wielkości, składających się na średni błąd wyznaczenia ΔT , otrzymamy:

$$m_{\Delta T} = \pm \sqrt{m_T^2 + m_{T_0}^2} = \pm 0,28 \text{ mm.}$$

Wzór na średni błąd pomiaru h będzie miał postać:

$$m_h = \pm \sqrt{\operatorname{tg}^2 \alpha m_{\Delta T}^2 + m_b^2}, \quad (19)$$

gdzie $m_{\Delta T}$ i m_b zostały utożsamione z przyrostami zmiennych $d\Delta T$ i db . Jeśli przyjmujemy, że α w momencie pomiaru nie przekroczy 60° i że odległości na magnetogramie mierzyć można ze średnim błędem rzędu $\pm 0,2$ mm, średni błąd m_h osiągnie wielkość: $m_h = 0,56$ mm.

Średni błąd $m_h = \pm 0,56$ mm w powyższym wzorze otrzymano przy założeniu, że dokładność określenia momentu pomiaru na magnetogramie wynosi około 1/3 milimetra, co w mierze czasowej, przy najczęściej spotykanej szybkości przesuwu papieru rejestracyjnego w wariografie, równej 20 mm/godz., odpowiada jednej minucie.

Przy małej szybkości zmian E średni błąd określenia momentu pomiaru na magnetogramie ma niewielkie znaczenie. Przy $\alpha = 10^\circ$ — $m_h = \pm 0,21$ mm, przy $\alpha = 20^\circ$ — $m_h = \pm 0,23$ mm. Przy $\alpha > 60^\circ$, czyli przy szybszych zmianach pola magnetycznego, obliczanie wielkości redukcji-

nych jest już niecelowe ze względu na zbyt duży wpływ błędu pomiaru rzędnej h na wielkość poprawki redukcyjnej δE .

Średni błąd wyznaczenia różnicy rzędnych Δh wyrazi się wzorem

$$m_{\Delta h} = \pm \sqrt{2} m_h.$$

Po wstawieniu w miejsce m_h odpowiednio, wyżej obliczonych wartości przy $\alpha = 10^\circ$ i $\alpha = 60^\circ$, otrzymamy:

$$m_{\Delta h} = \pm 0,31 \text{ mm}; \quad m_{\Delta h} = \pm 0,78 \text{ mm}.$$

Wstawiając do wzoru (12) znalezione wartości $m_{\Delta h}$ oraz odpowiednie wartości ε_D , ε_H i ε_Z w obserwatoriach w Świdrze, w Helu, w Belsku i w wariografie Askania, zestawione w tablicy 1, otrzymamy wyrażony w gammach dla H i Z oraz w minutach dla D wpływ średniego błędu pomiarzenia Δh na poprawkę redukcyjną δE .

Wielkości $m_{\Delta h}$ przy $\alpha = 10^\circ$ i $\alpha = 60^\circ$ dla D , H i Z w obserwatoriach: w Świdrze, w Helu, w Belsku i w wariografie Askania zestawione zostały dalej w tablicy 2.

Rozpatrzmy teraz pochodną cząstkową wyrażoną wzorem (13). Wielkość Δh zależy od szybkości zmian E podczas pomiaru i od czasu trwania

Tablica 1

Wariograf	$\varepsilon_D \gamma/\text{mm}$	$\varepsilon_H \gamma/\text{mm}$	$\varepsilon_Z \gamma/\text{mm}$	$\varepsilon_F \gamma/\text{mm}$
obserwatorium w Świdrze	0.7	3.7	4.0	—
obserwatorium w Helu	0.5	2.1	0.9	—
obserwatorium w Belsku	0.36	2.0	2.0	2.0
wariograf Askania	0.5	3.0	3.0	—

pomiaru. Najczęściej jedna seria obserwacji trwa nie dłużej niż $5 \div 6$ minut, co odpowiada dwóm milimetrom na osi odciętych. Przy szybkości zmian E , odpowiadającej kątowi 60° , zmiana h wyniesie 3,5 mm. Czułość wariografu ε jest zazwyczaj wyznaczana z dokładnością 0,01 γ/mm . Na obszarze Polski, na którym H wynosi około 20 000 gamma, 0,01 γ/mm odpowiada dokładności ε_D około 0,002'/mm. Wstawiając te wielkości do wzoru (13) otrzymamy wpływ błędu wyznaczenia ε na poprawkę redukcyjną δE :

$$\text{dla } H \text{ i } Z \quad \frac{\partial \delta E}{\partial \varepsilon} = 0,035 \gamma \quad \text{oraz dla } D \quad \frac{\partial \delta E}{\partial \varepsilon_D} = 0,007'$$

Zastanówmy się teraz ile wynosi wpływ średniego błędu wyznaczenia współczynnika termicznego q oraz średniego błędu określenia z magneto-

gramu zmiany temperatury Δt na wielkość wyrazu redukcyjnego δE . Wahań dobowe temperatury w pawilonie rejestracyjnym w obserwatorium magnetycznym są zazwyczaj niewielkie. Jeśli założymy, że są one rzędu 12°C , to najszybsza zmiana temperatury wyniesie 12°C na 12 godzin. Przy serii pomiarowej trwającej 6 minut, zmiana temperatury wariografu w obserwatorium podczas pomiaru na punkcie wiekowym wyniesie $0,1^{\circ}\text{C}$.

Średni błąd wyznaczenia współczynnika termicznego q jest rzędu $\pm 0,05 \gamma/1^{\circ}$. Wstawiając powyższe wielkości do wzoru (14) otrzymamy

$$\frac{\partial \delta E}{\partial q} = 0,0025 \gamma.$$

Rzadną krzywej termicznej zmierzyć można, podobnie jak rzadną krzywej E przy kącie α bliskim zeru, z dokładnością $0,2 \text{ mm}$. Średni błąd odczytania zmiany temperatury na magnetogramie, utożsamiony z przyrostem $d\Delta t$ będzie zależał zatem tylko od czułości termografu i wyrazi się wzorem

$$m_{\Delta t} = \varepsilon_t 0,2 \text{ mm } 1/2,$$

Wartość skali krzywej termicznej (czułość termografu) na magnetogramie obserwatorium jest zazwyczaj rzędu $0,1^{\circ}/\text{mm}$, zatem $m_{\Delta t} = 0,03^{\circ}\text{C}$. Po wstawieniu tej wielkości do wzoru (15), jak również wartości współczynnika termicznego q wariometru, który w zasadzie nie bywa większy niż $3 \gamma/1^{\circ}\text{C}$, otrzymamy wpływ zmiany temperatury na wielkość poprawki redukcyjnej, który wyniesie:

$$\frac{\partial \delta E}{\partial \Delta t} = 0,09 \gamma.$$

Jeśli podstawimy znalezione wartości kolejnych pochodnych cząstkowych: $\frac{\partial \delta E}{\partial \Delta h}$, $\frac{\partial \delta E}{\partial \varepsilon}$, $\frac{\partial \delta E}{\partial q}$ i $\frac{\partial \delta E}{\partial \Delta t}$ do wzoru (16) otrzymamy średnie błędy wyznaczenia poprawek redukcyjnych δD , δH i δZ z magnetogramów Świdra, Helu, Belska i Askanii.

