

ISBN 978-83-60024-17-1

INSTYTUT GEODEZJI I KARTOGRAFII

SERIA MONOGRAFICZNA NR 17

ELŻBIETA WELKER

**SPOSOBY POZYSKIWANIA INFORMACJI
O ELEMENTACH POLA MAGNETYCZNEGO
ZIEMI I ICH WYKORZYSTANIE W GEODEZJI
I NAWIGACJI**



Warszawa 2013

Rada Wydawnicza
Serii Monograficznej
Editorial Council
of the Monographic Series

*Aleksander Brzeziński, Andrzej Ciołkosz (przewodniczący, chairman),
Tadeusz Chrobak, Katarzyna Dąbrowska-Zielińska, Ireneusz Ewiak, Dariusz Gotlib,
Teresa Konarska (sekretarz, secretary), Jan Kryński, Adam B. Łyszkowicz,
Jan R. Olędzki, Krystian Pyka, Jerzy B. Rogowski*

Redaktor naukowy wydawnictwa
Scientific Editor
Marek Baranowski

Redaktor techniczny
Technical Editor
Paulina Waszkiewicz

Adres Redakcji
Instytut Geodezji i Kartografii
02-679 Warszawa, ul. Modzelewskiego 27
Address of the Editorial Board:
Institute of Geodesy and Cartography
02-679 Warsaw, 27 Modzelewskiego St.
Poland
e-mail: boi@igik.edu.pl

© Copyright by Instytut Geodezji i Kartografii

ISBN 978-83-60024-17-1

IGiK, Warszawa 2013 r.

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	13
1.1. Pole magnetyczne Ziemi	15
1.2. Zmiany pola geomagnetycznego	26
1.3. Obserwatoria magnetyczne	31
1.4. Stacje permanentnych rejestracji zmian składowych pola geomagnetycznego	34
1.5. Badania zmian wiekowych pola geomagnetycznego	38
1.6. Modele matematyczne pola geomagnetycznego	41
2. Rys historyczny pomiarów magnetycznych w Polsce	44
2.1. Pomiary archiwalne na terenach obecnej Polski od XVI wieku	44
2.2. Pomiary magnetyczne w Polsce przedwojennej i pomiary magnetyczne w latach 1940–1942	55
2.3. Pomiary magnetyczne w drugiej połowie XX wieku	60
3. Aparatura do pomiarów magnetycznych	64
3.1. Instrumenty wahadłowe – deklinator	64
3.2. Magnetometr protonowy	69
3.3. Magnetometr Flux-Gate <i>D/I</i>	72
3.4. Magnetyczne stacje wariograficzne	77
3.4.1. Wariograf Askania	78
3.4.2. Wariograf Bobrova	79
3.4.3. Magnetometr LEMI	79
3.5. Busole (kompasy) i pelengatory	84
4. Pomiary na punktach magnetycznych	86
4.1. Stabilizacja punktów magnetycznych	86
4.2. Stabilizacja punktów wiekowych	87
4.3. Pomiar deklinacji i inklinacji magnetycznej	90
4.3.1. Wyznaczenie azymutu geograficznego	90
4.3.2. Wyznaczenie kierunku na północ magnetyczną magnetometrem Flux-Gate <i>D/I</i>	91
4.3.3. Wyznaczenie inklinacji magnetometrem Flux-Gate <i>D/I</i>	92

4.3.4. Wyznaczenie kierunku na północ magnetyczną za pomocą deklinatora	93
4.4. Pomiar modułu wektora natężenia całkowitego F	93
5. Podstawowa osnowa magnetyczna kraju – punkty wiekowe	94
6. Zdjęcie magnetyczne Polski	102
7. Bank Danych Geofizycznych	109
7.1. Opis tabel banku dotyczących magnetycznych obserwatoriów i punktów wiekowych	111
7.2. Opis tabel banku dotyczących punktów zdjęcia magnetycznego	112
7.3. Wzajemne relacje między tabelami banku geofizycznego	114
8. Redukcja danych magnetycznych	115
8.1. Metoda redukcji wartości elementów pola geomagnetycznego do dowolnej epoki – metoda wielomianowa	115
8.2. Przeliczenie wartości deklinacji magnetycznej na epokę 2000.5	116
8.3. Redukcja deklinacji magnetycznej od epoki 2000.5 do dowolnej epoki na podstawie siatki zmian	122
8.4. Poprawki redukcyjne	123
9. Praktyczne wykorzystanie wyników pomiarów magnetycznych	125
9.1. Wykorzystanie aktualnych wartości deklinacji magnetycznej	125
9.2. Mapy magnetyczne	125
9.2.1. Mapy deklinacji magnetycznej	125
9.2.2. Atlas map magnetycznych Bałtyku	127
9.2.3. Mapy magnetyczne opracowywane dla potrzeb innych dziedzin	130
9.3. Modele matematyczne pola geomagnetycznego	131
9.4. Pomiary magnetyczne na lotniskach	132
9.5. Atestacje i wzorcowania	133
10. Podsumowanie	133
Podziękowania	135
11. Bibliografia	136
Summary	144
Załącznik	147

TABLE OF CONTENTS

1. Introduction	13
1.1. Earth's magnetic field	15
1.2. Magnetic field changes	26
1.3. Magnetic observatories	31
1.4. Permanent stations recording variations of geomagnetic field elements	34
1.5. Research on geomagnetic field secular changes	38
1.6. Mathematic models of the geomagnetic field	41
2. History of the geomagnetic measurements in Poland	44
2.1. Archive measurements on the present Polish territory starting from 16th century	44
2.2. Geomagnetic measurements in Poland before II World War and in the years 1940-1942	55
2.3. Geomagnetic measurements in the second part of 20th century	60
3. Equipment for geomagnetic measurements	64
3.1. Pendulum instruments - declinator	64
3.2. Proton magnetometer	69
3.3. Magnetometer Flux-Gate D/I	72
3.4. Magnetic variation stations:	77
3.4.1. Variograph station Askania	78
3.4.2. Variograph station Bobrova	79
3.4.3. Magnetometer LEMI	79
3.5. Compasses and bearing indicators	84
4. Measurements at the magnetic stations	86
4.1. Stabilization of magnetic stations	86
4.2. Stabilization of repeat stations	87
4.3. Measurement of magnetic declination and inclination	90
4.3.1. Determination of the geographic azimuth	90
4.3.2. Determination of the direction to the magnetic north with the Flux-Gate D/I magnetometer	91
4.3.3. Determination of the magnetic inclination with the Flux-Gate D/I magnetometer	92

4.3.4. Determination of the direction to the magnetic north with the declinator	93
4.4. Measurement of the module F of the total intensity vector	93
5. The basic geomagnetic control	94
6. Magnetic declination survey in Poland	102
7. Database of geophysical data	109
7.1. Tables with data concerning geomagnetic observatories and magnetic repeat stations	111
7.2. Tables with data concerning magnetic declination survey	112
7.3. Mutual relations between tables of the database	114
8. Geoagnetic data reduction	115
8.1. Method of conversion of the geomagnetic field elements to chosen epoch – polynomial method	115
8.2. Conversion of magnetic declination values to the epoch 2000.5	116
8.3. Conversion of magnetic declination from epoch 2000.5 to chosen epoch with the use of gridded declination changes	122
8.4. Reduction corrections	123
9. Practical use of the results of magnetic measurements	125
9.1. Use of the present values of magnetic declination	125
9.2. Magnetic charts	125
9.2.1. Charts of magnetic declination	125
9.2.2. Atlas of the magnetic charts of the Baltic Sea	127
9.2.3. Magnetic charts for other users	130
9.3. Mathematic models of the geomagnetic field	131
9.4. Magnetic measurements at the airports	132
9.5. Attestation and standardization	133
10. Conclusions	133
Acknowledgments	135
11. References	136
Summary	144
Appendix	147

Recenzent:

prof. dr hab. inż. Andrzej Sas-Uhrynowski

Słowa kluczowe: pole magnetyczne Ziemi, modele globalne pola geomagnetycznego – IGRF, pomiary magnetyczne w Polsce – instrumenty, standardy i procedury, zmiany wiekowe elementów pola magnetycznego Ziemi

Keywords: Earth's magnetic field, global models of geomagnetic field – IGRF, magnetic measurements in Poland – equipment, standards and procedures, secular changes of geomagnetic field elements

OBJAŚNIENIA TERMINÓW I SKRÓTÓW

- F* – moduł wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego **F**.
H – składowa pozioma wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego **F**.
X, Y – składowe północna i wschodnia wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego **F**.
Z – składowa pionowa wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego **F**.
D – deklinacja magnetyczna, element kątowy pola geomagnetycznego – kąt między kierunkiem na północ magnetyczną i północ geograficzną.
I – inklinacja magnetyczna, element kątowy pola geomagnetycznego – kąt pomiędzy wektorem natężenia ziemskiego pola magnetycznego i płaszczyzną horyzontu (dodatni na półkuli północnej, ujemny na półkuli południowej).

Zboczenie magnetyczne – inne określenie deklinacji.

Izogony, izokliny, izodynamy – linie łączące punkty o jednakowych wartościach elementów pola geomagnetycznego *D, I* i *F* składowych wektora natężenia pola.

Uchylenie magnetyczne – kąt między kierunkiem na północ magnetyczną i kierunkiem linii siatki kartograficznej (deklinacja – zbieżność południków).

Dipol magnetyczny – układ wytwarzający pole magnetyczne, które cechuje magnetyczny moment dipolowy, np. magnes trwały, solenoid (cewka) lub pojedyncza pętla z prądem. Wszystkie skończone źródła pola magnetycznego są dipolami.

Bieguny geomagnetyczne – punkty przecięcia osi geomagnetycznej z powierzchnią Ziemi – punkty teoretyczne związane z modelem pola magnetycznego Ziemi.

Bieguny magnetyczne – punkty na powierzchni Ziemi, w których inklinacja magnetyczna wynosi 90°.

Równik magnetyczny – miejsce geometryczne punktów na powierzchni Ziemi, w których inklinacja jest równa zero.

IGRF – International Geomagnetic Reference Field – globalny model pola geomagnetycznego opracowywany co 5 lat przez IAGA na podstawie wszystkich dostępnych danych magnetycznych.

WMM – World Magnetic Model – globalny model pola geomagnetycznego, opracowywany w NASA i British Geological Survey przy współpracy z NGDC, dla Departamentu Obrony USA i innych służb cywilnych.

Współrzędne geomagnetyczne – szerokość i długość magnetyczna odniesione do biegunów geomagnetycznych Ziemi (model IGRF).

Pole normalne – pole matematycznego modelu geomagnetycznego obliczonego na podstawie danych geofizycznych oraz danych z pomiarów magnetycznych na powierzchni Ziemi, na wodach oraz w przestrzeni kosmicznej.

Gradient elementu pola magnetycznego – zmiana wartości elementu pola magnetycznego na jednostkę odległości.

Anomalia magnetyczna – obszar, w którym pole magnetyczne Ziemi znacznie się różni od pola sąsiednich obszarów, zmieniając monotoniczny przebieg wzrostu lub zmniejszania się wartości elementów tego pola – zmiana gradientów, które w polu normalnym na większych obszarach pozostają stałe.

Punkt wiekowy – punkt osnowy magnetycznej trwale zastabilizowany w terenie.

Ekscentryczny punkt wiekowy – dublowany punkt wiekowy zastabilizowany w niewielkiej odległości od głównego punktu wiekowego.

Osnowa magnetyczna – zbiór punktów wiekowych (w Polsce jest 19 takich punktów) z systematycznie na nich powtarzanimi pomiarami trzech niezależnych składowych pola geomagnetycznego (obecnie D , I i F).

Zdjęcie magnetyczne – pomiary magnetyczne (głównie deklinacji magnetycznej) wykonane na stabilizowanej tymczasowo sieci punktów rozproszonych.

Zmiany wiekowe – zwane także biegiem wiekowym – zmiany wartości średnich rocznych składowych pola magnetycznego Ziemi, obliczane dla dowolnej epoki na podstawie danych pomiarowych i/lub na podstawie współczynników modelu.

Izopory – linie łączące punkty o jednakowych wartościach zmian wiekowych pola magnetycznego Ziemi.

Flux-Gate D/I (DIM) – magnetometr do pomiaru deklinacji i inklinacji magnetycznej.

PMP magnetometr – magnetometr protonowy do pomiaru modułu wektora natężenia całkowitego pola magnetycznego Ziemi.

Wariometr – magnetometr polowy do ciągłej rejestracji zmian elementów X , Y , Z pola geomagnetycznego.

Stacja polowa – punkt w terenie z zainstalowanym wariometrem do pomiarów ciągłych zmian elementów pola geomagnetycznego.

BGS – British Geological Survey.

GNSS – Global Navigation Satellite System – globalny satelitarny system nawigacyjny. W jego skład wchodzi: GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou, QZSS.

GPS – Global Positioning System – amerykański globalny satelitarny system pozycjonowania.

- IAGA* – International Association of Geomagnetism and Aeronomy.
- INTERMAGNET* – International Real-time Magnetic Observatory Network –
światowa sieć obserwatoriów magnetycznych (www.intermagnet.org)
- IUGG* – International Union of Geodesy and Geophysics.
- KAPG* – Komisja Wielostronnej Współpracy Akademii Nauk Krajów Socjalistycznych „Planetarne Badania Geofizyczne”.
- LOIZMIRAN* – Leningradskoie Oddielenije Instituta Ziemnowo Magnetizma i Rosprestrenienija Radiowoln Rosijskoj Akademii Nauk
- NASA* – National Aeronautics and Space Administration.
- NGDC* – National Geophysical Data Center.
- UT* – czas uniwersalny.
- WDC* – World Data Center – centrum danych geofizycznych utworzone pod koniec lat 1950. w czasie trwania Międzynarodowego Roku Geofizycznego do archiwizowania i udostępniania danych geofizycznych z siedzibami w USA, Wielkiej Brytanii, Rosji i Japonii.

ELŻBIETA WELKER

Instytut Geodezji i Kartografii

Warszawa

SPOSOBY POZYSKIWANIA INFORMACJI O ELEMENTACH POLA MAGNETYCZNEGO ZIEMI I ICH WYKORZYSTANIE W GEODEZJI I NAWIGACJI

ZARYS TREŚCI: Praca zawiera podstawowe informacje o polu magnetycznym Ziemi, niezbędne dla praktykujących geodetów, a także dla innych specjalistów, którzy w swojej pracy stosują instrumenty i urządzenia do pomiarów składowych elementów pola geomagnetycznego. Po krótkim opisie historycznych pomiarów magnetycznych wykonywanych na terenach obecnej Polski, został przedstawiony 60-letni dorobek pracowników Pracowni Magnetycznej IGiK (obecnie Zakładu Geodezji i Geodynamiki). Dorobek ten obejmuje całokształt prac związanych z tworzeniem osnów magnetycznych w Polsce powojennej – projektowanie, opracowywanie standardów pomiarowych, pomiary na punktach magnetycznych, opracowanie obserwacji i analizę wyników pomiarów oraz przedstawienie ich w postaci kartograficznej. Opisane zostały także instrumenty wykorzystywane do pomiarów magnetycznych oraz procedury pomiarowe wypracowane przez pracowników IGiK w toku długoletniej praktyki. Znaczna część pracy została poświęcona badaniom zmian wiekowych pola geomagnetycznego. Ich znajomość jest niezbędna do aktualizacji wyników pomiarów magnetycznych i ich redukcji do wybranej epoki, przy wykorzystaniu opracowanych w IGiK i opisanych w pracy metod.

Opisany w pracy bank danych geofizycznych, utworzony w IGiK od podstaw, zawiera wszystkie dane o wynikach pomiarów magnetycznych w Polsce, zarówno archiwalnych, jak i współczesnych. Bank zawiera także dane dotyczące punktów wiekowych w krajach sąsiednich oraz średnie roczne wartości elementów pola geomagnetycznego uzyskane z rejestracji w obserwatoriach magnetycznych Europy. W pracy zostały opisane wyniki opracowywanych zmian wiekowych pola geomagnetycznego w latach 1955–2010 oraz ich wykorzystanie do tworzenia map izolinii i izopor elementów pola geomagnetycznego, a w szczególności deklinacji magnetycznej. Przedstawiona została też informacja o współpracy IGiK z innymi instytutami i jej wyniki. Pracę kończy krótka prognoza kierunku rozwoju wyznaczeń i badań pola geomagnetycznego.

Do pracy został dołączony Załącznik, w którym zostały opisane procedury pomiarowe stosowane na punktach magnetycznych sieci podstawowych, na lotniskach i innych wybranych obiektach oraz procedury stosowane przy atestacji instrumentów. Zostały także zebrane wzory stosowanych dzienników pomiarowych i arkuszy atestacyjnych.

ABSTRACT: The work includes basic information about the Earth's magnetic field, necessary for practicing surveyors and other professionals who use for their work tools and equipment for the measurements of the elements of the geomagnetic field. After a brief historical description of the magnetic measurements carried out on the territory of the present Poland it was presented 60 years' achievements of researchers of the Institute of Geodesy and Cartography concerning all activities towards establishing the magnetic control in postwar Poland – design, development of measurement standards, measurements at the magnetic points, data processing and analysis of measurement results, and presenting them in the form of charts. Instruments for magnetic measurements and procedures developed through many years of experience are also described,. Much of the work is devoted to the investigation of secular changes of the geomagnetic field. Their knowledge is necessary to update the results of magnetic measurements and to reduce them to a specific epoch, using methods developed in the Institute of Geodesy and Cartography and described in this work.

Described in this work of the geophysical database, created in the Institute of Geodesy and Cartography, contains a complete set of data from the magnetic measurements in Poland, both archival and contemporary. The database contains also data from neighbouring countries repeat stations and the average annual values of the geomagnetic field components generated from records in magnetic observatories in Europe. This paper describes the determined secular changes of the geomagnetic field during 1955–2010 and their use for the development of charts of contour lines of the geomagnetic field components, in particular magnetic declination. Information on the cooperation of the Institute of Geodesy and Cartography with other research institutions and its results is also presented.

The measurement procedures used at the points of magnetic networks, airports and other selected objects as well as procedures used for attesting magnetic instruments are described in the Appendix. There are also presented the forms for magnetic measurements and sheets for attestation of magnetic instruments.

1. WPROWADZENIE

Problemy związane z badaniem pola magnetycznego Ziemi i wykorzystaniem wyników tych badań w praktyce są przedmiotem zainteresowania specjalistów reprezentujących dwa środowiska zawodowe. Dla środowiska geofizyków i geologów wyniki badania magnetycznego pola Ziemi stanowią narzędzie do poznania budowy skorupy ziemskiej, zjawisk fizycznych zachodzących we wnętrzu Ziemi oraz w praktyce do poszukiwania złóż mineralnych potrzebnych gospodarce kraju. Dla środowiska geodetów pole geomagnetyczne, jako pole potencjalne, jest jednym z czynników wpływających na procesy geodynamiczne, a więc i na kształt Ziemi, co stanowi przedmiot badań geodezji. Właściwości pola magnetycznego Ziemi i jego parametry umożliwiające autonomiczną orientację w przestrzeni, są wykorzystywane w topografii cywilnej i wojskowej, nawigacji lotniczej i morskiej, jak również w przemyśle lotniczym, łączności i in.

Te dwa główne kierunki zastosowania wyników badań ziemskiego pola magnetycznego determinują zakres zainteresowań obu ww. środowisk. Geofizycy koncentrują swoją uwagę na pomiarach i skartowaniu anomalii modułu F wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego lub składowej pionowej Z tego wektora. Są nimi różnice między parametrami pola mierzonego i pola normalnego, obliczonego z matematycznego modelu pola geomagnetycznego. Zmiany pola magnetycznego Ziemi o okresie rocznym i dłuższym nie są w związku z tym przedmiotem ich specjalnego zainteresowania. Można założyć, że zmiany te jednakowo oddziałują na pole mierzone i na pole normalne i stąd nie mają zasadniczego wpływu na rozkład i wielkość anomalii.

Dla geodetów rozkład przestrzenny zmian wiekowych pola magnetycznego Ziemi jest bardzo istotny. Zmiany te powodują szybką dezaktualizację danych magnetycznych, a więc i wszystkich opracowań na nich opartych. Środowisko geodezyjne jest zatem żywotnie zainteresowane w prowadzeniu badań nad przebiegiem i rozkładem przestrzennym zmian wiekowych ziemskiego pola magnetycznego, bowiem bez tej wiedzy aktualizacja danych magnetycznych byłaby praktycznie niemożliwa (Welker i Żółtowski, 1993b).

Różnice w zainteresowaniach wspomnianych środowisk zawodowych przekładają się na różnice w ich podejściu do pomiarów magnetycznych wykonywanych w terenie. Dla geofizyków dane magnetyczne odniesione do konkretnej epoki stanowią materiał przejściowy, na podstawie którego opracowuje się mapy anomalii magnetycznych lub wykreśla zmiany gradientu opracowywanej składowej pola geomagnetycznego (najczęściej Z lub F) na profilach geologicznych. Mapy te, jak wspomniano wyżej, nie wymagają aktualizacji ze względu na zmiany wiekowe. Dla geodetów zdjęcie magnetyczne (chodzi tu przede wszystkim o zdjęcie deklinacji magnetycznej) stanowi podstawę do opracowywania map magne-

tycznych odnoszących się do konkretnej epoki. Wiedza o zachodzących w czasie zmianach pola magnetycznego Ziemi umożliwia aktualizację tych map, zgodnie z potrzebami użytkowników.

Źródłem danych magnetycznych, niezbędnych do opracowań i badań, są wyniki pomiarów aktualnych i dawnych, zawarte w bankach danych i w zbiorach archiwalnych, najczęściej w postaci map i tabel, ale również w postaci źródłowej czyli operatów pomiarowych. Analiza przydatności tych danych i przygotowanie ich do wykorzystania przez geodetę wymaga wiedzy specjalistycznej i doświadczenia. Z tego względu już w połowie lat 1950., w Instytucie Geodezji i Kartografii w Warszawie została utworzona Pracownia Magnetyzmu Ziemskiego, której zadaniem było zaspokojenie potrzeb geodezji w zakresie aktualnych danych magnetycznych. Prace obejmowały badania danych archiwalnych, wykonywanie zdjęć magnetycznych na punktach osnów magnetycznych kraju, wykonywanie pomiarów na innych punktach terenowych (lotniska, odwierty...), badanie zmian wiekowych pola magnetycznego Ziemi oraz gromadzenie danych w zbiorach archiwalnych Instytutu. Od wczesnych lat 1980., zbiory te w formie cyfrowej, stanowią zawartość Banku Danych Geofizycznych, który został utworzony w Instytucie i jest na bieżąco aktualizowany i unowocześniany (rozdz. 7).

Najważniejszym dla geodetów elementem pola magnetycznego Ziemi jest deklinacja magnetyczna (uchylenie magnetyczne), stanowiąca jeden ze składników treści map topograficznych. Informacje o deklinacji magnetycznej muszą być także umieszczane na mapach morskich i lotniczych. Zmiany pola geomagnetycznego sprawiają, że dane te po pewnym czasie stają się nieaktualne i niezbędne jest wprowadzenie odpowiedniej korekty, a nawet opracowanie tych danych od nowa.

Na potrzeby służby geodezyjnej kraju zespół Instytutu Geodezji i Kartografii opracował projekt i zrealizował w latach 1952–1955 oraz 1958–1959 pierwsze podstawowe zdjęcie deklinacji magnetycznej w nowych granicach Polski. W wyniku opracowania tych pomiarów powstała pierwsza mapa izogon deklinacji magnetycznej na epokę 1955.5 (Krzemiński, 1959), zaktualizowana następnie do epoki 1961.5 (Krzemiński i in., 1963b). Do chwili obecnej wyniki tego zdjęcia uzupełnione o wartości z wykonywanych później pomiarów magnetycznych stanowią podstawę dla wszystkich opracowań magnetycznych w Polsce (rozdz. 6).

Równocześnie ze zdjęciem deklinacji magnetycznej powstała sieć zastabilizowanych punktów wiekowych (*repeat stations*), obecnie zwana *podstawową osnową magnetyczną kraju*, na której systematycznie, co najmniej raz na 4 lata, są wykonywane absolutne pomiary trzech niezależnych składowych pola magnetycznego (Krzemiński i in., 1963a; Sas-Uhrynowski, 1977a). Osnowa ta liczyła początkowo 20 punktów, obecnie zaś składa się z 19 punktów. Uzupełniają ją dwa obserwatoria magnetyczne – w Belsku i na Helu, stanowiące punkty odniesienia dla wszelkich redukcji magnetycznych na terenie kraju. Analiza pomiarów na punktach wiekowych umożliwia monitorowanie rozkładu przestrzennego zmian pola geomagnetycznego. Zmiany te są podstawą do aktualizacji wartości składowych tego pola otrzymanych w wyniku pomiaru bezpośredniego (rozdz. 5).

Dobrym narzędziem weryfikacji wyników pomiarów magnetycznych i ich redukcji jest globalny matematyczny model pola magnetycznego Ziemi. Powszechnie stosowany przez geofizyków jest model IGRF opracowywany raz na 5 lat przez IAGA (McLean i in., 2004). Publikowane współczynniki rozwinięcia funkcji potencjału pozwalają obliczyć wartości elementów pola geomagnetycznego dla dowolnego punktu globu i na dowolną epokę w pięcioletnim interwale.

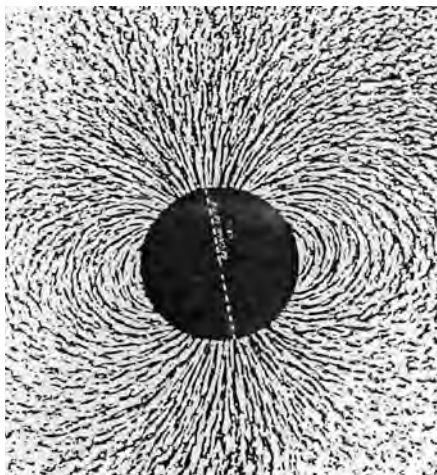
1.1. Pole magnetyczne Ziemi

W badaniach dotyczących pola geomagnetycznego, jak również przy atestacji i wzorcowaniu różnego rodzaju magnetycznych urządzeń pomiarowych, stosowane są procedury uwzględniające właściwości tego pola i jego parametry. Należałoby w tym miejscu przypomnieć o najważniejszych aspektach dotyczących ziemskiego pola magnetycznego i ich wpływu na stosowanie określonych procedur badań lub standardów wykorzystywanych przy pracach pomiarowych (Janekowski i Sucksdorff, 1996).

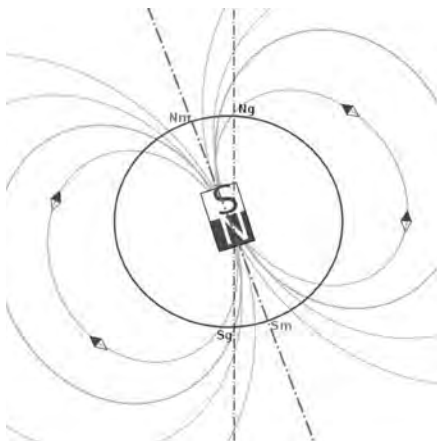
Kulę ziemską można ogólnie rzecz biorąc przyrównać do wielkiego magnesu z dwoma biegunami (północnym i południowym), wytwarzającego pole magnetyczne, którego kształt obrazują linie sił tego pola. Według hipotezy zaproponowanej przez Edwarda Bullarda (zw. *geodynamo*), siłą napędową pola geomagnetycznego są wirowe prądy konwekcyjne w płynnym jądrze Ziemi. W wygenerowanych prądach, ruch obrotowy Ziemi wywołuje poprzez efekt Coriolisa wiry działające jak jednobiegunowy generator Faradaya, wytwarzające prąd elektryczny. Wskutek przepływu tego prądu powstaje pole magnetyczne. Teoretycznie, linie sił tego pola powinny być symetryczne, gdyż ruch elektrycznie naładowanych cząstek w płynnym jądrze wytwarza, w wyniku wirowania Ziemi, symetryczny prąd elektryczny – pole powinno być więc jednorodne. Jednak ustawianie się igły magnetycznej w różnych oddalonych od siebie punktach Ziemi w różnych kierunkach wskazuje na niejednorodność pola magnetycznego w stosunku do powierzchni Ziemi. Zadaniem nauki o magnetyzmie ziemskim jest badanie tego pola w celu znalezienia źródeł jego powstania i związków z innymi zjawiskami fizycznymi zachodzącymi we wnętrzu Ziemi i w otaczającej ją atmosferze. Pole magnetyczne rozciąga się nawet na kilkadziesiąt tysięcy kilometrów od powierzchni Ziemi, a obszar, w którym ono występuje nosi nazwę ziemskiej magnetosfery.

Igła magnetyczna ustawia się zawsze wzdłuż linii sił ziemskiego pola magnetycznego. Na rysunku 1.1 pokazano fotografię opiłków żelaznych, rozsypanych na arkuszu papieru, które zostały poddane działaniu magnesu kulistego (Chapman i Bartels, 1940). Opiłki te pod wpływem działania pola magnetycznego zajęły uporządkowane położenie, zgodnie z przebiegiem linii sił tego pola. Na rysunku 1.2 pokazano linie sił pola magnetycznego magnesu kulistego obliczone teoretycznie. Igła magnetyczna (kierunek na północ magnetyczną) ustawia się w kierunku bieguna południowego geodipola. Należy zwrócić uwagę, że bieguny magnetyczne Ziemi są oznaczane zgodnie z nazwami biegunów geograficznych, a przeciwnie do oznaczeń biegunów magnesu stosowanych w fizyce.

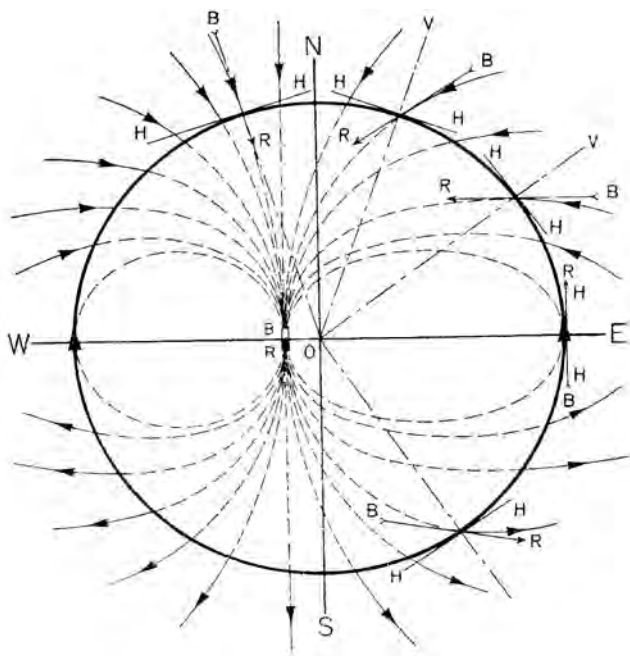
Na obu rysunkach linie sił przebiegają podobnie. Podobnie powinny także wyglądać linie sił ziemskiego pola magnetycznego. W rzeczywistości jednak ich przebieg jest bardziej złożony i rozkład pola nie jest regularny. Model składający się z co najmniej kilkunastu przemieszczających się innych dipoli rozmieszczonych wokół płaszcza na głębokości 3–5 tysięcy km lepiej wpasowuje się w obserwacje składowych pola magnetycznego Ziemi niż model ograniczony do pojedynczego jednorodnego geodipola centralnego umieszczonego blisko jądra Ziemi (Sas-Uhrynowski i in., 2002). Uproszczony obraz tego pola przedstawia rysunek 1.3. Widać na nim, że bieguny magnetyczne nie pokrywają się z biegunami geograficznymi i nie zajmują położenia dokładnie przeciwległego tak, jak bieguny geograficzne. Obecnie linia łącząca bieguny magnetyczne tworzy z osią obrotu Ziemi kąt około 11.3° .



Rys. 1.1. Rozkład opilków żelaza poddanych działaniu magnesu kulistego



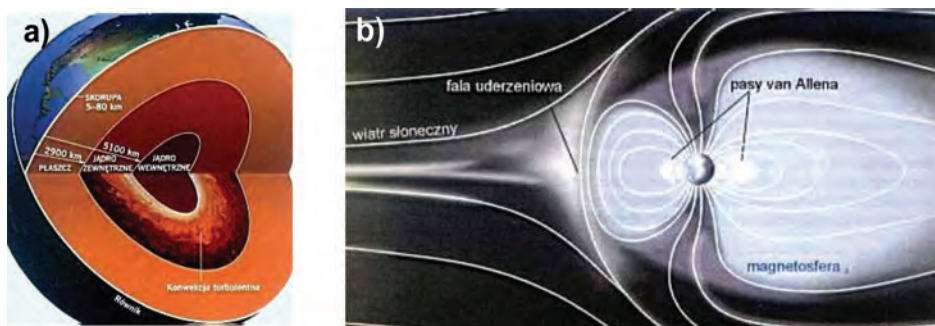
Rys. 1.2. Linie sił magnesu kulistego obliczone teoretycznie i kierunki na bieguny magnetyczne (Nm, Sm) i geograficzne (Ng, Sg)



Rys. 1.3. Uproszczony obraz linii sił pola magnetycznego Ziemi (Hine, 1968)

Na rysunku 1.3 B i R oznaczają bieguny magnesów znajdujących się w ziemskim polu magnetycznym a V i HH są liniami pokazującymi pionowy i poziomy kierunek linii sił ziemskiego pola magnetycznego w różnych szerokościach geograficznych.

Teoretyczne przedstawienie pola magnetycznego Ziemi jako pola potencjalnego zaproponował Gauss w pierwszej połowie XIX wieku. Dzięki tej teorii można było podzielić pole magnetyczne Ziemi na dwie części o wewnętrznych i zewnętrznych źródłach (rys. 1.4). Pierwsze próby wydzielenia potencjału, którego źródła znajdują się poza kulą ziemską podjął Schmidt w 1885 roku. Dalsze



Rys. 1.4. Źródła a) wewnętrzne i b) zewnętrzne wpływające na pole magnetyczne Ziemi (www.wikipedia.org/Earth_magnetic_field)

badania wykonane na podstawie danych ze zdjęcia magnetycznego na całej kuli ziemskiej wykazały, że pole uwarunkowane czynnikami zewnętrznymi stanowi około 6% pola obserwowanego (Bauer i in., 1921; Bauer, 1923). Badania te nie wyjaśniały jednak przyczyn namagnesowania kuli ziemskiej. Do tej pory badania zjawisk magnetyzmu ziemskiego nie dały jednoznacznej teorii ani hipotezy opisującej przyczyny ich powstawania

Prace nad ziemską magnetosferą zaczęto już w XVII wieku, ale właściwie opisana została ona dopiero w latach 60. XX wieku. Dane z amerykańskiej sondy kosmicznej Explorer 1, opracowane w ramach programu badań przeprowadzanych w trakcie Międzynarodowego Roku Geofizycznego (*International Geophysical Year*) w latach 1957-1958, umożliwiły dokładniejsze rozpoznanie magnetosfery i zanalizowanie jej wpływu na pole magnetyczne Ziemi. Misje sond kosmicznych umożliwiły także odkrycie wiatru słonecznego i określenie związków między prądami płynącymi w magnetosferze, a emisją naładowanych cząstek ze Słońca. Magnetosfera Ziemi to obszar przestrzeni kosmicznej będący strefą oddziaływania ziemskiego pola magnetycznego. Kształt magnetosfery, zniekształcony poprzez wiatr słoneczny, określa dipolowe ziemskie pole magnetyczne. W kierunku Słońca granica magnetosfery jest odległa od centrum Ziemi o około 70 000 km (10–12 promieni ziemskich), a jej niesymetryczny kształt tworzy po przeciwnej stronie Ziemi warkocz, który rozciąga się na odległość nawet do 100 promieni ziemskich. Zwiększająca się liczba pozyskiwanych danych pomiarowych ze specjalistycznych urządzeń umieszczanych na satelitach oraz coraz lepsze techniki komputerowe pozwolą na dokładniejsze poznanie właściwości magnetosfery i być może na lepszy opis źródeł jej powstania.

Analiza map magnetycznych oraz badania matematycznych modeli pola magnetycznego Ziemi prowadzą do wniosku, że obserwowane na powierzchni Ziemi pole magnetyczne jest sumą pól o różnych źródłach pochodzenia. Całkowite natężenie pola magnetycznego Ziemi H_t można więc przedstawić za pomocą wzoru:

$$H_t = H_0 + H_m + H_a + H_e + \delta H = H_n + H_a \quad (1.1)$$

gdzie

H_0 – natężenie pola jednorodnie namagnesowanej kuli ziemskiej,

H_m – natężenie pola szczątkowego lub kontynentalnego związanego ze źródłami we wnętrzu Ziemi,

H_a – natężenie pola anormalnego zależnego od struktur geologicznych litosfery (wpływ skał namagnesowanych przez normalne pole magnetyczne Ziemi),

H_e – natężenie pola zewnętrznego (generowane w jonosferze i magnetosferze),

δH – natężenie pola zmian, którego źródła leżą poza kulą ziemską,

H_n – natężenie pola normalnego.

Obecnie prace badaczy skupiają się głównie na wyznaczeniu wpływu poszczególnych źródeł na wielkość parametrów opisujących obserwowane pole magnetyczne.

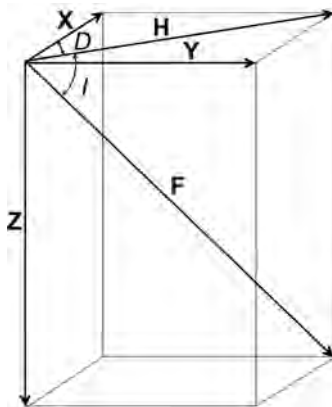
Pole geomagnetyczne opisywane jest za pomocą wektora całkowitego natężenia pola $\mathbf{F}$, którego kierunek i moduł można wyznaczyć w dowolnym punkcie pomiaru. Wektor ten można rozłożyć na składowe:

- pionową Z (V), skierowaną do środka Ziemi zgodnie z kierunkiem wektora przyspieszenia siły ciężkości;
- poziomą H , skierowaną na północ magnetyczną, czyli w kierunku północnego bieguna magnetycznego;
- północną X , skierowaną na północ geograficzną;
- wschodnią Y , skierowaną prostopadle do składowej X (dodatnią w kierunku wschodnim, ujemną w kierunku zachodnim).

Do celów praktycznych (szczególnie w geodezji i nawigacji) wykorzystywane są elementy kątowe pola geomagnetycznego. Są to:

- deklinacja magnetyczna D będąca kątem pomiędzy kierunkiem na północ geograficzną a kierunkiem na północ magnetyczną (południkiem magnetycznym) liczoną od północy geograficznej. Deklinacja po wschodniej stronie składowej X nosi nazwę deklinacji wschodniej (E) i ma wartość dodatnią;
- inklinacja magnetyczna I będąca kątem pomiędzy kierunkiem wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego $\mathbf{F}$, a płaszczyzną poziomą. Inklinacja ma wartości dodatnie na półkuli północnej, ujemne na południowej.

Na rysunku 1.5 pokazany jest rozkład wektora całkowitego natężenia pola geomagnetycznego $\mathbf{F}$ na składowe. Łatwo zauważyć, że pomiędzy modułami składowych wektora $\mathbf{F}$ oraz elementami kątowymi tego pola zachodzą proste zależności trygonometryczne, które pozwalają obliczyć wszystkie kątowe i siłowe elementy pola geomagnetycznego, jeśli znane są trzy elementy niezależne.



Rys. 1.5. Składowe wektorowe $\mathbf{X}$, $\mathbf{Y}$, $\mathbf{Z}$ i $\mathbf{H}$ (o modułach X , Y , Z , H) i elementy kątowe D i I wektora $\mathbf{F}$ całkowitego natężenia pola geomagnetycznego.

