

Metoda przygotowania nowego typu magnetometru BMZ do pomiarów składowej pionowej Z na terenie Polski

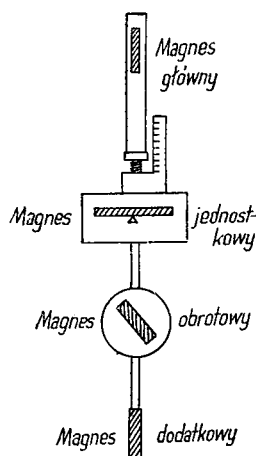
Magnetometr BMZ (The Magnetometric Zero Balance) konstrukcji D. la Cour'a jest instrumentem służącym do względnego pomiaru natężenia składowej pionowej Z ziemskiego pola magnetycznego. Właściwości techniczne pozwalają na użycie tego instrumentu do różnego rodzaju prac związanych z pomiarami składowej Z pod warunkiem, że zostanie do określonego zadania odpowiednio przygotowany. Zagadnienie jest ważne, gdyż z upływem czasu ulegają zmianom stałe instrumentu wskutek zmian momentów magnetycznych poszczególnych magnesów, a także wskutek możliwości nieznacznego przesunięcia magnesów względem siebie. Najdokładniejsze i najbardziej uniwersalne byłoby okresowe kontrolowanie stałych przy pomocy dużej, odpowiednio skonstruowanej cewki Helmholtz'a, w którą wyposażone są niektóre obserwatoria magnetyczne. Magnetometry BMZ mają tym sposobem wyznaczone stałe w duńskim obserwatorium Rude Skov, a wyniki kalibracji załączone są do instrumentów [2]. W Polsce dotychczas żadne obserwatorium nie posiada takiego urządzenia i dlatego konieczne jest zastosowanie metod zastępczych. Tematem tej pracy jest metoda przygotowania nowego typu BMZ do zdjęcia składowej pionowej na terenie Polski (t. zn. w zakresie 41 000—46 000 γ) dla celów kartografii magnetycznej w układzie dowolnego obserwatorium. Oczywiście jest, że przy tak postawionym zadaniu rozwiązana zostanie jednocześnie sprawa przydatności instrumentu do obserwacji sieci punktów wiekowych.

BMZ nr 254 znajdujący się w Instytucie Geodezji i Kartografii różni się od poprzedniego typu tym, że ma regulowaną odległość magnesu głównego (field magnet) od magnesu jednostkowego (monad magnet). Do ustawienia magnesu głównego we właściwej odległości (w zależności od wielkości mierzonego pola) służy umocowana z boku skala podzielona na 60 działek (rys. 1). Ponieważ natężenie pola w kierunku pionowym wytworzone przez magnes główny, oznaczane przez Z^C , jest m. in. funkcją jego odległości od magnesu jednostkowego, wobec tego wartości Z tabelowane są jako funkcja odczytów skali [2]. Wpływ pozostałych magnesów kompensacyjnych: obrotowego (Z^T) i dodatkowego (Z^S) pozostają bez zmian, a zatem nie zmienia się również postać wzoru podstawowego:

$$Z = Z^C + Z^T + Z^S - \alpha t - 2 \alpha \Delta t$$

Pamiętać jednak należy, że Z^C może tu przybierać różne wartości, oraz w nieco inny sposób oblicza się współczynnik termiczny α .

Omówiona powyżej zmiana konstrukcyjna daje dwie, bardzo istotne korzyści: rozszerza zakres działania instrumentu do kilkudziesięciu tysięcy gamma i umożliwia w większym stopniu wzajemną kontrolę magnesów.



Rys. 1

Biorąc to pod uwagę dalsze rozważania w żadnym stopniu nie mogą być zastosowane do typu tradycyjnego.