Z porównania obliczonych pochodnych cząstkowych wynika, że czynnikiem decydującym o wielkości średniego błędu poprawki redukcyjnej δE jest średni błąd pomiaru na magnetogramie odległości krzywej E od bazy E . Wpływ pozostałych czynników jest o rząd lub dwa rzędy mniejszy. Możemy zatem w praktyce utożsamić średni błąd δE z wpływem średniego błędu pomiaru Δh na wielkość δE , a pozostałe składniki pominąć. Przy takim uproszczeniu wielkości $\varepsilon m_{\Delta h}$, zestawione w tablicy 2, będą jednocześnie przedstawiały wartości średnich błędów δE . Średni błąd δF wyznaczony z magnetogramu w Belsku przy $\alpha = 10^{\circ}$ i $\alpha = 60^{\circ}$ wyniesie odpowiednio:

$$\delta F = \pm 0,6 \gamma \text{ i } \delta F = \pm 1,6 \gamma$$

Tablica 2

Wariograf	m_{iD}	m_{iH}	m_{iZ}	m_{iF}
obserwatorium w Świdrze	0.22'—0.55'	1.1—2.9 γ	1.2—3.1 γ	1.2—3.2 γ^*
obserwatorium w Helu	0.16'—0.39'	0.6—1.6 γ	0.3—0.7 γ	0.4—0.9 γ^*
obserwatorium w Belsku	0.11'—0.28'	0.6—1.6 γ	0.6—1.6 γ	0.6—1.6 γ
wariograf Askania	0.16'—0.39'	0.9—2.3 γ	0.9—2.3 γ	0.9—2.3 γ^*

Natomiast w pozostałych obserwatoriach, w których nie prowadzi się rejestracji zmian całkowitego natężenia pola F , średni błąd δF wyrazi się wzorem

$$m_{iF} = \pm \sqrt{\left(\frac{H}{F} m_{iH}\right)^2 + \left(\frac{Z}{F} m_{iZ}\right)^2}, \quad (20)$$

w którym ze względu na małe wartości m_{iH} i m_{iZ} wystarczy wziąć przybliżone wartości H , Z i F .

Obliczone wielkości m_{iF} znajdują się także w tablicy 2, gdzie zostały zaznaczone gwiazdką.

Obliczmy teraz średni błąd pojedynczego wyznaczenia elementu E na punkcie wiekowym.

Jak już podano poprzednio, wartość E obliczona z serii pomiarów wyrazi się wzorem (10). We wzorze tym E_k oznacza wartość E otrzymaną z jednokrotnego pomiaru w serii wyznaczeń E . Ponieważ każdy z wyznaczanych elementów mierzony jest innym magnetometrem, to na błąd pojedynczego wyznaczenia D , H , Z lub F wpłyną różne czynniki, zależne bądź od właściwości użytego instrumentu, bądź też od metody pomiaru. Średnie błędy pojedynczego wyznaczenia poszczególnych elementów D , H , Z i F musimy zatem rozpatrywać osobno.

Średni błąd pojedynczego wyznaczenia deklinacji magnetycznej

Średni błąd pojedynczego wyznaczenia deklinacji magnetycznej wyraża się wzorem

$$m_D = \pm \sqrt{m_{A_a}^2 + m_{A_m}^2}, \quad (21)$$

gdzie m_{A_a} jest średnim błędem wyznaczenia azymutu geograficznego pewnego celu ziemskiego, zaś m_{A_m} — średnim błędem wyznaczenia azymutu magnetycznego tego samego celu ziemskiego.

Średni błąd wyznaczenia azymutu magnetycznego wyrazi się wzorem

$$m_{\Delta_m} = \pm \sqrt{m_{\delta}^2 + m_m^2}, \quad (22)$$

gdzie m_{δ} jest błędem kierunku na cel ziemski a m_m błędem kierunku na północ magnetyczną.

Na dokładność wyznaczenia kierunku na cel ziemski wpływają: błąd centrowania teodolitu nad punktem pomiarowym — m_c , błąd poziomowania teodolitu — m_p , błąd wycelowania na cel — m_z i błąd odczytu koła teodolitu — m_k .

Przy centrowaniu za pomocą pionu zawieszonego na sznurku z dokładnością 1 cm przy celu ziemskim odległym o 1 km, $m_c = \pm 0,03'$.

Wpływ błędu poziomowania na wyznaczenie kierunku wyraża się wzorem:

$$m_p = \lambda \operatorname{tg} \beta,$$

gdzie λ jest kątem odchylenia od pionu osi obrotu teodolitu, zaś β — kątem nachylenia osi celowej lunety do poziomu. Ponieważ luneta w teodolicie magnetycznym Askania może być nachylana do poziomu tylko o 15° , a przewaga libeli nasadkowej wynosi $30'$, przy poziomowaniu przeprowadzonym z dokładnością $1/2$ działki libeli, wpływ średniego błędu poziomowania na wyznaczenie jednego kierunku wyniesie: $m_p = 0,07'$.

Średni błąd wycelowania na cel ziemski wyraża się wzorem

$$m_z = \omega : G,$$

gdzie ω jest rozdzielczością oka ludzkiego, zaś G powiększeniem lunety. Przyjmuje się, że $\omega = 60''$. Ponieważ teodolit Askania ma lunetę o pięciokrotnym powiększeniu, średni błąd celowania wyniesie $m_z = \pm 0,2'$.

Użyte teodolity mają szklane koła poziome z podziałem stopniowym oraz po dwa mikroskopy odczytowe ze skalą podzieloną na 30 działek. Nominalna zatem dokładność teodolitu wynosi $2'$. Jeśli założymy, że obserwator jest w stanie oszacować $0,1$ działki mikroskopu, możemy przyjąć, że pojedynczy odczyt koła będzie wykonany ze średnim błędem $\pm 0,2'$. Ponieważ odczytuje się zawsze obydwie mikroskopy, średni błąd odczytu koła wyniesie $m_k = \pm 0,14'$.

Podczas pojedynczego wyznaczenia azymutu magnetycznego, na cel ziemski celuje się dwukrotnie — przed i po obserwacjach magnesów. Średni błąd kierunku na cel ziemski wyrazi się więc wzorem

$$m_{\delta} = \pm \sqrt{m_c^2 + m_p^2 + \frac{m_z^2}{2} + \frac{m_k^2}{2}}. \quad (23)$$

Po podstawieniu do tego wzoru wyżej wyprowadzonych wartości średnich błędów otrzymamy: $m_{\delta} = 0,19'$.

Na dokładność wyznaczenia kierunku na północ magnetyczną błąd centrowania i błąd poziomowania teodolitu nie ma wpływu

Średni błąd wycelowania na magnes wyniesie podobnie jak w wypadku celu ziemskiego: $m_M = \pm 0,2'$.

Tak samo średni błąd odczytu koła poziomego: $m_k = \pm 0,14'$.

Na dokładność wyznaczenia azymutu magnetycznego wpływają jeszcze dwa czynniki: zmienność parametrów fizycznych nici podtrzymującej magnes oraz zmiana deklinacji magnetycznej podczas pomiaru. Pierwszy z nich — m_s , na podstawie wieloletnich doświadczeń można oszacować na $\pm 0,2'$, zaś drugi — m_D , jak wyżej już wykazano, może osiągnąć średnio $\pm 0,4'$.