Między wartościami poszczególnych elementów pola magnetycznego Ziemi zachodzą następujące zależności:

$$\begin{aligned}
 H &= F \cos I \\
 Z &= F \sin I = H \operatorname{tg} I \\
 X &= H \cos D \\
 Y &= H \sin D \\
 X^2 + Y^2 &= H^2 \\
 X^2 + Y^2 + Z^2 &= H^2 + Z^2 = F^2
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$

Główną przyczyną nieregularnego rozkładu pola magnetycznego na powierzchni kuli ziemskiej jest niejednorodna budowa wnętrza Ziemi, która powoduje istnienie dużych anomalii magnetycznych, tzw. anomalii globalnych, których powstawanie opisuje się za pomocą dipoli utworzonych wokół płynnego jądra Ziemi (Sas-Uhrynowski i in., 2002, 2004). Według teorii dipolowej oprócz dipola centralnego istnieje kilkanaście dipoli o porównywalnym natężeniu i różnych kierunkach zwrotu. Każdy z nich może być opisany za pomocą sześciu parametrów (Kalinin, 1953; Demina i in., 1998a), a mianowicie:

r – odległość dipola od środka Ziemi,

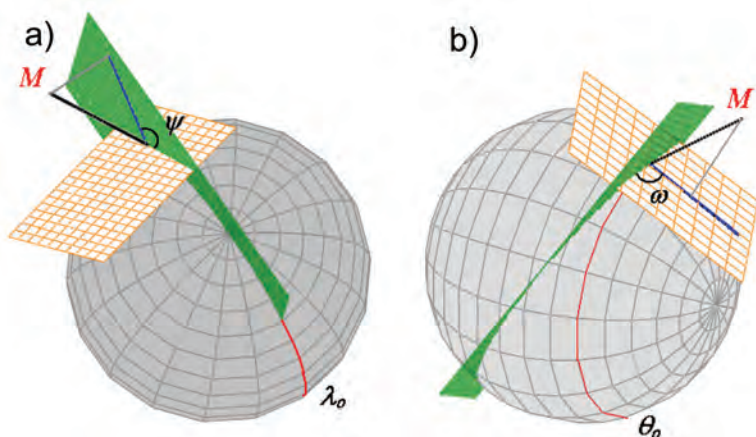
$\theta_0 = 90^\circ - \varphi_0$, gdzie φ_0 – szerokość geograficzna punktu, w którym dipol jest zlokalizowany,

λ_0 – długość geograficzna tego punktu, w którym dipol jest zlokalizowany,

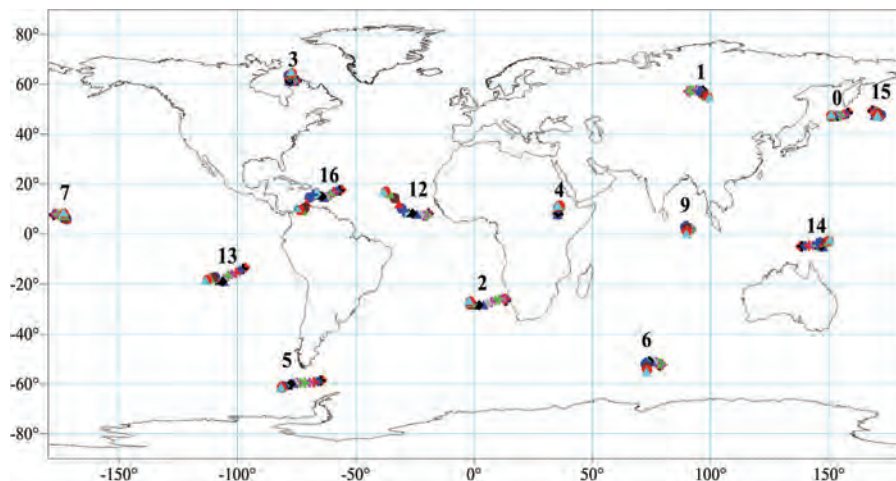
M – wielkość dipola czyli jego moment magnetyczny,

ψ – kąt pomiędzy rzutem wektora momentu magnetycznego dipola na płaszczyznę południka λ_0 , a płaszczyznę styczną do sfery koncentrycznej z powierzchnią Ziemi i przechodzącą przez punkt (φ_0, λ_0) (rys. 1.6a),

ω – kąt pomiędzy rzutem wektora momentu magnetycznego dipola na płaszczyznę styczną do sfery, a płaszczyznę styczną do stożka środkowego opartego na równoleżniku $\varphi = \varphi_0$ w punkcie (φ_0, λ_0) (rys. 1.6b).



Rys. 1.6. Graficzny obraz parametrów ψ i ω dipoli magnetycznych



Rys. 1.7. Obraz rozkładu teoretycznych dipoli i ich przemieszczenia w latach 1900–2000

Na rysunku 1.7 pokazano rozkład modelowych, głównych dipoli tworzących globalne anomalie magnetyczne i ich teoretyczne przemieszczenia w ciągu 100 lat XX wieku. Model dipolowy został opracowany w IGiK wspólnie z Instytutem LOIZMIRAN w St. Petersburgu (Sas-Uhrynowski i in., 2002, 2004).

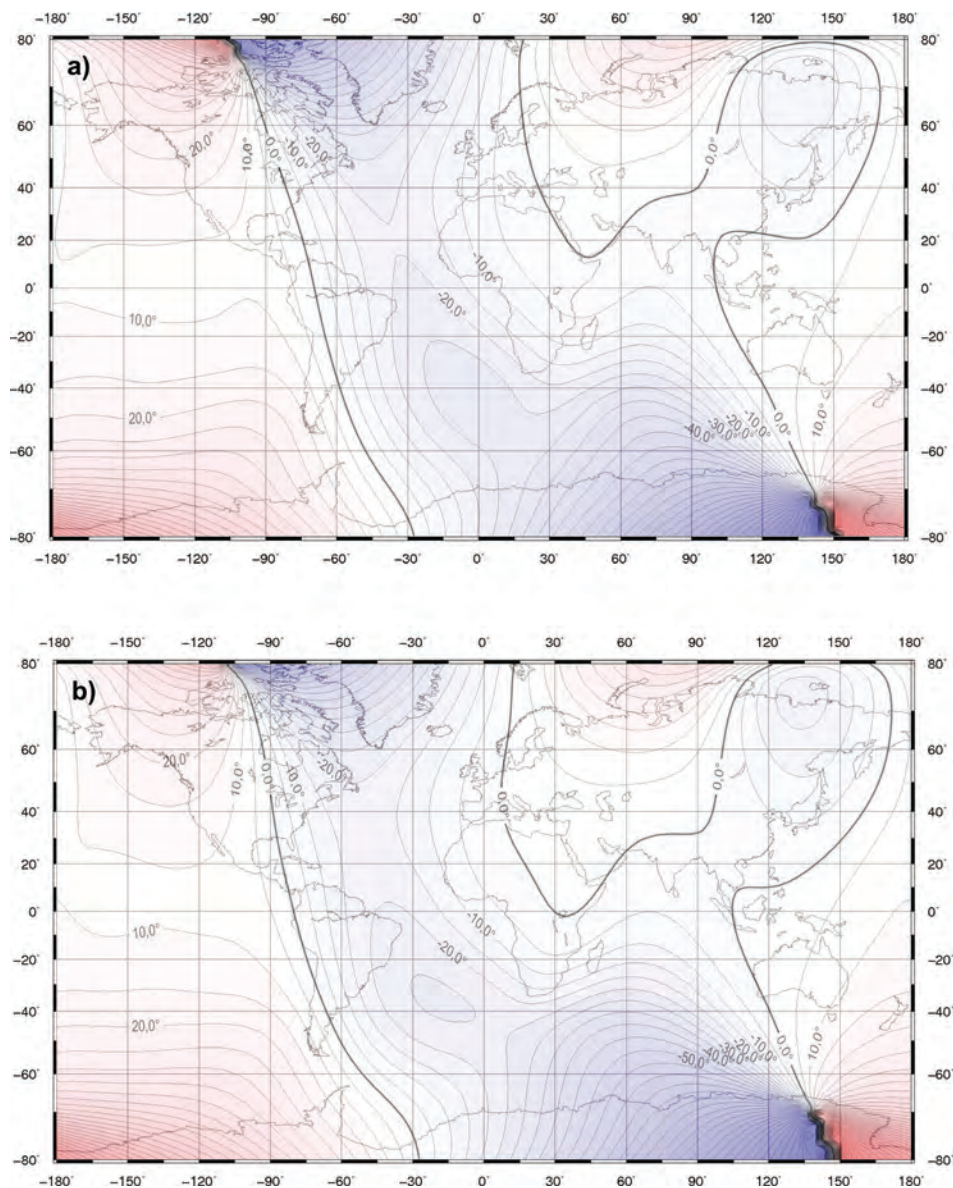
Na rysunkach 1.8, 1.9 i 1.10 pokazane są mapy magnetyczne świata dla epoki 1950.5 i 2000.5. Są to: mapa deklinacji magnetycznej D czyli mapa izogon, tj. linii o jednakowych wartościach deklinacji, mapa izodynam F czyli mapa rozkładu linii łączących punkty o jednakowych wartościach modułu wektora natężenia całkowitego ziemskiego pola magnetycznego oraz mapa inklinacji magnetycznej I zwana też mapą izoklin, tj. linii o jednakowych wartościach inklinacji.

Na mapach zamieszczonych na rysunkach 1.8–1.10 widać duże globalne anomalie ziemskiego pola magnetycznego. Rozmieszczenie tych anomalii jest podobne do rozmieszczenia opracowanych teoretycznie w wyniku setek obliczeń dipoli magnetycznych leżących na granicy płynnego jądra (rys. 1.7).

Przyczyną niejednorodności pola magnetycznego Ziemi jest także wpływ namagnesowania głębokich i płytszych warstw skorupy ziemskiej (anomalie regionalne i lokalne).

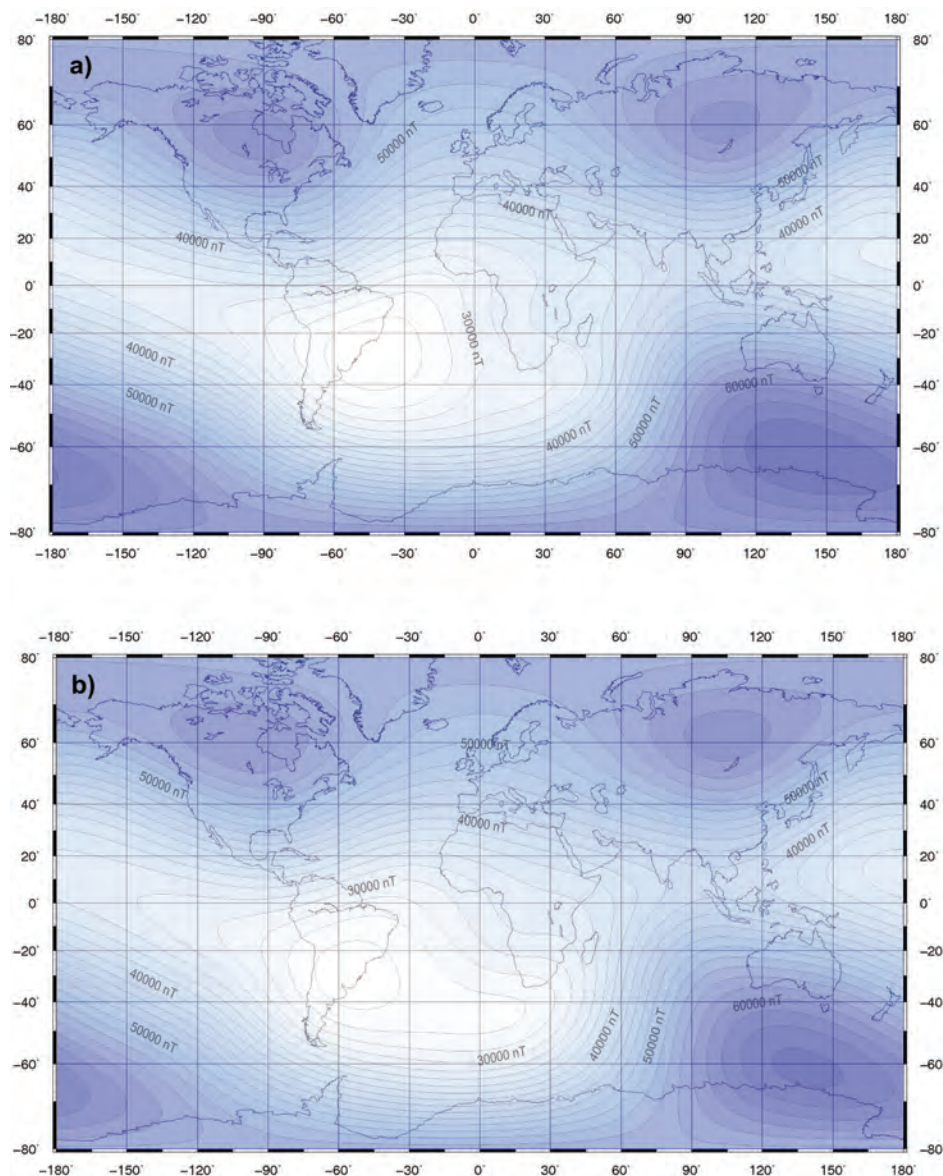
Na rysunku 1.11 pokazane są dla przykładu mapy jednej z większych lokalnych anomalii magnetycznych znajdującej się niedaleko Kurska w Rosji. Anomalia ta, opracowana przez Smirnowa w XIX wieku, jest tak silna, że igła magnetyczna busoli zamiast wskazywać północ odchyła się o ponad 120° , czyli pokazuje kierunek południowo – wschodni. Odwierty geologiczne wykonane na tym terenie wykazały ogromne pokłady skał o właściwościach magnetycznych (rudy żelaza).

Rysunek 1.12 przedstawia mapę deklinacji magnetycznej Polski na epokę 2010.5. Zielone linie to izogony obliczone na podstawie modelu ziemskiego pola magnetycznego IGRF2010. Widać wyraźnie, że południowo-zachodnia część



Rys. 1.8. Mapa deklinacji magnetycznej D – izogony [$^{\circ}$] wg modelu IGRF
 a) – na epokę 1950.5, b) – na epokę 2000.5

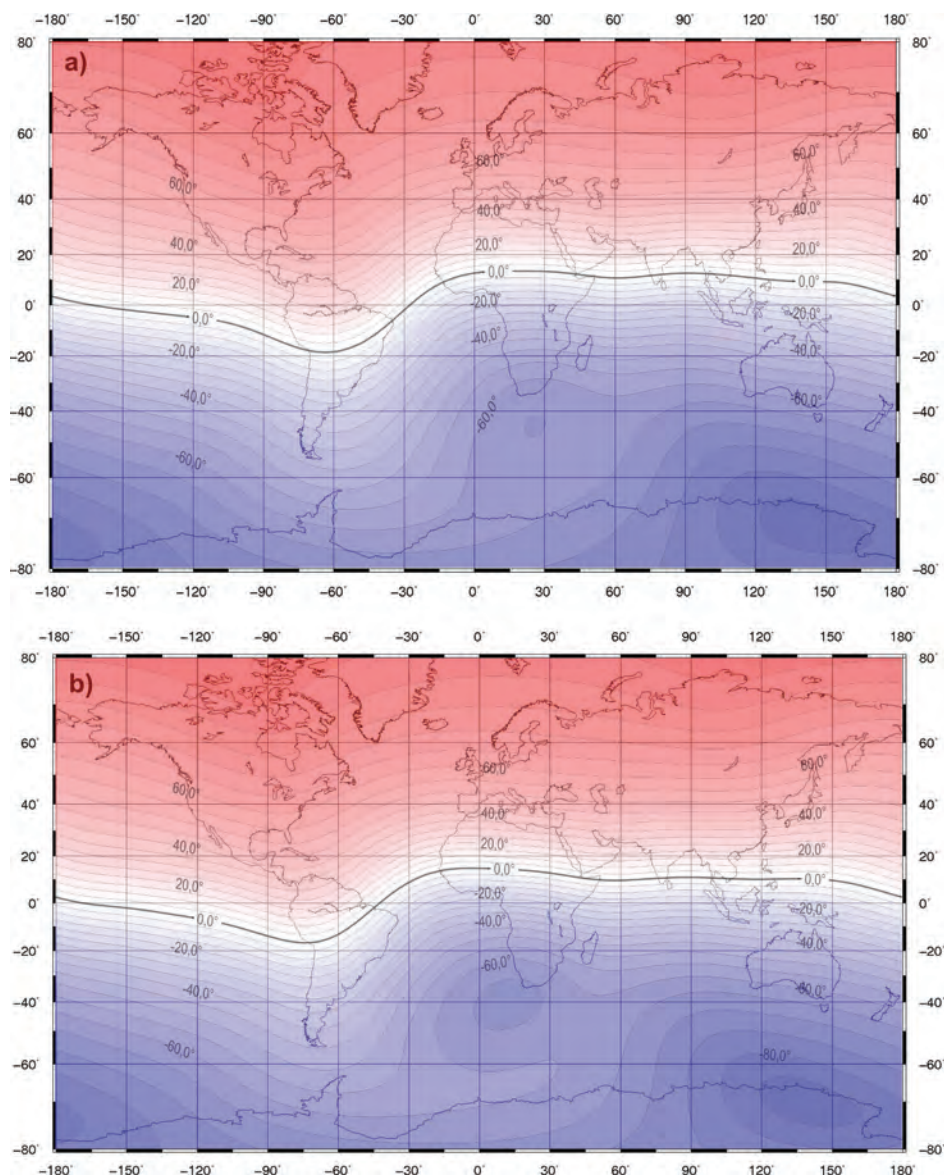
terytorium Polski to rejon magnetycznie spokojny. Izogony przebiegają prawie południkowo, odchylając się o kilka stopni na zachód względem modelu. Przebieg izogon w północno-wschodniej części kraju jest natomiast bardzo skomplikowany (Sas-Uhrynowski i Welker, 2006). Przyczyną tego jest budowa geologiczna – fundament krystaliczny po wschodniej stronie strefy T–T (Teisseyre’a–Tornquista) znajdujący się o kilka kilometrów bliżej powierzchni Ziemi niż po stronie za-



Rys. 1.9. Mapa modułu F wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego – izodynamy [nT] wg modelu IGRF
a) – na epokę 1950.5, b) – na epokę 2000.5

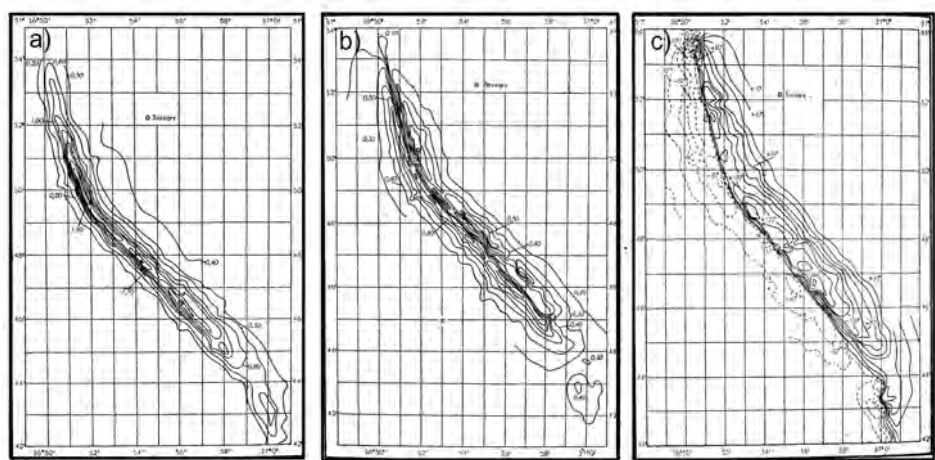
chodniej. Uwidacznia się to na powierzchni bardzo złożonym obrazem pola geomagnetycznego.

Pomiary magnetyczne w postaci zdjęcia magnetycznego potrzebnego do opracowania mapy wykonuje się także na morzach (Mroczek i Uhrynowski, 1986). Przedmiotem zainteresowania marynistów jest przede wszystkim rozkład

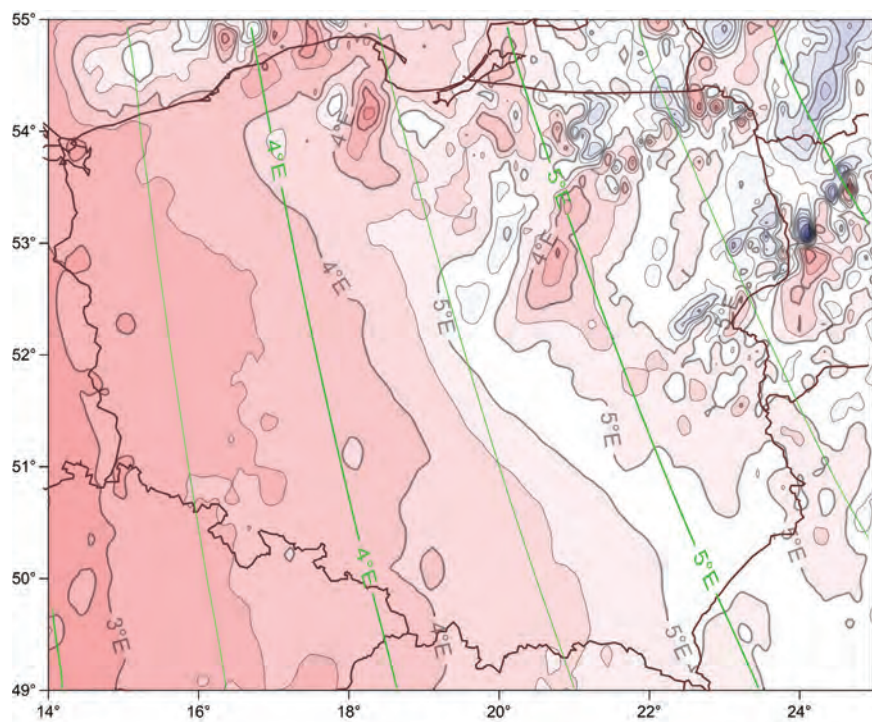


Rys. 1.10. Mapa inklinacji magnetycznej I – izokliny $[\circ]$ wg modelu IGRF
 a) – na epokę 1950.5, b) – na epokę 2000.5

deklinacji i modułu wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego, którego znajomość jest niezbędna w geologicznych pracach poszukiwawczych i w nawigacji. Pomiary F można stosunkowo łatwo wykonywać holując magnetometr na odpowiednio długiej linie za statkiem, co pozwala uniknąć zakłócającego wpływu mas metalu, z którego jest on zbudowany. Pozostałe elementy pola geomagnetycznego, które wymagają orientacji magnetometrów względem



Rys. 1.11. Anomalia Kurska dla składowych Z, H i D (Janowski, 1958)
 a) – anomalie składowej pionowej Z, b) – anomalie składowej poziomej H,
 c) – anomalie deklinacji magnetycznej D



Rys. 1.12. Mapa deklinacji magnetycznej Polski wraz z przebiegiem izogon obliczonych z modelu IGRF na epokę 2010.5 (kolor zielony)

poziomu i kierunku na północ geograficzną, mierzy się raczej rzadko z powodu znacznych trudności technicznych, jakie sprawia wyeliminowanie wpływu falowania morza, dewiacji magnetometrów wywołanych ferromagnetycznymi materiałami znajdującymi się na statku itp. Dokładne mapy morskie wszystkich elementów pola geomagnetycznego zostały opracowane dla środkowej i południowej części akwenu Morza Bałtyckiego (rozdz. 2). Nie są znane tego typu kompletne opracowania dla innych akwenów.

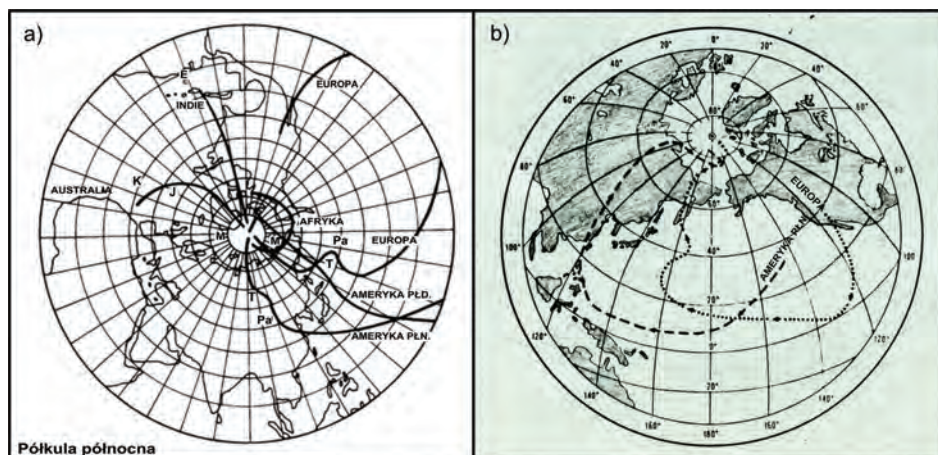
1.2. Zmiany pola geomagnetycznego

Ziemskie pole magnetyczne podlega ciągłym zmianom. Zmiany te zachodzą w bardzo szerokim zakresie częstotliwości – od części sekund do setek lat. Zmiany o okresach krótszych niż jeden rok, zwane wariacjami, są spowodowane czynnikami zewnętrznymi. Ich przyczyną jest przede wszystkim aktywność Słońca i Księżyca. Zmiany o okresach większych niż rok są spowodowane w znacznej części czynnikami wewnętrznymi, mają bowiem swoje źródło wewnątrz globu (zmiany namagnesowania wnętrza Ziemi). Zostały one nazwane zmianami wiekowymi. Zmiany wiekowe są zjawiskiem skomplikowanym i nie do końca dobrze rozpoznanym. Przyjmuje się, że są co najmniej cztery przyczyny ich występowania.

Pierwsza, to różnica pomiędzy okresem obrotu płynnego jądra Ziemi a okresem obrotu sztywnego płaszcza i skorupy. Zmiany spowodowane tym czynnikiem obejmują całą kulę ziemską i zostały one nazwane składową planetarną zmian wiekowych.

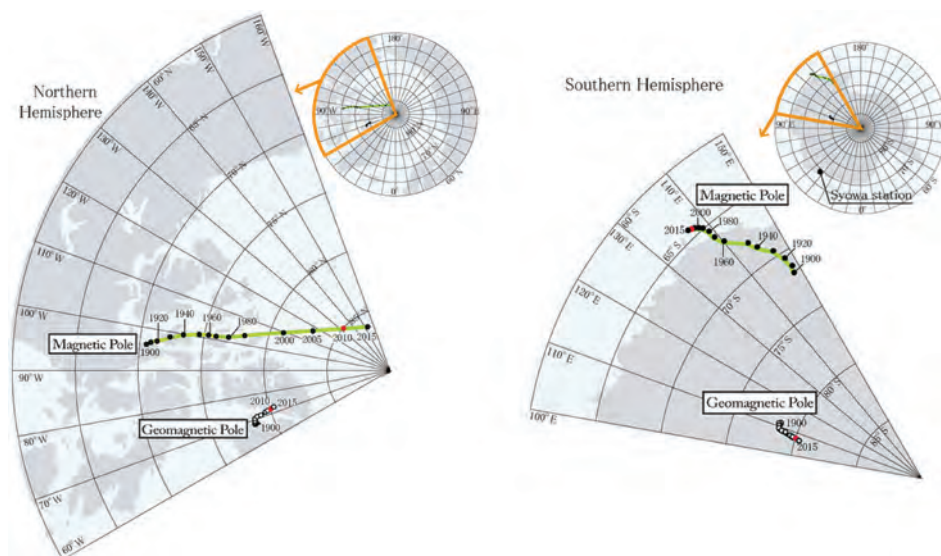
Drugą przyczyną są wiry konwekcyjne w wyższych partiach jądra na granicy z płaszczem. Z ich obecnością wiążą się wielkie kontynentalne anomalie magnetyczne. Różna intensywność wirów konwekcyjnych, ich ruchy i przemieszczanie się wewnątrz globu ziemskiego, powodują zmiany, które nakładając się na wiekowe zmiany planetarne, tworzą normalne tło zmian wiekowych na powierzchni globu. Jednym z przejawów zmian wiekowych wywołanych tymi przyczynami są także ruchy biegunów magnetycznych Ziemi (północnego – N i południowego – S), które stale, w różnym tempie, zmieniają swoje położenie. Na rysunku 1.14 pokazano trasy przemieszczania się północnego bieguna magnetycznego, względem sześciu kontynentów, wyznaczone na podstawie badań paleomagnetycznych przy wykorzystaniu próbek skalnych. Zwraca uwagę przesunięcie trasy biegunów, zwłaszcza w odległych epokach geologicznych oraz ich zbieżność w epokach ostatnich. Przyczyną tej różnicy jest przemieszczanie się kontynentów względem siebie. Korelacja między ruchem bieguna magnetycznego i ruchem kontynentów jest bardzo pomocna w badaniach przesunięć płyt kontynentalnych w przeszłości i obecnie.

Tabela 1.1 zawiera lokalizację biegunów magnetycznych i geomagnetycznych od 1900 do 2015 roku. Bieguny geomagnetyczne są to punkty przecięcia osi modelowego dipola centralnego, uzyskanego na podstawie opracowania wyników wszystkich dostępnych pomiarów magnetycznych, z powierzchnią Ziemi.



Rys. 1.14. Trasy biegunów magnetycznych względem różnych kontynentów wyznaczone na podstawie badań paleomagnetycznych według a) Cooka (Cook, 1973) i b) Pochtàreva (Pochtàrev i Mikhlin, 1985). Literami oznaczono położenie bieguna w danym okresie geologicznym: Pa – paleozoik, E – kambr, K – kreda, J – jura, T – trias, M – mezozoik

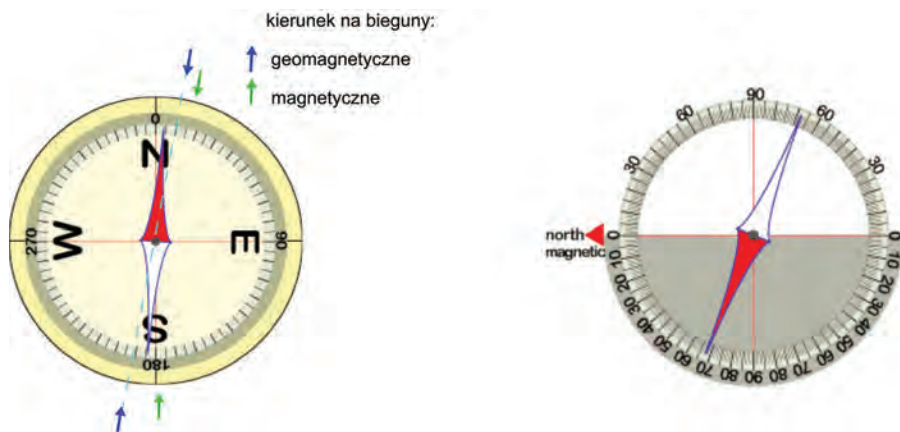
Bieguny te położone są symetryczne względem początku układu współrzędnych. Bieguny magnetyczne są to punkty na powierzchni Ziemi, w których wektor $\mathbf{F}$ skierowany jest w kierunku dipola centralnego ($I = 90^\circ$). Punkty te można wyznaczyć za pomocą pomiarów magnetycznych. Jako ciekawostkę należałoby



Rys. 1.15. Przemieszczanie się biegunów geomagnetycznych (białe punkty) i magnetycznych (zielona linia z czarnymi punktami) od 1900 do 2015 roku (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/poles/polesexp.html>) nie ma tego w bibliografii

dodać, że północny biegun magnetyczny ma swój ruch dobowy. Obecnie odsunięty jest on od bieguna geomagnetycznego wzdłuż południka magnetycznego o około 11° . Rysunek 1.15 pokazuje ruchy tych biegunów od 1900 roku do 2015 roku (ekstrapolacja od 2010 roku) na tle siatki geograficznej i konturów kontynentów. Należy podkreślić, że bieguny magnetyczne zmieniają swoje położenie także z powodu zmiennych zewnętrznych strumieni prądowych w jonosferze i magnetosferze.

Na rysunku 1.16 pokazano przykładowe odczyty z busoli i inklinomierza dla środka Polski z zaznaczeniem kierunków na bieguny magnetyczne i geomagnetyczne.



Rys. 1.16. Przykładowe odczyty deklinacji i inklinacji dla środka Polski na epokę 2012.5 ze wskazań igły busoli z zaznaczonymi kierunkami na bieguny geomagnetyczne i magnetyczne

Trzecia przyczyna zmian wiekowych to zmiany spowodowane procesami zachodzącymi w skorupie ziemskiej lub bezpośrednio pod nią (zmiany namagnesowania).

Czwarta przyczyna to wpływ zewnętrznego pola magnetycznego złożonego z pola magnetycznego indukowanego przez prądy tworzone na skutek krótko-okresowych zmian pola magnetycznego Ziemi oraz pola indukowanego przez prądy w jonosferze i magnetosferze. Zarówno Ziemia jak i górne warstwy jej atmosfery są dobrymi przewodnikami elektromagnetycznymi (Kalinin, 1946; Langel i Hinze, 1998).

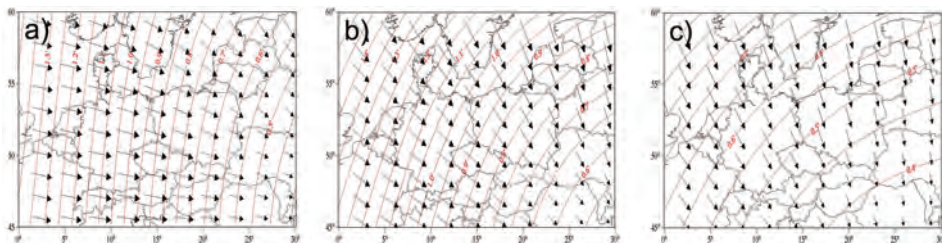
Zmiany wiekowe najlepiej przedstawiają rejestracje elementów pola geomagnetycznego w światowych obserwatoriach magnetycznych. Przykłady zmian wiekowych deklinacji magnetycznej dla Europy Środkowej w latach 1980–2005 w stosunku do obserwatorium w Belsku pokazują rysunki 1.17a, 1.17b i 1.17c. Strzałkami zaznaczono kierunki gradientów tych zmian (Welker, 2007).

Zmiany wiekowe pola geomagnetycznego można prześledzić także poprzez analizę rozkładu deklinacji magnetycznej, odniesionej do epoki 1970.5 w latach

Tabela 1.1. Lokalizacja biegunów geomagnetycznych (IGRF) i magnetycznych od 1900 do 2015 roku

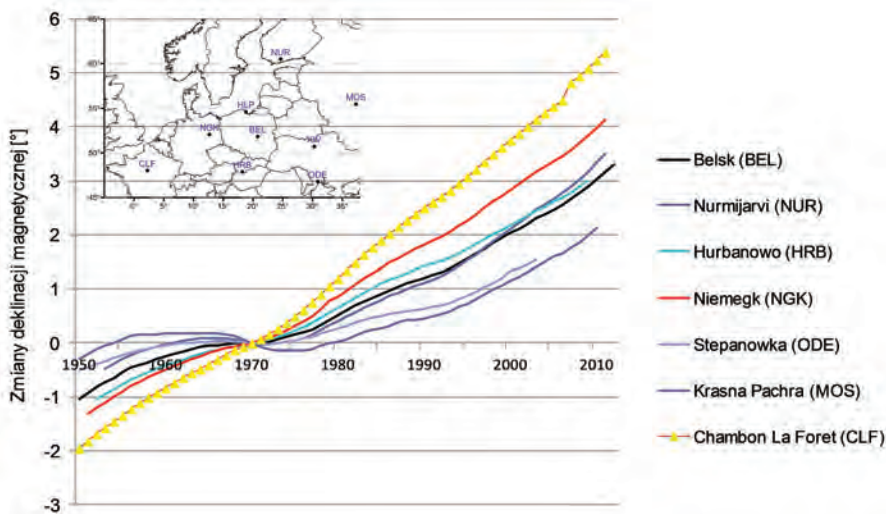
Rok	Położenie biegunów geomagnetycznych				Położenie biegunów magnetycznych			
	biegun północny		biegun południowy		biegun północny		biegun południowy	
	$j [^\circ]$	$\lambda [^\circ]$	$j [^\circ]$	$\lambda [^\circ]$	$j [^\circ]$	$\lambda [^\circ]$	$j [^\circ]$	$\lambda [^\circ]$
1900	78.6N	68.8W	78.6S	111.2E	70.5N	96.2W	71.7S	148.3E
1905	78.6N	68.7W	78.6S	111.3E	70.7N	96.5W	71.5S	148.6E
1910	78.6N	68.7W	78.6S	111.3E	70.8N	96.7W	71.2S	148.7E
1915	78.6N	68.6W	78.6S	111.4E	71.0N	97.0W	70.8S	148.5E
1920	78.6N	68.4W	78.6S	111.6E	71.3N	97.4W	70.4S	148.2E
1925	78.6N	68.3W	78.6S	111.7E	71.8N	98.0W	70.0S	147.6E
1930	78.5N	68.3W	78.5S	111.7E	72.3N	98.7W	69.5S	147.0E
1935	78.5N	68.4W	78.5S	111.6E	72.8N	99.3W	69.1S	145.8E
1940	78.5N	68.5W	78.5S	111.5E	73.3N	99.9W	68.6S	144.6E
1945	78.5N	68.5W	78.5S	111.5E	73.9N	100.2W	68.2S	144.5E
1950	78.5N	68.8W	78.5S	111.2E	74.6N	100.8W	67.9S	143.6E
1955	78.5N	69.2W	78.5S	110.8E	75.2N	101.4W	67.2S	141.5E
1960	78.5N	69.5W	78.5S	110.5E	75.3N	101.0W	66.7S	140.2E
1965	78.5N	69.9W	78.5S	110.1E	75.6N	101.3W	66.3S	139.5E
1970	78.6N	70.2W	78.6S	109.8E	75.9N	101.0W	66.0S	139.4E
1975	78.7N	70.5W	78.7S	109.5E	76.2N	100.7W	65.7S	139.5E
1980	78.8N	70.8W	78.8S	109.2E	76.9N	101.7W	65.4S	139.3E
1985	79.0N	70.9W	79.0S	109.1E	77.4N	102.6W	65.1S	139.1E
1990	79.1N	71.1W	79.1S	108.9E	78.1N	103.7W	64.9S	138.9E
1995	79.3N	71.4W	79.3S	108.6E	79.0N	105.2W	64.8S	138.7E
2000	79.5N	71.6W	79.5S	108.4E	81.0N	109.7W	64.7S	138.4E
2001	79.6N	71.6W	79.6S	108.4E	81.4N	110.9W	64.6S	138.2E
2002	79.6N	71.7W	79.6S	108.3E	81.9N	112.6W	64.6S	138.1E
2003	79.7N	71.7W	79.7S	108.3E	82.3N	114.0W	64.6S	138.0E
2004	79.7N	71.7W	79.7S	108.3E	82.8N	116.2W	64.6S	138.0E
2005	79.7N	71.8W	79.7S	108.2E	83.2N	118.0W	64.5S	137.8E
2006	79.8N	71.8W	79.8S	108.2E	83.8N	122.0W	64.5S	137.7E
2007	79.8N	71.9W	79.8S	108.1E	84.1N	123.7W	64.5S	137.7E
2008	79.9N	71.9W	79.9S	108.1E	84.2N	124.0W	64.5S	137.6E
2009	79.9N	71.9W	79.9S	108.1E	84.9N	131.0W	64.4S	137.4E
2010	80.0N	72.2W	80.0S	107.8E	85.0N	132.6W	64.4S	137.3E
2011	80.1N	72.3W	80.1S	107.7E	85.1N	134.0W	64.4S	137.2E
2012	80.1N	72.4W	80.1S	107.6E	85.9N	147.0W	64.4S	137.1E
2013	80.2N	72.5W	80.2S	107.5E	85.9N	148.0W	64.4S	137.0E
2014	80.2N	72.5W	80.2S	107.5E	85.9N	149.0W	64.3S	136.8E
2015	80.3N	72.6W	80.3S	107.4E	86.1N	153.0W	64.3S	136.7E

1950–2012 w siedmiu wybranych obserwatoriach (rys. 1.18). Obserwatoria wybrano na linii wschód–zachód i północ–południe względem polskiego Centralnego Obserwatorium Geofizycznego Instytutu Geofizyki PAN w Belsku.