Jeśli w dowolnym obserwatorium magnetycznym zostanie wykonany pomiar składowej pionowej przy pomocy magnetometru BMZ (określenie: nowy typ będzie odtąd pomijany) może okazać się, że po obliczeniu wyniku wystąpi niezgodność między wskazaniem instrumentu i wariografu. Stosowanie tej różnicy jako poprawki instrumentu przy pomiarze pól o innym natężeniu jest niewłaściwe, gdyż — jak dalej zostanie wskazane — wielkość tej poprawki jest zależna od wielkości pól kompensacyjnych wytwarzanych przez poszczególne magnesy. Zasadniczym problemem jest kontrola pól kompensacyjnych pochodzących od magnesu głównego i obrotowego oraz wyznaczenie poprawek ich wskazań oznaczanych dalej odpowiednio przez dZ^C i v^T . Po uzyskaniu tych poprawek kontrola magnesów dodatkowych jest już zupełnie prosta i dlatego jest przy wprowadzeniu metody pominięta.

Wyznaczenie poprawki wskazań magnesu obrotowego również nie następuje specjalnych trudności. Magneś ten — o małym momencie magnetycznym — kompensuje stosunkowo niewielką część natężenia składowej pionowej, stąd też normalne zmiany momentu magnetycznego mogą spowodować tylko niewielkie poprawki. Poprawka v^T — tak jak

Z^T — będzie oczywiście funkcją kąta δ (odczytu dysku), czyli w wy-starczającym przybliżeniu

$$v^T = v_{max}^T \cdot \cos \delta$$

Poprawkę v_{max}^T można wyznaczyć zmieniając pole kompensujące Z^C przez przesuwanie magnesu głównego o pewną ilość działek skali i dokonując w każdym położeniu pomiar Z . Dla dwóch położenia magnesu głównego otrzymamy wówczas:

$$Z = Z_1^C + dZ_1^C + Z_1^T + v_{max}^T \cdot \cos \delta_1 - P$$

$$Z + \delta z = Z_2^C + dZ_2^C + Z_2^T + v_{max}^T \cdot \cos \delta_2 - Q$$

gdzie P i Q są to poprawki termiczne a δz jest zmianą składowej pionowej w czasie, jaki upłynął między pomiarami. Ponieważ badanie instrumentu musi być dokonywane w obserwatorium, wielkość tej zmiany można bez trudu wyznaczyć. Kładąc $Z_2^C - Z_1^C = \Delta Z^C$ i $Z_2^T - Z_1^T = \Delta Z^T$, po rozwiązaniu tych równań względem v_{max}^T otrzymujemy ostatecznie

$$v_{max}^T = \frac{\Delta Z^C + \Delta Z^T}{\cos \delta_1 - \cos \delta_2} + \frac{P - Q - \delta z}{\cos \delta_1 - \cos \delta_2} + \frac{dZ_2^C - dZ_1^C}{\cos \delta_1 - \cos \delta_2} \quad (1)$$

Do obliczenia v_{max}^T potrzebne są poprawione wartości Z_1^C i Z_2^C i dlatego wykorzystanie tego wzoru będzie możliwe dopiero po znalezieniu poprawek dZ_i^C dla wartości Z_i^C zawartych w granicach 41 000—46 000 γ .

Na rys. 2 przedstawione jest wzajemne położenie biegunów magnesu głównego i jednostkowego w momencie, gdy magnes jednostkowy jest doprowadzony do poziomu. Zgodnie z oznaczeniami na rysunku natężenia pola Z^C — opuszczając dalsze wyrazy rozwinięcia — wyrazi się w ogólności wzorem:

$$Z^C = \frac{2M \cos^5 \varphi}{r^3} \left(1 + \frac{2l^2}{r^2} \cos^2 \varphi \right) \quad (2)$$