Magnesy obserwuje się czterokrotnie (dwa magnesy w dwóch położeniach każdy) wobec czego średni błąd kierunku na północ magnetyczną wyrazi się wzorem

$$m_m = \pm \frac{1}{2} \sqrt{m_M^2 + m_k^2 + m_s^2 + m_D^2}. \quad (24)$$

Kładąc odpowiednie wartości w miejsce m_M , m_k , m_s i m_D otrzymamy: $m_m = \pm 0,26'$. Przy $\alpha = 0^\circ$, $m_m = \pm 0,16'$.

Wstawiając do wzoru (22) wartości m_δ i m_m obliczone z wzorów (23) i (24) otrzymamy średni błąd wyznaczenia azymutu magnetycznego celu ziemskiego równy:

$$m_{A_m} = \pm 0,32'. \text{ Przy } \alpha = 0^\circ \text{ wyniesie on } \pm 0,25'.$$

Średni błąd wyznaczenia azymutu geograficznego z Polaris na punktach wiekowych wynosi: $m_{A_1} = \pm 3''$, co w porównaniu z wartością m_{A_m} jest wielkością małą, która może być w obliczaniu średniego błędu deklinacji pominięta. Błąd m_D utożsamia się zatem z błędem m_{A_m} i wyniesie również:

$$m_D = \pm 0,32'.$$

Wyznaczenia azymutu geograficznego ze Słońca dokonuje się ze średnim błędem rzędu $\pm 15''$, który przy obliczaniu średniego błędu wyznaczenia deklinacji magnetycznej musi być uwzględniony. m_D wyniesie wówczas:

$$m_D = \pm 0,41'.$$

Przy pomiarze D obserwuje się dwukrotnie każdy z dwóch magnesów o różnym momencie magnetycznym. Mimo to, że w rezultacie otrzymuje się jedną wartość D , obserwacje te traktuje się jako serię wyznaczeń D .

Średni błąd serii utożsamia się więc z obliczonym wyżej (dla $\alpha = 60^\circ$) średnim błędem pojedynczego wyznaczenia D i wyniesie: $m_D = \pm 0,32'$.

Średni błąd pojedynczego wyznaczenia natężenia składowej poziomej H

Nie będziemy analizować pomiarów z 1957 roku, wykonywanych metodą Gaussa-Lamonta, która od tamtej pory nie była w kraju stosowana. (Analiza dokładności pomiaru tą metodą zawarta jest w podręczniku Janowskiego). Wszystkie następne pomiary H wykonywane były magnetometrami kwarcowymi QHM lub HTM, nasadzonymi na ten sam teodolit magnetyczny Askania. H obliczane było z równania QHM, które po odlogarytmowaniu i pewnych przekształceniach upraszczających ma postać:

$$H = \frac{A'}{\sin \Theta} (1 + B' \Delta t) (1 + C' \cos \Theta H_0)^{-1}, \quad (25)$$

gdzie: A' jest stałą A po odlogarytmowaniu, B' jest współczynnikiem termicznym magnetometru B po odlogarytmowaniu i C' — współczynnikiem indukcyjnym C po odlogarytmowaniu.

Pochodne cząstkowe względem zmiennych podlegających pomiarom wyrażą się wzorami:

$$\frac{\partial H}{\partial \Theta} = -H \operatorname{ctg} \Theta d\Theta, \quad (26)$$

$$\frac{\partial H}{\partial \Delta t} = HB' d\Delta t, \quad (27)$$

Ze względu na to, że drugi nawias we wzorze (25) jest bliski jedności, średni błąd obliczenia poprawki indukcyjnej jako znikomo mały nie będzie uwzględniony w dalszej analizie.

Średni błąd pojedynczego wyznaczenia H wyrazi się wzorem

$$m_{H_k} = \pm \sqrt{H^2 \operatorname{ctg}^2 \Theta m_{\Theta}^2 + H^2 B'^2 m_{\Delta t}^2}, \quad (28)$$

gdzie średnie błędy m_{Θ} i $m_{\Delta t}$ zostały utożsamione z przyrostami $d\Theta$ i $d\Delta t$.

Ponieważ w celu wyznaczenia H mierzy się kąt pomiędzy dwoma położeniami magnesu zawieszonego na nici, błąd centrowania ani błąd poziomowania teodolitu na dokładność pomiaru tego kąta nie wpływa.

Średni błąd wycelowania na magnes m_M i średni błąd odczytu koła m_k przyjmujemy tak samo, jak w wypadku pomiaru deklinacji, tzn. równe:

$$m_M = \pm 0,20' \quad \text{ i } \quad m_k = \pm 0,14'.$$

Wielkość zaobserwowanego kąta może być zniekształcona na skutek zmiany deklinacji magnetycznej i zmiany H , jakie zaszły w trakcie jego pomiaru. Odpowiednią poprawkę do kąta Θ — $\delta\Theta$, jak również poprawkę do wyznaczanego H — δH , oblicza się z wzoru (4). Na podstawie tablicy 2 przyjmijmy przeciętne wielkości średnich błędów poprawek redukcyjnych, otrzymanych w obserwatoriach przy $\alpha = 60^\circ$, równe:

$$m_{iD} = \pm 0,4' \quad \text{ i } \quad m_{iH} = \pm 2,3 \gamma.$$

W celu wyznaczenia wpływu błędu poprawki δH na kąt Θ przeliczmy poprawkę δH na odpowiadającą jej zmianę kąta Θ , którą oznaczmy przez δH .

Przeliczenia można dokonać posługując się przekształconym wzorem (26):

$$\delta H_{\Theta} = - \frac{\partial H}{H \operatorname{ctg} \Theta} \varrho'. \quad (29)$$

Średni błąd $m_{iH_{\Theta}}$ wyrazi się wtedy wzorem

$$m_{iH_{\Theta}} = \pm \frac{\varrho'}{H \operatorname{ctg} \Theta} m_{iH}. \quad (30)$$

Kładąc $H = 19\,000 \gamma$, $\Theta = 55^\circ$ oraz $m_{iH} = \pm 2,3 \gamma$ otrzymamy

$$m_{iH_{\Theta}} = \pm 0,59'.$$

Ponieważ dla pojedynczego wyznaczenia H trzeba zaobserwować magnes w dwóch położeniach, różnych o 2Θ , wzór na błąd pomiaru Θ będzie miał postać:

$$m_{\Theta} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{2m_M^2 + 2m_K^2 + m_{iH}^2 + m_{iD}^2}. \quad (31)$$

Wstawiając do tego wzoru odpowiednie wartości poszczególnych średnich błędów m otrzymamy:

$$m_{\Theta} = \pm 0,38'.$$

W wypadku gdy D i H podczas pomiaru nie ulegają zmianie, czyli gdy $\alpha = 0^\circ$, $m_{\Theta} = \pm 0,17'$.

Jeśli do wzoru (26) wstawimy przybliżoną wartość natężenia składowej poziomej H dla Polski, równą $19\,000 \gamma$, przybliżoną wielkość kąta Θ , równą 55° , oraz otrzymamy wyżej średni błąd pomiaru Θ przy $\alpha = 60^\circ$, równy $\pm 0,38'$, znajdziemy wartość pochodnej cząstkowej H względem Θ . Wartość tej pochodnej wyrażona w gammach wyniesie:

$$\frac{\partial H}{\partial \Theta} = 1,5 \gamma.$$

Przy $\alpha = 0^\circ$ wartość tej pochodnej wyniesie $0,66 \gamma$.