Rys. 1.17. Kierunki zmian deklinacji magnetycznej w Europie Centralnej w latach:
a) 1980–1990, b) 1990–2000, c) 2000–2005

Na rysunku 1.18 na przykładzie deklinacji magnetycznej pokazano, że przebieg zmian wiekowych pola geomagnetycznego w danym punkcie Ziemi zależy od jego położenia geograficznego – w tym wypadku położenia obserwatorium. Najszybsze zmiany deklinacji obserwuje się na zachód od Polski (Niemegk), zaś najwolniejsze – na wschodzie Europy (Krasna Pachra). Na linii północ–południe zmiany wiekowe są podobne mimo różnic w wielkości dobowych amplitud rejestrowanych składowych.



Rys. 1.18. Zmiany deklinacji magnetycznej zredukowane do epoki 1970.5 w wybranych obserwatoriach europejskich

Krótkookresowe zmiany (wariacje) pola geomagnetycznego, zależne od zjawisk geofizycznych zachodzących w jonosferze, można przedstawić jako zmiany spowodowane:

- wpływem jonosfery
 - zmiany dobowe słoneczne (sinusoidalne),
 - zmiany dobowe księżycowe,
- nieokresowymi zaburzeniami magnetycznymi (wg ich natężenia):
- burzami magnetycznymi (wywoływane są przez promieniowanie korpuskularne pochodzące od Słońca, obejmujące w jednej fazie całą kulę ziemską),
- zakłóceniami lokalnymi trwającymi lokalnie do kilku godzin,
- zakłóceniami zatokowymi (zmiany lokalne lub globalne, obrazujące się na magnetogramach w postaci wypukłości lub wklęsłości przypominających kształtem zatokę morską),
- pulsacjami (sinusoidalne wahania natężenia pola o amplitudzie kilku nanotesli i okresie kilku minut).

Zmiany te nie dadzą się opisać formułami matematycznymi. Ponieważ jednak są rejestrowane wyłącznie w wyniku bezpośrednich pomiarów magnetycznych to można je opracować metodami statystycznymi.

1.3. Obserwatoria magnetyczne

Badania nad poznaniem pola magnetycznego Ziemi mają długą historię. Dopiero jednak w końcu XIX wieku uznano za niezbędne posiadanie map rozkładu powierzchniowego elementów tego pola, zwłaszcza map izogon, potrzebnych do celów wojskowych i nawigacyjnych. Niezbędne stały się także mapy izodynam składowej pionowej Z wektora natężenia pola magnetycznego Ziemi, potrzebne do badań i poszukiwań geologicznych. Od czasu zastosowania do magnetycznych prac polowych magnetometrów protonowych, które znacząco uprościły i przyspieszyły pomiary, mapy składowej Z zostały zastąpione mapami modułu F wektora natężenia całkowitego pola magnetycznego F .

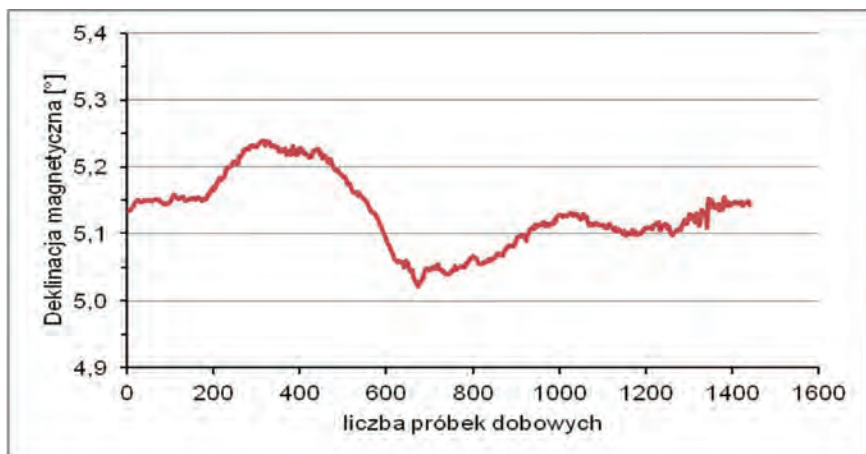
Dokładność pierwszych map magnetycznych była niska nie tylko z powodu małej precyzji przyrządów pomiarowych, ale także dlatego, że niedostateczna znajomość zmian wiekowych lub wręcz brak danych pozwalających na wyznaczenie tych zmian, uniemożliwiała aktualizacje map. Wzrastające potrzeby dynamicznie rozwijającego się przemysłu wydobywczego, transportu lotniczego i morskiego, a także potrzeby nowoczesnej armii, zwłaszcza po wojnach światowych I i II, zadecydowały o podjęciu energicznych starań w celu dostarczenia zainteresowanym ośrodkom aktualnych danych magnetycznych. Możliwości takie stwarzają przede wszystkim obserwatoria magnetyczne, gdzie prowadzona jest ciągła rejestracja zmian co najmniej trzech niezależnych składowych pola geomagnetycznego.

Coraz więcej krajów buduje własne obserwatoria magnetyczne, w których prowadzi się nie tylko stałą rejestrację zmian pola geomagnetycznego, ale także wykonuje się analizę tych zmian. Wyniki pomiarów i prac z nimi związanych są publikowane w postaci roczników magnetycznych, a ostatnio są także dostępne na stronach internetowych. Na systematycznie organizowanych przez IAGA, w różnych obserwatoriach, wspólnych sesjach pomiarowych porównuje się stan-

dardy instrumentów do pomiarów magnetycznych oraz ustala się zasady wzajemnej współpracy i wymiany doświadczeń.

Obserwatoria magnetyczne zakłada się w miejscach o małym gradiencie poziomym pola geomagnetycznego, w odległości od miasta nie mniejszej niż 40 km, daleko od zelektryfikowanych linii kolejowych lub linii tramwajowych, daleko od dużych fabryk i linii wysokiego napięcia. Przy projektowaniu lokalizacji obserwatorium należy przewidzieć kierunek rozbudowy miasta tak, aby po pewnym czasie obserwatorium nie znalazło się w jego granicach.

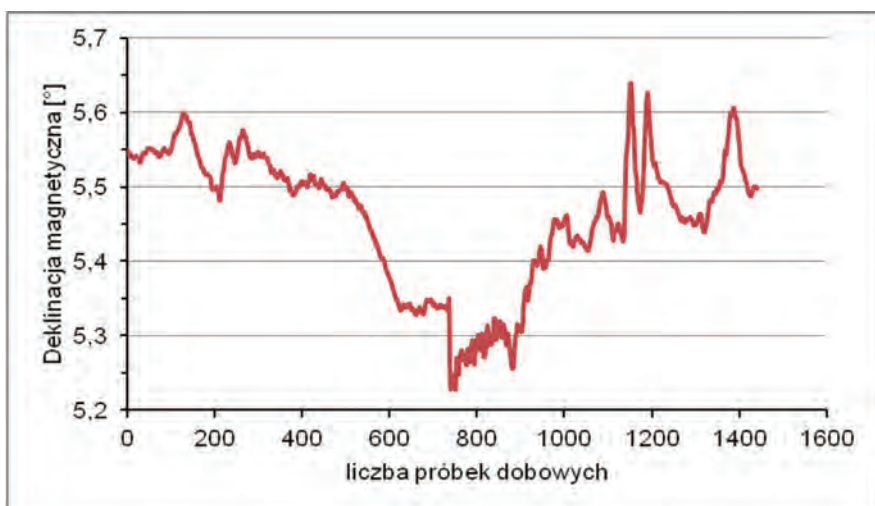
Rejestracja magnetyczna na terenie obserwatorium musi być prowadzona w osobno stojącym pawilonie rejestracyjnym, zabezpieczonym od szybkich zmian temperatury. Aparaturę rejestracyjną ustawia się więc w izolowanych pomieszczeniach z instalacją termostatyczną. Rejestracja zmian pola geomagnetycznego była początkowo prowadzona wyłącznie w systemie analogowym (graficzny obraz magnetogramów). Obecnie większość obserwatoriów przeszła na cyfrowy system rejestracji, gdyż jest on dużo wygodniejszy, dokładniejszy, tańszy, co związane jest z powszechnym już stosowanym nowoczesnym sprzętem pomiarowym. Na rysunkach 1.19 i 1.20 pokazane są przykładowe magnetogramy deklinacji magnetycznej, czyli wyniki rejestracji zmian deklinacji magnetycznej w obserwatorium magnetycznym w Belsku, w dniu magnetycznie spokojnym oraz w dniu magnetycznie zaburzonym. W dniu spokojnym (23 lipca 2010 r.) amplituda zmian wynosiła około 0.2° ($12'$), przy czym zmiany te zachodziły powoli. Maksymalna prędkość zmian deklinacji w interwale czasu 10–30 minut wynosiła około 0.05° . W dniu zaburzonym, 3 września 2012 r., amplituda zmian dochodziła do 0.5° i zmiany te były bardzo szybkie.



Rys. 1.19. Magnetogram D z obserwatorium w Belsku z dnia 23 lipca 2010 r.

Znajomość tych przebiegów jest niezbędna przy opracowywaniu magnetycznych pomiarów terenowych. Jedna seria pomiaru trwa około 6–10 minut i zmiany pola magnetycznego w tym czasie nie powinny być większe od dokładności pomiaru, tj. około $0.3'$. Pomiary w czasie zakłóceń magnetycznych (trudnych

jednak do przewidzenia) obarczone są dużym błędem redukcji i nie powinny być uwzględniane w procesie analizy zmian pola magnetycznego.



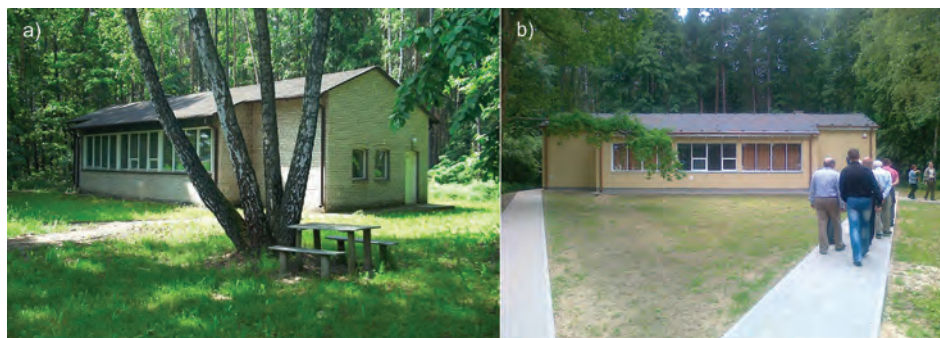
Rys. 1.20. Magnetogram D w obserwatorium w Belsku z dnia 3 września 2012 r.

W pobliżu pawilonu rejestracyjnego powinien być usytuowany pawilon pomiarowy z kilkoma posadowionymi na głębokim fundamencie słupami do ustawiania magnetometrów i innych instrumentów pomiarowych. Oba pawilony muszą być zbudowane z materiałów niemagnetycznych. Na terenie obserwatorium powinien znajdować się budynek z pomieszczeniami do pracy kameralnej i biurowej i ewentualnie z pomieszczeniami socjalnymi dla personelu i gości. Cały teren obserwatorium musi być ogrodzony i zamknięty przed obcymi (Reda i in., 2011).

W Polsce działają obecnie dwa obserwatoria magnetyczne należące do Instytutu Geofizyki (IGF) Polskiej Akademii Nauk. Jedno w Belsku koło Grójca – Centralne Obserwatorium Geofizyczne IGF PAN i drugie na Helu. Na rysunku 1.21 znajduje się fotografia pawilonu pomiarowego w obserwatorium w Belsku.

Obserwatoria magnetyczne służą nie tylko do rejestrowania i archiwizowania danych o zmianach pola geomagnetycznego. Pełnią one także bardzo istotną rolę w zakresie definiowania i konserwacji magnetycznego poziomu odniesienia i magnetycznej jednostki, czyli krajowego standardu magnetycznego, zintegrowanego ze standardem międzynarodowym. W tym celu odbywają się regularnie co kilka lat międzynarodowe spotkania organizowane w różnych obserwatoriach, podczas których, oprócz prezentacji wyników prac badawczych i dyskusji naukowych, wykonywane są pomiary porównawcze aparaturą przywiezioną przez uczestników tych spotkań (Krzemiński i Uhrynowski, 1968; Sas-Uhrynowski i Żółtowski, 1980; Sas-Uhrynowski i Ritter, 1992). Obserwatorium magnetyczne służy zatem także do kontroli wskazań magnetometrów stosowanych

w różnego rodzaju pracach pomiarowych, w tym także do atestowania magnetometrów wzorcowych.



Rys. 1.21. Pawilon do pomiarów magnetycznych w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym IGF PAN w Belsku (a) stary i b) po remoncie w 2012 roku)

1.4. Stacje permanentnych rejestracji zmian składowych pola geomagnetycznego

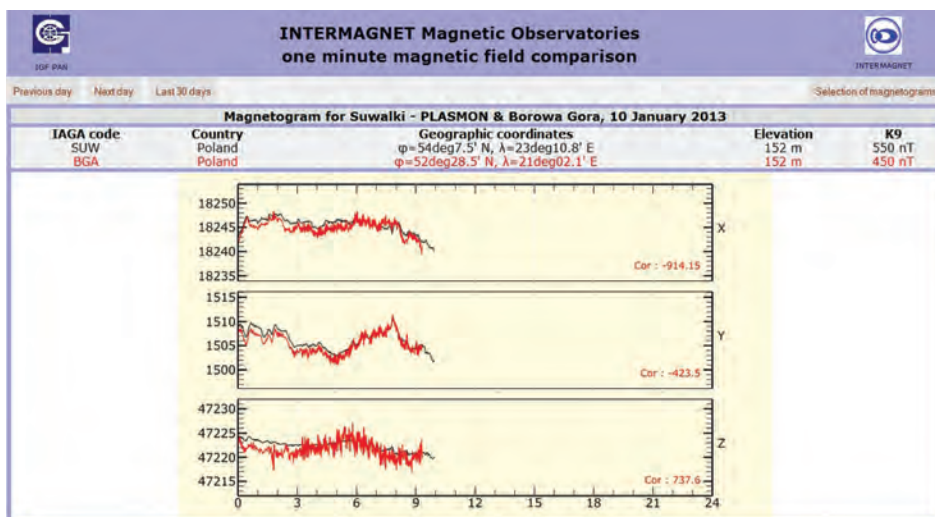
Borowa Góra – stacja magnetycznej rejestracji na terenie Obserwatorium Geodezyjno–Geofizycznego IGiK

Na początku XXI wieku w Obserwatorium Geodezyjno–Geofizycznym Borowa Góra Instytutu Geodezji i Kartografii została założona stacja ciągłej rejestracji zmian składowych pola geomagnetycznego. Zakupiono dwa zestawy magnetometrów LEMI (rozdz. 3) wraz z rejestratorami. Dane z rejestratorów, po odpowiednim rozkodowaniu, są zapisywane na dysku komputera bazowego w Obserwatorium. Jeden komplet sprzętu umieszczono w specjalnie do tego celu przeznaczonym kopcu (rys. 1.22).



Rys. 1.22. Kopiec magnetyczny na terenie Obserwatorium Borowa Góra i tymczasowy punkt bazowy

Drugi zestaw jest wykorzystywany do pomiarów polowych. W 2012 roku zakupiono dwa rejestratory nowego typu pozwalające na bezpośredni dostęp do bieżących danych za pośrednictwem Internetu (<http://rtbel.igf.edu.pl/>). Dobowe pliki z wartościami rejestracji magnetycznej są zapisywane w postaci tekstowej na dysku komputera centralnego. Przykładowy przebieg zapisów zmian elementów X , Y , Z na stacji Suwałki i Borowa Góra w dniu 10 stycznia 2012 r. pokazano na rysunku 1.23. Stronę internetową opracowano w IGF PAN.

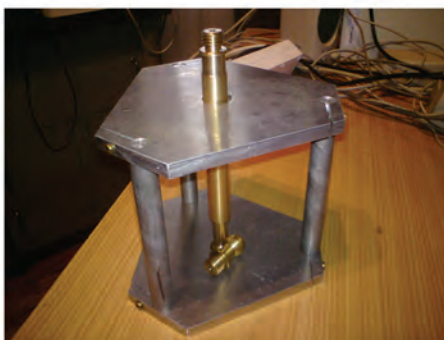


Rys. 1.23. Przebieg aktualnych zmian elementów X , Y , Z na stacji Borowa Góra i na stacji Suwałki z 10 stycznia 2012 r. dostępny na stronach Internetu

W Obserwatorium Borowa Góra co najmniej 2–3 razy w roku wykonywane są pomiary absolutne 3 niezależnych elementów pola geomagnetycznego D , I i F na punkcie bazowym. Wyznaczenie wartości baz jest niezbędne do poznania wartości absolutnych rejestrowanych elementów X , Y , Z . W 2012 roku tymczasową stabilizację za pomocą rurki winylowej zastąpiono słupem betonowym głęboko osadzonym w podłożu (rys. 1.24). Słup obudowano drewnianym pawilonem przeznaczonym do pomiarów magnetycznych. Przed zabudową wykonano zdjęcie magnetyczne (pomiar wartości modułu F wektora natężenia całkowitego pola magnetycznego) całego otoczenia w celu wykrycia ewentualnych miejsc zakłócających pole magnetyczne. Na ścianie północnej i południowej zamontowano dwa duże okna pozwalające na dobrą obserwację celów naziemnych (mir) (rys. 1.26). Po zakończeniu prac budowlanych wykonano ponowne pomiary wartości F w otoczeniu pawilonu i w jego wnętrzu. Nie wykazały one zmian pola magnetycznego w stosunku do pierwotnych pomiarów. Także wyniki absolutnych pomiarów magnetycznych D , I i F , wykonanych na słupie bazowym, nie wykazały zmian baz X , Y , Z opracowywanych dla rejestrowanych zmian elementów pola geomagnetycznego w kopcu magnetycznym. Wykonano także spe-



Rys. 1.24. Punkt bazowy zastabilizowany słupem betonowym



Rys. 1.25. Statyw do podniesienia poziomu obserwacji

cialny, niemagnetyczny statyw pozwalający na pracę instrumentu na dwóch poziomach (rys. 1.25).

Dodatkowo na terenie Obserwatorium, zastabilizowano widoczną ze słupa bazowego miarę wyznaczającą kierunek północy geograficznej (tarcza celownicza). W odległości około 5 metrów od pawilonu wykonano w ziemi obetonowany wykop, przeznaczony do umieszczenia w nim czujnika LEMI z sondami. Od wiosny do późnej jesieni w pawilonie magnetycznym wykonywana jest dublowana rejestracja zmian wartości składowych X , Y , Z wektora natężenia pola geomagnetycznego.

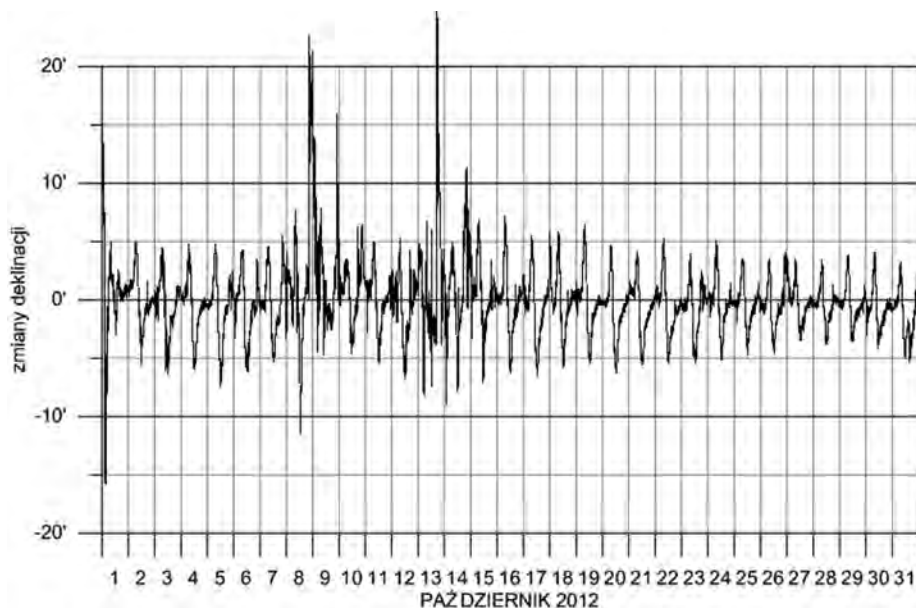
Wartości baz wyznaczonych dla rejestracji w kopcu magnetycznym w latach 2010–2012 zmieniały się w granicach ± 5 nT, co świadczy o dużej stabilności rejestracji (Jędrzejewska i Welker, 2011).



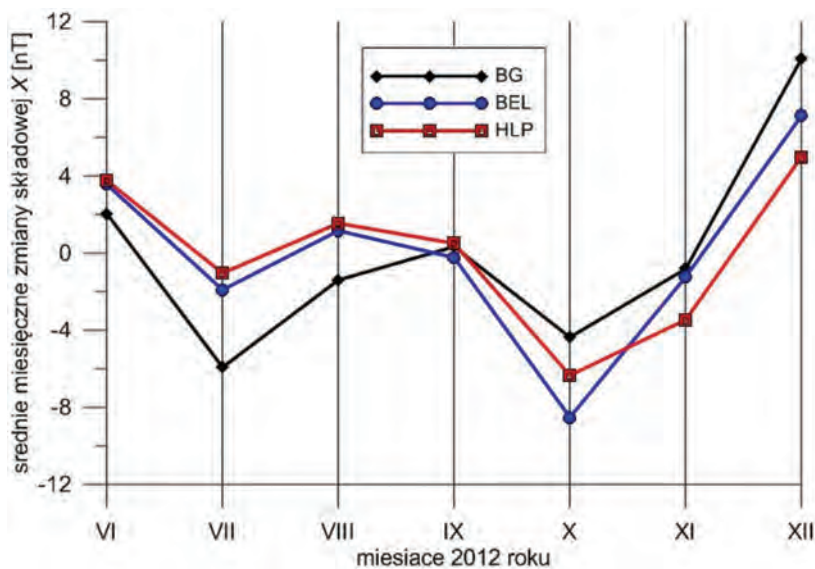
Rys. 1.26. Pawilon niemagnetyczny do pomiarów absolutnych i do ciągłej rejestracji zmian składowych pola magnetycznego

Na rysunku 1.27 pokazano przykładowo przebieg zmian deklinacji magnetycznej na stacji magnetycznej w Obserwatorium Borowa Góra w październiku

2012 roku zaś na rysunku 1.28 – przebieg zmian średnich miesięcznych wartości składowej X w 2012 roku (na tle innych polskich obserwatoriów).



Rys.1.27. Przebieg zmian deklinacji magnetycznej na stacji magnetycznej w Obserwatorium Borowa Góra w październiku 2012 r.



Rys. 1.28. Zmiany średnich miesięcznych wartości składowej X w Obserwatorium Belsk, Hel i na stacji magnetycznej w Obserwatorium Borowa Góra w 2012 roku

Wszystkie cyfrowe pliki z zapisem dobowych rejestracji dostępne są w IGiK.

Rejestracja na stacji magnetycznej w Obserwatorium Borowa Góra, które jest zlokalizowane blisko drogi i linii kolejowej, nie ma gładkich linii zapisu, szczególnie zapisu zmian wartości składowej Z . Wielkości rozrzutów zapisu dochodzą do ± 5 nT.

Suwałki – stacja magnetycznej rejestracji Instytutu Geofizyki PAN

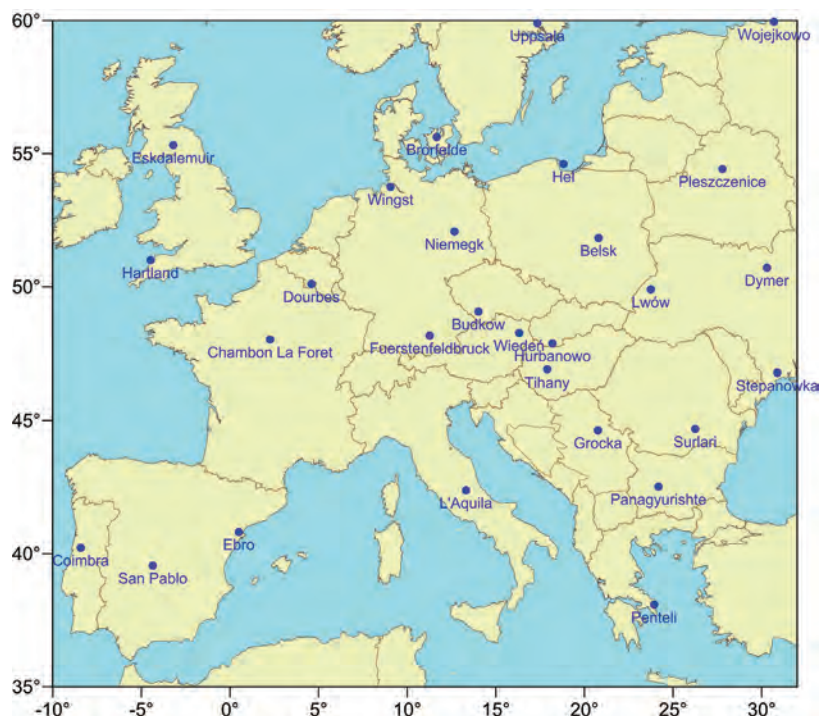
Stacja polowa Suwałki przeznaczona do ciągłego zapisu zmian wartości składowych X , Y , Z wektora pola geomagnetycznego została założona przez IGF PAN w środku Puszczy Augustowskiej. Zapisy stacji można na bieżąco śledzić w Internecie, a pliki z danymi dostępne są w obserwatorium w Belsku. Stacja charakteryzuje się dużą stabilnością pomiarów, wynikającą z braku w pobliżu źródeł zakłócających pole magnetyczne. Dane z tej stacji doskonale nadają się do analiz porównawczych przebiegu zmian pola geomagnetycznego w różnych punktach Polski.

1.5. Badania zmian wiekowych pola geomagnetycznego

Zmiany wiekowe pola geomagnetycznego powodują dezaktualizację map, jak również dezaktualizację wszystkich innych danych dotyczących tego pola. Badania zmian wiekowych umożliwiają wyznaczenie rozkładu przestrzennego tych zmian i określenie ich wielkości. Na tej podstawie opracowywane są algorytmy służące do przeliczenia pozyskanych dawniej danych magnetycznych na współczesną epokę czyli na ich aktualizację. Wyniki badań zmian wiekowych umożliwiają także tworzenie przestrzenno–czasowych modeli pola, np. numerycznego modelu IGRF, stosowanego do rozwiązywania niektórych problemów badawczych, a także do prognozowania zmian wiekowych pola geomagnetycznego.

W krajach europejskich zmiany wiekowe rejestrowane są w obserwatoriach magnetycznych od ponad 100 lat i chociaż w Europie obserwatoriów jest ponad czterdzieści to liczba ich jest niewystarczająca do prowadzenia badań dokładnego rozkładu przestrzennego tych zmian (Fisk, 1931). Rozmieszczenie magnetycznych obserwatoriów w Europie pokazano na rysunku 1.29, a ich skróty stosowane w sieci INTERMAGNET zawiera tabela 1.2. Dane dotyczące przebiegu rejestracji składowych pola geomagnetycznego w obserwatoriach magnetycznych oraz ich średnie roczne są dostępne na stronach internetowych INTERMAGNET. W celu zwiększenia liczby punktów magnetycznych, potrzebnych do badań zmian wiekowych pola geomagnetycznego, wykonuje się obserwacje na zastabilizowanych punktach, tzw. magnetycznych punktach wiekowych (*magnetic repeat stations*), na których co kilka lat (zwykle co 2–4 lata) przeprowadza się pomiary trzech niezależnych elementów magnetycznego pola Ziemi (Mroczek i in., 1996; Newitt i in., 1996). Pozostałe elementy oblicza się na podstawie znanych zależności funkcyjnych (wzory 1.2). Intensywność tych badań, czyli częstotliwość i zagęszczenie punktów wiekowych w poszczególnych krajach europejskich jest bardzo różna. Aktualną sieć punktów wiekowych w Europie ilustruje rysunek 1.30.

Zredukowane wartości wyników obserwacji magnetycznych na punktach wiekowych są gromadzone w WDC (World Data Center) w Edynburgu i dostępne na stronie Internetu (Rishbeth, 1996).

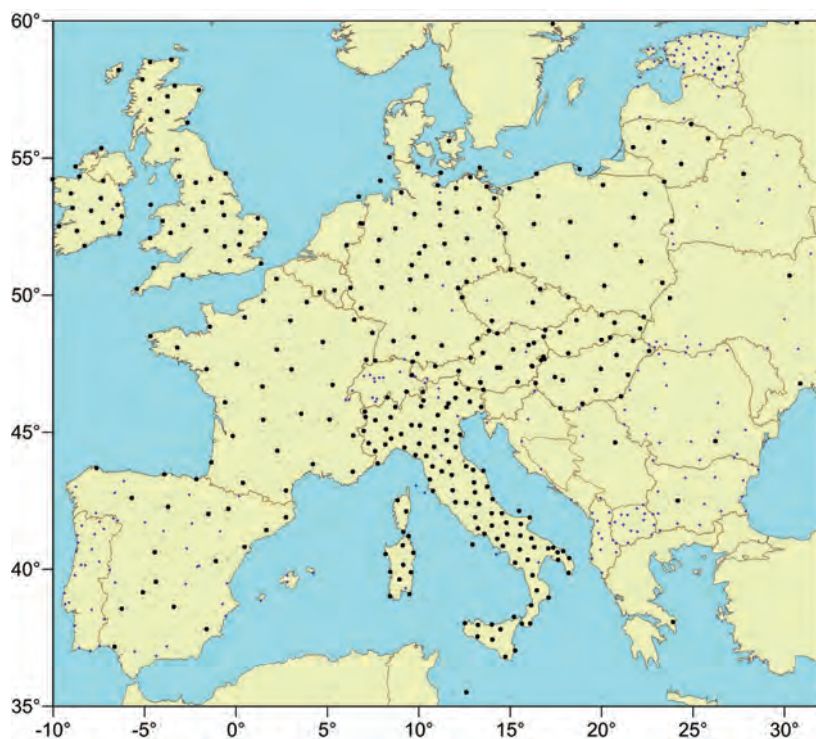


Rys. 1.29. Lokalizacja magnetycznych obserwatoriów w Europie (stan na 2012 r.)

Tabela 1.2. Skróty europejskich obserwatoriów magnetycznych w sieci INTERMAGNET (St-Louis, 2008)

BEL – Belsk	HAD – Hartland	ABK – Abisko
HLP – Hel	AQU – L’Aquila	BDV – Budkov
PRU – Pruchonice	LER – Lerwick	HRB – Hurbanovo
NUR – Nurmijarvi	ESK – Eskdalemuir	WIK – Wien
MOS – Krasnaya Pakhra	VAL – Valentia	TRO – Tromso
THY – Tihany	ODE – Stepanovka	LOV – Lovoe
MAB – Manhay	KIV2 – Dymer	SOD – Sodankyla
NGK – Niemegk	SPT – San Pablo	SFS – San Fernando
PAG – Panagyurishte	COI – Coimbra	PEG – Penteli
LNN – Voeikovo	CTS – Castello	MNK – Pleszczenice
BFE – Brorfelde	DOB – Dombas	SUA – Surlari
WNG – Wingst	EBR – Ebro	LVV – Lwow
FUR – Fuerstenfeldbruck	GCK – Grocka	NCK – Nagycenk
CLF – Chambon La Foret	GUI – Guimar	KIR – Kiruna

Badania zmian wiekowych pola magnetycznego Ziemi w Polsce są prowadzone w Instytucie Geodezji i Kartografii od połowy lat 1950. Na 19 punktach wiekowych, co 2–4 lata przeprowadza się pomiary trzech niezależnych elementów pola geomagnetycznego. Analiza wieloletnich serii obserwacji umożliwiła opracowanie metod aktualizacji danych magnetycznych potrzebnych w kraju (Sas-Uhrynowski, 1977a, 1977b, 1992). Pomimo ponad 50–letniego okresu badań zmian wiekowych w Polsce, prace te nie były koordynowane z badaniami w krajach sąsiednich. Badania takie w innych krajach europejskich także nie były koordynowane z sąsiadami, pomimo wielokrotnych apeli przewodniczącego Grupy Roboczej IAGA V–4 – *Zdjęcia i mapy magnetyczne* (Barton, 1989, 1991). W każdym z krajów pomiary wykonywano w różnym czasie według różnych programów, różną aparaturą. Również metody obserwacji, redukcji i obliczeń były różne (Schulz i in., 1997; Korte i Haak, 2000; Korte i Fredow, 2001; W latach 1996 i 1997 zespoły Instytutu Nauk Geologicznych Białoruskiej Akademii Nauk oraz Instytutu Geodezji Wileńskiego Uniwersytetu Technicznego im. Gedymina, przy wiodącym udziale zespołu Instytutu Geodezji i Kartografii w Warszawie, wykonały projekt, wywiad terenowy i stabilizację 11 stanowisk pomiarowych na Białorusi i 6 na Litwie (rys. 1.30).



Rys. 1.30. Punkty wiekowe (RS) do badań zmian pola magnetycznego w Europie (stan na 2012 r.)

Pierwsza kampania pomiarowa na punktach białoruskich w latach 1996 i 1997, jak również następna w roku 2000, były przeprowadzone pod naukowym i technicznym kierownictwem specjalistów z IGiK i przy użyciu aparatury do pomiarów magnetycznych, stanowiącej własność IGiK.

Podobnie na Litwie, kampanie pomiarowe w latach 1999, 2001, 2004 i 2007 zostały przeprowadzone pod naukowym i technicznym nadzorem IGiK i przy użyciu aparatury należącej do Instytutu. Na punktach wiekowych białoruskich i litewskich, podobnie jak na punktach położonych w Polsce, była mierzona nie tylko deklinacja magnetyczna, ale także inklinacja magnetyczna i wektor całkowitego natężenia pola geomagnetycznego, czyli trzy niezależne elementy pola, które pozwalają ze związków funkcyjnych obliczyć elementy pozostałe. Wynikało to z dwóch przyczyn. Jedną to świadomość, że ziemskie pole magnetyczne, będąc polem potencjalnym o źródle wewnątrz Ziemi, którego geneza nie jest jeszcze wyjaśniona i podlegając stałym zmianom, których mechanizm także nie został poznany, musi mieć wpływ na kształt Ziemi jako planety i jej dynamikę. W świetle tego nie wolno ograniczać się do badania deklinacji lecz należy badać także zmienność całego wektora pola i jego składowych, gdyż bez zgromadzenia odpowiednio bogatej wiedzy poznanie tajemnic przyrody jest niemożliwe. Druga przyczyna wynikała ze świadomości, że jeśli poniosło się trud i poważne nakłady finansowe na kampanię pomiarową, to koszt wykonania dodatkowo obserwacji jeszcze dwóch składowych elementów pola geomagnetycznego, czyli wzbogacenie znacząco materiału obserwacyjnego, stanowi niewspółmiernie niską część kosztów już poniesionych.

1.6. Modele matematyczne pola geomagnetycznego

Dobrym narzędziem weryfikacji wyników pomiarów magnetycznych i ich redukcji jest globalny model pola magnetycznego Ziemi. Modele takie są opracowywane na podstawie wszystkich dostępnych wyników pomiarów magnetycznych na punktach naziemnych (obserwatoria i punkty wiekowe), morskich i obecnie coraz częściej z danych satelitarnych. Powszechnie przez geofizyków używany jest model IGRF opracowywany co 5 lat przez IAGA, w grupie współpracującej z NGDC. Obecnie obliczana jest już 11 generacja tego modelu, zawierająca począwszy od 2000 roku 195 współczynników rozwinięcia potencjału potrzebnych do wyliczenia wartości elementów pola geomagnetycznego w dowolnym punkcie Ziemi na epokę opracowania modelu i 81 współczynników rozwinięcia potencjału umożliwiających ekstrapolację pola na 5 lat (Maus i in., 2005). Współczynniki modelu są ogólnie dostępne na stronach Internetu (<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/igrf/>).

Model IGRF opisuje potencjał V pola geomagnetycznego następującym wzorem

$$V(r, \theta, \lambda, t) = R \sum_{n=1}^{n_{\max}} \left(\frac{R}{r} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda) P_n^m(\theta) \quad (1.3)$$

gdzie:

r – odległość od środka Ziemi,

θ – szerokość geocentryczna,

λ – długość geocentryczna,

R – promień Ziemi (6371.2 km),

$g_n^m(t)$ i $h_n^m(t)$ – współczynniki harmoniczne (współczynniki Gaussa),

t – czas,

$P_n^m(\theta)$ – stowarzyszone funkcje Legendre’a stopnia n i rzędu m .

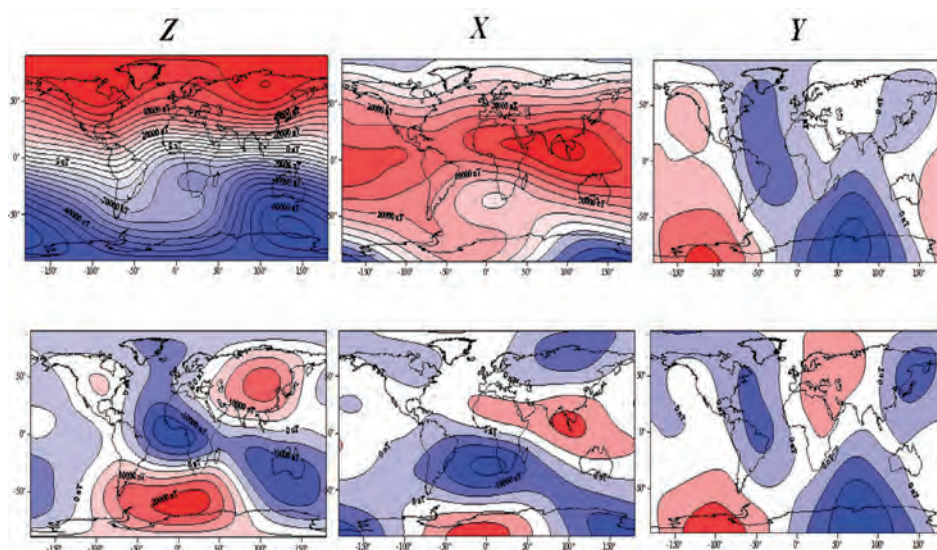
Coraz większa liczba danych z pomiarów satelitarnych i wyższa dokładność danych z pomiarów naziemnych umożliwiły od 2000 roku zwiększenie maksymalnego stopnia rozwinięcia wzoru. Obecnie przyjęto $n_{\max} = 13$, co daje dokładność ± 0.1 nT wyznaczeń składowych pola geomagnetycznego (poprzednia dokładność wynosiła ± 1 nT). Współczynniki potrzebne do ekstrapolacji zmian wiekowych obliczane są przy $n_{\max} = 10$ z dokładnością wyznaczenia ± 0.1 nT.