Znając długości obydwu magnesów [1] i choćby w grubym przybliżeniu odległość r obliczenie $\cos \varphi$ i czynnika w nawiasie nie natrafia na żadne trudności. Natomiast celem dokładniejszego obliczenia r (bezpośredni pomiar nie jest możliwy) skorzystamy z tabeli Z^C podanej przez producenta [2]. Odległość r jest zależna od nastawienia magnesu głównego na daną działkę skali s . Ponieważ skala ma 60 działek, w przypadku BMZ nr 254 dla dwóch skrajnych działek otrzymamy równania:

$$\text{dla } s = 0 \quad 69\,746 = \frac{2M}{r_0^3} \cdot 1,05$$

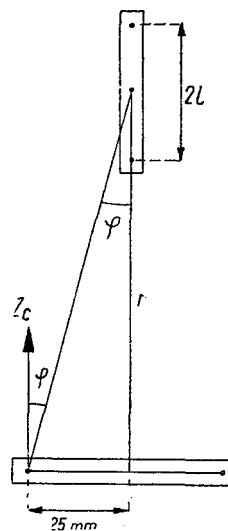
$$\text{dla } s = 60 \quad 29\,847 = \frac{2M}{(r_0 + 60)^3} \cdot 1,02$$

gdzie r_0 jest to odległość (w działkach skali) środków magnesów przy $s = 0$, a zatem $r = r_0 + s$. Eliminując niewiadomą M znajdujemy rozwiązanie

$$r_0 = 187 \text{ działek}$$

Dla założonego zakresu (41 000—46 000 γ) możemy za podstawę analizy zmian Z^C przyjąć wzór

$$Z^C = \frac{2M}{r^3} \cdot 1,03 \quad \text{przy } 214 < r < 222 \quad (3)$$



Rys. 2

Zbadamy teraz wpływ przyrostów dM i dr na wielkości Z^C . W tym celu znajdziemy różniczkę zupełną

$$dZ^C = Z^C \frac{dM}{M} - 3 Z^C \frac{dr}{r} \quad (4)$$

gdzie pierwszy wyraz z prawej strony równania przedstawia wpływ zmiany momentu magnetycznego a drugi — wpływ zmiany odległości r . Ponieważ nie ma możliwości zmierzenia dr (aby nie wprowadzać dodatkowych oznaczeń traktujemy różniczkę jako przyrosty skończone) przyjmiemy, że wielkość dr nie powinna przy normalnym użytkowaniu instrumentu przekroczyć 0,01 działki. Dla średnich wielkości $Z^C \cong 44\,000 \gamma$ i $r = 218$ działki, drugi wyraz w równaniu (4) osiągnie zaledwie 6γ . Widać już stąd wyraźnie, że głównym składnikiem poprawki instrumentu (która może osiągnąć 100 i więcej gamma) jest wpływ zmiany momentu magnetycznego dM [3], ale wielkość tej zmiany też nie jest znana. D. la Cour podaje, że moment magnetyczny M ma tendencję wzrostu o ok. 0,01% na miesiąc. Nie wiadomo jednak, jak długo trwa ten wzrost, a oprócz tego mogą jeszcze występować skokowe i to dość znaczne zmiany M np. pod wpływem wstrząsu. Ważne jest jeszcze, iż stosunek $\frac{dM}{M}$ łatwo może osiągnąć taką wielkość, że poprawki dZ_i^C będą różne dla różnych wartości Z_i^C .

Biorąc powyższe pod uwagę, jedyną metodą obliczenia dZ^C jest doświadczalne wyznaczenie łącznego wpływu dM i dr oraz zastosowanie przekształconego wzoru (4) w postaci

$$dZ_i^C = Z_i^C \left(\frac{dM}{M} - 3 \frac{dr}{r} \right) \quad (4a)$$

W tym celu należy wykonać pomiar w obserwatorium magnetycznym bez magnesu dodatkowego przy dobranym Z^C , aby Z^T i v^T były jak najmniejsze. Wskazane jest też, aby pomiar wykonany był w temperaturze możliwie najbliższej 0°C , w celu zredukowania do minimum wpływu błędu współczynnika termicznego α . Oznaczając przez Z^{BMZ} wynik pomiaru, a przez Z^{OBS} składową pionową odczytaną dla tego samego momentu z zapisu obserwatorium otrzymuje się równanie