Rozpatrzmy teraz wpływ błędu pomiaru temperatury. Najmniejsza działka skali termometru wynosi $0,2^\circ\text{C}$. Szacując $1/4$ działki można odczytać wskazanie termometru z dokładnością $\pm 0,05^\circ\text{C}$. Termometr wskazuje jednak temperaturę wnętrza instrumentu a nie temperaturę magnesu. Jeśli założymy, że temperaturę magnesu można określić na pewno z dokładnością $0,1^\circ\text{C}$ to przy wielkości B' rzędu $0,0004$ oraz H równym $19\,000 \gamma$, otrzymamy na podstawie wzoru (27):

$$\frac{\partial H}{\partial \Delta t} = 0,76 \gamma.$$

Zgodnie zatem z wzorem (28), średni błąd pojedynczego wyznaczenia H wyniesie:

Przy $\alpha = 60^\circ$ — $m_H = \pm 1,7 \gamma$ zaś przy $\alpha = 0^\circ$ — $m_H = \pm 1,0 \gamma$.

Na serię wyznaczeń H składają się po dwa wyznaczenia, wykonane dwoma magnetometrami. Z czterech zatem par obserwacji magnesu oblicza się niezależnie kąt Θ , otrzymując w rezultacie cztery niezależne wyznaczenia H , które są następnie redukowane do wspólnego momentu przez wprowadzenie poprawek δH .

Błąd średni serii wyznaczenia H wyrazi się więc wzorem:

$$m_{H_i} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{m_{H_k}^2 + m_{H_l}^2}. \quad (32)$$

Po wstawieniu obliczonych już poprzednio odpowiednich wartości m_{H_k} i m_{H_l} otrzymamy:

dla $\alpha = 60^\circ$ — $m_{H_i} = \pm 1,4 \gamma$ oraz dla $\alpha = 0^\circ$ — $m_{H_i} = \pm 0,5 \gamma$.

Średni błąd pojedynczego wyznaczenia natężenia składowej pionowej Z

Podobnie jak w wypadku H , wyznaczeń Z wykonanych w 1957 roku analizować nie będziemy. Otrzymano je drogą pośrednią, przez obliczenie na podstawie rezultatów pomiarów natężenia składowej poziomej i inklinacji magnetycznej i więcej tym sposobem wyznaczane nie były. Wszystkie następne wyznaczenia Z wykonywane były za pomocą pomiarów magnetometrami BMZ. Natężenie składowej pionowej obliczano z równania magnetometru. Ponieważ Z_T znajdujące jest w tabeli podanej w certyfikacie instrumentu jako funkcja kąta φ , odczytanego na kole pionowym dżysku, równanie magnetometru można napisać w postaci:

$$Z_k = Z_C + K \sin \varphi - at - 2 a \Delta t, \quad (33)$$

gdzie K jest maksymalnym polem pochodzącym od magnesu obrotowego i oddziałującym na czujnik magnetometru. K maksymalne, równe około 1200 gamma osiąga się przy pionowym położeniu magnesu obrotowego, czyli przy $\varphi = 90^\circ$. Pole pochodzące od magnesów dodatkowych pomijamy, gdyż magnesy dodatkowe w magnetometrze nowego typu nie potrzebują być w zasadzie używane. Błąd stałej Z_C jest poprawką magnetometru i jako błąd systematyczny rozpatrywany nie będzie.

Pochodne cząstkowe Z względem zmiennych podlegających pomiarom, a więc φ i t wyrażą się wzorami:

$$\frac{\partial Z}{\partial \varphi} = K \cos \varphi \quad (34)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = a dt, \quad (35)$$

$$\frac{\partial Z}{\partial \Delta t} = 2 a d\Delta t. \quad (36)$$

Średni błąd pojedynczego wyznaczenia Z wyrazi się wzorem:

$$m_{Z_k} = \pm \sqrt{K^2 \cos^2 \varphi m_\varphi^2 + a^2 m_t^2 4 a^2 m_{\Delta t}^2}, \quad (37)$$

gdzie średnie błędy m_φ , m_t i $m_{\Delta t}$ zostały utożsamione z przyrostami $d\varphi$, dt i $d\Delta t$.

Zbadajmy najpierw wpływ dokładności pomiaru kąta φ na wyznaczaną wartość Z . Na dokładność pomiaru kąta φ wpływają:

- m_p — błąd poziomowania magnetometru,
 - m_d — błąd określenia miejsca zerowego położenia czujnika,
 - m_M — błąd ustawienia indeksu na działce zerowego położenia czujnika,
 - m_k — błąd odczytu dysku,
 - m_r — błąd wyznaczenia poprawki zera dysku,
- m_k oraz m_r można od razu wyrazić w mierze kątowej:

$$m_k = \pm 0,1^\circ \quad \text{ i } \quad m_r = \pm 0,1^\circ.$$

Natomiast m_p , m_d i m_M prościej wyrazić najpierw w gammach.

Przy spoziomowaniu magnetometru w położeniu „N” z dokładnością 0,1 działki libeli średni błąd poziomowania m_p wyniesie $\pm 0,2$ gamma. Wartość jednej działki skali lunety w położeniu magnetometru „N” wynosi około 20 gamma, zatem przy ustawianiu indeksu na skali z dokładnością 0,1 działki skali m_d i m_M wyniosą po ± 2 gamma. W celu określenia wpływu m_p , m_d i m_M na dokładność pomiaru kąta φ należy te wielkości wyrazić w mierze kątowej. Maksymalną zmianę Z_T na 1° zmiany położenia dysku otrzymamy kładąc we wzorze (34) $\varphi = 0$.

Wynika z tego, że 2γ odpowiada zmianie kąta φ o $0,1^\circ$. Średni błąd wyznaczenia φ przy pojedynczym pomiarze Z wyrazi się więc wzorem:

$$m_\varphi = \pm \sqrt{m_p^2 + m_M^2 + m_k^2 + m_d^2 + m_r^2}. \quad (38)$$

Po podstawieniu do tego wzoru odpowiednich wartości średnich błędów m , omówionych wyżej, otrzymamy $m_\varphi = \pm 0,2^\circ$.

Temperaturę magnesu odczytuje się z dokładnością $0,02^\circ\text{C}$, Δt oblicza się z dokładnością $0,01^\circ/\text{min.}$, zaś a wynosi około 15. Wstawiając powyższe wielkości do wzorów (35) i (36) otrzymamy:

$$\frac{\partial Z}{\partial t} = 0,3 \gamma \quad \text{ oraz } \quad \frac{\partial Z}{\partial \Delta t} = 0,3 \gamma.$$

W celu znalezienia m_z obliczone wartości: $\frac{\partial Z}{\partial \varphi}$ wyrażone w gammach oraz $\frac{\partial Z}{\partial t}$ i $\frac{\partial Z}{\partial \Delta t}$ wstawimy do wzoru (37). Średni błąd pojedynczego pomiaru Z_k wyniesie wówczas:

$$m_{Z_k} = \pm 4 \gamma.$$

Średni błąd serii wyznaczeń Z_i składającej się z 6 obserwacji wyrazi się wzorem:

$$m_{Z_i} = \pm \sqrt{\frac{m_{Z_k}^2 + m_{iZ}^2}{6}}.$$

Przy $\alpha = 60^\circ$ — $m_{Z_i} = \pm 1,9 \gamma$, zaś przy $\alpha = 0^\circ$ — $m_{Z_i} = \pm 1,6 \gamma$.