Do badań pola geomagnetycznego wykorzystywany jest również model WMM opracowywany przez British Geological Survey (BGS), Departament Obrony USA, NATO i Światowe Biuro Hydrograficzne (WHO), głównie na potrzeby służb wojskowych Stanów Zjednoczonych, ale również do wykorzystania przez cywilne systemy nawigacyjne.

Należy mocno podkreślić przydatność modelu pola geomagnetycznego do aktualizacji wartości elementów magnetycznych wyznaczonych z bezpośrednich pomiarów na punktach fizycznych. Różnice między zmianami wiekowymi obliczonymi z modelu i zmianami opracowanymi na podstawie bezpośrednich pomiarów magnetycznych dla obszarów o niewielkich gradientach pola mieszczą się w granicach błędu pomiaru. Model nie może jednak zastąpić bezpośrednich, absolutnych pomiarów na punkcie magnetycznym, szczególnie w terenach o dużych anomaliach pola magnetycznego, którym towarzyszą duże gradienty pola. Różnice między wartością pomierzoną, np. deklinacji magnetycznej i wartością obliczoną na podstawie współczynników modelu mogą dochodzić nawet do kilku stopni, co widać na rysunku 1.11 pokazującym izogony na terenie Polski i ich skomplikowany przebieg na północnym wschodzie kraju.

Model matematyczny pola geomagnetycznego IGRF jest podstawą do obliczania tzw. pola normalnego, reprezentowanego przez pierwsze trzy człony rozkładu potencjału V w szereg harmoniczny ($n = 1$). Pole to jest wykorzystywane do opracowań map anomali magnetycznych, tj. map przedstawiających, w postaci izolinii, różnice między rzeczywistą (pomierzoną) wartością elementu pola geomagnetycznego, a jego wartością wyliczoną na podstawie współczynników modelu matematycznego. W zależności od zasięgu anomali i ich wielkości różni się anomalie globalne, regionalne i lokalne. Niejednorodna budowa płaszcza i skorupy ziemskiej, w której znajdują się skały krystaliczne, a także różne złoża o właściwościach ferromagnetycznych, powodują występowanie anomali regionalnych i lokalnych. Wykrywanie tych anomali za pomocą naziemnych pomiarów magnetycznych i ich analiza z punktu widzenia geologicznego może

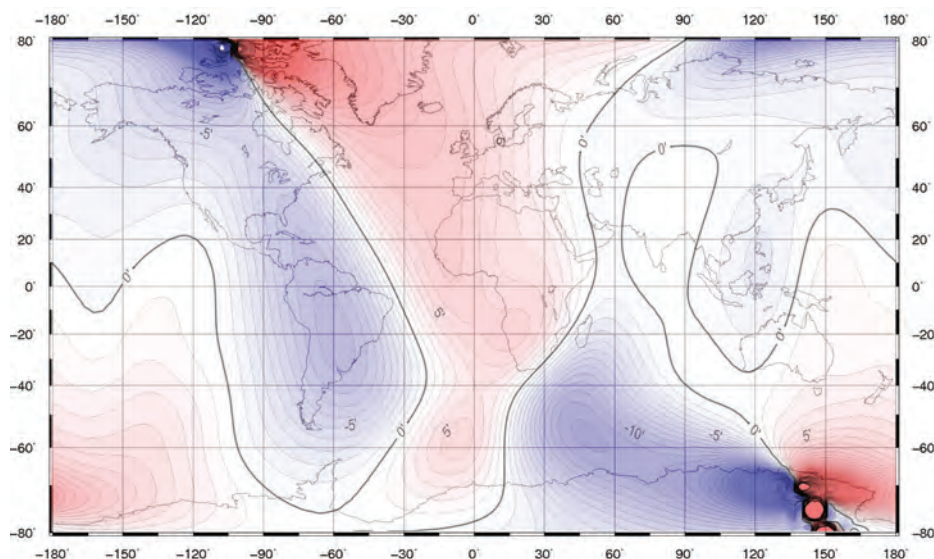
dostarczyć wiele informacji o pożytecznych złożach nadających się do eksploatacji. Rysunek 1.31 pokazuje obraz pola normalnego IGRF 2000 (pierwszy szereg rozwinięcia funkcji potencjału) dla składowych X , Y , Z wraz z obrazem anomalii globalnych (drugi szereg rozwinięcia funkcji potencjału).



Rys. 1.31. Obraz pola normalnego IGRF 2000 dla składowych Z , X , Y oraz obraz anomalii globalnych

Rysunek 1.32 przedstawia mapę izopor deklinacji magnetycznej opracowaną na podstawie modelu IGRF, niezbędną do redukcji wartości D z epoki pomiaru na dowolną epokę opracowania. Mapę wykonano dla przedziału epok 1950–2000. Można ją wykorzystać przy braku danych z bezpośrednich pomiarów na punktach wiekowych i w obserwatoriach w rejonie zainteresowania.

Obecnie do badań naukowych coraz powszechniej używany jest model pola geomagnetycznego utworzony na podstawie danych satelitarnych. Dostępne dane pomiarowe z lat 1965–2007 rejestrowane przez satelity: POGO, MAGSAT, CHAMP i OERSTED stały się podstawą dla opracowywanych w Centrum Badań Ziemi w Poczdamie i w NASA w Stanach Zjednoczonych modeli geomagnetycznych. Modele te są dostępne na stronie GFZ w Poczdamie: <http://www.gfz-potsdam.de> (sekcja 2.3) oraz na stronie NASA: <http://denali.nasa.gov>. Nowe dane satelitarne są wykorzystywane w projekcie EMAG (*Earth Magnetic Anomaly Grid*) oraz w nowym, międzynarodowym projekcie WDMAM (*World Digital Magnetic Anomaly Map*). Analiza tych danych pozwala na poszerzenie wiedzy w zakresie szybkich zmian małoskalowych ziemskiego pola magnetycznego. Wyniki prac nad tymi modelami można znaleźć na stronie internetowej <http://geomag.org/models/emag2.html> oraz na stronie <http://www.esa.int/esaLP/Lpswarm.html>.



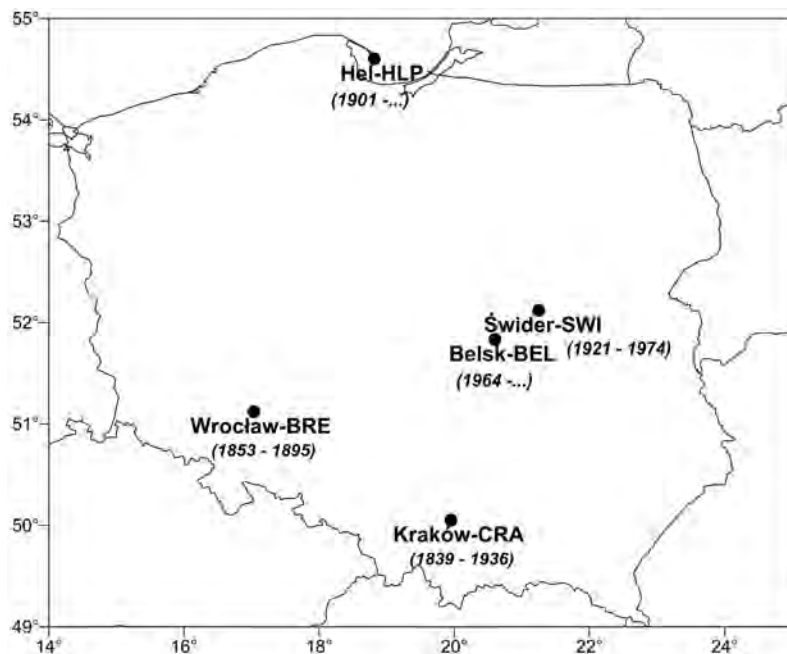
Rys. 1.32. Globalny obraz izopor D [°] dla lat 1950–2000 opracowany na podstawie modelu IGRF

2. RYS HISTORYCZNY POMIARÓW MAGNETYCZNYCH W POLSCE

2.1. Pomiary archiwalne na terenach obecnej Polski od XVI wieku

Zagadnienie badań magnetyzmu ziemskiego na skalę światową pojawiło się z inicjatywy Gaussa już w połowie XIX wieku (Janowski, 1958). Powstała wtedy pierwsza Międzynarodowa Unia Magnetyczna z siedzibą w Getyndze. Miała ona za zadanie uporządkowanie XIX wiekowych pomiarów magnetycznych. Apel L.A. Bauera kierownika Departamentu Magnetyzmu Ziemskiego Instytutu Carnegie'ego w Waszyngtonie z 1904 roku i inicjatywa tego Instytutu w sprawie podjęcia międzynarodowych prac nad mapą magnetyczną Ziemi, spowodowała rozpoczęcie pomiarów magnetycznych na szeroką skalę w Europie. W Polsce inicjatywę tę przejął Stanisław Kalinowski, który też jako pierwszy zwrócił uwagę na ścisłe powiązanie magnetyzmu ziemskiego z geodezją. Pierwsze polskie projekty magnetyczne były oparte na modelu niemieckim wiążącym sieć magnetyczną z siecią triangulacyjną. Zdjęcia magnetyczne wykonane przez naukowców niemieckich obejmowały w dużej mierze tereny zachodniej i północnej Polski w obecnych granicach (Dziewulski, 1912).

Na terenach obecnej Polski funkcjonowało lub jeszcze funkcjonuje 5 obserwatoriów magnetycznych, których lokalizację pokazano na rysunku 2.1 wraz z latami ich działalności, tzn. okresem rejestracji składowych pola geomagnetycznego.



Rys. 2.1. Obserwatoria magnetyczne na obecnych terenach Polski i lata ich działalności

Obserwatorium Breslau (we Wrocławiu) i obserwatorium w Krakowie zostały uruchomione jeszcze w Polsce rozbiorowej w XIX wieku. Rejestrowały one tylko składowe kątowe pola magnetycznego Ziemi – deklinację i inklinację magnetyczną. Obserwatorium wrocławskie posiada zapis archiwalny deklinacji od 1852 do 1895 roku z 20-letnimi przerwami. Dostępne wyniki pomiarów w tych obserwatoriach zawiera Tabela 2.1 i Tabela 2.2.

Pierwsze udokumentowane pomiary deklinacji magnetycznej dla Krakowa wykonano już w XVI wieku (Krassowski, 1920). Jednorazowe wyznaczenia powtórzono w 1761 roku (Niegowiecki) oraz w 1804 roku (Staszic). Deklinacja wyznaczona była „igłą magnesową” z dokładnością jednego stopnia i wyniosła -11°E dla wyznaczenia Niegowieckiego, zaś -15°E dla wyznaczenia Staszica (Stenz, 1936). Z danych archiwalnych z przełomu XVIII i XIX wieku wynika, że roczna zmiana wartości deklinacji magnetycznej wynosiła około $+6\text{'}.$ Obserwatorium magnetyczne w Krakowie rozpoczęło regularną działalność w 1839 roku przy wykorzystaniu specjalistycznego sprzętu, tzw. „deklinatorium i inklinatorium magnetycznego”. Po raz pierwszy na ziemiach polskich w 1847 roku, oprócz absolutnego wyznaczenia deklinacji i inklinacji, wykonano wyznaczenie składowej poziomej (Janowski, 1958). Prace pomiarowe na terenie Obserwatorium kontynuowano po pierwszej wojnie światowej. Powstała w ten sposób 100-letnia seria pomiarowa była doskonałym materiałem do pierwszych badań i analiz zmian wiekowych pola magnetycznego Ziemi. Pomiary wykonywano na terenie Ogrodu Botanicznego UJ w pawilonie magnetycznym lub bezpośrednio na słupie w ogro-

dzie na wolnym powietrzu. Ciągłą rejestrację deklinacji i inklinacji magnetycznej prowadzono także w wolnej Polsce w Obserwatorium Astronomicznym UJ lub na terenie Ogrodu Botanicznego od 1920 do 1936 roku. Pomiarów deklinacji magnetycznej w Krakowie z lat 1914–1936 oraz 1928–1943 opublikowano w pracach Kani, (1938) i Olczaka, (1948). Pomiarów w latach 1942 i 1943 były wykonywane w sezonie letnim, na wolnym powietrzu na terenie Uniwersytetu przy zastosowaniu teodolitu magnetycznego firmy Chasselon. Wyniki pomiarów zredukowano wg zapisów w obserwatorium magnetycznego w Świdrze. Na podstawie wyników pomiarów deklinacji magnetycznej w Świdrze i w Krakowie w latach 1928–1943 opracowano wykres ich przebiegu. Linie zmian deklinacji miały tendencję do zbliżania się (różnica między wartością deklinacji w Krakowie i w Świdrze w ciągu 15 lat zmalała o 4'). Świadczy to o różnym rozkładzie zmian wiekowych w rejonach obu obserwatoriów. Dostępne wartości z pomiarów magnetycznych w obserwatorium krakowskim zawarte są w Tabeli 2.2 (Olczak, 1948).

Próby prognozy zmian deklinacji magnetycznej do połowy lat 1950. przy wykorzystaniu serii archiwalnych obserwacji deklinacji magnetycznej w Krakowie od początków XIX wieku dokonał Stenz (1936). Według jego opracowania deklinacja magnetyczna osiągnęła minimum w 1900 roku (około -12°E) i powinna rosnąć aż do zera około 1936 roku. Jak wiadomo z aktualnych wyznaczeń prognoza ta nie sprawdziła się, gdyż wartość deklinacji z pomiaru 1936 roku wyniosła -1.5°E (Kania, 1938). Ze względu na długi okres przyjęty do badania i wątpliwą dokładność wyznaczeń z XIX wieku półtorastopniową niezgodność trzeba przyjąć za sukces, tym bardziej że naukowcy z początku XX wieku zauważyli skokowe zmiany deklinacji (około półstopniowe) związane, według nich, z zakłóceniami magnetycznymi rozwijających się miast (Kania, 1938).

Wyznaczenia deklinacji magnetycznej w okolicach Gdańska sięgają XVI wieku (Olczak, 1955a). Pierwsze jej wyznaczenie udokumentowano w 1539 roku. Zostało ono wykonane za pomocą specjalnego magnesu przez Georga Joachima von Lauchena (Retyka). Zaobserwowane zboczenie zinterpretował on jako „poprawkę instrumentalną” użytej przez siebie igły magnetycznej. Na przełomie wieku XVI i XVII żeglarze gdańscy wykorzystywali już do nawigacji wartość deklinacji równą 8.5°E . Potwierdza to w swoich pracach Jan Heweliusz, który jako jeden z pierwszych dostrzegł w 1628 roku zmiany wiekowe deklinacji magnetycznej i próbował je zinterpretować jako wynik ruchu materii ziemskiej. Zrobił to wcześniej od Gellibranda uchodzącego za odkrywcę tego zjawiska w 1635 roku. Seria siedmiu pomiarów wykonanych w XVII wieku w Gdańsku pozwoliła Heweliuszowi wyliczyć zmianę wiekową deklinacji równą $10^{\circ}/54$ lata. Wszystkie prace wykonywano w ramach działalności Gdańskiego Gimnazjum Akademickiego traktowanego jako szkoła półwyższa. (Olczak, 1955b; Janowski, 1958).

Mimo, że w drugiej połowie XVIII wieku odżywa zainteresowanie magnetyzmem ziemskim to pomiary magnetyczne są sporadyczne. W obserwatorium krakowskim zakupiono pod koniec wieku nowoczesny sprzęt – deklinatorium magnetyczne, za pomocą którego, niezależnie od korzystania z igły magnetycznej, zaczęto wykonywać pomiary deklinacji. Na przełomie wieku XVIII i XIX

po raz pierwszy zostały wykonane przez Staszica udokumentowane pomiary inklinacji magnetycznej (np. na Babiej Górze uzyskano wartość 65°). Wyniki wykonanych w XVIII wieku pomiarów deklinacji magnetycznej są rozbieżne. Tylko dwa wyznaczenia pasują do przebiegu krzywej deklinacji magnetycznej opracowanej dla tego rejonu przez Olczaka. Dopiero od XIX wieku pomiary stają się liczniejsze – wyznaczana wartość deklinacji magnetycznej zmienia się od -13.7°E około roku 1820 do -11.3°E około roku 1860. Od roku 1891 u ujścia Wisły w Nowym Porcie były wykonywane systematycznie pomiary deklinacji magnetycznej dla celów nawigacyjnych. W latach 1891–1903 niemieccy uczeni wykonali pomiary deklinacji w ramach zdjęcia 1-go rzędu z pięcioma absolutnymi wyznaczeniami w rejonie Gdańska. Opis serii wyznaczeń deklinacji magnetycznej w Gdańsku obejmującej okres 400 lat (1540–1935) opracowany przez Olczaka (Olczak, 1955a) przedstawia rysunek 2.2.

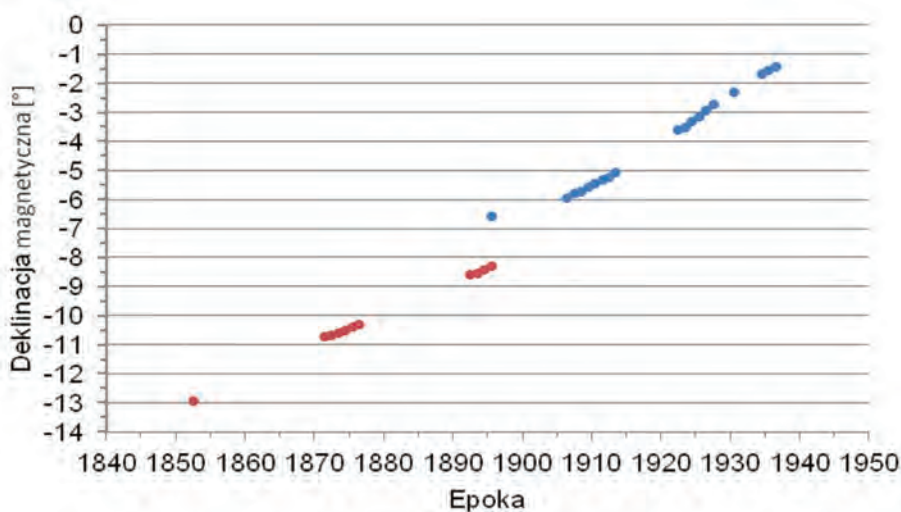


Rys. 2.2. Przebieg deklinacji magnetycznej w Gdańsku w latach 1540–1940

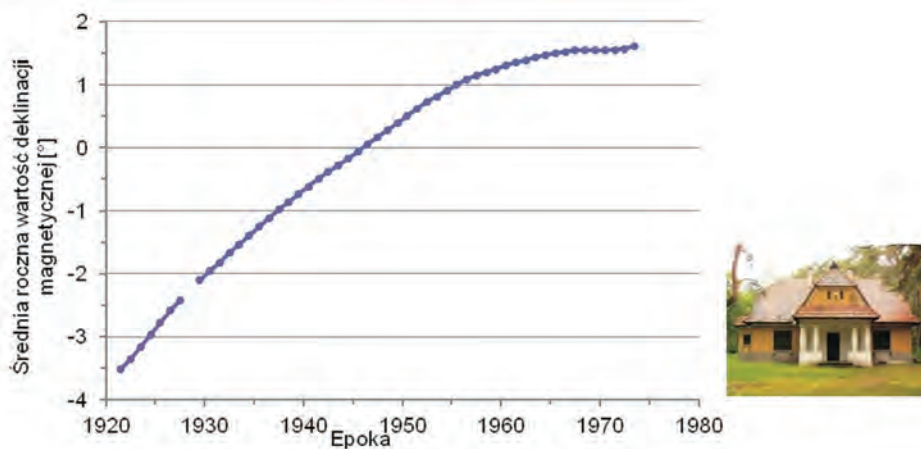
W XIX wieku po raz pierwszy na ziemiach polskich została wyznaczona składowa pozioma wektora natężenia całkowitego pola magnetycznego Ziemi. Wyznaczenia prowadzone były w Krakowie przez Kuczyńskiego w 1847 roku (Dziewulski, 1912; Janowski, 1958).

Na początku XX wieku wykonywano wiele pomiarów magnetycznych na rozproszonych w rejonie środkowego wybrzeża punktach. Po założeniu na Helu obserwatorium magnetycznego, oficjalnie powołanego do życia w 1932 roku (Dłuski i Cynk, 1933), część pomiarów stanowiła przedłużenie serii obserwatoryjnej. Pierwsza rejestracja składowych pola magnetycznego Ziemi na Helu została wykonana w 1901 roku, ale ciągły, archiwalny zapis wszystkich składowych tego pola istnieje dopiero od roku 1926, z 2–6 letnimi przerwami, do chwili obecnej (Tabela 2.5) (Reda i in., 2006–2013).

Obserwatorium magnetyczne w Świdrze pod Warszawą, zostało wybudowane w latach 1914–1915 z funduszy zebranych od społeczeństwa. Prace wykonywane były pod nadzorem prof. St. Kalinowskiego – kierownika Pracowni Fizycznej Muzeum Przemysłu i Rolnictwa w Warszawie. Ciągłą rejestrację co najmniej 3 niezależnych składowych pola magnetycznego Ziemi obserwatorium rozpoczęło w 1921 roku. Wyposażono je w najnowocześniejsze wówczas instrumenty pomiarowe (Tabela 2.3) (Kalinowski, 1930). W latach 1960., na skutek rozbudowy zelektryfikowanych linii kolejowych i wynikające z tego zakłócenia pola magnetycznego, pojawiła się konieczność przeniesienia obserwatorium w bardziej dogodnym do pomiarów magnetycznych miejsce. Lokalizację nowego obserwatorium, któremu następnie nadano nazwę Centralnego Obserwatorium Geofizycznego Instytutu Geofizyki PAN, wybrano w Belsku koło Grójca, około 50 km na południe od Warszawy. Pierwsze pomiary magnetyczne w powstałym obserwatorium w Belsku wykonano w 1960 roku. Seria pomiarów magnetycznych z lat 1960–1974 wykonana w Świdrze i w Belsku umożliwiła przeniesienie serii obserwacji ze starego obserwatorium w Świdrze do aktualnego – w Belsku i tym samym zachowanie ciągłości rejestracji od 1921 roku. Jest to szczęśliwie okres małego gradientu zmian pola geomagnetycznego i przeniesienie danych nie jest obciążone dużymi błędami. Rejestracje magnetyczne w obserwatorium w Świdrze zakończono w 1974 roku. Pełną serię wyników obserwacji magnetycznych w Obserwatorium w Belsku zawiera Tabela 2.4 (Reda i in., 2006–2013). Rysunki 2.3–2.6 pokazują zmiany deklinacji magnetycznej w latach 1852–1936 na południu Polski, zmiany w latach 1921–2008 w okolicach Warszawy oraz zmiany na północy Polski w obserwatorium na Helu.



Rys. 2.3. Zmiany deklinacji magnetycznej w obserwatoriach Breslau (Wrocław) (kolor czerwony) i w Krakowie (kolor niebieski) w latach 1850–1936



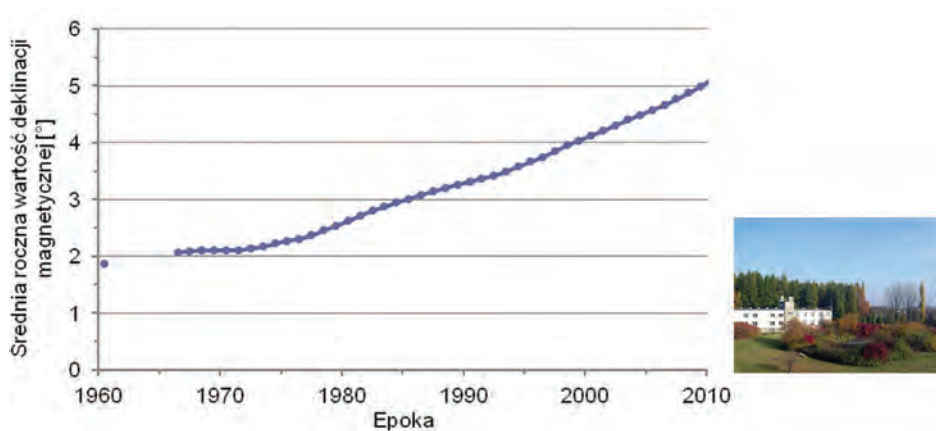
Rys. 2.4. Zmiany deklinacji magnetycznej w obserwatorium w Świdrze

Tabela 2.1. Wyniki pomiarów deklinacji magnetycznej w obserwatorium Breslau–Wrocław (BRE)

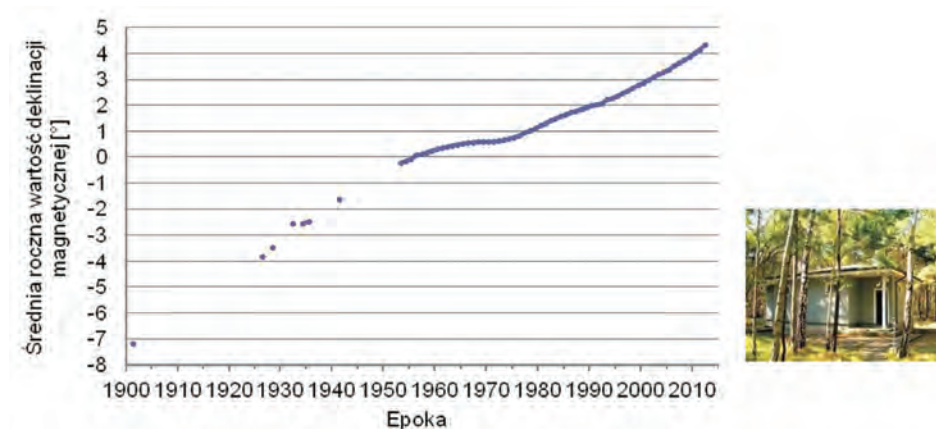
Rok	$D [^{\circ}]$
1852.5	-12.9334
1871.5	-10.7434
1872.5	-10.6817
1873.5	-10.5934
1874.5	-10.4950
1875.5	-10.3934
1876.5	-10.2850
1892.5	-8.5984
1893.5	-8.5367
1894.5	-8.4134
1895.5	-8.3017

Tabela 2.2. Wyniki pomiarów deklinacji i inklinacji magnetycznej w obserwatorium w Krakowie (CRA)

Rok	$D [^{\circ}]$	$I [^{\circ}]$
1895.5	-6.5634	64.2017
1906.5	-5.9500	-
1907.5	-5.7984	-
1908.5	-5.7434	-
1909.5	-5.5850	64.3000
1910.5	-5.4567	-
1911.5	-5.3017	64.2583
1912.5	-5.2234	64.1783
1913.5	-5.0550	64.3067
1922.5	-3.6084	-
1923.5	-3.5200	-
1924.5	-3.3300	-
1925.5	-3.1334	-
1926.5	-2.9234	-
1927.5	-2.7350	-
1928.5	-2.5834	-
1930.5	-2.3167	-
1934.5	-1.6634	-
1935.5	-1.5351	-
1936.5	-1.4101	-
1942.5	-0.6634	-
1943.5	-0.5500	-



Rys. 2.5. Zmiany deklinacji magnetycznej w obserwatorium w Belsku



Rys. 2.6. Zmiany deklinacji magnetycznej w obserwatorium na Helu

Tabela 2.3. Wyniki pomiarów magnetycznych w obserwatorium w Świdrze (SWI)

Rok	D [°]	H [nT]	I [°]	X [nT]	Y [nT]	Z [nT]	F [nT]
1921.5	-3.5050	18712	66.5733	18677	-1144	43185	47065
1922.5	-3.3450	18690	66.6116	18658	-1091	43215	47084
1923.5	-3.1600	18674	66.6566	18646	-1029	43269	47127
1924.5	-2.9667	18649	66.6983	18624	-965	43300	47146
1925.5	-2.7767	18620	66.7500	18598	-902	43339	47170
1926.5	-2.5850	18584	66.8050	18565	-838	43369	47183
1927.5	-2.4200	18563	66.8383	18546	-784	43390	47194
1928.5	-2.2550	18536	66.9033	18522	-729	43464	47252
1929.5	-2.1050	18507	66.9599	18495	-680	43517	47289

Rok	$D [^\circ]$	$H [\text{nT}]$	$I [^\circ]$	$X [\text{nT}]$	$Y [\text{nT}]$	$Z [\text{nT}]$	$F [\text{nT}]$
1930.5	-1.9550	18476	67.0183	18465	-630	43565	47321
1931.5	-1.8184	18463	67.0533	18454	-586	43608	47356
1932.5	-1.6650	18438	67.0950	18430	-535	43639	47374
1933.5	-1.5317	18420	67.1550	18413	-492	43724	47445
1934.5	-1.3950	18406	67.1916	18401	-448	43768	47481
1935.5	-1.2534	18384	67.2516	18380	-402	43845	47543
1936.5	-1.1167	18364	67.3050	18361	-358	43911	47596
1937.5	-0.9817	18343	67.3566	18340	-314	43971	47643
1938.5	-0.8600	18329	67.4066	18327	-275	44046	47707
1939.5	-0.7350	18319	67.4449	18317	-235	44106	47759
1940.5	-0.6134	18313	67.4916	18312	-196	44193	47837
1941.5	-0.4884	18303	67.5250	18302	-156	44242	47879
1942.5	-0.3867	18296	67.5466	18296	-123	44273	47905
1943.5	-0.2784	18284	67.6050	18284	-89	44371	47991
1944.5	-0.1784	18267	67.6300	18267	-57	44385	47997
1945.5	-0.0617	18263	67.6666	18263	-20	44456	48061
1946.5	0.0600	18234	67.7250	18234	19	44514	48104
1947.5	0.1666	18225	67.7483	18225	53	44544	48128
1948.5	0.2800	18217	67.7666	18217	89	44566	48145
1949.5	0.3850	18210	67.7983	18210	122	44619	48192
1950.5	0.5050	18220	67.8016	18219	161	44650	48224
1951.5	0.6216	18224	67.8199	18223	198	44700	48272
1952.5	0.7250	18226	67.8199	18225	231	44706	48278
1953.5	0.8133	18238	67.8266	18236	259	44752	48326
1954.5	0.9000	18249	67.8283	18247	287	44781	48357
1955.5	0.9950	18254	67.8416	18251	317	44825	48399
1956.5	1.0833	18248	67.8750	18245	345	44882	48450
1957.5	1.1450	18250	67.8900	18246	365	44921	48487
1958.5	1.2000	18255	67.9066	18251	382	44970	48534
1959.5	1.2500	18260	67.9183	18256	398	45011	48574
1960.5	1.3066	18264	67.9183	18259	416	45020	48584
1961.5	1.3500	18284	67.9183	18279	431	45070	48638
1962.5	1.3866	18294	67.9066	18289	443	45067	48639
1963.5	1.4350	18304	67.9083	18298	458	45096	48669
1964.5	1.4666	18317	67.9000	18311	469	45108	48685
1965.5	1.4950	18329	67.8883	18323	478	45114	48695
1966.5	1.5233	18335	67.8950	18329	487	45143	48724
1967.5	1.5433	18340	67.9016	18333	494	45168	48749
1968.5	1.5450	18348	67.8983	18341	495	45182	48765
1969.5	1.5416	18365	-	18358	494	-	-
1970.5	1.5433	18381	-	18374	495	-	-
1971.5	1.5533	18402	-	18395	499	-	-
1972.5	1.5700	18415	-	18408	505	-	-
1973.5	1.6066	-	-	-	-	-	-
1974.5	1.6583	-	-	-	-	-	-

Tabela 2.4. Wyniki pomiarów magnetycznych w obserwatorium w Belsku (BEL)

Rok	$D [^\circ]$	$H [\text{nT}]$	$I [^\circ]$	$X [\text{nT}]$	$Y [\text{nT}]$	$Z [\text{nT}]$	$F [\text{nT}]$
1960.5	1.8666	18839	67.2466	18829	614	44917	48708
1961.5	-	18856	67.2333	-	-	44931	48727
1962.5	-	18873	67.2233	-	-	44948	48749
1963.5	-	18889	67.2150	-	-	44968	48774
1964.5	-	18894	67.2200	-	-	44991	48797
1965.5	-	18895	67.2283	-	-	45010	48815
1966.5	2.0700	18901	67.2266	18889	683	45023	48829
1967.5	2.0933	18906	67.2333	18893	691	45048	48854
1968.5	2.1033	18918	67.2300	18905	694	45071	48880
1969.5	2.1050	18936	67.2216	18923	696	45094	48908
1970.5	2.1100	18953	67.2166	18940	698	45123	48942
1971.5	2.1100	18976	67.2016	18963	699	45146	48972
1972.5	2.1333	18992	67.1983	18978	707	45176	49006
1973.5	2.1700	19005	67.2000	18991	720	45211	49043
1974.5	2.2216	19016	67.2033	19002	737	45246	49079
1975.5	2.2733	19035	67.1949	19020	755	45273	49112
1976.5	2.3083	19050	67.1949	19034	767	45307	49149
1977.5	2.3666	19062	67.1949	19046	787	45337	49181
1978.5	2.4566	19059	67.2166	19041	817	45376	49216
1979.5	2.5383	19061	67.2250	19042	844	45401	49240
1980.5	2.6200	19063	67.2316	19043	871	45418	49257
1981.5	2.7150	19047	67.2616	19026	902	45449	49279
1982.5	2.8049	19035	67.2883	19012	931	45479	49302
1983.5	2.8733	19033	67.3000	19009	954	45499	49319
1984.5	2.9483	19023	67.3199	18998	978	45520	49335
1985.5	3.0133	19015	67.3383	18989	1000	45542	49352
1986.5	3.0850	19003	67.3633	18976	1023	45570	49374
1987.5	3.1416	18999	67.3783	18971	1041	45593	49393
1988.5	3.2066	18983	67.4100	18953	1062	45626	49418
1989.5	3.2650	18966	67.4433	18935	1080	45662	49444
1990.5	3.3133	18962	67.4583	18930	1096	45684	49463
1991.5	3.3700	18951	67.4800	18918	1114	45709	49482
1992.5	3.4216	18955	67.4850	18921	1131	45726	49499
1993.5	3.4966	18956	67.4900	18921	1156	45744	49516
1994.5	3.5800	18954	67.5066	18917	1183	45772	49541
1995.5	3.6633	18959	67.5116	18921	1212	45797	49566
1996.5	3.7500	18966	67.5150	18925	1241	45822	49592
1997.5	3.8483	18963	67.5333	18920	1273	45857	49623
1998.5	3.9550	18956	67.5600	18911	1308	45897	49658
1999.5	4.0416	18958	67.5716	18911	1336	45931	49689
2000.5	4.1300	18955	67.5916	18906	1365	45969	49724
2001.5	4.2166	18962	67.6000	18911	1394	46005	49760
2002.5	4.3066	18969	67.6100	18916	1424	46044	49798
2003.5	4.4033	18970	67.6283	18914	1457	46090	49841

Rok	$D [^\circ]$	$H [\text{nT}]$	$I [^\circ]$	$X [\text{nT}]$	$Y [\text{nT}]$	$Z [\text{nT}]$	$F [\text{nT}]$
2004.5	4.4900	18980	67.6316	18922	1486	46121	49874
2005.5	4.5783	18984	67.6416	18924	1516	46155	49906
2006.5	4.6633	18997	67.6383	18934	1544	46177	49932
2007.5	4.7633	19007	67.6400	18942	1578	46207	49963
2008.5	4.8750	19014	67.6450	18945	1616	46236	49993
2009.5	4.9950	19022	67.6500	18950	1656	46265	50023
2010.5	5.1333	19018	67.6700	18941	1701	46301	50055
2011.5	5.2683	19015	67.6883	18934	1745	46338	50087
2012.5	5.4100	19014	67.7066	18929	1793	46377	50123

Tabela. 2.5. Wyniki pomiarów magnetycznych w obserwatorium na Helu (HLP)

Rok	$D [^\circ]$	$H [\text{nT}]$	$I [^\circ]$	$X [\text{nT}]$	$Y [\text{nT}]$	$Z [\text{nT}]$	$F [\text{nT}]$
1901.5	-7.1834	18309	67.5516	18165	-2289	44315	47948
1926.5	-3.8134	17732	68.1466	17693	-1179	44214	47637
1928.5	-3.5000	17692	68.2333	17659	-1080	44308	47710
1932.5	-2.6000	17535	68.3333	17517	-795	44138	47494
1934.5	-2.5917	17553	68.4200	17535	-794	44379	47724
1935.5	-2.5000	17530	68.4816	17513	-765	44461	47792
1941.5	-1.6367	-	-	-	-	-	-
1947.5	-	17359	69.0000	-	-	45222	48439
1953.5	-0.2417	17388	69.0133	17388	-73	45329	48549
1954.5	-0.1667	17394	69.0250	17394	-51	45372	48592
1955.5	-0.0701	17379	69.065	17379	-21	45428	48639
1956.5	0.0650	17371	69.0833	17371	20	45450	48657
1957.5	0.0950	17372	69.0916	17372	29	45475	48680
1958.5	0.1699	17380	69.1083	17380	52	45535	48739
1959.5	0.2450	17390	69.1100	17390	74	45565	48771
1960.5	0.2933	17402	69.1133	17402	89	45602	48810
1961.5	0.3300	17422	69.1000	17422	100	45625	48838
1962.5	0.3783	17438	69.0916	17438	115	45647	48864
1963.5	0.4416	17449	69.0866	17448	135	45663	48883
1964.5	0.4766	17464	69.0766	17463	145	45676	48901
1965.5	0.5000	17476	69.0683	17475	153	45692	48920
1966.5	0.5266	17485	69.0666	17484	161	45710	48940
1967.5	0.5549	17492	69.0733	17491	169	45743	48973
1968.5	0.5733	17502	69.0733	17501	175	45769	49001
1969.5	0.5716	17524	69.0583	17523	175	45792	49030
1970.5	0.5800	17542	69.0533	17541	178	45824	49067
1971.5	0.5950	17565	69.0383	17564	182	45849	49098
1972.5	0.6016	17579	69.0350	17578	184	45880	49132
1973.5	0.6416	17595	69.0316	17594	197	45912	49168

Rok	$D [^\circ]$	$H [\text{nT}]$	$I [^\circ]$	$X [\text{nT}]$	$Y [\text{nT}]$	$Z [\text{nT}]$	$F [\text{nT}]$
1974.5	0.6983	17606	69.0366	17605	215	45951	49208
1975.5	0.7500	17625	69.0283	17623	231	45984	49246
1976.5	0.8266	17639	69.0266	17637	254	46015	49280
1977.5	0.9166	17651	69.0250	17649	282	46045	49312
1978.5	1.0033	17646	69.0483	17643	309	46085	49348
1979.5	1.0850	17651	69.0533	17648	334	46112	49375
1980.5	1.1916	17653	69.0583	17649	367	46127	49390
1981.5	1.2916	17637	69.0866	17632	398	46156	49411
1982.5	1.3899	17620	69.1183	17615	427	46184	49431
1983.5	1.4766	17614	69.1300	17608	454	46200	49444
1984.5	1.5583	17602	69.1500	17596	479	46219	49457
1985.5	1.6316	17591	69.1716	17584	501	46239	49472
1986.5	1.7116	17579	69.1933	17571	525	46263	49490
1987.5	1.7716	17572	69.2099	17564	543	46285	49508
1988.5	1.8500	17555	69.2433	17546	567	46318	49533
1989.5	1.9250	17535	69.2783	17525	589	46352	49558
1990.5	1.9733	17527	69.2966	17516	604	46374	49575
1991.5	2.0099	17513	69.3216	17502	614	46398	49593
1992.5	2.0650	17515	69.3266	17504	631	46416	49611
1993.5	2.2050	17516	69.3300	17503	674	46428	49622
1994.5	2.2633	17512	69.3466	17500	692	46456	49647
1995.5	2.3550	17518	69.3500	17503	720	46481	49672
1996.5	2.4433	17523	69.3533	17507	747	46506	49698
1997.5	2.5483	17519	69.3716	17502	779	46539	49727
1998.5	2.6633	17512	69.3966	17493	814	46581	49764
1999.5	2.7550	17511	69.4116	17491	842	46615	49796
2000.5	2.8650	17507	69.4316	17485	875	46657	49833
2001.5	2.9616	17515	69.4366	17492	905	46692	49869
2002.5	3.0616	17520	69.4483	17495	936	46730	49906
2003.5	3.1800	17519	69.4683	17492	972	46777	49950
2004.5	3.2766	17529	69.4700	17500	1002	46809	49983
2005.5	3.3716	17531	69.4816	17501	1031	46843	50016
zmiana baz	-0.025	-2	0.01	-2	-8	9	7
2006.5	3.4983	17550	69.4683	17517	1071	46859	50038
2007.5	3.6116	17559	69.4700	17524	1106	46887	50067
2008.5	3.7300	17564	69.475	17527	1143	46917	50097
2009.5	3.8550	17571	69.4800	17531	1181	46945	50126
2010.5	4.0083	17568	69.4966	17525	1228	46980	50157
2011.5	4.1533	17563	69.5150	17517	1272	47014	50188

2.2. Pomiary magnetyczne w Polsce przedwojennej i pomiary magnetyczne w latach 1940–1942

W pierwszej połowie XX wieku działały w wolnej Polsce trzy obserwatoria magnetyczne – obserwatorium w Krakowie, na Helu i w Świdrze. Oprócz prac rejestracyjnych prowadziły one też prace pomiarowe na punktach rozproszonych lub na punktach zdjęcia magnetycznego 1-go rzędu. Wynikiem pierwszego polskiego zdjęcia magnetycznego, obejmującego wszystkie składowe pola geomagnetycznego zredukowane do epoki 1927.0 była mapa zboczeń magnetycznych na epokę 1927.0 i mapy pozostałych składowych (opublikowane przez Kalinowskiego w Pracach Obserwatorium Magnetycznego w Świdrze w 1927 i w 1933 roku) (Kalinowski, 1933).