$$Z^{OBS} + R.S. - Z^{BMZ} - v^T = Z^C \left(\frac{dM}{M} - 3 \frac{dr}{r} \right) \quad (5)$$

gdzie $R.S.$ oznacza różnicę absolutnego poziomu bazy obserwatorium w stosunku do Rude Skov. Jeśli wartość ta jest znana z międzynarodowych nawiązań należy uwzględnić ją w dalszym rachunku, jeśli nie —

przyjąć $R.S. = 0$. Oczywiście w tym przypadku nastąpi obniżenie dokładności wyznaczenia poprawek, ale tylko w nieznacznym stopniu. Jeśli na przykład przyjmieć $R.S. = 20\gamma$ [3], to na pomiar różnicy $\Delta Z = 5\,000\gamma$ (41 000—46 000 γ) daje to wpływ ok. 2 γ , czyli jeszcze poniżej dokładności wyznaczenia ΔZ przy pomocy tego typu instrumentu w warunkach polowych. Biorąc powyższe pod uwagę i przyjmując jeszcze $v^T = 0$, należy z równania (5) wyliczyć czynnik

$$\left(\frac{dM}{M} - 3 \frac{dr}{r} \right)$$

i po podstawieniu do równania (4a) znaleźć odpowiednie poprawki dZ_i^C . Teraz ze wzoru (1) można już obliczyć v_{max}^T i v^T i, jeśli zajdzie potrzeba, zrobić drugie przybliżenie wprowadzając do równania (5) obliczoną wielkość v^T . Dla podniesienia dokładności można wykonać wielokrotnie pomiary $Z^{OBS} - Z^{BMZ}$ a do ostatecznego obliczenia poprawek przyjmieć wartości średnie.

W ten sposób znalezione poprawki dZ^C i v_{max}^T umożliwiają wykorzystanie instrumentu dla wykonania postawionych na wstępie zadań. Również obliczenie poprawki v^S odnoszącej się do Z^S można teraz łatwo przeprowadzić przez zmierzenie wpływu magnesu dodatkowego przy pomocy magnesu głównego i obrotowego. Wzór podstawowy do obliczenia składowej pionowej Z w systemie obserwatorium będzie więc miał postać

$$Z = Z^C + dZ^C + Z^T + v^T + Z^S + v^S - \alpha t - 2\alpha \Delta t - R.S.$$

lub inaczej

$$Z = Z^{BMZ} + dZ^C + v^T + v^S - R.S. \quad (6)$$

Ponieważ współczynnik termiczny α zależy od wielkości Z^C , Z^T i Z^S , przy dużych zmianach tych elementów należy obliczyć poprawki do tabelki wartości α wykorzystując podane przez producenta wzory [2].

W zakończeniu należy podkreślić, że tego rodzaju badanie daje możliwość wykorzystania magnetometru BMZ do pomiaru różnic składowej pionowej osiągających 5 000 γ praktycznie bez straty dokładności. Jest to duży postęp w stosunku do BMZ typu tradycyjnego, gdzie nieznaną błąd wpływu magnesu obrotowego przenosi się na mierzoną różnicę pola proporcjonalnie do jej wielkości, co znacznie ogranicza zastosowanie tego typu instrumentu (oczywiście odnosi się to do warunków, w których nie ma możliwości kontroli magnesów w cewce Helmholtz'a). Pamiętać też trzeba, że przedstawiona metoda nie może mieć zastosowania do instrumentów uprzednio mechanicznie uszkodzonych lub naprawionych.

*Przykład wyznaczenia poprawek BMZ nr 254 w Obserwatorium
Geofizycznym Polskiej Akademii Nauk na Helu*

W dniu 23. XI. 1962 r. wykonano 2 serie pomiarów składowej pionowej instrumentem BMZ nr 254, na słupie w pawilonie obserwacyjnym helskiego obserwatorium. Do obliczeń poprawek wykorzystano średnie wartości z każdej serii. Obserwacje prowadzono w ten sposób, że po każdym dwóch pomiarach Z nastawiano od nowa odczyt skali, aby wyeliminować systematyczny błąd ustawienia magnesu głównego. Wyniki badania przedstawione są w tablicach poniżej.