Średni błąd pojedynczego wyznaczenia natężenia pola magnetycznego Ziemi F

Średni błąd pojedynczego wyznaczenia F za pomocą magnetometru protonowego PMP wynosi: $m_F = \pm 0,5 \gamma$. Poprawek redukcyjnych tutaj się nie wprowadza ze względu na to, że pomiary magnetometrem protonowym przebiegają bardzo szybko. Sześć odczytów nie zajmuje więcej niż 30 sekund, wobec czego przyjmuje się, że zostały wykonane w jednym, środkowym momencie serii. Ponieważ pole magnetyczne może jednakże w trakcie pomiarów ulegać zmianom, te sześć odczytów należałoby traktować raczej jako sprawdzenie, czy zmiany pola nie są za szybkie, jak również czy magnetometr działa prawidłowo i czy nie ma jakiś sztucznych zakłóceń pola magnetycznego podczas pomiaru. W związku z tym, błąd średni serii wyznaczeń F należałoby raczej przyjąć jako także równy $\pm 0,5 \gamma$.

Średni błąd wyznaczenia wartości elementu E z magnetogramu w obserwatorium odniesienia

Wartość E_i^{obs} w obserwatorium odniesienia oblicza się z wzoru:

$$E_i^{\text{obs}} = E_B + h\varepsilon + qt, \quad (39)$$

gdzie: $t = t_B + \varepsilon_i r_t$ (t_B — wartość bazy termografu).

Pochodne E_i^{obs} względem wszystkich zmiennych wyrażą się wzorami:

$$\frac{\partial E}{\partial B_E} = dE_B, \quad (40)$$

$$\frac{\partial E}{\partial h} = \varepsilon dh, \quad (41)$$

$$\frac{\partial E}{\partial \varepsilon} = h d\varepsilon, \quad (42)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} = q dt, \quad (43)$$

$$\frac{\partial E}{\partial q} = t dq. \quad (44)$$

Utożsamiając przyrosty dB , dh , $d\varepsilon$, dt i dq ze średnimi błędami B , h , ε , t i q błąd średni E_i^{obs} wyrazi się wzorem:

$$m_{E_i}^{\text{obs}} = \pm \sqrt{m_B^2 + \varepsilon^2 m_h^2 + h^2 m_\varepsilon^2 + q^2 m_t^2 + t^2 m_q^2}. \quad (45)$$

Omówmy teraz poszczególne składniki wyrażenia znajdującego się pod pierwiastkiem:

Średni błąd bazy m_B podawany jest przez obserwatorium i nie przekracza zazwyczaj w deklinacji $\pm 0,1'$ a w H i w Z $\pm 1 \gamma$.

Jak już wykazano poprzednio, średni błąd odczytania h na magnetogramie (przy $\alpha = 60^\circ$) osiąga $\pm 0,56$ mm. Po pomnożeniu m_h przez odpowiednie wartości ε wzięte z tablicy 1, otrzymamy wpływ błędu pomiaru h na wielkość E_i^{obs} (tabl. 3).

Tablica 3

Wariograf	$\varepsilon_D \cdot m_h$	$\varepsilon_H \cdot m_h$	$\varepsilon_Z \cdot m_h$	$\varepsilon_F \cdot m_h$
obserwatorium w Świdrze	$+0,39'$	2,0 γ	2,2 γ	—
obserwatorium w Helu	$+0,28'$	1,2 γ	0,5 γ	—
obserwatorium w Belsku	$+0,20'$	1,1 γ	1,1 γ	1,1 γ
wariograf Askania	$+0,28'$	1,7 γ	1,7 γ	—

W celu obliczenia $h m_\varepsilon$ przyjmijmy, że $h = 100$ mm. Taka odległość krzywej E od bazy nie jest rzadkością, zwłaszcza w wariografach z jedną linią bazową dla wszystkich rejestrowanych elementów. Na przykład w wariografie Askania krzywa H przebiega w pobliżu przeciwnej krawędzi papieru rejestracyjnego niż linia bazowa.

Jeśli podobnie jak już poprzednio przyjęliśmy, dla H i Z : $m_\varepsilon = \pm 0,01$ γ/mm i dla D : $m_\varepsilon = \pm 0,002'$ / mm , to wyrażenie $h m_\varepsilon$ będzie równe:

$$\text{dla } H \text{ i } Z: h m_\varepsilon = \pm 1 \gamma \text{ oraz dla } D: h m_\varepsilon = 0,2'.$$

Wpływ błędu określenia temperatury będzie zależeć przede wszystkim od błędu określenia bazy termografu. Jeżeli w momencie zakładania lub

zdejmowania papieru rejestracyjnego temperatura wnętrza wariografu zostanie odczytana ze średnim błędem $\pm 0,5^\circ\text{C}$, to z takim samym co najmniej błędem zostanie określona temperatura wariografu dla momentu, dla którego odczytuje się krzywą. Jeżeli zatem wstawimy do wzoru (43) $dt = 0,5^\circ\text{C}$ oraz, tak jak poprzednio, $q = 3 \gamma/1^\circ\text{C}$, to otrzymamy:

$$q m_t = \pm 1,5 \gamma.$$

Wyraz tm_q będzie zależał głównie od różnicy pomiędzy temperaturą odczytaną na magnetogramie a temperaturą, dla której poprawka termiczna jest równa zeru — najczęściej jest to 0°C . Wariometr pracuje zwykle w temperaturze około 20°C . Podstawiając zatem $t = 20^\circ$ oraz $m_q = 0,05 \gamma/1^\circ$ otrzymamy:

$$t m_q = \pm 1 \gamma.$$

W niektórych obserwatoriach, między innymi i w Belsku, zainstalowane są specjalne urządzenia, pozwalające utrzymać stałą temperaturę wewnątrz pawilonu rejestracyjnego z dokładnością $\pm 1^\circ\text{C}$. Jeżeli ponadto współczynniki termiczne wariografów są małe, np. rzędu $1 \gamma/1^\circ\text{C}$, to w praktyce wpływ temperatury na wskazania wariometrów może być pominięty. Na wskazania wariometru D temperatura oczywiście nie wpływa.

Średnie błędy elementów D , H i Z obliczonych z magnetogramów Świdra, Helu i Belska otrzymamy po wstawieniu do wzoru (45) odpowiednich wartości omówionych wyżej. W tablicy 4 zestawione zostały wielkości $m_{E_i}^{\text{obs}}$ dla tych obserwatoriów, przy $\alpha = 60^\circ$.

Tablica 4

Wariometr	$m_{D_i}^{\text{obs}}$	$m_{H_i}^{\text{obs}}$	$m_{Z_i}^{\text{obs}}$	$m_{F_i}^{\text{obs}}$
obserwatorium w Świdrze	0,45'	3,0 γ	3,2 γ	—
obserwatorium w Helu	0,36'	2,6 γ	2,3 γ	—
obserwatorium w Belsku	0,30'	1,8 γ	1,8 γ	1,8 γ

Mając $m_{E_i}^{\text{pom}}$ i $m_{E_i}^{\text{obs}}$ możemy wreszcie obliczyć średni błąd pojedynczego wyznaczenia ΔE_i , który wyrazi się wzorem:

$$m_{\Delta E_i} = \pm \sqrt{m_{E_i}^2{}^{\text{pom}} + m_{E_i}^2{}^{\text{obs}}}. \quad (46)$$

W tablicy 5 zestawiono wartości $m_{\Delta E}$ obliczone w odniesieniu do obserwatoriów w Świdrze, Helu i Belsku.