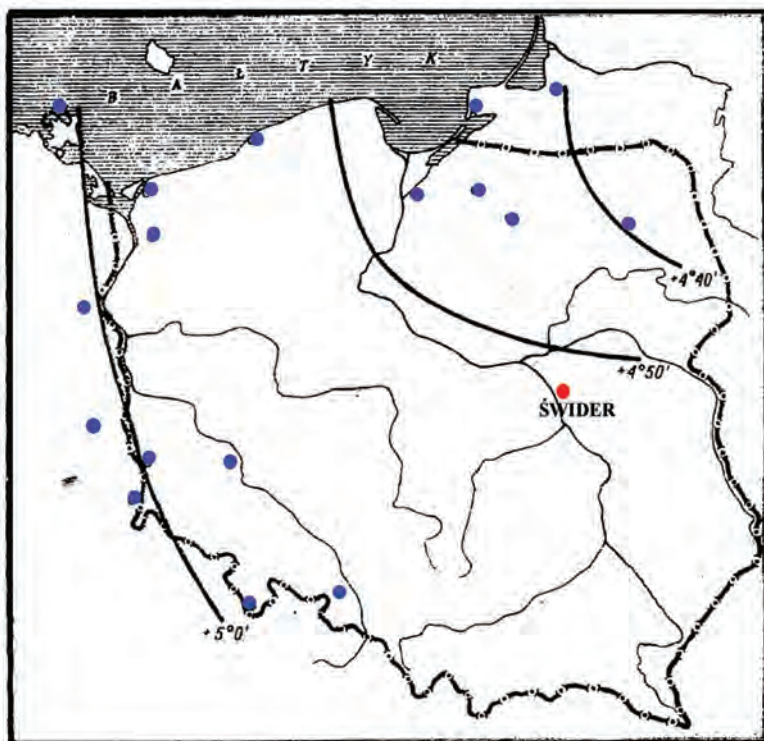
Do badań nad magnetyzmem ziemskim włączały się stopniowo inne placówki, między innymi Instytut Geologiczny. Na początku lat 1930. uruchomiono na wyspie Niedźwiedziej pierwszą polską stację polarną rejestrującą zmiany ziemskiego pola magnetycznego. W 1932 roku Instytut Geofizyki i Meteorologii Uniwersytetu Lwowskiego uruchomił w Janowie pod Lwowem obserwatorium magnetyczne. Wszystkie dostępne wartości składowych pola magnetycznego Ziemi uzyskane z pomiarów poszerzały ówczesną wiedzę na temat zmian wiekowych tego pola.

W latach 1898–1903 zostało wykonane niemieckie zdjęcie magnetyczne 1-rzędu, z którego 90 punktów znalazło się na terenie obecnej Polski. Szacowana dokładność zdjęcia według Schmidta wyniosła $\pm 0.5'$ dla deklinacji, co świadczyłoby o wysokiej jakości materiału pomiarowego (Schmidt, 1922). W świetle obecnie wykonywanych opracowań danych magnetycznych uzyskanie w tamtym czasie takiej dokładności jest mało prawdopodobne.

Pod koniec XIX wieku i na początku wieku XX na obszarze naszego kraju liczne prace magnetyczne wykonywali uczeni niemieccy (ziemie zachodnie i północne), austriaccy (Małopolska) i rosyjscy (była Kongresówka) (Dziewulski, 1912). Wykonywane były zdjęcia magnetyczne 1-go rzędu. Największą pracą było szczegółowe zdjęcie deklinacji magnetycznej na obszarze wschodniego i środkowego Pomorza (ponad 4700 punktów), które po raz pierwszy ujawniło anomalny charakter pola magnetycznego w tych okolicach (Schmidt, 1922). Wyniki tych pomiarów wchodziły w skład różnych opracowań europejskich.

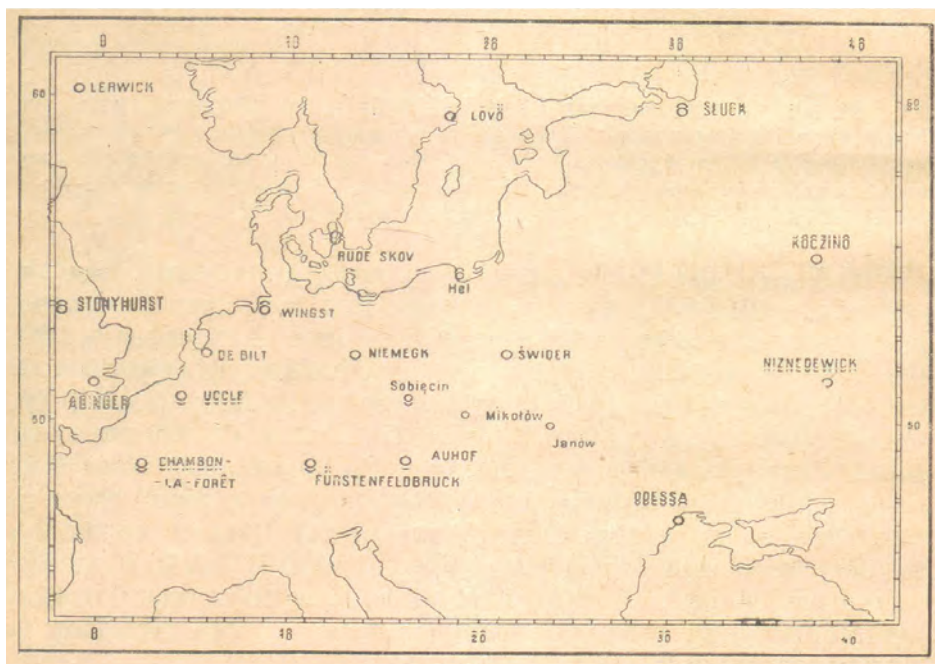
Na początku XX wieku były wykonywane systematyczne pomiary deklinacji magnetycznej na 47 punktach w okolicy ujścia Wisły i Nowego Portu. W 1929 roku Errulat opublikował swoje zdjęcie magnetyczne dla całego rejonu Gdańska i okolicy, zredukowane do epoki 1925.0 (Olczak, 1955a).

Nowe zdjęcie magnetyczne zostało wykonane w latach 1934–1935 (Bock i in., 1948) i zredukowane do epoki 1935.0. Objęło ono niestety tylko 12 punktów poprzedniego zdjęcia z terenów polskich. Na podstawie wyników obu zdjęć została wykonana mapa zmian deklinacji magnetycznej dla Polski w latach 1901–1935 (rys. 2.7).



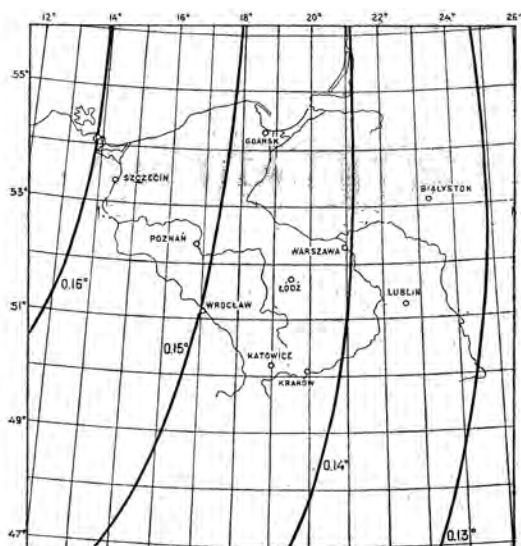
Rys. 2.7. Zmiana deklinacji magnetycznej w latach 1901–1935 z zaznaczonymi punktami zdjęcia magnetycznego wykorzystanymi do opracowania

Zmiany wiekowe pola magnetycznego, niedoceniane przez dziewiętnastowiecznych obserwatorów, okazały się interesujące i ważne w wieku XX. Związane to było z szybkim rozwojem techniki pomiarowej, militarnej, nawigacyjnej itp. wymagającej podniesienia dokładności wyznaczeń magnetycznych. Próbę opisanie zjawiska zmian wiekowych podjął Olczak (1952) na podstawie analizy działalności stacji magnetycznych w Europie Środkowej (rys. 2.8). Autor pracy zauważył różnice między zmianami wiekowymi składowych pola magnetycznego Ziemi (szczególnie modułu F wektora natężenia całkowitego) w obserwatorium polskim w Świdrze i w pozostałych obserwatoriach europejskich. Według Olczaka różnica deklinacji magnetycznej między Bugiem i Odrą zmniejszała się średnio około $1'$ rocznie (Olczak, 1952). Obecnie różnica ta wzrosła do około $2'$. Ponieważ krzywe na stacjach wykazywały znaczne przesunięcia fazowe, znaczne różnice stromości i inne zróżnicowania ich przebiegu, autor wyraził pogląd o konieczności założenia sieci punktów wiekowych między stacjami i regularne wykonywanie na nich absolutnych pomiarów magnetycznych. Na terenach niemieckich prace takie podjęto już na przełomie wieków XIX i XX.



Rys. 2.8. Rozmieszczenie stacji magnetycznych w Europie Środkowej w pierwszej połowie XX wieku

W 1940 roku Burmeister opracował izopory deklinacji magnetycznej dla terenów polskich na epokę 1940.5, na podstawie wszystkich dostępnych danych i przedstawił je w postaci mapki (rys. 2.9) (Olczak, 1952).



Rys. 2.9. Izopory deklinacji magnetycznej dla epoki 1940.5 wg Burmeistera

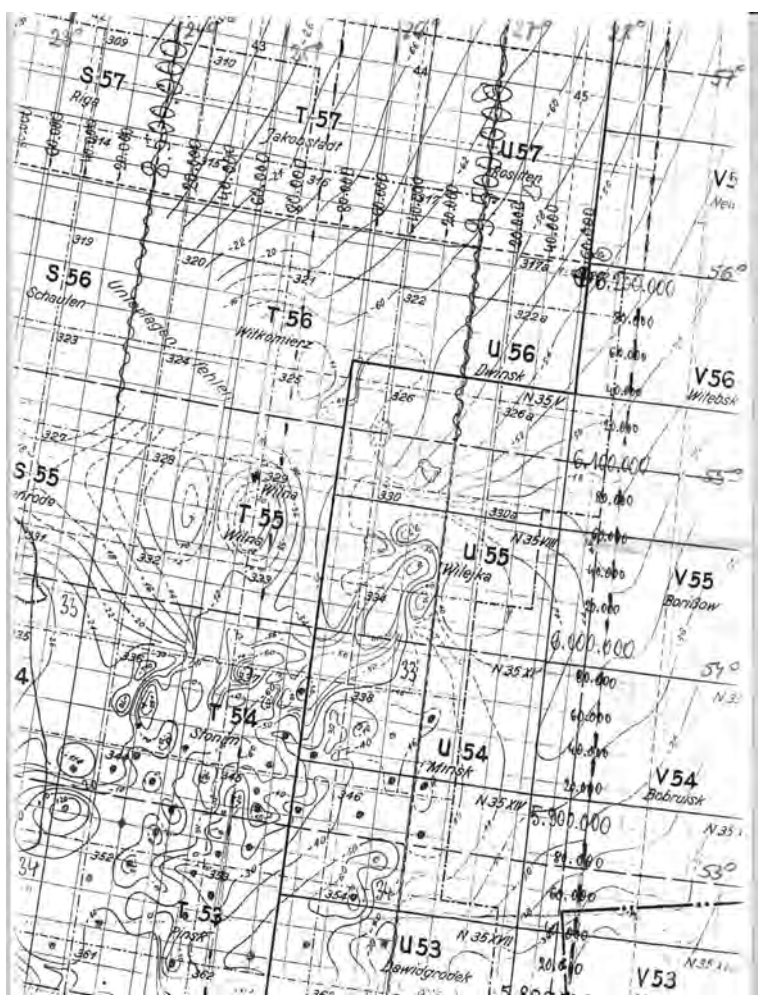
Dostępne wartości deklinacji magnetycznej uzyskane z pomiarów naziemnych na punktach zdjęcia magnetycznego leżących na terenach Polski przedwojennej i na terenach obecnie znajdujących się w granicach Polski, a uzyskane w pierwszej połowie XX wieku zapisane są w katalogach. Są to:

- katalog „*Zdjęcie magnetyczne Polski*” (Kalinowski, 1933). Katalog zawiera opis terenowych punktów magnetycznych, opis pomiarów, wyniki obserwacji deklinacji, inklinacji i natężenia składowej poziomej H wektora pola geomagnetycznego oraz trzy mapy, przedstawiające izolinie D , I i H . Mapa czwarta przedstawia lokalizację punktów na terytorium kraju. Dane magnetyczne zostały zredukowane na epokę 1928.0. Katalog zawiera dane dla 375 punktów, z czego na dawnych polskich terenach wschodnich zlokalizowanych jest 150 punktów;
- katalog „*Magnetische Reichsvermessung 1935.0*” (Bock, 1948) opracowany przez Instytut Geofizyczny w Poczdamie. Zawiera on dane magnetyczne na 554 punktach rozproszonych, obejmujących terytorium Niemiec i Prus Wschodnich. W niniejszym opracowaniu wykorzystano je do kontroli redukcji 20 punktów zlokalizowanych w dzisiejszym Obwodzie Kaliningradzkim;
- katalog „*Verzeichnis der Deklinationswerte für das Gebiet des ehemaligen Staates Polen und Isogonenkarte*” (Verzeichnis, 1942). Zawiera on dane magnetyczne na 877 punktach rozproszonych, obejmujących teren Polski przedwojennej. Deklinacja magnetyczna podana jest w katalogu w mierze gradowej;
- katalog danych magnetycznych „*Lietuvos magnetinė nuotrauka, padaryta 1936–1938 metais*” (Slezevicius i Saldukas, 1941) znaleziony w archiwach litewskich, opracowany na podstawie pomiarów Slezeviciusa z lat 1936–1938. Katalog obejmuje 179 punktów, rozmieszczonych równomiernie na terytorium przedwojennej Litwy. Na podstawie wykonanego zdjęcia zostały opracowane mapy deklinacji D , inklinacji I oraz mapy składowych poziomej H i pionowej Z , na epokę 1940.0, w skali 1:1 000 000.

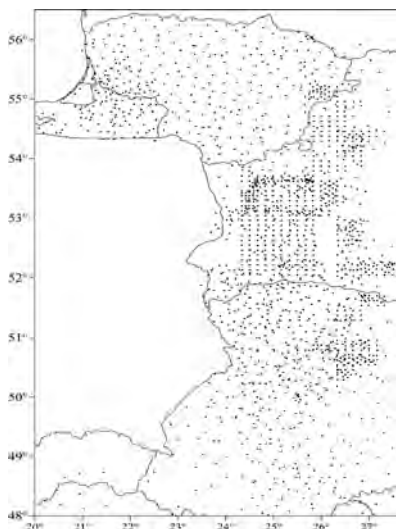
W zasobach archiwalnych Instytutu Geodezji i Kartografii znajdują się także mapy uchylenia magnetycznego (różnica między deklinacją magnetyczną i zbieżnością południków) z 1941 roku, wykonane przez służbę topograficzną Wehrmachtu, w skali 1:300 000 (dołączone do katalogu *Verzeichnis der Deklinationswerte für das Gebiet des ehemaligen Staates Polen und Isogonenkarte*). Mapy opracowane zostały w odwzorowaniu Gaussa–Krügera z podziałem na 3-stopniowe pasy. Mapy obejmują tereny Zachodniej Ukrainy, Białorusi, Litwy i Obwodu Kaliningradzkiego – fragment takiej mapy pokazano na rysunku 2.10.

Dane z wymienionych katalogów, przeliczone na deklinację wyrażoną w stopniach, zostały wpisane do geofizycznego banku danych IGiK (rozdz. 7) (Welker i Sas-Uhrynowski, 2004). Mapy poddano obróbce w celu wygenerowania cyfrowego zapisu ich obrazu. Po digitalizacji map otrzymano zbiór punktów w układzie lokalnym z wartościami uchyień magnetycznych. Następnie przeliczono te wartości na wartości deklinacji magnetycznej i przetransformowano je z lokalnego układu współrzędnych do układu współrzędnych zdjęcia magnetycznego, tzn. obowiązującego wtedy układu współrzędnych 1965. W rezultacie otrzymano

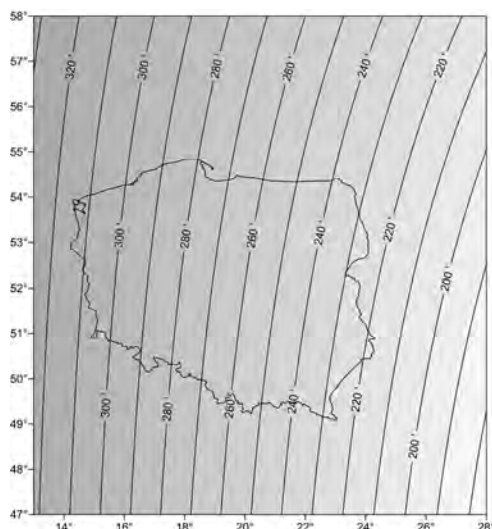
jednorodny zbiór punktów z wartościami deklinacji magnetycznej dla całego obszaru objętego archiwalnymi pomiarami. Dzięki tym materiałom udało się odtworzyć z dokładnością 10–20' przebieg deklinacji magnetycznej na terenach na wschód od obecnych granic Polski. Niewątpliwym sukcesem tej pracy jest uzyskanie danych magnetycznych pozwalających na bezpieczną ekstrapolację deklinacji na granicy wschodniej i poznanie z dużym prawdopodobieństwem przebiegu izogon na obszarze poddanym opracowaniu. Brak jakichkolwiek danych magnetycznych z terenów wschodnich powodowałby przekłamanie przebiegu izogon w rejonach przygranicznych. Rozkład „odzyskanych” punktów wschodnich pokazuje rysunek 2.11. Pomiary magnetyczne na terenie Litwy (Obuchowski, 2003), Białorusi i Ukrainy, wykonane w ramach współpracy naukowej, pozwoliły na weryfikację otrzymanych wyników.



Rys. 2.10. Fragment archiwalnej mapy z 1941 roku



Rys. 2.11. Punkty deklinacji magnetycznej uzyskane z materiałów archiwalnych



Rys. 2.12. Izopory deklinacji magnetycznej 1940–2000 obliczone w minutach z danych obserwatoriów europejskich

Archiwalne wartości deklinacji magnetycznej zostały zredukowane do epoki 2000.5 na podstawie zmian wiekowych pola geomagnetycznego w całym badanym okresie 1940–2000. Zmiany deklinacji w postaci izopor, opracowane na podstawie zapisów w obserwatoriach Europy Środkowej i Wschodniej w latach 1940–2000, przedstawia rysunek 2.12.

2.3. Pomiary magnetyczne w drugiej połowie XX wieku

Po drugiej wojnie światowej działalność w zakresie magnetyzmu ziemskiego obejmująca pomiary magnetyczne, sporządzanie map składowych pola geomagnetycznego dla Polski oraz badania zmian wiekowych tego pola podjęło kilka ośrodków. Były to:

- Instytut Geofizyki PAN prowadzący obserwatoria magnetyczne (Belsk, Hel) oraz pełniący rolę koordynatora badań magnetyzmu ziemskiego w Polsce,
- Instytut Geodezji i Kartografii prowadzący permanentną służbę w zakresie pomiarów magnetycznych oraz badań zmian wiekowych pola geomagnetycznego,
- Obserwatorium Magnetyczne im. St. Kalinowskiego w Świdrze prowadzące poza ciągłą rejestracją składowych pola geomagnetycznego prace związane z pomiarami magnetycznymi i badaniem zmian wiekowych (do 1953 roku),
- Instytut Geologiczny prowadzący w bardzo szerokim zakresie prace magnetyczne dla potrzeb rozpoznania geologicznego a także badania zmian wiekowych, szczególnie modułu składowej Z (F), pola geomagnetycznego,
- Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie podejmująca ba-

dania zmian wiekowych pola geomagnetycznego oraz badania w zakresie specjalistycznych zagadnień magnetyzmu ziemskiego.

W Instytucie Geodezji i Kartografii, w ramach zadań służby geodezyjnej, opracowano projekt pierwszego w nowych granicach Polski, podstawowego zdjęcia deklinacji magnetycznej, które liczyło około 4500 punktów pomiarowych a następnie zorganizowano kilkuletnią kampanię pomiarową (lata 1954–1959), obejmującą szkolenie obserwatorów, zakup aparatury, nadzór naukowo-techniczny nad wykonywanymi pracami, zarówno polowymi, jak i kameralnymi oraz założenie odpowiednio skonstruowanego banku danych magnetycznych w postaci analogowej, który w latach następnych został przetworzony do postaci cyfrowej. Uwieńczeniem tych działań było opracowanie pierwszej mapy izogon Polski na epokę 1955.0 (Krzemiński, 1959). Po przeprowadzeniu analizy uzyskanych danych i po wykonaniu pomiarów uzupełniających, została opracowana druga wersja mapy, na epokę 1961.0 (Krzemiński i in., 1963b). Ta wersja była do lat 1980. jednym z podstawowych źródeł danych o deklinacji magnetycznej w Polsce. Od czasu rozpowszechnienia techniki komputerowej i stworzenia cyfrowej bazy danych magnetycznych (rozdz. 7) materiałem wyjściowym do opracowań są bezpośrednio wyniki pomiarów na punktach sieci. Dokładniejszy opis zdjęcia magnetycznego Polski zawiera rozdział 5.

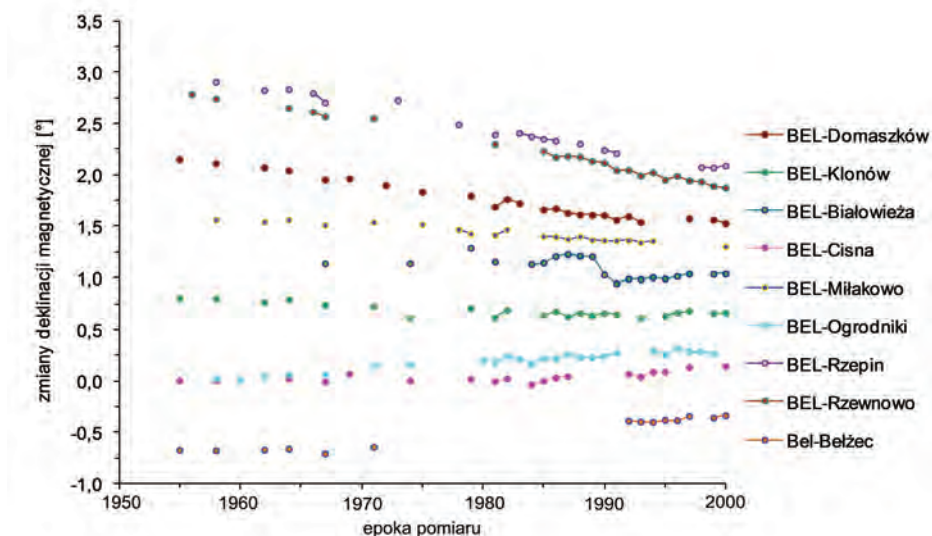
Na początku lat 1950. założono podstawową ośnowę magnetyczną kraju składającą się początkowo z 20, a obecnie z 19 punktów wiekowych. Są to punkty o trwałej stabilizacji, na których systematycznie co 2–3 lata wykonuje się absolutne pomiary trzech niezależnych składowych pola geomagnetycznego. Pomiary te są niezbędne do badania zmian wiekowych tego pola czyli do opracowywania i aktualizacji danych magnetycznych. Ośnowę magnetyczną uzupełniają dwa obserwatoria magnetyczne w Belsku i na Helu, stanowiące punkty odniesienia do wszelkich redukcji magnetycznych. Więcej szczegółów na temat tej ośnowy zawarto w rozdziale 4.

W latach 1960. wykonano pełne zdjęcie magnetyczne kraju na wybranych 756 punktach zdjęcia deklinacji magnetycznej z lat 1950. (rozdz. 6). Wyniki pomiarów trzech elementów pola geomagnetycznego opracowano w IGiK w latach 1964–1970 i zredukowano do epoki 1965.0 (Żółtowski, 1972).

Badania zmian wiekowych pola magnetycznego Ziemi, jakie prowadzone są w Instytucie nieprzerwanie również od lat 1950., umożliwiają monitorowanie rozkładu przestrzennego tych zmian, przeprowadzanie ich analizy i opracowanie na podstawie uzyskanych wyników badań odpowiednich algorytmów, pozwalających na wprowadzanie poprawek do danych archiwalnych, czyli na aktualizację tych danych (rys. 2.13).

Wartości deklinacji zdjęcia magnetycznego Polski z lat 1952–1955 i 1958–1959, dane archiwalne dla terenów wschodnich, wartości ze zdjęcia magnetycznego Czech (1978), Słowacji (1980 i 1995), Niemiec (1965 i 2000), Węgier (1995) oraz Bułgarii (1960 – pomiar H i F), uzyskane w drodze wymiany między instytutami, wartości deklinacji magnetycznej uzyskane z pomiarów morskich na Bałtyku w 1971 roku (Uhrzynowski, 1975) oraz w latach 1970–1990 (Sas-Uhry-

nowski i in., 2001) wraz z siecią europejskich obserwatoriów geofizycznych stanowią podstawową bazę do badań zmian deklinacji magnetycznej w Europie Środkowej i tworzenia aktualnych obrazów deklinacji dla potrzeb służb geodezyjnych, wojska i nawigacji.



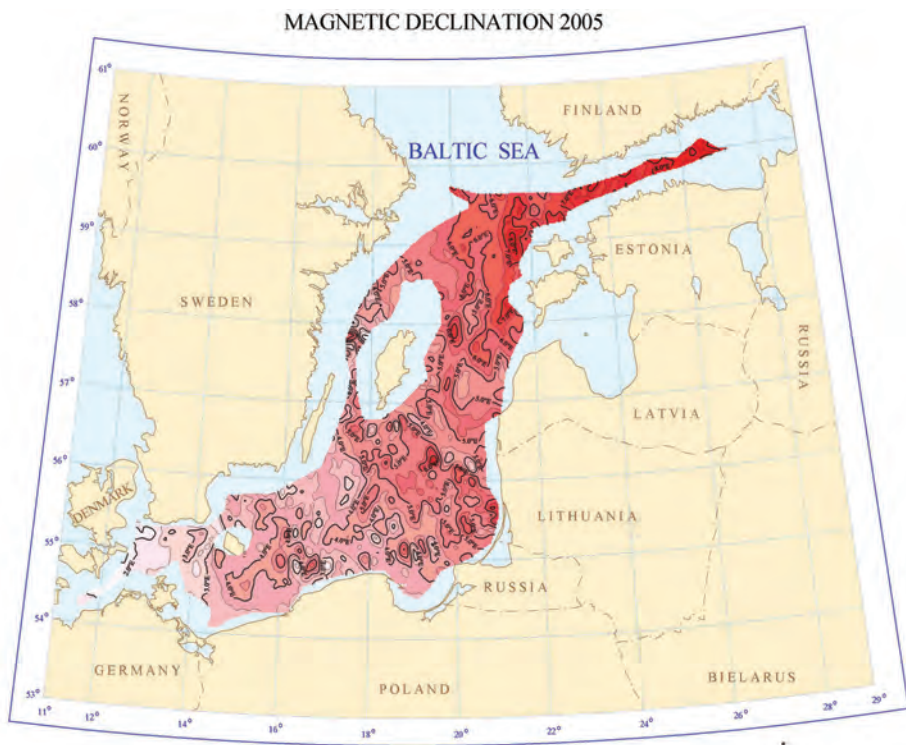
Rys. 2.13. Zmiany deklinacji magnetycznej na polskich punktach wiekowych w drugiej połowie XX wieku odniesione do Centralnego Obserwatorium Geofizycznego IGF PAN w Belsku

W roku 1970, Instytut Geodezji i Kartografii podjął współpracę z Instytutem Ziemijskiego Magnetyzmu Jonosfery i Propagacji Fal Radiowych Rosyjskiej Akademii Nauk (IZMIRAN) w Petersburgu nad rozpoznaniem ziemskiego pola magnetycznego na obszarze Bałtyku (Sas-Uhrynowski i in., 2001). Do pomiarów magnetycznych został użyty jedyny w tamtym czasie szkuner niemagnetyczny „Zaria”, na którym wpływ pól zakłócających mierzone składowe pola był minimalny. Pomiary, prowadzone metodą profilową w sposób ciągły i uśredniane co kilometr, były wykonywane za pomocą specjalistycznej aparatury pomiarowej, która prowadziła analogową rejestrację czterech elementów składowych pola geomagnetycznego. Całkowita długość profilów pomiarowych wyniosła ponad 55000 km, przy odległościach między nimi średnio około 5 km. Pomiary zakończone w 1990 roku objęły obszar całego Bałtyku, bez wód terytorialnych nadbałtyckich państw.

Na podstawie tych danych opracowano w IGiK pierwszy Atlas Map Magnetycznych Bałtyku, na epokę 1990.5, zawierający mapy elementów pomierzonych F , D i H , mapy elementów obliczonych I i Z oraz mapy anomalii F_a i H_a . Do Atlasu włączono także mapy zmian wiekowych elementów pomierzonych, mapy

rozkładu normalnego tych elementów wg modelu IGRF oraz mapę przebiegu profili pomiarowych (Sas-Uhrynowski i Welker, 1999; Sas-Uhrynowski i in., 2000). Zmiany roczne (izopory) zostały obliczone w oparciu o sieć polskich punktów wiekowych oraz dane z obserwatoriów krajów nadbałtyckich.

Na rysunku 2.14 przedstawiono jako przykład mapę deklinacji magnetycznej dla Bałtyku. Jest to mapa opracowana dla ww. Atlasu zaktualizowana na epokę 2005.5, czyli poprawiona o zmiany wiekowe, jakie zaszły od czasu pierwszej redukcji do 2005 roku. Podobnie zostały zaktualizowane mapy izodynam dla modułu F wektora natężenia całkowitego pola magnetycznego Ziemi i jego składowej poziomej H .



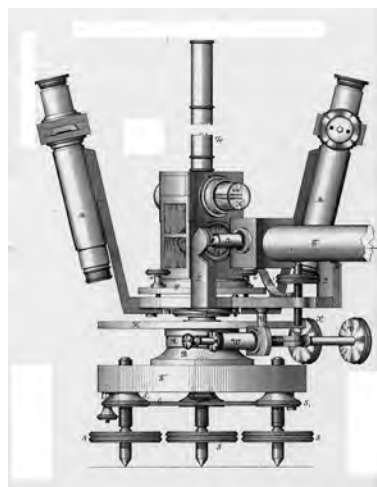
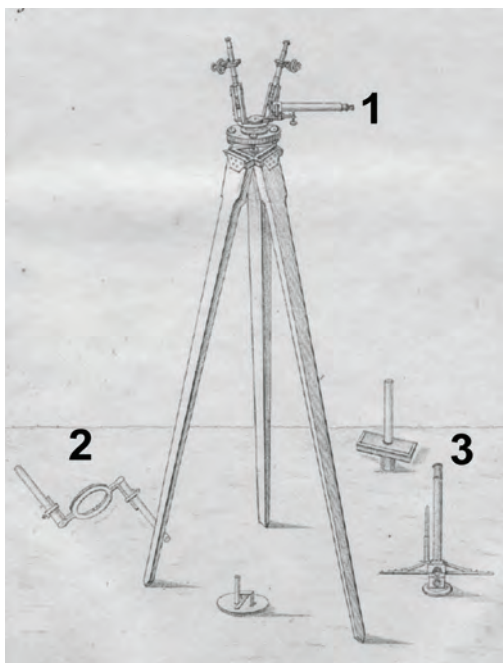
Rys. 2.14. Mapa deklinacji magnetycznej dla Bałtyku na epokę 2005.5 (Demina i in., 1998b; Sas-Uhrynowski i in., 2000)

Pod koniec XX wieku zespół IGiK wraz z pracownikami instytutu IZMIRAN podjął próbę sporządzenia mapy anomalii magnetycznych dla Polski i Bałtyku na podstawie danych satelitarnych zarejestrowanych przez satelitę geofizycznego MAGSAT (Rotanova i in., 2000). Wyniki opracowania tych danych dla tak małego obszaru nie były satysfakcjonujące, gdyż otrzymany obraz anomalii był mocno zgeneralizowany.

3. APARATURA POMIAROWA

3.1. Instrumenty wahadłowe – deklinator

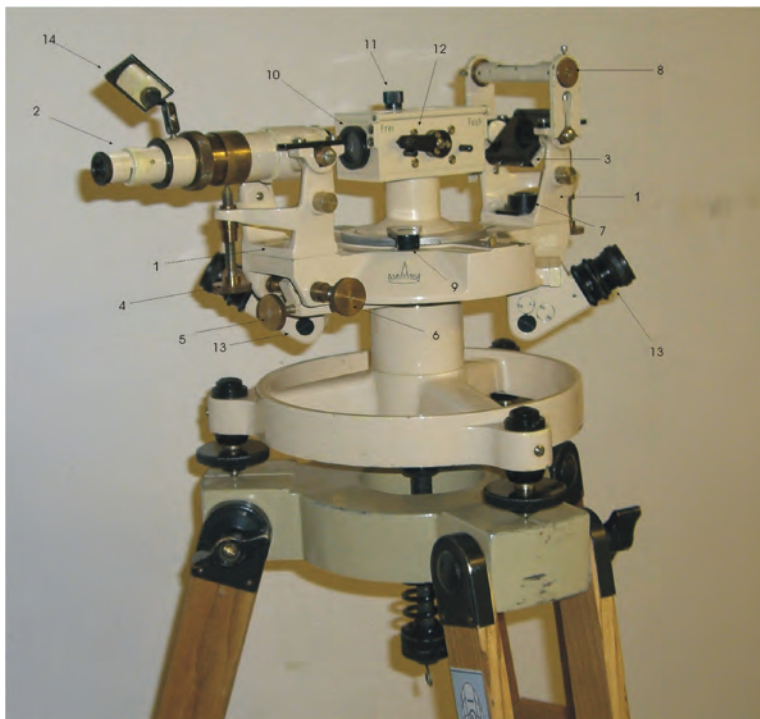
Jednym z pierwszych instrumentów wykonanych specjalnie do pomiarów magnetycznych był teodolit magnetyczny opracowany i skonstruowany przez niemieckiego uczonego J. Lamonta w pierwszej połowie XIX wieku (Matzka, 2005). Teodolitów takich, zwanych *Reisetheodolit*, wytworzono 45 sztuk i były to instrumenty standardowe dla pomiarów magnetycznych w XIX wieku (rys. 3.1). Wykorzystywano je do pomiarów deklinacji magnetycznej D , inklinacji I oraz modułu składowej poziomej H wektora natężenia całkowitego F pola magnetycznego.



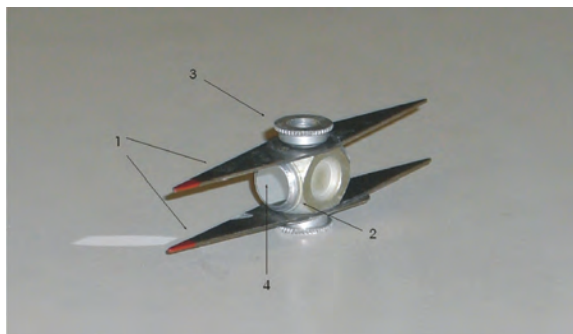
Rys. 3.1. Teodolit magnetyczny zaprojektowany w pierwszej połowie XIX wieku przez Johna Lamonta (Soffel i Matzka, 2005) (1–teodolit, 2–element do pomiaru I , 3–element do pomiaru D i H)

W połowie XX wieku niemiecka firma „Askania” produkowała polowe teodolity magnetyczne, przeznaczone do pomiarów deklinacji, inklinacji i składowej poziomej wektora natężenia pola geomagnetycznego. Do pomiaru deklinacji służył deklinator magnetyczny, do pomiaru inklinacji – induktor ziemski, a do pomiaru składowej poziomej H – dwie nasadki (do wahań i do wychyleń), umożliwiające jej wyznaczenie metodą Lamonta.

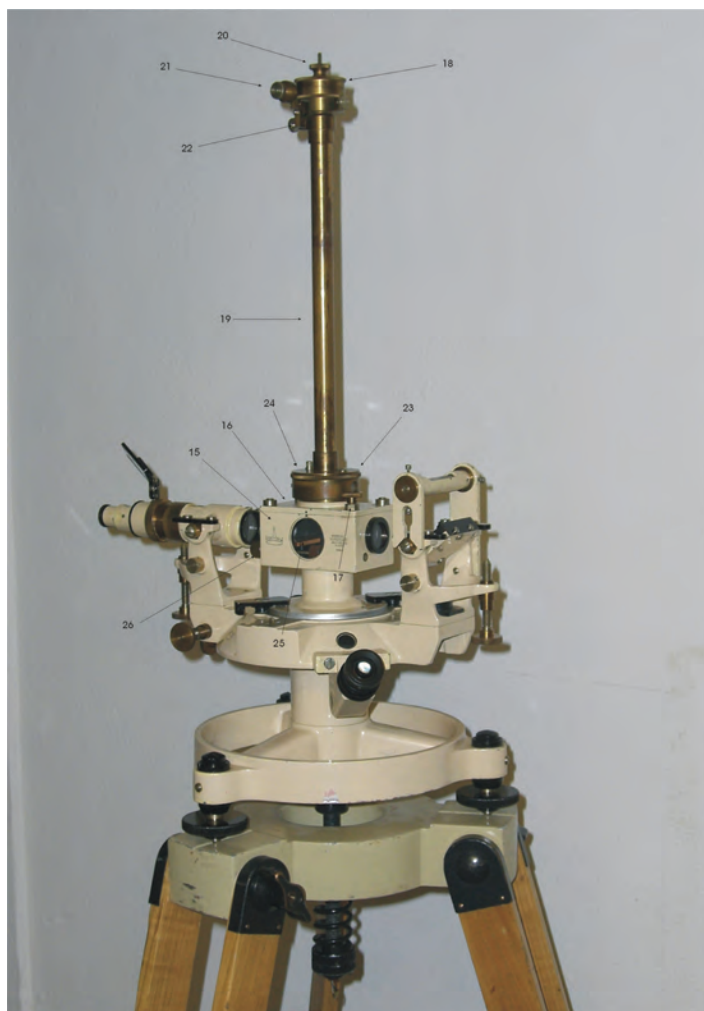
Deklinator magnetyczny jest specjalną nasadką, mocowaną jednoznacznie na teodolicie do pomiarów magnetycznych. Nasadkę stanowi komora z magnesem lub systemem magnesów, który jest osadzany w jej wnętrzu na ostrzu (zwanym także ostrkiem) w taki sposób, aby mógł się swobodnie obracać w płaszczyźnie horyzontalnej. W deklinatorze przeznaczonym do pomiarów bardziej precyzyjnych stosuje się nasadkę, w której system magnesów jest zawieszany na wolframowej nici, zwanej nicią torsyjną. Rysunek 3.2 przedstawia teodolit magnetyczny firmy Askania z deklinatorem igłowym a rysunek 3.4 – z deklinatorem niciowym.