Seria 1

Tablica 1

TU	$t^{\circ}C$	dysk (δ)	skala	Z^C	Z^T	$-\alpha t - 2\alpha \Delta t$	Z^{BMZ}	Z^{OBS}
7 ^h 22 ^m ,5	3,76	113°,80	27	46191 ^y	-462,4 ^y	-54,8 ^y	45673,8 ^y	45683,2 ^y
23,5	3,75	113,85			-463,3	-54,7	673,0	683,2
25,0	3,74	113,85			-463,3	-54,5	673,2	683,3
26,0	3,72	113,85			-463,3	-54,2	673,5	683,3
27,0	3,70	113,80			-462,4	-53,9	674,7	683,4
28,0	3,68	113,80			-462,4	-53,9	674,7	683,4
30,0	3,70	113,70			-460,6	-55,1	675,3	683,0
30,5	3,72	113,70			-460,6	-55,4	675,0	683,0
Wartości średnie					-462,3	-54,6	674,2	683,2

Seria 2

Tablica 2

TU	$t^{\circ}C$	dysk (δ)	skala	Z^C	Z^T	$-\alpha t - 2\alpha \Delta t$	Z^{BMZ}	Z^{OBS}
7 ^h 33 ^m ,0	3,80	44,05 ^o	29	44899 ^y	+829,3 ^y	-56,3 ^y	45672,0 ^y	45682,9 ^y
34,0	3,84	44,05			+829,3	-56,9	671,4	682,7
35,5	3,86	44,05			+829,3	-57,2	671,1	682,5
36,0	3,88	44,05			+829,3	-57,5	670,8	682,5
37,5	3,90	43,95			+830,7	-57,8	671,9	682,6
38,5	3,94	43,90			+831,4	-58,3	672,1	682,7
40,5	4,00	43,85			+832,1	-59,2	671,9	682,9
41,5	4,00	43,85			+832,1	-59,9	671,2	683,0
wartości średnie					+830,4	-57,9		682,7

Tablica 3

L.p.	symbol	wartość	uwagi
1	$Z^{OBS} - Z^{BMZ}$	+ 9,0 γ	z 1-szej serii wartość z 1960 r. 1-sze przybl.
2	R. S.	- 22 γ	
3	$\frac{dM}{M} - 3 \frac{dr}{r}$	- 0,000281	
4	- dZ_1^C	+ 13,0 γ	
5	dZ_2^C	- 12,6 γ	
6	ΔZ^C	- 1292 γ	
7	ΔZ^T	+ 1292,7 γ	
8	P	+ 54,6 γ	
9	- Q	- 57,9 γ	
10	- δz	+ 0,5 γ	
11	$\Sigma 4 - 10$	- 1,7 γ	
12	$\cos \delta_1 - \cos \delta_2$	- 1,12	
13	v_{max}^T	+ 1,5 γ	
14	$\frac{dM}{M} - 3 \frac{dr}{r}$	- 0,000266	2-gie przybl.

Tablica 4

skala	Z_i^C	dZ_i^C (2-gie przybl.)
27	46 191	- 12
28	45 539	- 12
29	44 899	- 12
30	44 272	- 12
31	43 656	- 12
32	43 051	- 11
33	42 458	- 11
34	41 877	- 11
35	41 303	- 11

LITERATURA

- [1] *D. la Cour*: „The Magnetometric Zero Balance, The BMZ”; Det Danske Meteorologiske Institut, Communications Magnétiques nr 19. Kopenhavn, 1942.
- [2] Calibration of BMZ No 254.
- [3] *Przybyszewski E.*: „Mittelung über die Indikationsniveau der Z — Magnetometer”. (Referat na Sympozjum VI Regionalnej Konferencji MWG Państw Regionu Europejsko-Azjatyckiego, Budapeszt 1962).
- [4] *Jankowski J.*: „Ogólne uwagi o pracach porównawczych z BMZ-tami” ZG PAN maszynopis 1958.
- [5] *Rybaltowski N. J.*: „Magnitno-Kompasnoje dieło”, Leningrad 1954.