Tablica 5

Obserwatorium odniesienia	$m_{\Delta D}$	$m_{\Delta H}$	$m_{\Delta Z}$	$m_{\Delta F}$
w Świdrze	0,55'	3,3 γ	3,7 γ	—
w Helu	0,48'	3,0 γ	3,0 γ	—
w Belsku	0,44'	2,3 γ	2,6 γ	1,8 γ

Średni błąd wyznaczenia ΔE będzie równy:

$$m_{\Delta E} = \frac{m_{\Delta E_i}}{\sqrt{n}},$$

gdzie n jest liczbą serii pomiarów.

W myśl przyjętych założeń technicznych wyznaczenie ΔE na punkcie wiekowym uznaje się za prawidłowe o ile zostanie wykonane na tym punkcie w przeciągu trzech dni co najmniej cztery pary pomiarów, po jednej parze rano i wieczorem. Dzieląc zatem otrzymane z wzoru (46) $m_{\Delta D_i}$, $m_{\Delta H_i}$, $m_{\Delta Z_i}$ i $m_{\Delta F_i}$ przez pierwiastek z ośmiu, otrzymanym przeciętnie:

$$m_{\Delta D} = \pm 0,18'; \quad m_{\Delta H} = \pm 1,1 \gamma; \quad m_{\Delta Z} = \pm 1,1 \gamma \text{ i } m_{\Delta F} = \pm 0,7 \gamma.$$

Dokładność średniej wartości rocznej E przy wykorzystaniu magnetogramów wariograficznej stacji polowej

ΔE wyrazi się w tym wypadku podobnym wzorem co poprzednio:

$$\Delta E = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{k=n} (E_k^{\text{obl}} - E_k^{\text{obs}}) \quad (47)$$

z tym, że E_k^{obl} jest obliczoną na podstawie magnetogramu stacji polowej wartością E w k -tym momencie nocy lub średnią wartością k -tej godziny nocnej na punkcie wiekowym, zaś E_k^{obs} jest odpowiednią wartością E w obserwatorium odniesienia. E_k^{obl} i E_k^{obs} oblicza się z wzoru (39). Bazę magnetogramu stacji polowej wyznacza się na podstawie pomiarów wykonanych na punkcie wiekowym według odpowiednio przekształconego wzoru (39).

Wzór na średni błąd jednokrotnego wyznaczenia bazy będzie miał postać:

$$m_{B_i} = \pm \sqrt{m_{E_{\text{pom}}}^2 + \epsilon^2 m_h^2 + h^2 m_\epsilon^2 + q^2 m_t^2 + t^2 m_q^2}, \quad (48)$$

gdzie: $m_{E_{\text{pom}}}$ — zostało obliczone wyżej i wynosi: $m_D = \pm 0,32'$; $m_H = \pm 1,4 \gamma$ a $m_Z = \pm 1,9 \gamma$;

εm_h — odnosi się do wariografu Askania i zgodnie z tablicą 3 wynosi $0,28'$ dla D oraz po $1,7 \gamma$ dla H i Z ;

hm_z — przyjmujemy podobnie jak we wzorze (45) równe $0,2'$ dla D oraz po 1γ dla H i Z ;

qm_t i tm_q przyjmujemy też podobnie jak we wzorze (45) równe odpowiednio $1,5 \gamma$ i $1,0 \gamma$ dla H i dla Z . Na wskazania wariografu D temperatura nie ma wpływu.

Po wstawieniu do wzoru (48) odpowiednich wartości w miejsce wyrażeń znajdujących się pod pierwiastkiem, otrzymamy:

dla D : $m_B = \pm 0,47'$ oraz dla H : $m_B = \pm 2,9 \gamma$ i dla Z : $m_B = \pm 3,1 \gamma$.

Jeśli bazy wariografu połowego wyznaczone zostaną na punkcie wiekowym na podstawie ośmiu serii pomiarów, to średnie błędy wyznaczenia baz wyniosą:

dla D : $m_B = \pm 0,17'$ oraz dla H : $m_B = \pm 1,0 \gamma$ i dla Z : $m_B = \pm 1,1 \gamma$, czyli po zaokrągleniu, tyle samo co w obserwatorium.

Średnie błędy obliczenia E_K^{obl} na punkcie wiekowym w godzinach nocnych można zatem wyrazić również wzorem (45), a ich wielkości będą takie same, jak otrzymane w obserwatorium (tabl. 4).

Średni błąd pojedynczego wyznaczenia ΔE w godzinach nocnych oblicza się podobnie jak w metodzie bezpośredniej z wzoru (46), z tym, że w miejsce $m_{E_{pom}}$ wstawia się $m_{E_{obl}}$. Po wstawieniu odpowiednich wartości $m_{E_K^{obl}}$ i $m_{E_K^{obs}}$ otrzymamy średnie błędy pojedynczego wyznaczenia ΔE_K w godzinach nocnych. Zestawione one zostały w tablicy 6.

Tablica 6

Obserwatorium odniesienia	$m_{\Delta D}$	$m_{\Delta H}$	$m_{\Delta Z}$
w Świdrze	$0.64'$	$4,2 \gamma$	$4,5 \gamma$
w Helu	$0.50'$	$3,6 \gamma$	$3,2 \gamma$
w Belsku	$0.42'$	$2,5 \gamma$	$2,5 \gamma$

Średni błąd wyznaczenia ΔE będzie równy:

$$m_{\Delta E} = \pm \frac{m_{\Delta E_K}}{\sqrt{n}},$$

gdzie n jest ilością pojedynczych wyznaczeń ΔE .

Jeśli do obliczenia ΔE weźmiemy po cztery wartości momentalne lub po cztery średnie wartości godzinne E z trzech nocy, to średnie błędy wyznaczenia ΔE należy obliczyć przy $n = 12$. Wówczas przeciętne wartości

$m_{\Delta D}$, $m_{\Delta H}$ i $m_{\Delta Z}$ dla trzech polskich obserwatoriów, wymienionych w tablicy 6, wyniosą odpowiednio:

$$m_{\Delta D} = \pm 0,15'; \quad m_{\Delta H} = \pm 1,0 \gamma \quad \text{i} \quad m_{\Delta Z} = \pm 1,0 \gamma.$$

Jak widać z powyższych rozważań średnie błędy wartości ΔE uzyskane metodą bezpośredniego wyznaczenia ΔE i przy wykorzystaniu wariacyjnej stacji polowej są praktycznie takie same. Zbieżność ta jest jednak pozorna. Należy bowiem pamiętać, że rozważania, dotyczące bezpośredniego wyznaczenia ΔE przeprowadzone zostały przy założeniu, iż przebieg zmian pola magnetycznego na punkcie wiekowym i w obserwatorium odniesienia jest jednakowy (równoległy). Założenie to przyjmuje się z konieczności, ale jak wiadomo, przebieg zmian pola może być niejednakowy, zwłaszcza w okresach wzmożonej aktywności magnetycznej i w miejscach bardziej od siebie oddalonych. Rozważania wyżej przeprowadzone nie uwzględniają różnic w przebiegu zmian pola, które mogą być nawet dość znaczne. Przede wszystkim krótkookresowe zmiany pola magnetycznego pochodzenia zewnętrznego, związane z różnym przewodnictwem prądu elektrycznego górnych warstw skorupy ziemskiej są różne.