Rys. 3.2. Teodolit magnetyczny „Askania” z deklinatorem igłowym



Rys. 3.3. System magnesów stosowany w deklinatorze igłowym



Rys. 3.4. Teodolit „Askania” z deklinatorem niciowym

Teodolit magnetyczny „Askania” został skonstruowany inaczej niż teodolity geodezyjne, ponieważ założeniem jego konstrukcji była możliwość wyznaczania zarówno kierunku północy magnetycznej, jak i geograficznej, na podstawie obserwacji położenia systemu magnesów i azymutu z obserwacji pozycji Słońca (Askania-Werke, 1953). Zagadnienie to rozwiązano umieszczając lunetę ekscentrycznie w taki sposób, aby jej oś celowa przechodziła przez oś pionową teodolitu (oś obrotu). W tym celu, jak widać na rysunku 3.2, do spodarki są przymocowane symetrycznie dwa jednakowe dźwigary (1). Na jednym mocowana jest autokolimacyjna luneta (2), na drugim przyciemnione lustro (3). Luneta ma ograniczoną możliwość obrotu w płaszczyźnie pionowej do $\pm 15^\circ$. Nachylenia lunety dokonuje się za pomocą śruby (4). Alidada teodolitu może obracać się swobodnie w płasz-

czyźnie horyzontalnej po zwolnieniu śruby zaciskowej (5). Po ustawieniu lunety na cel z grubsza i po przykręceniu śruby zaciskowej, dokładnego nastawienia lunety na cel dokonuje się za pomocą śruby leniwej (6). Lustro umocowane na drugim dźwigarze ma możliwość pełnego obrotu w płaszczyźnie pionowej. Służy ono do skierowania odbitego obrazu Słońca do lunety. W celu wyeliminowania systematycznych błędów pomiarów, położenie lunety i lustra można odwracać o 180° oraz zamieniać je miejscami. Do wstępnego poziomowania teodolitu służy libella pudełkowa (7), zaś do spoziomowania dokładnego nasadkowa libella rurkowa (8), którą osadza się na czopach lunety lub lustra (można ją odwracać o 180°). Obrotowe lustro jest zaciemnione do takiego stopnia, żeby nie zachodziła potrzeba zakładania na okular lunety ciemnika. Przy skierowaniu lunety na cel ziemski, lustro należy obrócić do położenia poziomego, aby nie zasłaniało celu.

Deklinator, zarówno igłowy jak i niciowy, umieszcza się jednoznacznie na alidadzie teodolitu i mocuje specjalnymi zaciskami (9). W deklinatorze igłowym magnes, a dokładniej mówiąc system magnesów umieszcza się na urządzeniu aretującym wewnątrz komory deklinatora (10). Po zamknięciu wieczka (11) opuszcza się magnes na ostrze (ostrek) za pomocą dźwigni urządzenia aretującego (12). W komorze deklinatora, po obu jej końcach znajdują się dwie płytki z czystej miedzi, tak umieszczone, aby końce systemu magnesów znajdowały się w bezpośredniej bliskości tych płytek. Poziome wahania systemu powodują powstawanie w płytkach miedzianych prądów Foucaulta, które działają hamująco na ruchy systemu. Dzięki takiemu rozwiązaniu, system magnesów, po osadzeniu go na ostrku, szybko się uspokaja, umożliwiając dokonanie obserwacji. Odczytów na kręgu poziomym teodolitu dokonuje się za pomocą dwóch mikroskopów (13). Koło poziome teodolitu podzielone jest na 360° . Skala w mikroskopach podzielona jest na 30 działek, zatem nominalny odczyt koła wynosi $2'$. Przy odczycie, ustawienie indeksu można oszacować z dokładnością 0.1 działki skali mikroskopu czyli $0.2'$. Do oświetlenia skali w okularze lunety służy umocowane na nim lusterko (14).

W deklinatorze niciowym system magnesów zawieszany jest na nici torsyjnej i umieszczany w komorze deklinatora (15) podobnie jak w deklinatorze igłowym. Wieko komory (16) nie otwiera się na zawiasach, jak w deklinatorze igłowym, lecz po odkręceniu śrub mocujących (17) wieko zdejmuje się umożliwiając założenie systemu magnesów na haczyku w kształcie litery T (T haczyk), umocowanym na końcu nici. Drugi koniec nici umocowany jest w obrotowej głowicy (18), która znajduje się w górnej części rurki torsyjnej (19) zabezpieczającej nić przed uszkodzeniem. Śruba (20) umożliwia regulowanie wysokości zawieszenia systemu magnesów w komorze. Na ruchomej części głowicy nanie-siona jest podziałka. Odpowiednio umocowana śruba mikrometryczna z bębnem odczytowym (21) umożliwia dokładne ustawienie położenia głowicy, a tym samym ustawienie kąta skręcenia nici torsyjnej. Śruba zaciskowa (22) służy do zablokowania obrotowej części głowicy w ustalonym położeniu. W dolnej części rurki torsyjnej znajduje się urządzenie aretujące system magnesów. Obrót pierścienia (23) nieznacznie unosi i unieruchamia system magnesów w komorze.

Dźwignia (24) umożliwia zablokowanie aretażu. Podobnie jak w deklinatorze igłowym w komorze deklinatora niciowego znajdują się płytki miedziane (25) służące do wyhamowania ruchów magnesu zawieszonego swobodnie na nici torsyjnej. Odwrócenie systemu magnesów o 180° odbywa się bez wyjmowania systemu z komory. Do tego celu służy specjalne urządzenie zamontowane w komorze. Na zewnątrz komory znajduje się pokrętło (26), które umożliwia obracanie ekscentrycznie umocowanego na jego osi wałka o moletowanej w ząbki powierzchni. Przy obrocie powierzchnia wałka zbliża się do zaaretowanego systemu magnesów i obraca go na T haczyku o pewien kąt. Po kilku obrotach wałka magnes przyjmie położenie odwrócone o 180° .

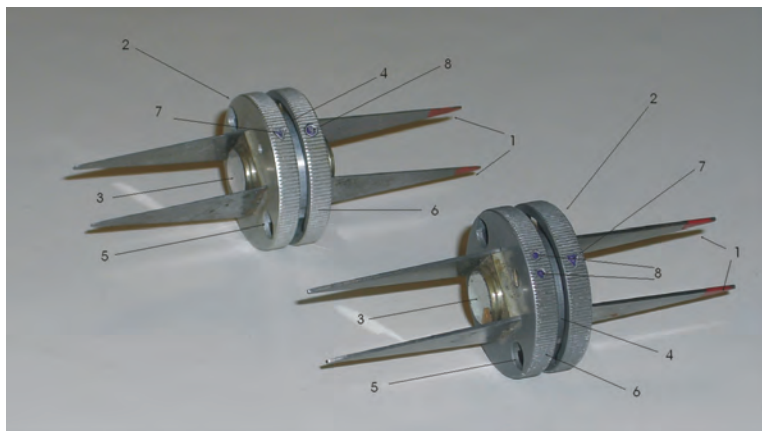
Przy wyznaczaniu kierunku na północ magnetyczną do obserwacji magnesu, który umieszczony jest w komorze deklinatora, służy luneta. Magnes w deklinatorze składa się najczęściej z dwóch jednakowych namagnesowanych elementów, między którymi umocowane jest lusterko. Magnes stosowany w deklinatorze igłowym pokazany jest na rysunku 3.3. Dwie namagnesowane stalowe lamelki o kształcie wydłużonych rombów (1) są przymocowane wzajemnie równolegle do aluminiowej kostki (2), tworząc system magnesów, stanowiących czujnik deklinatora. W kostce znajduje się tulejka (3), wewnątrz której umieszczone jest łożysko, służące do osadzenia systemu na ostrzu deklinatora. Łożysko może się przesuwąć wewnątrz tulejki w pewnych granicach tak, aby po osadzeniu systemu na ostrzu, środek ciężkości systemu znajdował się poniżej punktu osadzenia. Dzięki takiemu rozwiązaniu system magnesów osadzony jest na ostrzu w sposób stabilny. Do osadzenia systemu magnesów na ostrzu służy urządzenie aretujące, zaopatrzone w dźwignię (12 na rys 3.2).

Na aluminiowej kostce, po obu stronach między lamelkami magnetycznymi, umocowane są dwa lusterka (4), umożliwiające obserwacje położenia systemu magnetycznego od strony południowej i północnej. Luneta autokolimacyjna teodolitu umożliwia odpowiednie dla pomiaru ustawienie teodolitu tzn. takie, przy którym oś optyczna jest prostopadła do powierzchni lusterka.

W deklinatorze niciowym do wyznaczania kierunku północy magnetycznej potrzebne są dwa magnesy (systemy magnesów), z których jeden jest słabszy, drugi mocniejszy (rys. 3.5).

Namagnesowane stalowe lamelki (1) są zamontowane wzajemnie równolegle do dwóch złożonych pierścieni aluminiowych (2), odpowiednio wyprofilowanych. Między lamelkami, od obu stron (północnej i południowej) znajdują się lusterka (3). Pierścienie są tak złożone, że między nimi znajduje się szczelina (4), w którą, podczas zakładania magnesu, wkłada się T haczyk. Haczyk należy włożyć w miejscu, gdzie w pierścieniu znajduje się jeden z dwóch otworów (5). Magnes zostaje zawieszony na haczyku po obróceniu go w stosunku do haczyka o 90° . Drugi otwór służy do zawieszenia magnesu po odwróceniu go o 180° . Na pierścieniu widoczne są ząbki (6), umożliwiające odwrócenie magnesu bez wyjmowania go z komory deklinatora, o czym była mowa wyżej. Na pierścieniu wygrawerowany jest znak p (7), który umożliwia zidentyfikowanie położenia magnesu. Magnes słabszy obok trójkątka ma wygrawerowana jedna kropkę ,

a magnes silniejszy dwie $\cdot \cdot$ (8). Zanim przystąpi się do obserwacji magnesów w celu wyznaczenia kierunku na północ magnetyczną, nić wolframowa, na której system magnesów jest zawieszany musi być możliwie dokładnie rozkręcona. Do tego celu służy specjalny szklany ciężarek, który zawieszany jest na T haczyku (rys. 3.6).



Rys. 3.5. Dwa magnesy o różnym momencie magnetycznym używane w deklinatorze niciowym



Rys. 3.6. Szklany ciężarek do rozkręcania nici w deklinatorze niciowym

Zasady wykonywania pomiarów magnetycznych oraz ich redukcji opisanym powyżej sprzętem zawierają *Wytyczne techniczne G-1.3* wydane przez GUGiK w 1982 roku.

3.2. Magnetometr protonowy

W 1954 roku dwaj fizycy amerykańscy, Varian i Packard przeprowadzili następujące doświadczenie: plastikowe naczynie w kształcie walca o średnicy 7 cm,

wysokości 10 cm i o pojemności około 1 litra, wypełnione wodą owinięli wielokrotnie przewodem elektrycznym i wytworzyli pole magnetyczne o natężeniu około 100 Oe. Tak skonstruowana cewka została ustawiona w ten sposób, że kierunek wytworzonego przez nią pola magnetycznego był prostopadły do wektora natężenia pola geomagnetycznego. Po szybkim wyłączeniu prądu przepływającego przez zwoje cewki uczeni stwierdzili, że indukuje się w niej sygnał indukcji elektromagnetycznej o zanikającej amplitudzie i częstotliwości odwrotnie proporcjonalnej do natężenia ziemskiego pola magnetycznego. Przeprowadzony eksperyment stał się podstawą skonstruowania przyrządu pomiarowego, który został nazwany magnetometrem protonowym (Jankowski i Sucksdorf, 1996). Opisane zjawisko można pokrótce wyjaśnić w następujący sposób.

Nukleony jąder atomów znajdujące się w ciągłym ruchu wirowym powodują powstanie w nich pewnych momentów: mechanicznego i magnetycznego. W przypadku braku zewnętrznego pola magnetycznego protony w jakimkolwiek ośrodku, np. w wodzie, nie mają wyróżnionego kierunku orientacji (zjawisko entropii). Jądra atomów wirujące w ziemskim polu magnetycznym w sposób nieuporządkowany, są poddane działaniu momentu skręcającego, który powoduje ich precesję. Na ten ruch jądra wpływa także oddziaływanie pomiędzy nim a otaczającymi go atomami, jak również wzajemne oddziaływanie momentów magnetycznych sąsiadujących ze sobą jąder, które wytwarzają pewne lokalne pola magnetyczne, powodujące zmianę częstotliwości precesji. Te zjawiska powodują znoszenie się momentów magnetycznych wirujących jąder atomów. Zatem protony znajdujące się w naczyniu z wodą, umieszczonym wewnątrz cewki, w normalnych warunkach nie będą indukowały w niej żadnej siły elektromagnetycznej (napięcia generowanego na skutek zjawiska indukcji elektromagnetycznej).

Gdy wewnątrz cewki zostanie wytworzone silne pole magnetyczne, zwane polem polaryzującym, o kierunku prostopadłym do kierunku pola ziemskiego, precesujące protony pod wpływem przyłożonego pola zostaną uporządkowane a następnie, po wyłączeniu prądu, czyli po zaniknięciu pola polaryzującego, rozpoczną ruch precesyjny dookoła wektora pola geomagnetycznego, indukując w cewce siły elektromagnetyczne o malejącej amplitudzie i częstotliwości odwrotnie proporcjonalnej do natężenia pola magnetycznego ziemskiego w danym miejscu. Aby powstała precesja, czas wyłączenia prądu polaryzującego musi być mały w porównaniu z okresem precesji. Po kilku sekundach indukowany sygnał zanika, gdyż protony osiągnęły znów stan początkowy (Acker, 1971).

Pomiar natężenia ziemskiego pola magnetycznego sprowadza się do określenia częstotliwości indukowanego sygnału i jego wartość oblicza się ze wzoru:

$$F = 2\pi f / \gamma \quad (3.1)$$

gdzie f – jest zmierzoną częstotliwością precesji, zaś γ – jest stosunkiem momentu magnetycznego do momentu mechanicznego wirujących jąder atomów zwaną stałą giromagnetyczną równą

$$\gamma = 0.267513 \pm 0.000002 \text{ sek}^{-1} \text{ nT}^{-1} \quad (3.2)$$

Wyznaczenie stałej giromagnetycznej według powyższego wzoru jest wystarczające do określenia modułu F wektora natężenia całkowitego pola magnetycznego z dokładnością 0.1 nT.

W magnetometrze protonowym można wydzielić trzy podzespoły: pierwszy, który powoduje powstanie sygnału wywołanego precesją protonów, drugi, który wzmacnia wywołany sygnał, i trzeci, który mierzy jego częstotliwość. Układ wzbudzania sygnału składa się z sondy, tj. z pojemnika zawierającego ciecz bogatą w protony, zwykle wodę, umieszczonego wewnątrz cewki, który służy do spolaryzowania próbki, a następnie do odbioru sygnału precesji. Oprócz tego w skład tego podzespołu wchodzi jeszcze źródło prądu polaryzującego i system przekąźnikowy. Układ ten powinien być tak skonstruowany, żeby sygnał był stosunkowo duży i żeby był zachowany warunek szybkiego wyłączenia prądu polaryzującego. Sonda powinna być jak najmniej wrażliwa na zakłócenia zewnętrzne. Podzespół wzmacniający stanowi wzmacniacz selektywny. Ze względu na małą amplitudę sygnału, wzmacniacz ten musi być mało wrażliwy na szумы zewnętrzne. Do mierzenia częstotliwości precesji stosuje się najczęściej elektroniczny miernik czasu z kwarcowym wzorcem częstotliwości. Czas ten odczytuje się ze wskazań licznika z dokładnością 10^{-5} sek., co odpowiada dokładności wyznaczenia modułu F wektora natężenia pola równej 0.5 nT. W obecnych konstrukcjach licznik jest tak skonstruowany, że wynik pomiaru odczytuje się bezpośrednio w nanoteslach (Koehler, 2004).

Magnetometry protonowe nie wymagają cechowania i przy wystarczającej dokładności wyznaczenia stałej żyromagnetycznej mogą stanowić wzorzec, na którym opiera się standard obserwatorium. Wykorzystuje się je także do rejestracji zmian pola geomagnetycznego zarówno w obserwatoriach jak i na innych punktach magnetycznych zlokalizowanych w terenie, na wodzie, w samolotach, balonach lub w sondach kosmicznych.

Skonstruowanie i wdrożenie do prac terenowych magnetometru protonowego (Korepanov, 2006) umożliwiło podjęcie badań rozkładu pola magnetycznego na terenach, na których pomiary klasycznymi metodami byłyby zbyt kosztowne, lub z racji niedostępności wręcz niemożliwe, np. morza, obszary pustynne, arktyczne, dżungle itp. Do pomiarów naziemnych zbudowano tranzystorowy magnetometr protonowy o wadze około 3 kg, który może być obsługiwany przez jedną osobę. Magnetometry protonowe są produkowane w różnych wersjach w kilku krajach: w Rosji, Stanach Zjednoczonych, Kanadzie, Anglii, Francji oraz, jak już wspomniano, w Polsce, w Instytucie Geofizyki PAN. Na rysunku 3.7 pokazany jest magnetometr protonowy polskiej konstrukcji PMP-8, produkowany w Instytucie Geofizyki PAN w Warszawie.

Magnetometry protonowe znajdują coraz szersze zastosowanie nie tylko w geofizyce i geologii, ale także w innych dziedzinach nauki, takich jak archeologia lub miernictwo. Wykorzystywane są one do wykrywania słabych anomalii magnetycznych, spowodowanych przez płytko leżące masy zaburzające, np. do inwentaryzacji urządzeń podziemnych. W pomiarach magnetycznych związanych z pracami geodezyjnymi, magnetometr protonowy używany jest do badań

zmian wiekowych na magnetycznych punktach powtarzanych, do badania poziomego gradientu natężenia pola geomagnetycznego (tzw. mikrozdjęcie), podczas wyboru lokalizacji nowego punktu magnetycznego, np. na lotniskach, przy odwiertach geologicznych, przy stacjach radiolokacyjnych itp. Magnetometr protonowy był także jednym z podstawowych instrumentów pomiarowych na statku „Zaria” podczas pomiarów magnetycznych na Bałtyku (Sas-Uhrynowski i in., 2001).



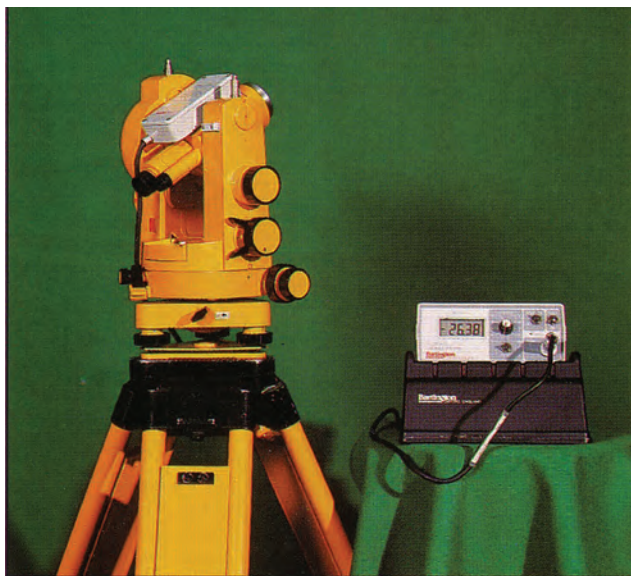
Rys. 3.7. Magnetometr protonowy PMP-8

3.3. Magnetometr Flux-Gate D/I

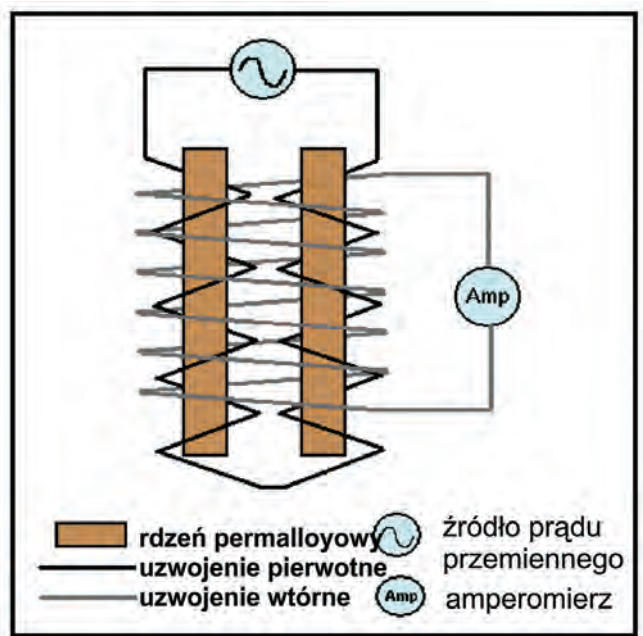
Najbardziej rozpowszechnionym obecnie instrumentem, stosowanym do wyznaczania kierunku linii sił pola geomagnetycznego, a tym samym kierunku na północ magnetyczną, jest magnetometr Flux-Gate D/I (Lauridsen, 1985; Korpanov, 2006). Magnetometr ten służy także do wyznaczania inklinacji magnetycznej. Obecnie tylko trzy firmy produkują takie magnetometry na rynek światowy. Są to kanadyjska firma ELSEC, angielska Bartington oraz Lwowskie Centrum Badań Kosmicznych na Ukrainie, które produkuje szereg instrumentów elektronicznych pod nazwą LEMI.

Czujnik magnetometru, zwany także sondą lub sensorem, umocowany jest na lunecie teodolitu przeznaczonego do pomiarów magnetycznych, czyli zbudowanego bez elementów ferromagnetycznych. Teodolitem stosowanym do tego celu przez obie pierwsze firmy jest specjalnie przerobiony teodolit sekundowy firmy Zeiss. Fotografia takiego teodolitu z sondą zamocowaną na lunecie pokazana jest na rysunku 3.8. Obok na stoliku znajduje się magnetometr MAG-01H firmy Bartington. Na płycie czołowej magnetometru, obok przełączników, widoczny jest wyświetlacz cyfrowy do odczytywania jego wskazań. Czujnikiem magnetometru Flux-Gate D/I jest para równoległych rdzeni ferromagnetycznych wytworzonych z permalloyu – substancji bardzo podatnej na namagnesowanie (Bartington, 1988). Każdy rdzeń umieszczony jest wewnątrz uzwojenia magnetycznego (pierwotnego). Uzwojenia te są wykonane z jednego przewodu, który nawinięty jest lewoskrętnie na jednym rdzeniu a prawoskrętnie na drugim. Całość

znajduje się wewnątrz solenoidu pomiarowego (uzwojenia wtórnego). Schemat budowy sensora jest pokazany na rysunku 3.9.

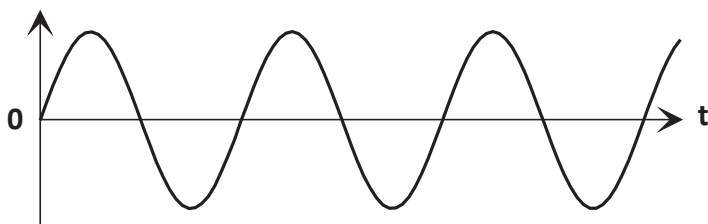


Rys. 3.8. Teodolit Zeiss 010B z sondą magnetometru Flux-Gate D/I umocowaną na lunecie. Obok znajduje się magnetometr, połączony kablem z sondą



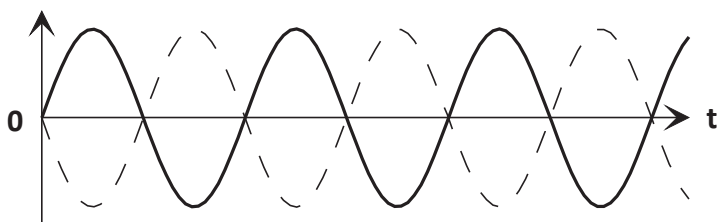
Rys. 3.9. Schemat budowy czujnika Flux-Gate D/I

Zasada działania magnetometru polega na pomiarze napięcia indukowanego w uzwojeniu wtórnym przez pole magnetyczne, a dokładniej przez tę składową tego pola, do której oś sensora, czyli para rdzeni permalloyowych, jest ustawiona równolegle. Rdzenie znajdujące się w uzwojeniach pierwotnych podlegają wpływom pól magnetycznych – zewnętrznego (np. ziemskiego) oraz wytwarzanego przez prąd płynący przez ich uzwojenia magnesujące. Prąd ten musi być prądem przemiennym o sinusoidalnym przebiegu (rys. 3.10).



Rys. 3.10. Przebieg prądu w uzwojeniu pierwotnym

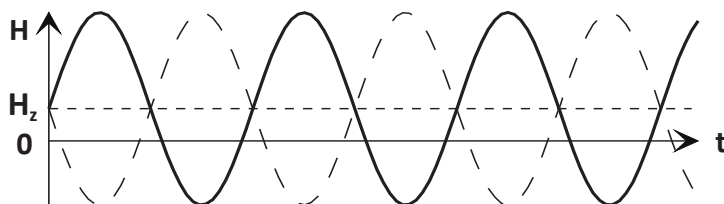
Przepływ prądu będzie indukował w obu rdzeniach zmienne pole magnetyczne o natężeniu zmieniającym się w identyczny sposób jak natężenie prądu, ale z opóźnieniem fazowym i zwrocie przeciwnym w każdym z rdzeni. Rysunek 3.11 przedstawia wykres natężenia pola magnetycznego indukowanego tylko przez prąd płynący w uzwojeniach pierwotnych.



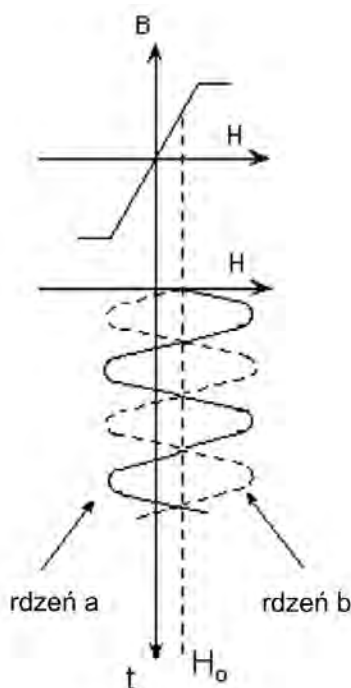
Rys. 3.11. Wykres natężenia pola magnetycznego w obu rdzeniach

Jeśli oba rdzenie ferromagnetyczne zostaną poddane działaniu tego samego zewnętrznego pola magnetycznego, jakim jest na przykład pole ziemskie, wówczas wykres indukowanego pola magnetycznego w obu rdzeniach zmieni się na następujący (rys. 3.12):

Rysunek 3.13 przedstawia zależność między natężeniem ziemskiego pola magnetycznego a polem indukowanym przez ferromagnetyk wraz ze zmianami pola magnetycznego wywołanymi przemiennym prądem elektrycznym.



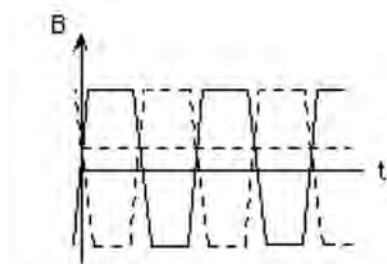
Rys. 3.12. Wykres natężenia pola magnetycznego w obu rdzeniach poddanych działaniu stałego zewnętrznego pola magnetycznego, np. pola geomagnetycznego H_z



Rys. 3.13. Wykres krzywej histerezy i zmian natężenia w czasie

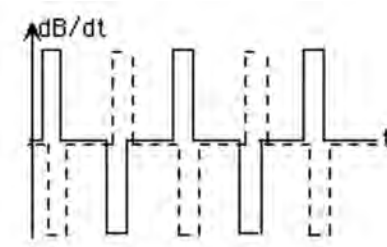
Można zauważyć, że w ferromagnetyku przy pewnych wartościach natężenia pola magnetycznego, indukcja B przestaje wzrastać, zatem dany materiał, z którego wykonany jest rdzeń osiąga punkt nasycenia. Materiał, z którego wytwarza się rdzenie flux-gate – permalloy, ma taką właściwość, że przy namagnesowaniu, pętla histerezy jest bardzo wąska i stroma. Powoduje to, że niewielkie zmiany słabego pola magnetycznego wywołują istotne zmiany namagnesowania, a w rezultacie silne zmiany sygnału użytecznego. Z powodu niesymetryczności zmian natężenia pola magnetycznego rdzenie osiągają punkt nasycenia w różnym czasie. Okres czasu, w którym rdzenie są w tym stanie również jest

różny dla poszczególnych rdzeni. Wykres zależności indukcji magnetycznej od czasu dla obu rdzeni, w przypadku istnienia zewnętrznego pola magnetycznego, przedstawiony jest na rysunku 3.14.



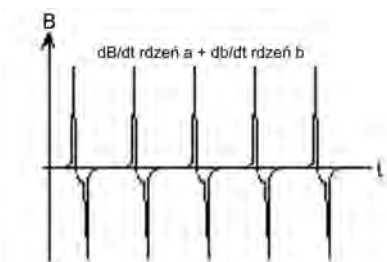
Rys. 3.14. Wykres indukcji w obu rdzeniach

W przypadku istnienia zewnętrznego pola magnetycznego wykres indukcji pochodzących z obu rdzeni jest niesymetryczny. Zatem dla dodatnich wartości natężenia pola magnetycznego materiał osiąga punkt nasycenia, natomiast dla ujemnych nie, lub ten stan jest osiągnięty później. To powoduje, że zmiany indukcji w czasie w obydwu rdzeniach nie przebiegają jednocześnie (rys. 3.15).



Rys. 3.15. Wykres zmian indukcji w obu rdzeniach

Po dodaniu do siebie zmian indukcji w czasie w obu rdzeniach otrzymamy (rys. 3.16).



Rys. 3.16. Wykres sumy zmian indukcji z obu rdzeni

Wielkość przesunięcia pomiędzy poszczególnymi impulsami jest miarą wielkości zewnętrznego pola magnetycznego. Gdyby nie istniało zewnętrzne pole magnetyczne, lub gdyby pole to nie powodowało indukcji prądu w uzwojeniu wtórnym, np. w przypadku gdy oś sondy jest prostopadła do linii sił pola geomagnetycznego, to wykres zależności dB/dt od czasu byłby symetryczny, a zatem suma zmian indukcji w obu rdzeniach byłaby stała i równa zero. Zmiany indukcji w czasie wytwarzają w uzwojeniu wtórnym prąd o napięciu proporcjonalnym do tych zmian. Pomiar tego prądu pozwala określić wielkość zewnętrznego pola magnetycznego.

3.4. Magnetyczne stacje wariograficzne

Stacja wariograficzna (wariometr) zakładana jest w rejonie pomiarów magnetycznych wówczas, kiedy pomiary są wykonywane w znacznej odległości (zwykle ponad 200 km) od obserwatorium magnetycznego. Wariacje dobowe pola geomagnetycznego nie przebiegają na powierzchni Ziemi jednakowo. Zależnie od ich źródeł i morfologii, szerokości geograficznej, przewodności elektrycznej górnych warstw skorupy ziemskiej i innych jeszcze czynników, wariacje dobowe mogą mieć różne częstotliwości i amplitudy. Założenie stacji wariograficznej ma na celu uzyskanie pełnej informacji o zmianach krótkookresowych pola geomagnetycznego, jakie zachodzą w rejonie pomiarów i dzięki temu, umożliwienie wprowadzenia rzeczywistych poprawek wariacyjnych, jako funkcji czasu, do wykonanych obserwacji.

Podstawowym przyrządem stosowanym na magnetycznej stacji wariograficznej jest magnetometr zwany wariometrem, czyli taki magnetometr, który służy do pomiarów i rejestracji zmian trzech niezależnych elementów pola geomagnetycznego. Najczęściej, na stacji potrzebna jest znajomość nie tylko samych zmian elementów pola lecz także znajomość absolutnych wartości tego pola w okresie działania stacji. W tym celu, w pobliżu ustawionego wariometru, na zastabilizowanym tymczasowo punkcie, wykonuje się pomiary absolutne trzech niezależnych elementów pola, podobnie jak to się odbywa w obserwatorium magnetycznym. Otrzymane wyniki pomiarów pozwalają na przypisanie poziomu odniesienia zmianom pola zarejestrowanym na stacji, czyli na wyznaczenie tzw. bazy wariografu lub ogólniej – bazy stacji. Pomiary te muszą być wykonane co najmniej trzykrotnie – na początku, w środku i na końcu okresu działania stacji. Bazy stacji dla rejestrowanych elementów pola, wyznaczone na podstawie tych pomiarów powinny różnić się w granicach dokładności pomiarów, tj. 3–6 nT. Zwykle, jeśli to możliwe, wyznaczenie absolutnych wartości trzech składowych pola geomagnetycznego w okresie działania stacji wykonuje się codziennie.

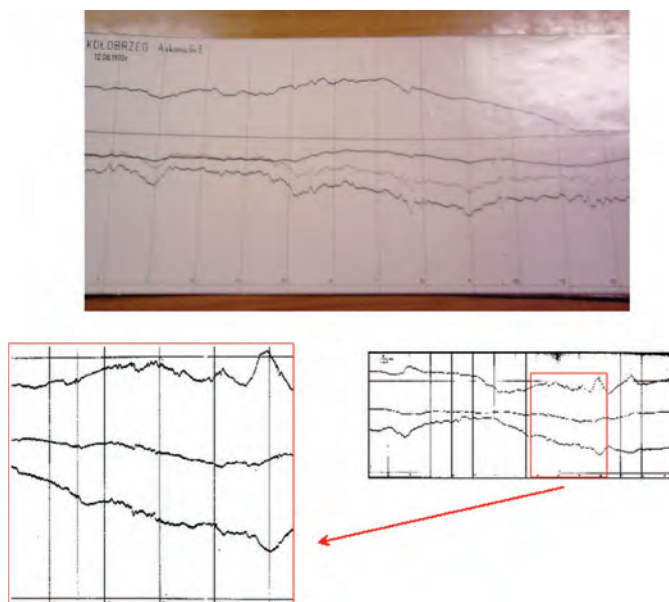
3.4.1. Wariograf Askania

W latach 1950. i 1960. na stacjach magnetycznych stosowano wariograf Askania Gv3 (rys. 3.17).



Rys. 3.17. Wariograf magnetyczny Askania

Jest to instrument do graficznej rejestracji zmian deklinacji D , zmian składowych wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego – składowej poziomej H i pionowej Z oraz zmian temperatury. Czujnikami wariografu Askania są magnesy zawieszone na niciach metalowych, co umożliwia skompensowanie w pewnych granicach wpływu zmian temperatury na wskazania czujników H i Z . W celu jeszcze większego zmniejszenia tego wpływu, systemy mierzące są umieszczone w termostacie. Temperatura w termostacie może być ustawiana na kilku poziomach, co umożliwia oszczędzanie energii, a także wyznaczenie szczątkowego współczynnika termicznego wariografu. Graficzna rejestracja zmian pola w postaci krzywych dokonywana jest na papierze fotograficznym (taśmie o szerokości 12 cm), ładowanym do specjalnej kasety. Konstrukcja kasety umożliwia, zależnie od grubości papieru, prowadzenie rejestracji przez kilka dni. Na stacji musi być zatem zorganizowana ciemnia fotograficzna oraz odpowiednie pomieszczenie do opracowywania wyników rejestracji. Specjalne uzwojenia zainstalowane wewnątrz wariografu umożliwiają wyznaczanie czułości rejestracji i znakowanie magnetogramu znaczkami czasowymi, potrzebnymi do identyfikacji momentu wykonywania pomiarów. Dokładniejszy opis działania stacji wariograficznej, wyposażonej w wariograf Askania Gv3, można znaleźć w publikacjach (Uhrzynowski, 1962, 1964, 1972). Fragment archiwalnego zapisu rejestracji na papierze pokazuje rysunek 3.18.



Rys. 3.18. Archiwalny graficzny zapis rejestracji wariografu na stacji Kołobrzeg (zdjęcie) i na stacji Rajgród (skan)

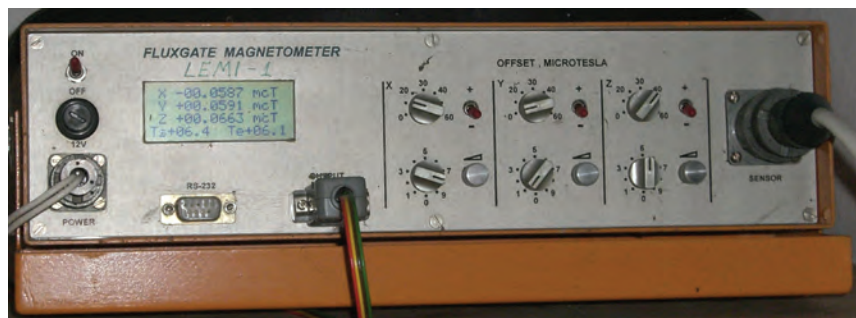
3.4.2. Wariograf Bobrova

W latach 1970. na stacjach wariograficznych stosowano także aparaturę Bobrova. Instrument ten jest znacznie mniej skomplikowany od Askanii, bowiem magnesy, będące czujnikami zmian elementów pola geomagnetycznego, zostały umocowane na specjalnych ramkach kwarcowych, odpowiednio zawieszonych na kwarcowych niciach. Konstrukcja ta umożliwia prawie pełną kompensację wpływu zmian temperatury na wskazania wariografu, a co za tym idzie, zrezygnowanie z izolacji termicznej i grzejników, czyli znaczne zmniejszenie gabarytów i wagi aparatury (Uhrynowski, 1968, 1972).

3.4.3. Magnetometr LEMI-3

Obecnie w Polsce do rejestracji zmian pola magnetycznego Ziemi zarówno w obserwatoriach jak i na punktach polowych wykorzystywany jest magnetometr LEMI – flux-gate, produkowany na Ukrainie we Lwowskim Centrum Instytutu Badań Kosmicznych. Rysunek 3.19 przedstawia część główną magnetometru – rejestrator przetwarzający wartości zmian elementów pola magnetycznego, płynące z trzech wzajemnie prostopadłych sond flux-gate umieszczonych w cylindrycznym czujniku (rys. 3.20). Magnetometr nie może być wykorzystany do pomiaru absolutnego modułów składowych X , Y , Z wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego, a tylko do rejestracji ich zmian. W celu zapewnienia pełnego opracowania magnetycznego należy znać bazy dla tych składowych. Bazy te wylicza się na podstawie pomiarów absolutnych na tzw. punkcie bazowym

zastabilizowanym w pobliżu stacji, w miejscu spełniającym wszystkie wymagania potrzebne dla pomiarów magnetycznych. Dla punktu o ciągłej rejestracji, bazy należałoby wyliczać przynajmniej raz w roku bezpośrednio po pomiarze w terenie lub sprawdzać je w stosunku do baz wybranego obserwatorium.