Rękopis złożono w Redakcji w lutym 1963 r.

АНДЖЕЙ ЖУЛТОВСКИ

МЕТОД ПОДГОТОВКИ НОВОГО ТИПА МАГНИТОМЕТРА ВМЗ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ Z
НА ТЕРРИТОРИИ ПОЛЬШИ

Резюме

Конструкция ВМЗ нового типа — с регулируемым расстоянием от главного до единичного магнита — дает возможность использовать прибор для измерения разности ΔZ произвольной величины в диапазоне для территории Польши диапазоне 41 000—46 000 гамма без необходимости контроля магнитов с помощью катушки Гельмгольца. Для получения результатов в системе соответствующей произвольной обсерватории следует найти соответствующие поправки dZ_i^C и v^T для Z_i^C и Z^T . Чтобы вычислить поправку dZ_i^C следует сначала определить из уравнения (5) фактор $\frac{dM}{M} - 3 \frac{dr}{r}$ принимая в начале $v^T = 0$. В этом уравнении $Z^{OBS} - Z^{BMZ}$ является разностью показаний испытываемого магнитометра и записью вариографа обсерватории в этот-же момент; что же касается $R.S.$ — это разность абсолютного уровня базисов вариографов обсерватории — Rude Skov. Путем введения вычисленного фактора в уравнение (4а), можно определить поправки dZ_i^C , а затем — используя измерения Z при двух разных отсчетах шкалы главного магнита — v_{max}^T и v^T из уравнения (1). В случае необходимости следует сделать второе приближение, вводя в уравнение (5) найденную уже поправку v^T . После окончательного вычисления v^T и dZ_i^C , определяют v^S сравнивая показания дополнительного магнита с главным и вращающимся. Вертикальную составляющую Z вычисляют по формуле (6). Этот метод позволяет исключить потери точности, связанные с ростом измеряемой разности поля ΔZ в диапазоне $\pm 2500 \gamma$. Подготовка прибора для измерений ΔZ большого диапазона, требует применения катушки Гельмгольца.

ANDRZEJ ŻÓŁTOWSKI

THE METHOD OF PREPARATION OF THE NEW TYPE OF BMZ
MAGNETOMETER FOR MEASUREMENTS OF VERTICAL
COMPONENT Z ON TERRITORY OF POLAND

S u m m a r y

The construction of a new type of BMZ — with regulation of distance between field magnet and monad magnet renders possible to use the instrument for measurement of any great difference ΔZ within the limit established for Polish territory as 41 000—46 000 γ , without control of the magnets by use of Helmholtz coil. To obtain the results in any observatory system, one has to find the corresponding corrections dZ_i^C and v^T for Z_i^C and Z^T . In order to calculate corrections dZ_i^C , first it is necessary to find from equation (5) factor $\frac{dM}{M} - 3 \frac{dr}{r}$ admitting at first $v^T = 0$. In this equation $Z^{OBS} - Z^{BMZ}$ is the difference between reading of the instrument under investigation and the result of registration on variograph at observatory, yet the *R.S.* is the difference between the absolute standards level between observatory and Rude Skov. Introducing calculated factor to equation (4a) one may calculate corrections dZ_i^C and further — v_{max}^T and v^T from equation (1) basing on observations Z with two different readings of the scale of the field magnet. If it is necessary, the second approximation must be done, introducing to equation (5) previously calculated correction v^T . After definitive calculation of v^T and dZ_i^C , v^S is established by comparison of reading with and without the supplementary magnet. The vertical component Z is calculated from equation (6).

This method allows to eliminate the decrease of accuracy with the increase of measured ΔZ within the limit of $\pm 2\,500 \gamma$. Preparation of the instrument for the greater ΔZ measurements requires the Helmholtz coil for calibration.