Badania nad przebiegiem tych krótkookresowych zmian prowadzone są w wielu krajach. Mają one na celu nie tylko ustalenie rozkładu i wielkości różnic przebiegu pola magnetycznego na badanym obszarze, lecz także zebranie bardzo cennych danych odnośnie budowy geologicznej skorupy ziemskiej. Są one bowiem najprostszą metodą głębokich sondowań geomagnetycznych.

W Stanach Zjednoczonych badania takie przeprowadzali w czerwcu 1969 roku Camfield i Gough, którzy wyniki prac opublikowali w roku 1975 [1]. Porównali oni przebiegi dobowych wariacji pola magnetycznego, zarejestrowane na 46 stacjach polowych usytuowanych w północno-zachodniej części Stanów Zjednoczonych i w południowo-zachodniej Kanadzie. Otrzymane wyniki posłużyły im do uzupełnienia interpretacji budowy geologicznej tych rejonów.

W Japonii, w 1961 roku, przy okazji badania zmian wiekowych Harada [2] stwierdził różnice w przebiegu pola magnetycznego pomiędzy pięcioma japońskimi obserwatoriami rzędu $4 \div 8$ gamma.

W Polsce, w latach 1959—1961 Małkowski [10] oraz Jankowski i Królikowski [3], przeprowadzali badania rozkładu i morfologii zmian zatokowych wzdłuż tak zwanej linii Wiesego [16]. Okazało się, że zmiany zatokowe, zwłaszcza w składowej Z nie tylko nie są jednakowe ale w różnych, niezbyt nawet oddalonych od siebie miejscach mają różnoimienne znaki.

Porównanie magnetogramów z Belska i ze stacji polowej w Kołobrzegu, nawet w dniu magnetycznie spokojnym (6.VI.1971 r.) także wyraźnie wskazuje na istnienie tych różnic, które osiągają nawet kilkanaście gam-

ma. Na rysunku 2 przedstawione są w postaci wykresu różnice przebiegu D , H i Z pomiędzy Belskiem i Kołobrzegiem. Pomiary rzędnych odpowiednich krzywych na magnetogramach obydwóch obserwatoriów wykonane zostały w tych samych momentach, co każde 5 minut.

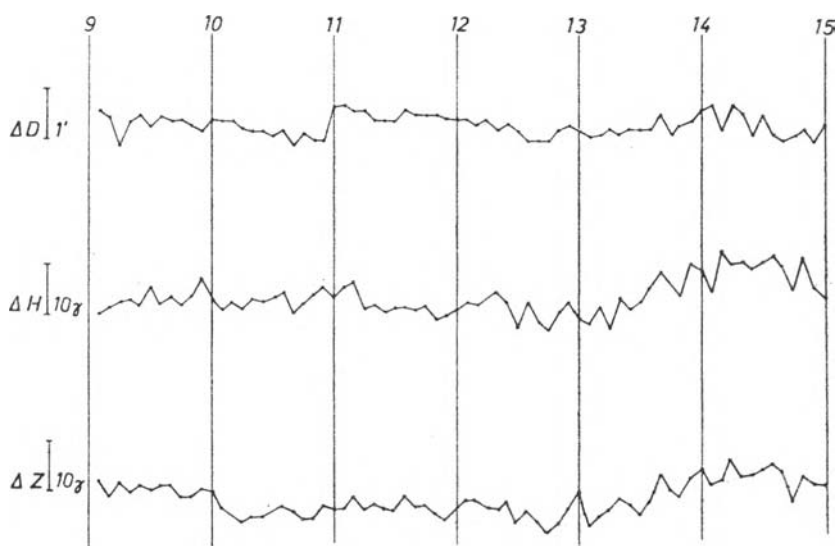
Druga metoda postępowania, to znaczy zastosowanie wariograficznych stacji polowych do rejestracji zmian pola magnetycznego w pobliżu punktu wiekowego, a następnie użycie otrzymanych magnetogramów do redukcji momentalnych i do obliczenia średniej wartości rocznej, pozwala podnieść dokładność wyznaczeń przede wszystkim dlatego, iż daje możliwość wyboru najwłaściwszych momentów lub okresów do obliczenia różnicy ΔE . Redukcje momentalne pomiarów, wykonywanych nawet podczas wzmożonej aktywności magnetycznej również są wolne od błędów wynikających z nierównoległości przebiegu zmian pola magnetycznego.

Niech ilustracją tego będzie porównanie średnich błędów wyznaczeń ΔD , ΔH i ΔZ na punktach wiekowych przeprowadzonych obydwoma metodami, np. w roku 1963 przy użyciu wariograficznej stacji polowej i w roku 1966 drogą bezpośredniego przejścia do średniej wartości rocznej (tabl. 7).

W drugim wypadku, mimo, że materiały rejestracyjne z Belska są znacznie lepszej jakości niż ze Świdra, gdzie obecność trakcji elektrycznej PKP powoduje ogromne zakłócenia, dokładności otrzymanych ΔE są niż-

KOŁOBRZEG-BELSK

6. VI. 1971r.



Rys. 2

Tablica 7

Punkt wiekowy	m_{AD}		m_{AH}		m_{AZ}	
	1963	1966	1963	1966	1963	1966
1 Cisowo	0,08	—	1,6	2,0	0,8	—
2 Ogrodniki	0,11	0,28	0,8	1,5	1,3	2,1
3 Miłakowo	0,06	0,34	0,7	1,6	1,0	0,7
4 Rzewnowo	0,05	0,60	1,2	2,4	2,2	2,5
5 Sołtmany	0,11	0,27	0,7	3,2	0,9	1,5
6 Szczecinek	0,07	0,60	1,2	1,0	0,9	4,0
7 Kruszwica	0,10	0,17	0,5	0,4	1,1	1,7
8 Pęckowo	0,08	—	0,8	0,4	0,4	1,1
9 Ludwinów	—	0,12	—	1,3	—	4,0
10 Rzepin	0,09	0,11	0,5	0,9	0,6	3,8
11 Sieradz	0,13	0,23	0,8	1,0	1,4	1,4
12 Podzamecze	0,15	0,11	0,8	1,0	1,3	2,0
13 Nałęczów	—	0,37	—	0,9	—	0,8
14 Okmiany	0,11	0,32	0,5	1,2	1,3	1,8
15 Bełżec	0,06	0,35	0,7	2,3	1,3	1,7
16 Klonów	0,05	0,29	0,3	0,6	1,6	1,4
17 Domaszków	0,09	0,21	1,1	1,6	0,8	1,4
18 Racibórz	—	—	—	—	—	—
19 Zakopane	0,06	0,38	0,8	1,0	0,8	2,2
20 Cisna	0,18	0,58	1,4	1,4	1,5	2,2

sze niż przy zastosowaniu wariograficznych stacji polowych. Jedynie na jednym punkcie deklinacja, na czterech H i na dwóch punktach Z , w 1966 roku wyznaczone zostały dokładniej niż w roku 1963, przy czym różnica średnich błędów m_{AE} nie przekracza 0,4 γ w H i Z i 0,04' w D .