Rys. 3.19. Część główna magnetometru LEMI-3



Rys. 3.20. Czujnik magnetometru LEMI z sondami

Przygotowanie stacji do rejestracji zmian pola geomagnetycznego

Prawidłową rejestrację zmian modułów składowych X, Y, Z wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego zapewni ustawienie sondy czujnika w kierunku północy geograficznej i odpowiednia kompensacja wskazań tych składowych (Załącznik).

Ustawienie sondy w kierunku północy (magnetycznej – do rejestracji zmian deklinacji D lub geograficznej – do rejestracji zmian składowej Y) nie musi być bardzo dokładne. Wpływ jej skręcenia na odczyt można obliczyć za pomocą wzoru który pokazuje zależność między rzeczywistą zmianą składowej poziomej, a kątem odchylenia od północy czujnika magnetycznego:

$$\Delta Y_1 = \Delta Y \cos \alpha \quad (3.3)$$

gdzie:

ΔY_1 – zmiana składowej zarejestrowana przez magnetometr,

ΔY – rzeczywista zmiana składowej poziomej pola geomagnetycznego,

α – kąt o jaki kierunek ustawienia czujnika różni się od kierunku północy geograficznej.

Przy zmianie składowej Y , która ma największy wpływ na zmianę deklinacji magnetycznej, nawet o 300 nT (co się jednak bardzo rzadko zdarza), gdy kąt $\alpha = 30^\circ$, zarejestrowana zmiana składowej wynosi 299.98 nT. Zatem wpływ niedokładnego ustawienia sondy względem północy geograficznej wynosi 0.02 nT i jest pięciokrotnie niższy od dokładności rejestracji.

W zależności od parametrów oprogramowania dane rejestracji zbierane są w pliki dobowe lub w plik ciągły, zapisywane na dysku rejestratora podłączonego do stacji i w dalszej kolejności przenoszone na komputer. W rejestratorach pierwszej generacji wszystkie pliki były zapisywane w postaci binarnej i dlatego do ich opracowania potrzebny był program, odkodowujący je do postaci tekstowej. Wszystkie wartości wymagały też przeliczenia ich z bitów na jednostki pola geomagnetycznego, tj. nanotesle. Współczynnik przeliczenia jednostki rejestratora wyznaczało się zaraz po zakupieniu stacji i jej ustawieniu. Odpowiednia ilość bitów odpowiada pewnej wartości składowej natężenia pola magnetycznego – współczynnik bit/nT powinien być stały. Wyznaczenie wartości współczynnika może być wykonane na dwa sposoby: pierwszy – to ustawienie przyrządu w cewce Helmholtza w Obserwatorium w Belsku i sprawdzanie wskazań magnetometru, zmieniających się wraz ze zmianą sztucznie wytwarzanego natężenia pola magnetycznego. Drugi sposób polega na zmianie wartości prądu kompensującego płynącego w cewkach czujnika (a więc i kompensującego pola magnetycznego) o określoną wartość i następnie odczytaniu, o ile zmieniła się wartość zapisana w bitach. Na przykład zmienia się wartość składowej X o 1000 nT i sprawdza się o ile zmienił się zapis stacji. Analogicznie testuje się pozostałe składowe. Różnica wyznaczenia współczynnika z obu metod nie powinna być większa niż 0.0005 nT/bit, co przekłada się na maksymalny błąd odczytu rejestrowanej wartości składowej pola magnetycznego ± 0.2 nT. Obecnie, rejestratory nowego typu i ich oprogramowanie pozwalają na cyfrowy zapis plików rejestracji w formie tekstowej.

Dane rejestrowane za pomocą stacji LEMI mogą być zapisywane także na dysku rejestratora przenośnego i wtedy stację można wykorzystywać do rejestracji zmian pola geomagnetycznego na stanowiskach polowych. Stacja polowa zaopatrzona jest w urządzenie GPS co pozwala na automatyczny zapis jej położenia w terenie (współrzędne WGS84). Dane z dysku można przepisywać na bieżąco do komputera przenośnego i opracowywać wstępnie już na etapie pomiarów polowych.

Z zakupionych dla IGiK w 2002 roku dwóch zestawów magnetometru LEMI do rejestracji zmian pola magnetycznego jeden zainstalowano w przygotowanym do tego celu kopcu w Obserwatorium Geodezyjno-Geofizycznym IGiK – Borowa Góra (rejestracja ciągła), drugi zaś przeznaczono do rejestracji polowej

(Sas-Uhrynowski i in., 2006). Przybliżona wartość współczynnika bit/nT dla tej aparatury waha się w granicach 0.003 nT/bit. Do określenia faktycznej wartości mierzonego pola w danym momencie czasu stosuje się wzory:

$$\begin{aligned} X &= \Delta X \cdot \beta + B_X \\ Y &= \Delta Y \cdot \beta + B_Y \\ Z &= \Delta Z \cdot \beta + B_Z \end{aligned} \quad (3.4)$$

gdzie:

X, Y, Z – składowe wektora całkowitego natężenia pola magnetycznego Ziemi,
 $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$ – wartości zarejestrowane na poszczególnych kanałach odpowiadające zmianom składowych pola magnetycznego,

β – współczynnik bit/nT,

B_X, B_Y, B_Z – wartości baz dla poszczególnych składowych.

Wartości baz dla poszczególnych rejestracji oblicza się na podstawie pomiarów absolutnych składowych wektora całkowitego natężenia pola geomagnetycznego D, I i F na wybranym do tego celu punkcie bazowym. W Obserwatorium Borowa Góra punkt bazowy zastabilizowano blisko kopca pomiarowego. Zasady wyboru punktu i pomiaru na nim są takie same jak przy pracy na punkcie wiekowym. Bazy powinny być wyznaczane z pomiarów co najmniej dwa razy w roku lub powinna być kontrolowana ich stabilność przez porównanie zapisów w Borowej Górze z zapisami pola rejestrowanymi w obserwatorium w Belsku.

Wzory na wartości bazy magnetometru przedstawiają się następująco:

$$\begin{aligned} B_X &= F_B \cdot \cos I_B \cdot \cos D_B - \cos \alpha \cdot \Delta X_B \\ B_Y &= F_B \cdot \cos I_B \cdot \sin D_B - \cos \alpha \cdot \Delta Y_B \\ B_Z &= F_B \cdot \cos I_B - \cos \gamma \cdot \Delta Z_B \end{aligned} \quad (3.5)$$

gdzie:

B_X, B_Y, B_Z – wartości bazy magnetometru dla składowych X, Y, Z ,

F_B – moduł wektora całkowitego natężenia pola magnetycznego,

I_B – inklinacja magnetyczna,

D_B – deklinacja magnetyczna,

$\alpha = 30^\circ$ – kąt odchylenia czujnika od kierunku północy geograficznej,

$\gamma = 5'$ – odchylenie czujnika od poziomu,

$\Delta X_B, \Delta Y_B, \Delta Z_B$ – odczyty wariografu [nT] użyte do obliczenia bazy.

Korzystając z powyższych wzorów oraz prawa przenoszenia się błędów średnich Gaussa wyznacza się błąd średni poszczególnych składowych pola magnetycznego oraz błąd bazy poszczególnych składowych. Założmy, iż dokładność wyznaczenia poszczególnych parametrów jest następująca:

$$m_F = 1 \text{ nT}$$

$$\begin{aligned} m_I &= 0.5' \\ m_D &= 1' \\ m_{\Delta X, Y, Z} &= 1 \text{ nT} \end{aligned} \quad (3.6)$$

wówczas błąd pojedynczego wyznaczenia bazy jest równy

$$m_{B_x}^2 = \left(m_F \cdot \frac{\partial B_x}{\partial F} \right)^2 + \left(m_I \cdot \frac{\partial B_x}{\partial I} \right)^2 + \left(m_D \cdot \frac{\partial B_x}{\partial D} \right)^2 + \left(m_{\Delta x} \cdot \frac{\partial B_x}{\partial \Delta x} \right)^2 \quad (3.7)$$

$$m_{B_x}^2 = (1 \text{ nT} \cdot 0.372)^2 + (6.67 \text{ nT})^2 + (0.35 \text{ nT})^2 + (1 \text{ nT} \cdot 0.03)^2 \quad (3.8)$$

$$m_{B_x} = 6.7 \text{ nT}$$

$$m_{B_y} = 5.4 \text{ nT} \quad (3.9)$$

$$m_{B_z} = 2.8 \text{ nT}$$

Ponieważ wartość bazy jest wyznaczana z minimum 4 pomiarów, zatem błąd średni bazy magnetometru zmniejsza się do wartości

$$\begin{aligned} m_{B_x} &= \frac{6.7 \text{ nT}}{\sqrt{4}} = 3.4 \text{ nT} \\ m_{B_y} &= \frac{5.4 \text{ nT}}{\sqrt{4}} = 2.7 \text{ nT} \\ m_{B_z} &= \frac{2.8 \text{ nT}}{\sqrt{4}} = 1.4 \text{ nT} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Następnie korzystając ze wzorów na wartości absolutne pola magnetycznego:

$$\begin{aligned} X_i &= B_x - \cos \alpha \cdot \Delta X_i \\ Y_i &= B_y - \cos \alpha \cdot \Delta Y_i \\ Z_i &= B_z - \cos \gamma \cdot \Delta Z_i \end{aligned} \quad (3.11)$$

oblicza się błąd średni wyznaczonej średniej absolutnej:

$$\begin{aligned} m_X^2 &= \left(m_{B_x} \cdot \frac{\partial X}{\partial B_x} \right)^2 + \left(m_{\Delta x} \cdot \frac{\partial X}{\partial \Delta x} \right)^2 \\ m_Y^2 &= \left(m_{B_y} \cdot \frac{\partial Y}{\partial B_y} \right)^2 + \left(m_{\Delta y} \cdot \frac{\partial Y}{\partial \Delta y} \right)^2 \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$m_z^2 = \left(m_{B_z} \cdot \frac{\partial Z}{\partial B_z} \right)^2 + \left(m_{\Delta_z} \cdot \frac{\partial Z}{\partial \Delta Z} \right)^2$$

$$m_x^2 = (3.4 \cdot 1)^2 + (1 \cdot 1)^2 \quad (3.13)$$

$$m_x = 3.5 \text{ nT}$$

$$m_y = 2.9 \text{ nT} \quad (3.14)$$

$$m_z = 1.7 \text{ nT}$$

Sprawdzono też zmianę wpływu temperatury na rejestrację zmian pola. W tym celu kilkakrotnie zmieniano gwałtownie temperaturę w kopcu poprzez gorący nawiew lub ochładzanie kopca zimą i analizowano zmiany zapisu. Wyniki badań były bardzo satysfakcjonujące, gdyż wpływ zmian temperatury, nawet o około 15°C, na rejestrowane zmiany składowych pola geomagnetycznego był mniejszy niż 0.5 nT.

3.5. Busole (kompasy) i pelengatory

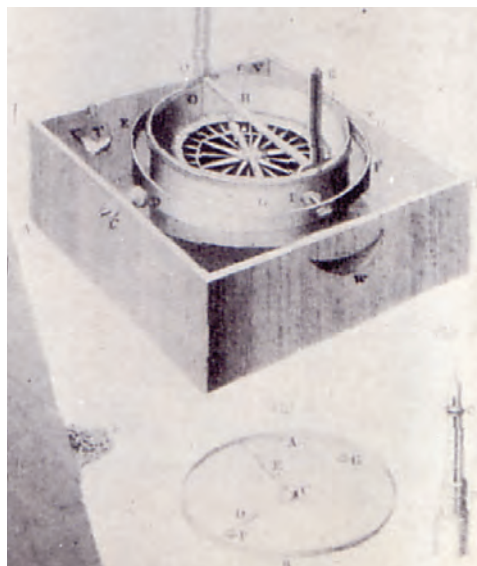
Najbardziej znanym przyrządem pomiarowym, który niezmiennie kojarzy się z polem magnetycznym jest kompas lub busola (Hine, 1968). Przyrząd ten od wielu stuleci jest stosowany do wyznaczania kierunku na północ magnetyczną, czyli kierunku składowej poziomej H wektora natężenia pola magnetycznego. Trzeba przy tym zaznaczyć, że kompas magnetyczny jest jedynym urządzeniem nawigacyjnym, które przetrwało przez dziesiątki stuleci do dziś w niezmienionej prawie postaci. Należy także podkreślić, że kompas musi być zainstalowany na każdej pływającej jednostce morskiej, a od skonstruowania balonu a potem samolotu, także na każdym obiekcie latającym. Metody nawigacyjne przy użyciu busoli są metodami autonomicznymi, tzn. nie wymagają one wspomagania żadnymi urządzeniami zewnętrznymi, czyli takimi, które są zainstalowane poza poruszającym się obiektem, co ma miejsce w wypadku nawigacyjnych systemów radiowych – tak lądowych, jak i satelitarnych. Ta właściwość tych prostych urządzeń jest bardzo istotna, bowiem zawsze istnieje niebezpieczeństwo zakłócenia sygnałów radiowych lub wręcz wyłączenia nadajników.

Rolę wskaźnika, czy też czujnika północy magnetycznej pełni w kompasie do dziś niezmiennie magnes. Jedyne zmiany, to ulepszenia jego kształtu, sposobu osadzenia i materiału, z którego jest wykonany. Ulepszano także korpus kompasu, sposób podziału kręgu na stopnie, urządzenie odczytowe i celownicze. Sama jednakże zasada wykorzystania magnesu do wyznaczania kierunku północy magnetycznej pozostała taka sama.

Na rysunku 3.21 pokazano jeden z pierwszych kompasów, zbudowany w Chinach w początkach ery nowożytnej, który został wyposażony także w zegar słoneczny. Na rysunku 3.22 pokazano kompas Gavina Knighta z 1750 roku, którego



Rys. 3.21. Kompas chiński z zegarem słonecznym



Rys. 3.22. Kompas Gavin Knighta z 1750 roku

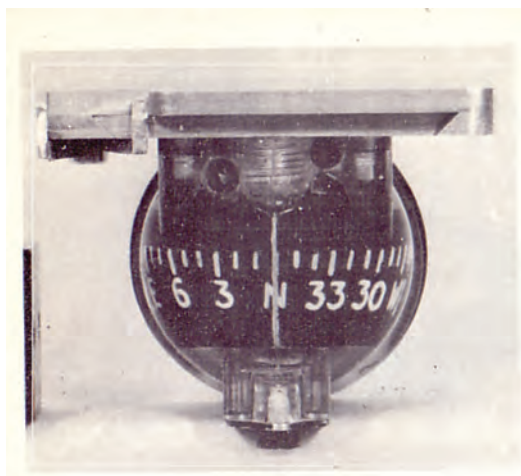
nowoczesna wówczas konstrukcja zyskała mu uznanie i który był przez wiele lat używany we flocie angielskiej, a następnie niemieckiej.

Na rysunku 3.23 pokazano kompas, który jest używany do celów topograficznych i którego konstrukcja od prawie stu lat nie ulega zasadniczym zmianom. Na rysunku 3.24 jest z kolei pokazany jeden z typów kompasu lotniczego.

Posługiwanie się kompasem magnetycznym (busolą) do wyznaczenia kierunku północy magnetycznej jest proste. Należy jednak pamiętać, że przy wartości



Rys. 3.23. Kompas topograficzny



Rys. 3.24. Kompas lotniczy

deklinacji magnetycznej przekraczającej dokładność busoli należy ją uwzględnić w celu otrzymania prawidłowego kierunku północy geograficznej. Dotyczy to wszystkich prac, w których potrzebna jest znajomość tego kierunku. Na lotniskach używa się jeszcze sporadycznie pelengatorów do sprawdzenia kierunku na północ magnetyczną. Dają one teoretycznie dokładność 0.1° , ale przy celowniku „nitka-szczerbinka” i ustawieniach przegubowych koła poziomego pelengatora dokładność rzeczywista jest w granicach 0.5° . Dokładność taka na potrzeby lotniska jest wystarczająca. Pelengatory muszą być co roku poddawane atestacji, polegającej na oznaczeniu wielkości poprawki jaką należy uwzględnić przy odczycie koła poziomego, aby wyznaczany kierunek był prawidłowy.

4. POMIARY NA PUNKTACH MAGNETYCZNYCH

W celu wyznaczenia wartości wszystkich elementów wektorowych i kątowych pola geomagnetycznego wystarczy pomierzyć dowolnie wybrane trzy jego elementy. Pozostałe dadzą się obliczyć przy wykorzystaniu zależności trygonometrycznych (wzory 1.2). W miarę rozwoju techniki starsze konstrukcje aparatury do pomiarów magnetycznych, wykorzystujące magnesy jako czujniki pola, były wypierane przez nowe – prostsze i szybsze w obsłudze, dokładniejsze i tańsze, oparte na technice elektronicznej. W miarę pojawiania się w powszechnym użyciu nowych przyrządów, kombinacje trzech niezależnych elementów pola, o których była mowa powyżej, także ulegały zmianom.

Obecnie podstawowym instrumentem używanym do pomiarów modułu F wektora natężenia całkowitego ziemskiego pola magnetycznego jest magnetometr protonowy. Drugim podstawowym przyrządem jest magnetometr Flux-Gate D/I , który służy do pomiarów elementów kątowych pola geomagnetycznego – deklinacji D i inklinacji I . Są to mierzone obecnie trzy niezależne elementy pola. W wyniku pomiaru otrzymuje się ich wartości absolutne.

4.1. Stabilizacja punktów magnetycznych

We wszystkich pomiarach ziemskich pól potencjalnych, wyznaczona wartość jest przypisana do punktu, na którym wykonywane były obserwacje. Położenie punktu jest oczywiście określone za pomocą współrzędnych. Im mniejszy jest gradient poziomy pola magnetycznego Ziemi, tym większa może być tolerancja dokładności przy wyznaczaniu położenia punktu – przesunięcie miejsca obserwacji nie spowoduje zmiany wartości mierzonego elementu. Przy pomiarach elementów pola geomagnetycznego, gdy ich gradient poziomy jest mały, terenowy punkt pomiaru magnetycznego wystarczy zlokalizować z dokładnością kilku metrów. Na takiej też przestrzeni wykonuje się wokół wybranego punktu mikrozdjęcie magnetyczne, mające na celu stwierdzenie braku lokalnych pól zakłócających, na przykład porzuconego złomu, obecności podziemnego kabla energetycznego, rurociągu, uzbrojonego bloku betonowego itp.

Punkty zdjęcia magnetycznego z lat 1952–1955 oraz punkty z powtórnych zdjęć były stabilizowane palikiem drewnianym. Taka stabilizacja dawała możliwość wykonania powtórnych obserwacji magnetycznych, w razie stwierdzenia podczas opracowywania wyników pomiarów zaburzeń pola geomagnetycznego lub podejrzenia błędów pomiarowych, bez konieczności powtarzania wyznaczeń azymutu geograficznego. Stanowi to istotne ułatwienie prac w wypadku, gdy podczas powtórnych obserwacji, Słońce, które najczęściej służy do wyznaczenia azymutu, jest schowane za chmurami. Stabilizacja punktu palikiem jest wystarczająca, w czasie nie dłuższym niż 2 lata, do odtworzenia stanowiska instrumentu z dokładnością potrzebną przy pomiarach kątowych. Stabilizacja punktu rurką mosiężną lub winidurówką o średnicy około 5 cm pozwala, po starannym wykonaniu opisu topograficznego, na jego identyfikację przez wiele lat.

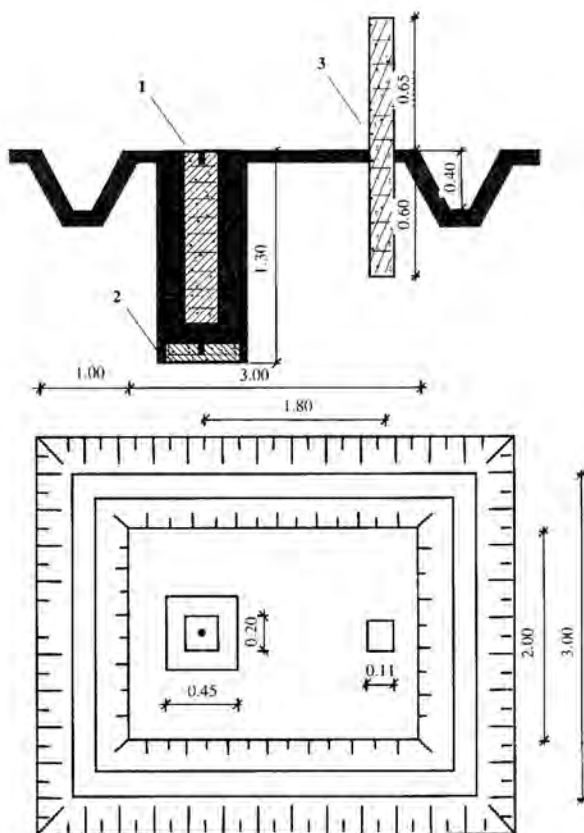
4.2. Stabilizacja punktów wiekowych

Stabilizacja punktów wiekowych, punktów podstawowej osnowy magnetycznej, zakładanych na wiele lat, musi zapewniać dokładne odtworzenie miejsca obserwacji. Konieczna jest bowiem pewność, że zmiana wartości elementów pola geomagnetycznego, jaka zaszła pomiędzy różnymi epokami obserwacji, jest wynikiem zmian wiekowych a nie wynikiem przesunięcia miejsca obserwacji.

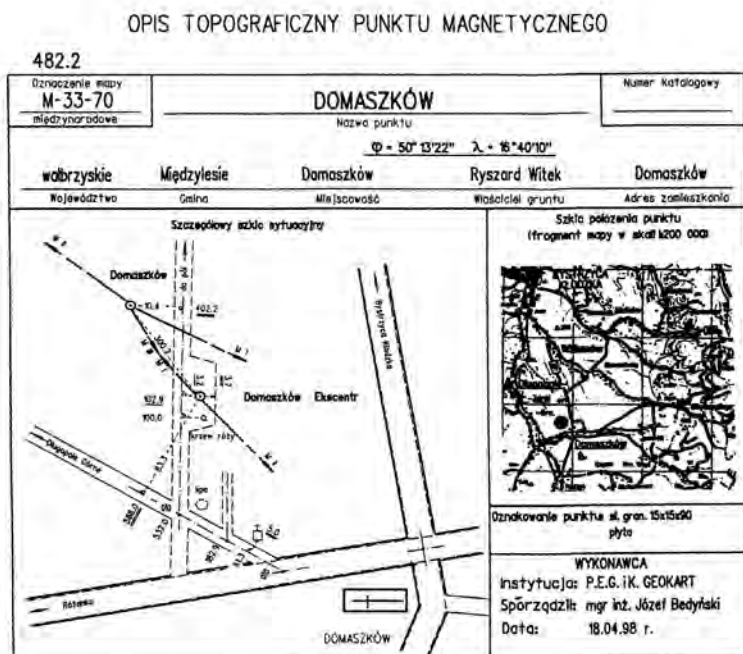
Punkty wiekowe stabilizowane są obecnie różnymi trwałymi znakami. Polskie punkty osnowy stabilizowane są granitowym słupem z oszlifowaną głowicą o rozmiarach 15×15 cm, na której wcięty jest znak (krzyż), potrzebny do centrowania teodolitu. Obecnie w Europie coraz częściej do stabilizacji używa się rur ceramicznych wypełnionych cementem o średnicy 15–20 cm. Słup lub rura o wysokości około 80 cm powinny być zakopane równo z powierzchnią ziemi nad centrycznie położoną płytą granitową. W Polsce znak punktu wiekowego powinien być okopany rowem w kształcie kwadratu o boku 2×2 m (rys. 5.1). Na Litwie punkty wiekowe oznaczone są dodatkowo tak zwanymi „świadkami”, czyli około metrowej wysokości słupami betonowymi pomalowanymi jaskrawym kolorem oddalonymi około 2 m od punktu wiekowego. Na słupie umocowana jest dodatkowo tabliczka z informacją o typie znaku i jego właścicielu. Mają one ułatwić znalezienie punktu położonego w lesie lub w miejscach mocno zarośniętych. Na rysunku 4.1 pokazany jest przykład stabilizacji punktu wiekowego litewskiej osnowy magnetycznej.

Na punktach osnowy magnetycznej, na punktach zdjęcia magnetycznego i na innych punktach przeznaczonych do pomiarów magnetycznych, wybierane są dwa, możliwie prostopadłe do siebie, kierunki na trwałe obiekty ziemskie (miry) takie jak wieża, komin, maszt itp. Są one punktami odniesienia podczas pomiarów kątowych przy wyznaczaniu deklinacji magnetycznej. W odległości, jeśli to możliwe kilkuset metrów od punktu głównego, zastabilizowany jest w taki sam sposób punkt ekscentryczny, który stanowi zabezpieczenie przed utratą ciągłości wyznaczeń w razie zniszczenia punktu głównego. Na punkcie głównym i ekscentrycznym, co kilka lat, wykonywane są magnetyczne pomiary

synchroniczne w celu wyznaczenia różnicy pola pomiędzy nimi. Różnica ta powinna być stała. Jej znajomość umożliwia przeniesienie wartości pomierzonych elementów pola geomagnetycznego z jednego punktu na drugi, w wypadku utraty lub chwilowej niedostępności jednego z nich. Każdy punkt wiekowy i jego ekscentr muszą posiadać opis topograficzny w celu ich łatwej lokalizacji, mimo szerokiego zastosowania odbiorników GNSS do odnajdowania punktów geodezyjnych. Zniszczenie punktu wiekowego i niemożność jego odtworzenia stanowi niepowetowaną stratę dla badań zmian wiekowych pola geomagnetycznego. Zostaje wówczas przerwany bezpowrotnie szereg czasowy obserwacji na tym punkcie, który stanowi podstawę do analizy przebiegu zmian wiekowych. Im dłuższy jest ciąg pomiarowy tym bardziej wartościowy jest jego udział w badaniu zmian wiekowych pola geomagnetycznego. Na rysunku 4.2 pokazany jest jako przykład opis topograficzny punktu wiekowego w Domaszkowie z lat 1980. Obecnie opisy topograficzne punktów wiekowych wzbogacone są o zdjęcia punktu i mir (rozdz. 5).



Rys. 4.1. Szkic stabilizacji wykonanej dla punktu wiekowego litewskiej osnowy magnetycznej



WIDOK Z PUNKTU NA MŁRY

Młra 1a Wieża kościoła w Domaszkowie

$$A = 127^{\circ}19'48''$$

Młra 1b Wieża kościoła w Długopolu

$$A_{\text{aks}} = 282^{\circ}55'00''$$

Młra 1c Punkt Domaszków - Duscenty

$$A = 180^{\circ}11'46''$$

Rys. 4.2. Opis topograficzny magnetycznego punktu wiekowego Domaszków I

Zniszczony punkt wiekowy powinien być jak najszybciej odtworzony, jeśli to możliwe to w tym samym miejscu lub przynajmniej w tym samym rejonie. Każda wizyta na punkcie wiekowym powinna mieć także na celu dokonanie analizy zagrożenia jego trwałości. W końcu lat 1990. przeprowadzona była szeroko zakrojona akcja konserwacji osnowy magnetycznej. Po niespełna 10 latach część punktów znowu wymagała przeprowadzenia zabiegów konserwacyjnych lub przesunięcia punktu. Należało to zrobić szybko, aby nie stracić możliwości wykonania synchronicznych pomiarów na punkcie starym i nowym, które umożliwią zachowanie ciągłości szeregów czasowych obserwacji.

4.3. Pomiar deklinacji i inklinacji magnetycznej

Pomiar deklinacji magnetycznej D , czyli pomiar kąta pomiędzy kierunkiem na północ geograficzną a kierunkiem na północ magnetyczną, sprowadza się do znalezienia na kole poziomym teodolitu odczytu odpowiadającego kierunkowi północy magnetycznej oraz odczytu kierunku na wyraźnie widoczny cel ziemski (mirę). Różnica tych odczytów to wartość azymutu magnetycznego miry. Wcześniejsza znajomość jej azymutu geograficznego (np. z pomiaru astronomicznego) pozwala wyznaczyć szukaną wartość miejscową deklinacji magnetycznej.

4.3.1. Wyznaczenie azymutu geograficznego

Wyznaczenie azymutu geograficznego wybranego celu ziemskiego może być dokonane różnymi sposobami – z pomiarów astronomicznych, w szczególności z obserwacji przejść Słońca przez pionowe linie krzyża nitek teodolitu, z pomiarów geodezyjnych poprzez dowiązanie geodezyjne stanowiska pomiarowego do co najmniej jednego punktu sieci geodezyjnej i obliczenie azymutu ze współrzędnych; za pomocą giroteodolitu lub przy wykorzystaniu technik satelitarnych – GNSS. Wieloletnia praktyka wykazała, że najszybszym, najpewniejszym, najtańszym i najmniej kłopotliwym sposobem jest metoda astronomiczna, pomimo iż pomiar uzależniony jest od pogodnego nieba (Załącznik). Przy jednorazowych pomiarach na punkcie magnetycznym wystarczą obserwacje Słońca, w wyniku których wyznacza się kierunek północy geograficznej na kole poziomym teodolitu. Wyznaczenie kierunku północy magnetycznej z pomiarów magnetycznych (Flux-Gate D/I) pozwala na bezpośrednie obliczenie deklinacji momentalnej na punkcie pomiarowym. Stała mira i znajomość jej azymutu geograficznego niezbędna jest przy wielokrotnych pomiarach magnetycznych. Azymut astronomiczny Słońca A^* wyznacza się z pomiarów kąta godzinnego Słońca t :

$$A^* = \arctg \frac{\cos \delta \cdot \sin t}{\cos \delta \cdot \sin \varphi \cdot \cos t - \sin \delta \cdot \cos \varphi} \quad (4.1)$$

przy czym

$$t = \lambda + E_0 + T + \mu \Delta T' \quad (4.2)$$

gdzie:

T – moment obserwacji,

δ – deklinacja Słońca (z Rocznika Astronomicznego IGiK),

φ – szerokość geograficzna miejsca obserwacji,

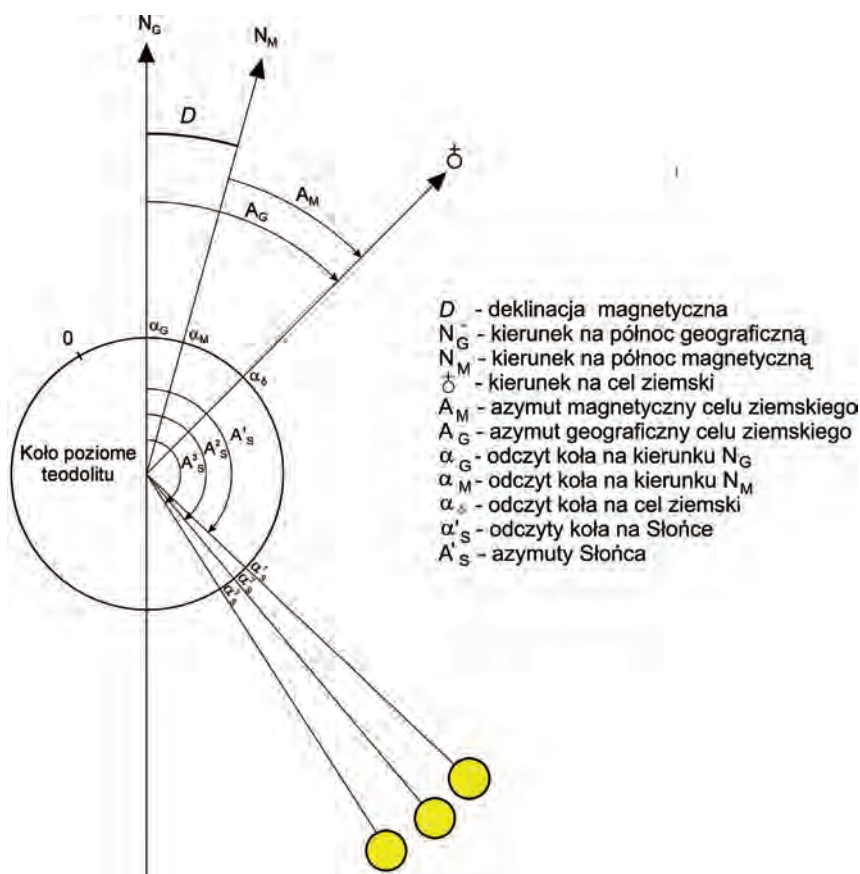
λ – długość geograficzna miejsca obserwacji,

E_0 – równanie czasu (wartość z Rocznika Astronomicznego IGiK),

$\mu \Delta T'$ – poprawka związana z przejściem pomiędzy czasem TT a $UT1$ (wartość z Rocznika Astronomicznego IGiK).

W praktyce, różnica między azymutem geograficznym a azymutem astronomicznym nie przekracza $30''$, toteż w dalszych rozważaniach przyjmuje się, że azymut wyznaczany metodą astronomiczną jest azymutem geograficznym.

Na rysunku 4.3 pokazany jest szkic kierunków, jakie obserwuje się na punkcie magnetycznym niezbędnych do wyznaczenia kierunku północy geograficznej, a tym samym do wyznaczenia wartości deklinacji magnetycznej na punkcie pomiarowym. Wzór dziennika do zapisywania wyników obserwacji Słońca znajduje się w Załączniku. Wyposażenie zespołu pomiarowego w aktualny Rocznik Astronomiczny opracowany w IGiK i w przenośny komputer z odpowiednim programem obliczeniowym umożliwi obliczenie wartości pomierzonego azymutu geograficznego natychmiast po wykonaniu obserwacji.



Rys. 4.3. Szkic kierunków na punkcie przy pomiarze deklinacji magnetycznej

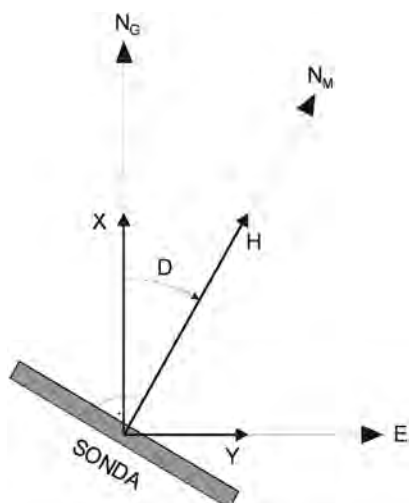
4.3.2. Wyznaczenie kierunku na północ magnetyczną magnetometrem Flux-Gate D/I

W pomiarach mających na celu wyznaczenie kierunku na północ magnetyczną, magnetometr Flux-Gate D/I jest wykorzystywany nie jako miernik natężenia pola magnetycznego, ale jako wskaźnik kierunku linii sił tego pola, a ściśłe – kierunku prostopadłego do linii sił.

Zasada tych pomiarów polega zatem na ustawieniu sondy w taki sposób, aby jej oś magnetyczna była prostopadła do kierunku linii sił pola magnetycznego. Przy takim ustawieniu sondy prąd w uzwojeniu wtórnym nie będzie indukowany i na monitorze magnetometru powinny pokazać się zera.

Ta właściwość sondy *flux* umożliwia wyznaczenie kierunku wektora natężenia całkowitego pola magnetycznego $\mathbf{F}$. Płaszczyzna pionowa, w której leży ten wektor oraz jego składowa Z jest płaszczyzną południka magnetycznego. Poziome ustawienie lunety teodolitu z umocowanym na niej czujnikiem prostopadle do tej płaszczyzny umożliwia wyznaczenie deklinacji magnetycznej.

Na rysunku 4.4 pokazane jest położenie sondy w płaszczyźnie horyzontalnej podczas pomiaru deklinacji.



Rys. 4.4. Ustawienie sondy podczas pomiaru deklinacji

Na punkcie pomiarowym najpierw wykonuje się pomiar deklinacji. Wyznaczony kierunek północy magnetycznej potrzebny jest do ustawienia sondy przy pomiarze inklinacji.

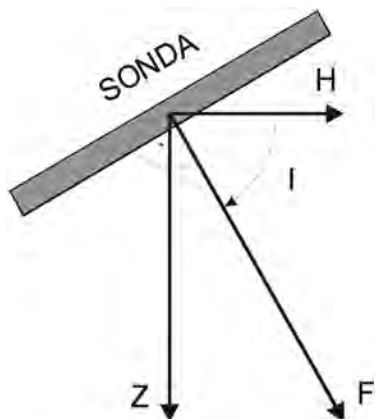
Dokładny opis czynności pomiarowych zawiera Załącznik.

4.3.3. Wyznaczenie inklinacji magnetometrem Flux-Gate D/I

Ustawienie lunety z czujnikiem w płaszczyźnie południka magnetycznego i prostopadle do wektora $\mathbf{F}$ umożliwia wyznaczenie inklinacji magnetycznej. Na rysunku 4.5 pokazane jest położenie sondy w płaszczyźnie pionowej podczas pomiaru inklinacji.

Do ustawienia lunety w płaszczyźnie południka magnetycznego służy wyznaczona już podczas pomiaru deklinacji wartość odczytu koła, przyjęta jako położenie miejsca północy magnetycznej. Położenie lunety w południku magnetycznym sprawdza się na kole poziomym przed każdą obserwacją. Na kole po-

winien być odpowiednio odczyt miejsca północy lub odczyt różny od niego o 180° . Szczegółowy opis czynności wykonywanych przy wyznaczeniu inklinacji zawiera Załącznik.



Rys. 4.5. Ustawienie sondy podczas pomiaru inklinacji

Podczas ostatecznego opracowania obserwacji i analizy otrzymanych wyników należy upewnić się, że nie było potrzeby wprowadzania poprawek wynikających z zakłócenia pola magnetycznego. Poprawki te, zwane poprawkami wariacyjnymi oblicza się na podstawie zapisu zmian pola geomagnetycznego na stacji polowej lub w obserwatorium. Jeśli w czasie obserwacji na punkcie pomiarowym pole magnetyczne było niespokojne, poprawki należy wprowadzić.

Załącznik zawiera obrazy dzienników pomiarowych do wyznaczeń astronomicznych i magnetycznych.

4.3.4. Wyznaczenie kierunku na północ magnetyczną za pomocą deklinatora

Kierunek na północ magnetyczną można także wyznaczać instrumentem o nazwie „deklinator magnetyczny” (rozdział 3a), który do połowy XX wieku był używany do pomiaru deklinacji magnetycznej i do tej pory może być wykorzystywany przy braku dostępu do magnetometru Flux-Gate D/I.

Dokładny opis czynności przy pomiarach magnetycznych wykonywanych tym instrumentem zawiera Załącznik.

4.4. Pomiar modułu wektora natężenia całkowitego F

Magnetometr protonowy, wykorzystywany do pomiaru momentu wektora natężenia całkowitego pola magnetycznego Ziemi, składa się z bloku elektroniki i sondy, która podłączona jest do niego 5-metrowym kablem. Podczas pomiaru sonda powinna być ustawiana w odległości kilku metrów od bloku elektroniki na kierunku północ-południe. Na rysunku 4.6 pokazana jest fotografia obserwatora z blokiem elektroniki i sondą ustawioną w pozycji gotowej do obserwacji.

Terenowy pomiar składowej F jest prosty a wynik pomiaru otrzymuje się natychmiast. Jest to bardzo istotne przy badaniu gradientów pola geomagnetycznego za pomocą tzw. mikrozdjęcia lub na profilach geodezyjnych lub geologicznych, gdzie stwierdzenie gradientu pola daje możliwość podjęcia decyzji o zagęszczeniu pomiarów. Opis postępowania podczas wykonywanych pomiarów magnetometrem protonowym zawiera Załącznik.