Rejestracja zmian elementów pola magnetycznego w warunkach polowych musi zapewnić możliwość wykorzystania magnetogramów do redukcji wyznaczeń na punktach wiekowych. W tym celu niezbędna jest dokładna znajomość baz magnetogramów, jak również znajomość współ-

czynników termicznych wariometrów. Bazy wyznaczone są wielokrotnie za pomocą pomiarów wykonywanych na punktach wiekowych. W wypadku, gdy bazy nie są stabilne oblicza się ich dryft, który pozwala interpolować wartości baz na dowolny moment rejestracji. Dryfty baz i współczynniki termiczne, które wyznaczone są w obserwatorium, kontroluje się ponadto metodą pośrednią. Zagadnienia dotyczące pracy polowych stacji wariograficznych były już w Pracach IGiK publikowane [15]. W Pracach IGiK było także publikowane opracowanie metody pośredniego wyznaczenia dryftów baz i współczynników termicznych wariometrów [13].

Na jedno jeszcze zagadnienie należy w tym miejscu zwrócić uwagę. Zasadnicze znaczenie przy opracowywaniu i porównywaniu zdjęć magnetycznych, a zwłaszcza przy badaniu zmian wiekowych ma zagadnienie standardów magnetycznych obserwatoriów. Każda bowiem nie uwzględniona zmiana standardu magnetycznego w całości wpłynie, jako błąd systematyczny, na średnią wartość roczną w obserwatorium odniesienia, zniekształcając tym samym bieg wiekowy w obserwatorium, a w konsekwencji również bieg wiekowy na wszystkich punktach wiekowych. Zagadnienia dotyczące standardów magnetycznych także były w Pracach IGiK publikowane [7].

LITERATURA

- [1] Camfield P. A., Gough D. I.: *Anomalies in Daily Variation Magnetic Fields and Structure Under North-western United States and South-western Canada*. Geoph. Journal, Royal Astr. Soc., vol. 41, Nr 2, str. 193—218, Londyn, 1975.
- [2] Harada Y.: *Geomagnetic Survey and the Magnetic Anomaly Distribution in Japan*. Bulletin of the Geographical Survey Institute, vol. IX, part 1—2, str. 97—153, Japan, 1964.
- [3] Jankowski J., Królikowski C.: *O zmianach krótkookresowych ziemskiego pola magnetycznego na terenie Polski*. Acta Geoph. Pol., vol. X, Nr 3, str. 281—289, Warszawa, 1962.
- [4] 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.
- [5] Krzemiński W., Uhrynowski A., Żółtowski A.: *Sieć magnetycznych punktów wiekowych w Polsce*. Prace IGiK, tom. VIII, Nr 2(18), str. 93—154, Warszawa, 1961.
- [6] Krzemiński W., Uhrynowski A., Żółtowski A.: *Sieć magnetycznych punktów wiekowych (II)*. Prace IGiK, tom X, Nr 2(22), Warszawa 1963.
- [7] Krzemiński W., Uhrynowski A.: *Standardy obserwatoriów magnetycznych Europy wschodniej*. Prace IGiK, tom XVI, Nr 3(39), str. 65—90, Warszawa 1969.
- [8] Krzemiński W., Uhrynowski A., Żółtowski A.: *Zdjęcie magnetyczne Polski, mapy elementów D, H, Z, F i I, na epokę 1965,0*. IGiK, Warszawa, 1971.
- [9] Krzemiński W., Umecka A.: *Wstępne zbadanie stałości podstaw prze-*

- nośnego wariografu magnetycznego *Askania Gv-3*. Przegląd Geodezyjny, Biuletyn IGiK, rok X, Nr 5, Warszawa, 1960.
- [10] Małkowski Z.: *Terenowe badania przebiegu zmian magnetycznych w Polsce*. Acta Geoph. Pol., vol. X, Nr 1, str. 63—68, Warszawa, 1962.
- [11] 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.
- [12] Tazima M.: *Accuracy of Recent Magnetic Survey and a Locally Anomalous Behaviour of the Geomagnetic Secular Variation in Japan*. Bulletin of the Geographical Survey Institute, vol. XIII. Part 2, Japan, 1968.
- [13] Uhrynowski A.: *Analityczna metoda wyznaczania współczynnika termicznego magnetycznego wariografu polowego*. Prace IGiK, tom XIX, zeszyt 2(45), str. 3—13, Warszawa, 1972.
- [14] 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.
- [15] Uhrynowski A.: *O rejestracji zmian pola magnetycznego wariografem Gv-3 w warunkach terenowych*. Prace IGiK, tom XI, zeszyt 2(24), str. 36—62, Warszawa, 1964.
- [16] Wiese H.: *Tiefentellurik*. Abhandlung des Geomagn. Inst. und Observ. Potsdam—Niemegk, Nr 18, 1956.
- [17] Żółtowski A.: *Metoda przygotowania nowego typu magnetometru BMZ do pomiarów składowej pionowej Z na terenie Polski*. Prace IGiK, tom X, zeszyt 2(22), str. 124—130, Warszawa, 1963.

Recenzował doc. mgr inż. Wojciech Krzemiński

Rękopis złożono w Redakcji w lutym 1977 r.

АНДЖЕЙ УХРЫНОВСКИ

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЕКОВЫХ ИЗМЕНЕНИЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ЗЕМЛИ НА ТЕРРИТОРИИ ПОЛЬШИ

Резюме

В работе рассматривается измерительный материал, полученный на точках магнитного векового хода в Польше в период 1957—1971, и суммируются опыт и выводы, собранные в этот период в Лаборатории земного магнетизма ИГиК, и касающиеся измерений на точках векового хода. Появление проточных магнитометров и полевых магнитных вариографов дало возможность повысить точность измерений и приведений. Но это требовало учёта влияния тех факторов, которые прежде, как довольно малые опускались, а сейчас при увеличении точности опре-

делений могут быть источником значительных систематических ошибок. Относятся это к горизонтальному градиенту годовых вариаций, к разнице в ходе крат-ко и долгосрочных изменений элементов магнитного поля на точках векового хода и в обсерватории отнесения, к знанию стандарта обсерватории, к знанию изменения дрейфа базиса и термических коэффициентов магнитографов на полевых вариографических станциях. В работе помещен подробный анализ полученных точностей средних годовых значений элементов магнитного поля Земли на точках векового хода, учитывающий влияние всех важных факторов на точность как измерений, так и проведенний к моменту и приведений к эпохе.

ANDRZEJ UHRYNOWSKI

INVESTIGATIONS OF THE SECULAR VARIATIONS OF THE EARTH MAGNETIC FIELD ON POLISH TERRITORY

Summary

The measurements performed at the magnetic secular variation stations in Poland in the period from 1957 to 1971 have been discussed, as well as the experiences and the conclusions concerning the magnetic measurements at the stations in this period, collected at the Earth Magnetic Laboratory of the Institut of Geodesy and Cartography. The invention of the proton magnetometers and field magnetic variographs made it possible to increase the accuracy of the measurements and corrections. It required, however, taking into consideration the influence of several factors, which formerly, as inconspicuously small, have been omitted, but may be a source of perceptible systematic errors at present. It concerns such factors as:

- the horizontal gradient of the annual variations;
- the differences in the run of short and long period variations of elements of the magnetic field between the secular variation stations and the reference magnetic observatory;
- the reference standard of the magnetic observatory;
- the drifts of the magnetogram basis and the thermal coefficients of the field magnetic variographs, and others.

The elaboration contains the detailed accuracy analysis of the mean annual values of elements of the Earth magnetic field obtained at the secular variation stations. All factors which influence on the accuracy of the measurements and of the momentary corrections, as well as the epoch corrections have been taken into consideration in this analysis.