Wszystkie pomiary magnetyczne wykonywane w Polsce od połowy XX wieku przez pracowników IGiK były zgodne z opracowanymi standardami (Krzemiński i Uhrynowski, 1969) oraz polskimi normami (Wytyczne techn. G-1.3, 1982, Instrukcja techn. G-1, 2004, Polska Norma PN-N-02212 *Magnetyzm Ziemi*, Polski Komitet Normalizacji Miar i Jakości) i normami europejskimi (Jankowski i Sucksdorf, 1996; Newitt i in., 1996; Barraclough i de Santis, 2011). Stabilizacja punktów magnetycznych wykonywana była zgodnie z wytycznymi GUGiK G-1.9 dotyczącymi stabilizacji punktów geodezyjnych.

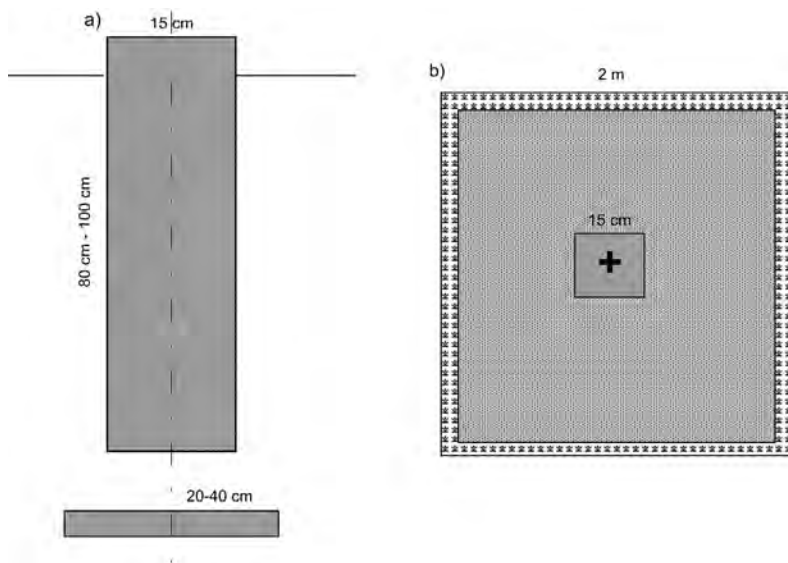


Rys. 4.6. Pomiary terenowe magnetometrem protonowym

5. PODSTAWOWA OSNOWA MAGNETYCZNA KRAJU – PUNKTY WIEKOWE

Na początku lat 1950. Instytutowi Geodezji i Kartografii w Warszawie powierzono prowadzenie prac badawczych związanych ze zmianami wiekowymi pola geomagnetycznego na obszarze Polski (Sas-Uhrynowski, 1977a). Oczywiście jest, że dla takich badań najlepsze są dane otrzymywane z rejestracji w obserwatoriach magnetycznych. Sieć obserwatoriów magnetycznych jest jednak bardzo

rzadka i dlatego niezbędne jest jej uzupełnienie o punkty zagęszczające. Takimi punktami są punkty wiekowe. Polska ma jedną z najstarszych w Europie sieci punktów wiekowych z regularnie prowadzonymi na nich obserwacjami magnetycznymi. Niektóre z tych punktów, np. Domaszków, były założone już na początku XX wieku i na nich niemieccy uczeni wykonywali pierwsze regularne pomiary magnetyczne (Dąbrowski, 1952; Krzemiński, 1952). Podstawowa osnowa magnetyczna kraju składa się obecnie z 19. punktów wiekowych (rys. 5.3), zasztablizowanych trwale w terenie. Na tych punktach od połowy XX wieku nie rzadziej niż raz na 4 lata wykonywane są pomiary trzech niezależnych składowych pola geomagnetycznego (Krzemiński i in., 1960, 1961, 1963a; Sas-Uhrynowski, 1984). Punkty te są sztablizowane granitowym słupem o wysokości 60–80 cm z wyrytym na głowicy (15 × 15 cm) krzyżem oraz płytą granitową o bokach od 20 do 40 cm zakopaną centrycznie na głębokości 1 m (rys. 5.1). Głowica słupa wystaje około 3–5 cm nad powierzchnię gruntu. Punkt okopany jest płytkim rowem o dwumetrowym boku. Punkty polskiej sieci nie mają tzw. „świadków”, ale od 1998 roku każdy punkt wiekowy zdublowany jest punktem ekscentrycznym, o podobnej sztablizacji, leżącym w jego pobliżu.

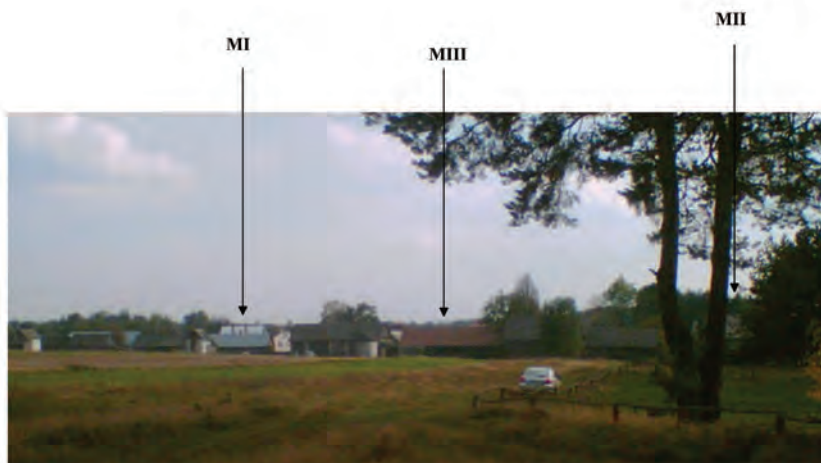
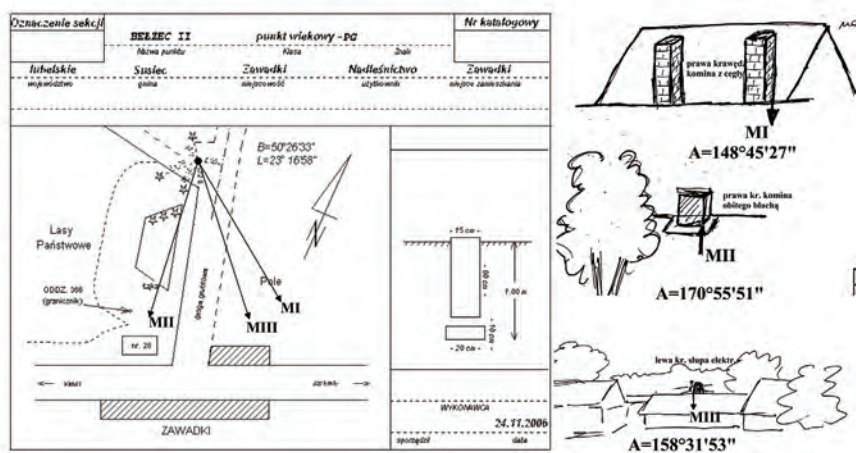


Rys. 5.1. Sztablizacja punktu wiekowego w Polsce: a) widok poprzeczny słupa i płyty z osią przechodzącą przez środek krzyża wyrytego na głowicy, b) widok z góry na słup (głowicę) i rów okalający punkt

Każdy punkt wiekowy i ekscentryczny ma opis topograficzny, obecnie wzbogacony o zdjęcia fotograficzne celów ziemskich, i wyznaczone pomiarami GNSS współrzędne geograficzne. Pierwotnie współrzędne odczytywano z map topograficznych w skali 1:5000. Przykładowy opis topograficzny nowych punktów Bełzec II i Domaszków II pokazany jest na rysunkach 5.2a i 5.2b.

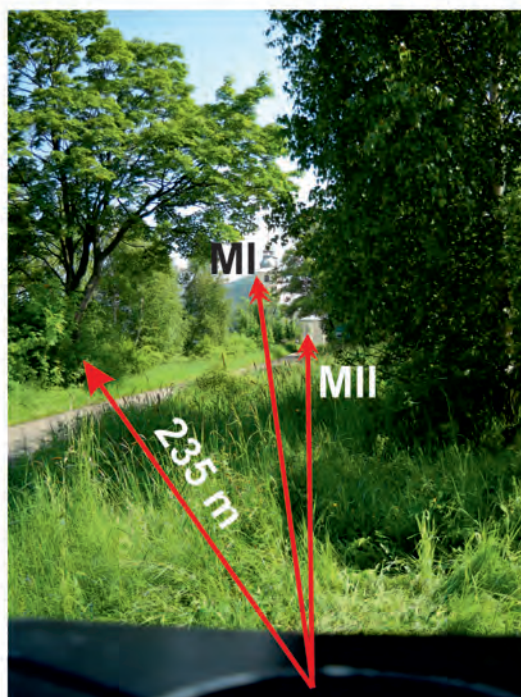
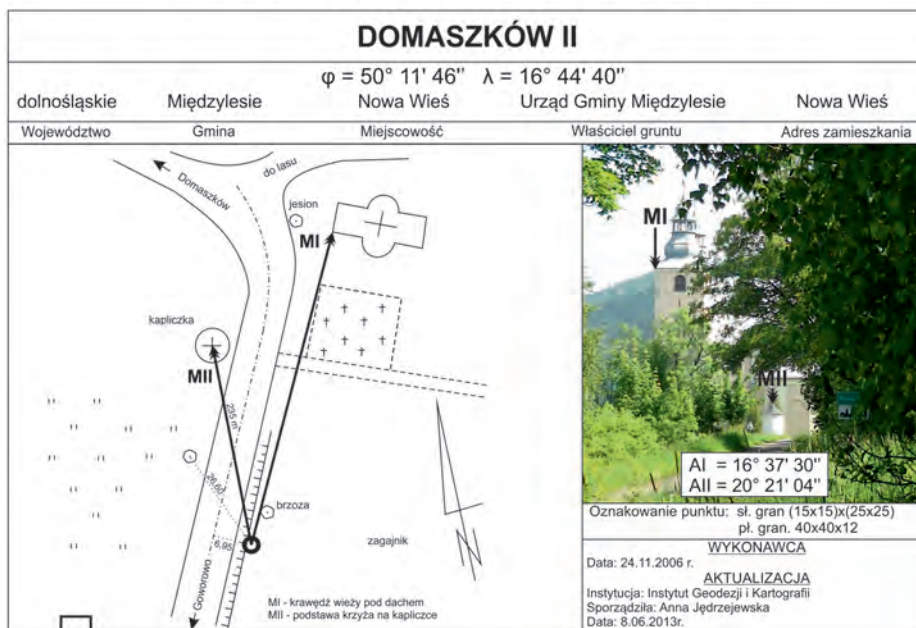
Mimo wielkiej troski jaką Instytut Geodezji i Kartografii, wspierany w tym działaniu przez Państwową Służbę Geodezyjną rozacza nad siecią punktów wiekowych od czasu jej założenia, zdarzają się wypadki zniszczenia punktu. Główną tego przyczyną jest rozwój gospodarczy kraju, który przejawia się w elektryfikacji linii kolejowych, rozbudowie aglomeracji miejskich, rozbudowie i unowocześnianiu wsi itp. Jak już wspomniano w poprzednich rozdziałach zniszczony punkt wiekowy musi być jak najszybciej odtworzony.

Osnowa magnetyczna punktów wiekowych, po jej założeniu w latach 1950., składała się od 19 do 21 punktów. Nie wszystkie aktualne punkty osnowy pokrywają się z punktami zakładanymi pierwotnie, gdyż z powodów wyżej podanych należało je zlokalizować w nowych miejscach. Wykonano wtedy, w miarę możliwości, obserwacje synchroniczne, pozwalające na przeniesienie ciągu wyznaczeń



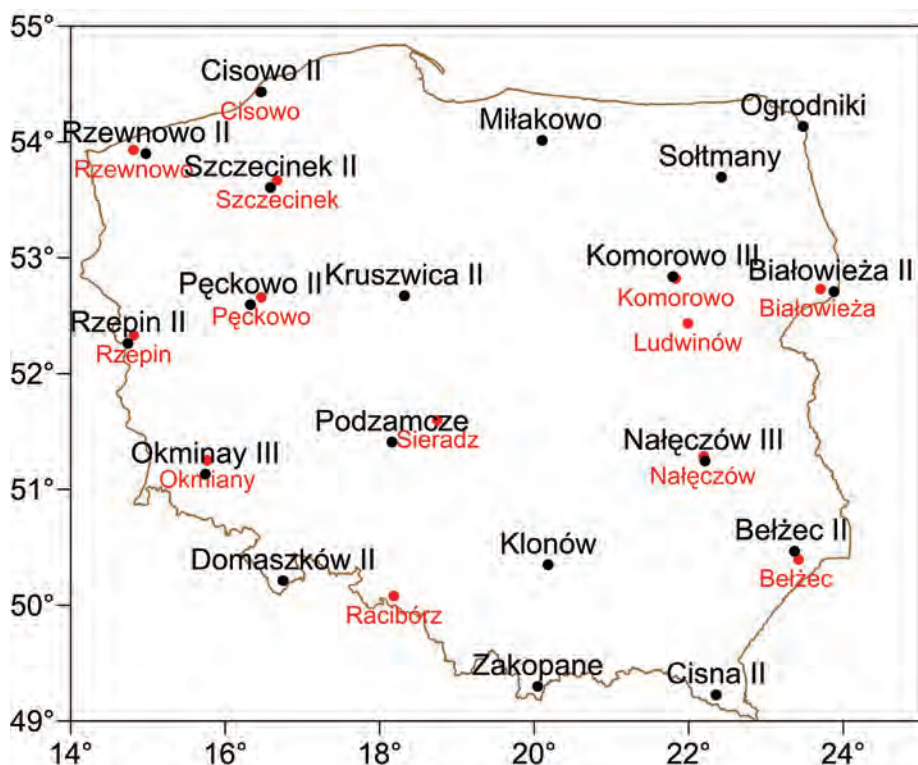
Rys. 5.2a. Opis topograficzny nowego punktu wiekowego Belżec II

OPIS TOPOGRAFICZNY PUNKTU MAGNETYCZNEGO



Rys. 5.2b. Opis topograficzny nowego punktu wiekowego Domaszków II

elementów pola geomagnetycznego z punktu starej na punkt nowej lokalizacji. Na rysunku 5.3 pokazany jest rozkład punktów podstawowej osnowy magnetycznej z lat 1950. i obecny. Na punktach starej osnowy w Ludwinowie i Sieradzu pomiary zakończono w latach 1970. W Raciborzu obserwacje były możliwe do początku lat 1990. Na punktach wiekowych: Domaszków, Cisna i Nałęczów pomiary mogą być jeszcze przez jakiś czas wykonywane jednocześnie w miejscu starej i nowej lokalizacji. Wydłuży to serie wspólnych pomiarów i podniesie dokładność przeniesienia pomiarów archiwalnych do serii pomiarowej odniesionej do nowego punktu. Punkty przeniesione zachowują tę samą nazwę i są traktowane jak punkty o ciągłej rejestracji od połowy XX wieku. W celu ich rozróżnienia obok nazwy dodaje się kolejny numer, np. I, II, III itd.



Rys. 5.3. Podstawowa osnowa magnetyczna Polski – czerwone kropki to punkty archiwalne (nieaktualne), czarne kropki to punkty wiekowe aktualne od 1998 roku

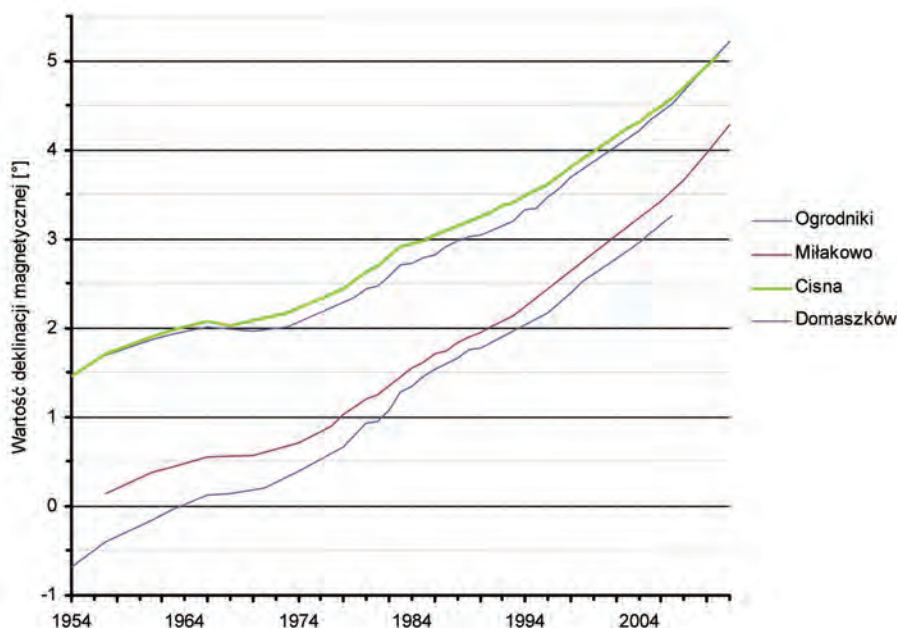
Sieć punktów wiekowych została wzmocniona w 1998 roku o dodatkowe punkty ekscentryczne oddalone średnio o około 500–1000 m od punktu głównego. Punkty te traktowane są równoprawnie, a więc wszystkie procedury przy ich zakładaniu i lokalizacji muszą być zachowane, ich stabilizacja musi być taka sama jak punktu wiekowego głównego i procedury dotyczące pomiarów muszą

być analogiczne jak na punkcie głównym. Jednoczesne, synchroniczne pomiary na obu punktach pozwoliły na wyznaczenie między nimi różnic wartości mierzonych elementów pola geomagnetycznego. Umożliwi to ewentualne przenoszenie wyników obserwacji z ekscentru na punkt główny, gdy ten z jakichś powodów nie będzie dostępny (Welker i Żółtowski, 1993a).

Osnowa punktów wiekowych w Polsce została założona ponad pół wieku temu i pomiary na niej są wykonywane systematycznie według standardów opracowanych w IGiK i obowiązujących norm krajowych. Wyniki tych pomiarów były i są wykorzystywane do opracowywania aktualnych map izopor (Sas-Uhrynowski, 1977b; Welker i Żółtowski, 1993b). Osnowa ta spełnia obecne normy przyjęte przez IAGA (Barracough i de Santis, 2011).

Pełny ciąg wyników z obserwacji magnetycznych na polskich punktach wiekowych, redukowanych początkowo do Obserwatorium Geofizycznego im. St. Kalinowskiego w Świdrze, a następnie do Centralnego Obserwatorium Geofizycznego IGF PAN w Belsku, jest zapisany w banku danych geofizycznych IGiK (rozdz. 7). W archiwum IGiK przechowywana jest także pełna dokumentacja polowa w postaci dzienników pomiarowych oraz graficzne i numeryczne zapisy magnetogramów z obserwatoriów wykorzystywane do redukcji wyników obserwacji magnetycznych.

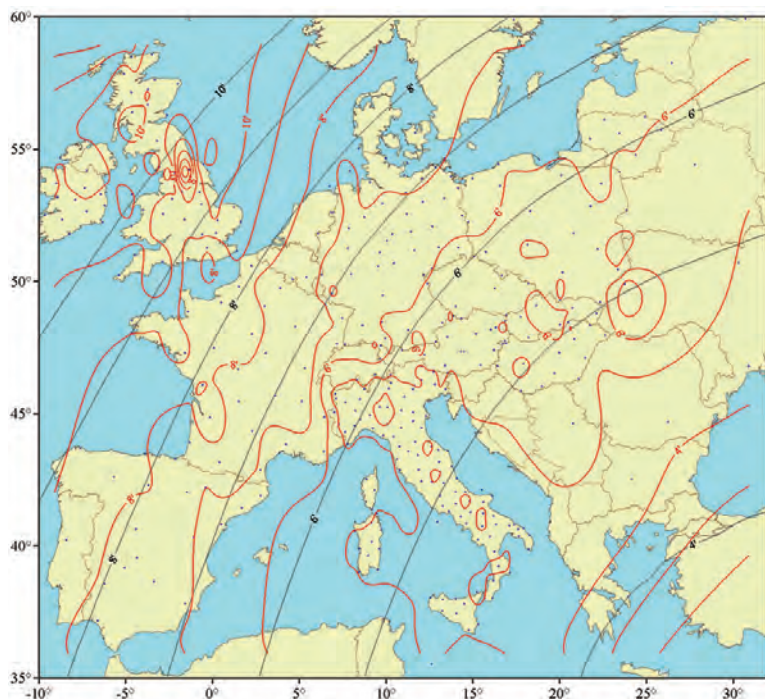
Przykładowy przebieg deklinacji magnetycznej wyznaczonej na wybranych 4 punktach wiekowych w latach 1954–2012 pokazany jest na rysunku 5.4.



Rys. 5.4. Przebieg wartości deklinacji magnetycznej pomierzonej na wybranych punktach wiekowych w latach 1954–2012

Dane dotyczące wartości elementów pola magnetycznego wyznaczonych na punktach wiekowych można także znaleźć na stronach internetowych WDC (World Data Center) w Edynburgu (Shanahan i McMillan, 2009). Są one przekazywane przez Instytut Geodezji i Kartografii regularnie od momentu podjęcia międzynarodowej współpracy w ramach utworzonej w 2003 roku grupy MagNetE, której zadaniem jest koordynacja badań zmian wiekowych pola magnetycznego Ziemi w Europie oraz wypracowanie jednakowych standardów, dotyczących pomiarów magnetycznych i opracowywania ich wyników. Polska, jako jeden z 23 krajów europejskich, aktywnie uczestniczy w pracach tej grupy (Duma, 2009).

Przykładem wykorzystania wyników pomiarów na punktach wiekowych osnowy magnetycznej kraju i dostępnych danych z punktów wiekowych krajów europejskich było opracowanie w 2008 roku, w ramach projektu badawczego finansowanego przez KBN (nr 4 T12E 005 28), mapy izopor elementów pola magnetycznego Ziemi dla Europy dla okresów 1995–2000 i 2000–2005 (Sas-Uhrynowski i Welker, 2008, 2009). Rysunek 5.5 przedstawia obraz izopor deklinacji magnetycznej D dla okresu 2000–2005. Na rysunku 5.6 pokazano przebieg różnic między izoporami rzeczywistymi i obliczonymi na podstawie modelu IGRF dla tego okresu oraz ich histogram. Analogicznie rysunek 5.7 przedstawia obraz izopor dla modułu F wektora natężenia całkowitego pola magnetycznego Ziemi opracowany dla okresu 2000–2005, a rysunek 5.8 przebieg

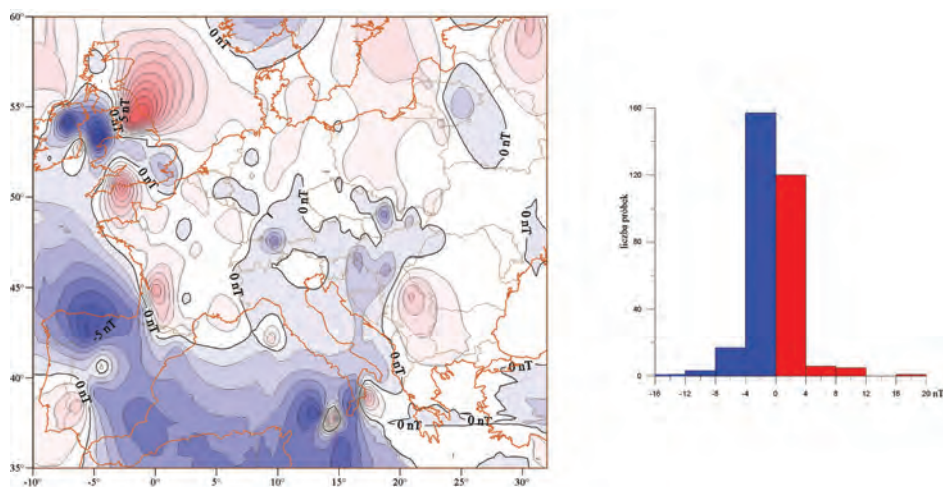


Rys. 5.5. Mapa izopor D obliczonych z danych pomiarowych i ze współczynników modelu IGRF (czarne linie) na okres 2000–2005

różnic między izoporami rzeczywistymi i obliczonymi na podstawie modelu IGRF dla tego samego okresu wraz z histogramem.

Analiza wyników otrzymanych z opracowania danych z europejskich punktów wiekowych wskazuje na potrzebę dalszych wspólnych prac pomiarowych i badań zmian pola geomagnetycznego dla wyeliminowania przypadkowych błędów, wynikających prawdopodobnie z niewłaściwego przestrzegania standardów pomiarowych i/lub redukcyjnych. Świadczą o tym niewyjaśnionego pochodzenia anomalie izopor F w rejonie Szkocji, Irlandii, Sardynii i północnej Hiszpanii.

Różnice między izoporami obliczonymi na podstawie rzeczywistych wartości uzyskanych z pomiarów naziemnych na punktach wiekowych i wyznaczonymi na podstawie modelu IGRF mieszczą się w granicach błędów pomiarowych. Wystąpienie widocznych na rysunkach „anomalnych” obszarów może być spowodowane błędami pomiarowymi, przyjętymi złymi procedurami redukcyjnymi lub może odzwierciedlać lokalne anomalie pola geomagnetycznego pochodzące z nieznanego źródła.



Rys. 5.8. Mapa różnic izopor F obliczonych z danych pomiarowych i ze współczynników modelu IGRF wraz z histogramem

6. ZDJĘCIE MAGNETYCZNE POLSKI

Jak już wspomniano w rozdziale 2 podstawowe zdjęcie deklinacji magnetycznej w Polsce powojennej zostało wykonane w latach 1953–1955 z uzupełniającymi pomiarami z lat 1958–1959. Charakteryzowało się ono dużym stopniem szczegółowości, wyrażającym się gęstością punktów zdjęcia. Zagęszczenie punktów w rejonie północno-wschodniej Polski wiązało się z rozpoznaniem

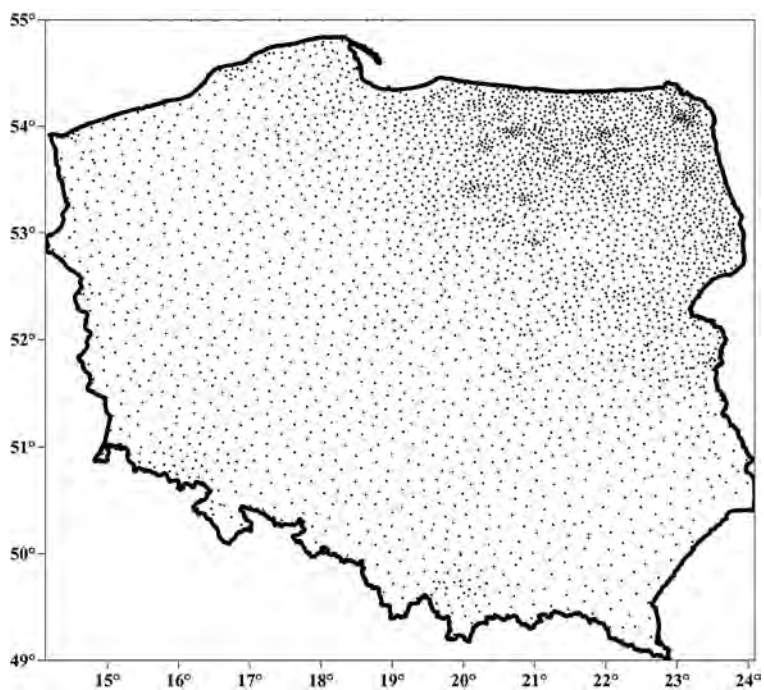
wcześniej anomaliami magnetycznymi występującymi w tym rejonie. Wynikiem zdjęcia magnetycznego było opracowanie map deklinacji magnetycznej Polski na epoki 1955.5 i 1961.5 (Krzemiński, 1954, 1959; Krzemiński i in., 1963b). Była to praca pionierska w ówczesnej Europie oparta częściowo na doświadczeniu naukowców radzieckich, wykonujących w latach 1930. zdjęcia magnetyczne na terenach Rosji (Janowski, 1958). Mapy deklinacji magnetycznej Polski opracowano dla arkuszy w skali 1:200 000 z cięciem izolinii 5'. Prace były prowadzone pod kierunkiem Krzemińskiego i nadzorem pracowników IGiK, zgodnie z opracowanymi przez IGiK standardami i przy wykorzystaniu deklinatorów igłowych będących własnością Instytutu (rozdz. 3a). Na punktach, na których stwierdzono duże anomalie w stosunku do otoczenia, lub na których różnice między wartościami obserwowanego elementu znacznie przekraczały dokładność jego wyznaczenia, obserwacje były powtarzane nawet trzy- lub czterokrotnie. Około 4500 punktów zdjęcia magnetycznego stabilizowano tymczasowo za pomocą palika drewnianego, odczytywano ich współrzędne z mapy topograficznej i wykonywano dla nich opis topograficzny (rys. 6.4). Umożliwiło to zlokalizowanie punktu po kilkunastu lub nawet kilkudziesięciu latach. Zbiór tych punktów z wartościami deklinacji magnetycznej uzyskanej w wyniku pomiarów i redukcji służy do tej pory jako baza wyjściowa dla wszelkich opracowań magnetycznych. Na rysunku 6.1 pokazany jest rozkład punktów zdjęcia magnetycznego z lat 1950.

Dane o archiwalnych punktach zdjęcia magnetycznego są przechowywane w archiwum IGiK w postaci zbioru dwustronnych kart, zawierających informacje o punkcie i wyniki wykonanych na nim pomiarów magnetycznych (rys. 6.2).

Na rysunku 6.3 pokazano kartę pomiarową dla przykładowego punktu zdjęcia – Rudziska, a na rysunku 6.4 jego opis topograficzny. Od lat 1980. dane z kart, już odtajnione, zostały przeniesione do cyfrowego banku danych geofizycznych i od tej pory stanowią bazę wyjściową do wszelkich cyfrowych opracowań deklinacji magnetycznej. Więcej informacji o danych zapisanych w banku zawiera rozdział 7.

Opis topograficzny dla wybranego punktu magnetycznego Nienowice, na którym powtarzano pomiary magnetyczne podczas zdjęcia magnetycznego z 1965 roku, pokazany jest na rysunku 6.5.

W latach 1964–1965 w ramach Grupy Roboczej 1.6 KAPG na wybranych ze zbioru zdjęcia deklinacji magnetycznej 756 punktach zostały pomierzone dwie niezależne składowe pola geomagnetycznego H i Z . Punkty zostały rozmieszczone równomiernie na terenie Polski (Żółtowski, 1972). Obliczone z pomiarów wartości elementów pola geomagnetycznego H i Z (pomiarzy z 1965 roku) oraz D (pomiarzy z lat 1950.) wraz z obliczonymi wartościami elementów F i I są przechowywane w banku danych. Wykonano wtedy także pierwsze wspólne pomiary nawiązujące z ówczesną NRD i Czechosłowacją. W wyniku opracowania w IGiK danych pomiarowych i zredukowania ich do epoki 1965.0 powstały mapy elementów D , H , Z , F i I pola geomagnetycznego. Przy wykonywaniu zdjęcia zastosowano wiele nowych, opracowanych w Instytucie metod pomiarowych i redukcyjnych. Po raz pierwszy wykorzystano instalowane w rejonach obserwacji polowe stacje



Rys. 6.1. Punkty zdjęcia magnetycznego 1952–1959



Rys. 6.2. Skrzynki z kartami punktów zdjęcia magnetycznego z lat 1950. (archiwum IGiK)

10518				Tajne 1955-15 ^{"V"}																																															
numer punktu 343107		nazwa punktu Rudziska		$\varphi \quad 53^{\circ} 41' 18'' V$																																															
województwo Olsztynskie		powiat Szczytno		$\lambda \quad 20^{\circ} 47' 32''$ 1955-27 ^{"V"}																																															
Pomiary z r. 1958 $\varphi = 53^{\circ} 41' 15''$ $\lambda = 20^{\circ} 47' 28''$		Porównanie różnych punktów. Zostawiono ostatni 1958 rok. Jeszcze		<table border="1"> <thead> <tr> <th>epoka</th> <th>wartość</th> <th>zmiana roczna</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1954.5</td> <td>+ 1° 46' ?</td> <td rowspan="3">+ 26'</td> </tr> <tr> <td>1955.0</td> <td>+ 1° 56' 0</td> </tr> <tr> <td>1958.5</td> <td>+ 2° 04' 2 V</td> </tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> <tr><td> </td><td> </td><td> </td></tr> </tbody> </table>		epoka	wartość	zmiana roczna	1954.5	+ 1° 46' ?	+ 26'	1955.0	+ 1° 56' 0	1958.5	+ 2° 04' 2 V																																				
epoka	wartość	zmiana roczna																																																	
1954.5	+ 1° 46' ?	+ 26'																																																	
1955.0	+ 1° 56' 0																																																		
1958.5	+ 2° 04' 2 V																																																		
Uwagi																																																			

[illegible]

Rys. 6.3. Przykład dwustronnej karty punktu zdjęcia magnetycznego Rudziska z lat 1954, 1955 i 1958

Główny Urząd Pomiarów Kraju

TYLKO DO UŻYTKU SŁUŻBOWEGO

Opis topograficzny

Formularz Nr E-2

Nr porządkowy punktu na mapie przeglądowej: Nr

Arkusz Mapy

1 : 100.000 Pas 34. Słup 31

1 : 25.000 Litera

Nazwa punktu { ostateczna Rudziska
 tymczasowa
 dawna

punktu 343107 (211)

Wojew.
 Powiat Szczytno
 Gmina
 Gromada
 Obręb Nr

Posiadacz gruntu:
 Nazwisko
 Imię
 Miejsce zamieszkania

Nr arkusza mapy katastr.
 Nr parceli
 Nr hipot.

Dojazd
 Kąty lub kierunki na punkty sąsiednie

Utrwalenie punktu

Spółrzędne

Utrwalono dnia

TOPOGRAFIA

Orientacja ogólna (odrys z mapy)

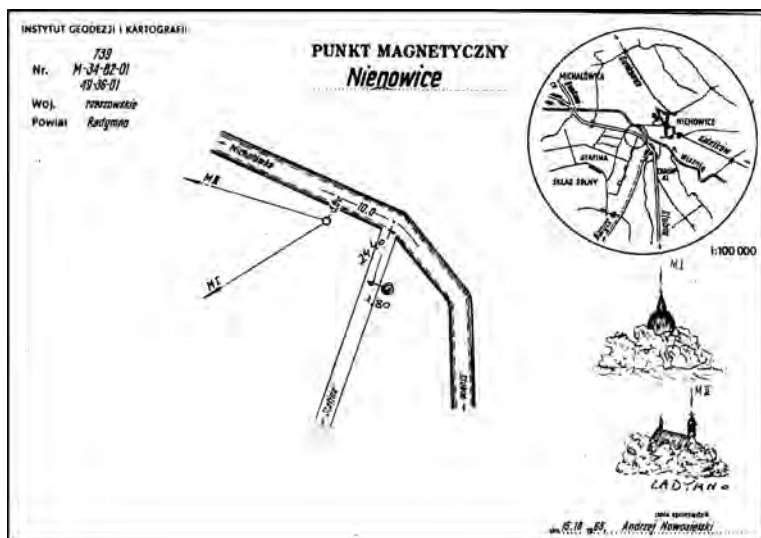
Typ
 Wysokość stolika
 Wysokość świecy
 Inne dane:

Spółrzędne J. Namak
 dnia

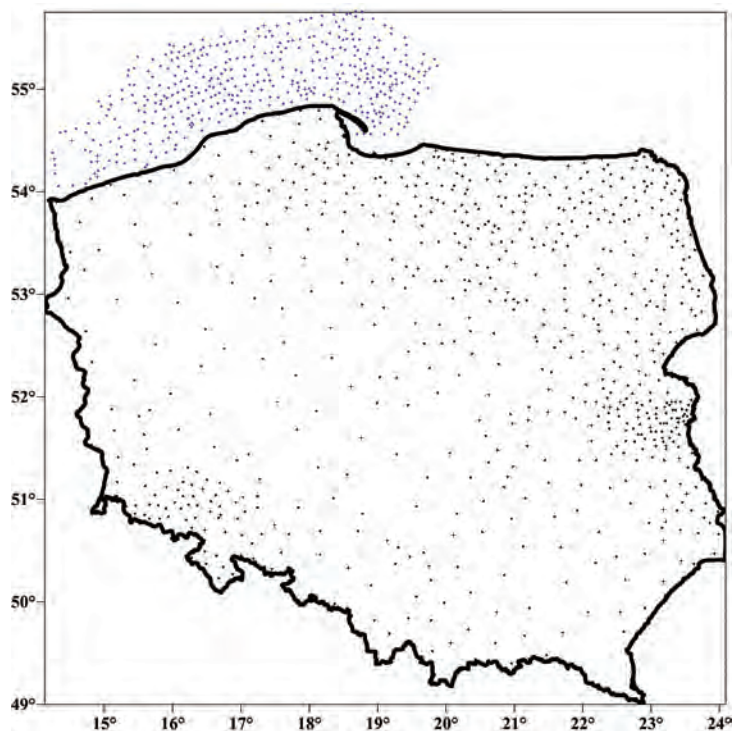
Rys. 6.4. Opis topograficzny punktu zdjęcia magnetycznego Rudziska z 1954 r.

magnetyczne z ciągłą rejestracją elementów pola geomagnetycznego. Dane z zapisów stacji wykorzystano do redukcji obserwacji na punktach magnetycznych.

Przechowywane w archiwum Instytutu Geodezji i Kartografii mapy deklinacji magnetycznej, opracowane dla południowej części Bałtyku na epokę 1971.5 (pomiar z lat 1971–1972) (Uhrynowski, 1975; Dąbrowski i Uhrynowski, 1976) poddano w latach 1980. digitalizacji i odpowiedniej transformacji. W ich wyniku otrzymano zbiór cyfrowy z ponad 400 punktami morskimi, mającymi przypisaną



Rys. 6.5. Opis topograficzny punktu zdjęcia magnetycznego Nienowice z 1965 r.



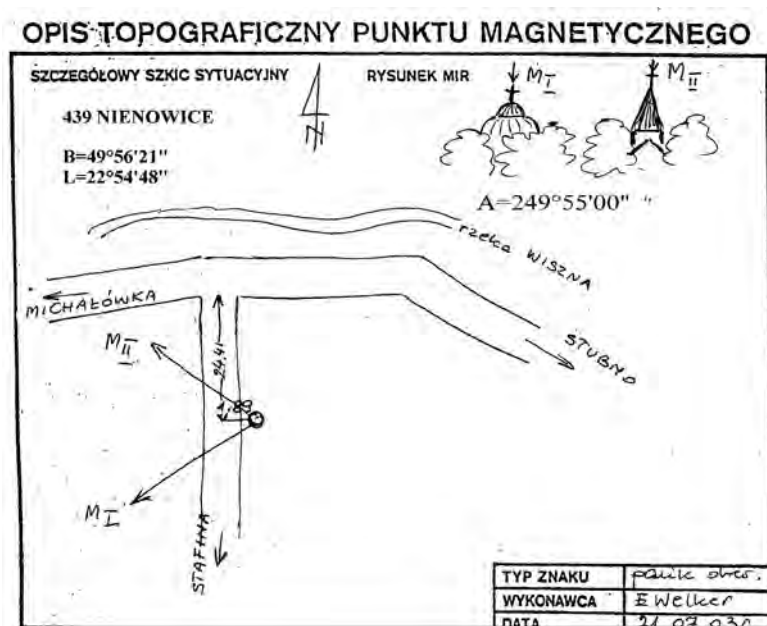
Rys. 6.6. Punkty pełnych pomiarów magnetycznych z 1965 roku (czarne punkty) i punkty pomiarów na Bałtyku z 1971 roku (niebieskie punkty)

z dokładnością 0.1° wartość deklinacji magnetycznej. Rysunek 6.6 pokazuje rozkład punktów magnetycznych z 1965 roku i punktów morskich z 1971 roku.

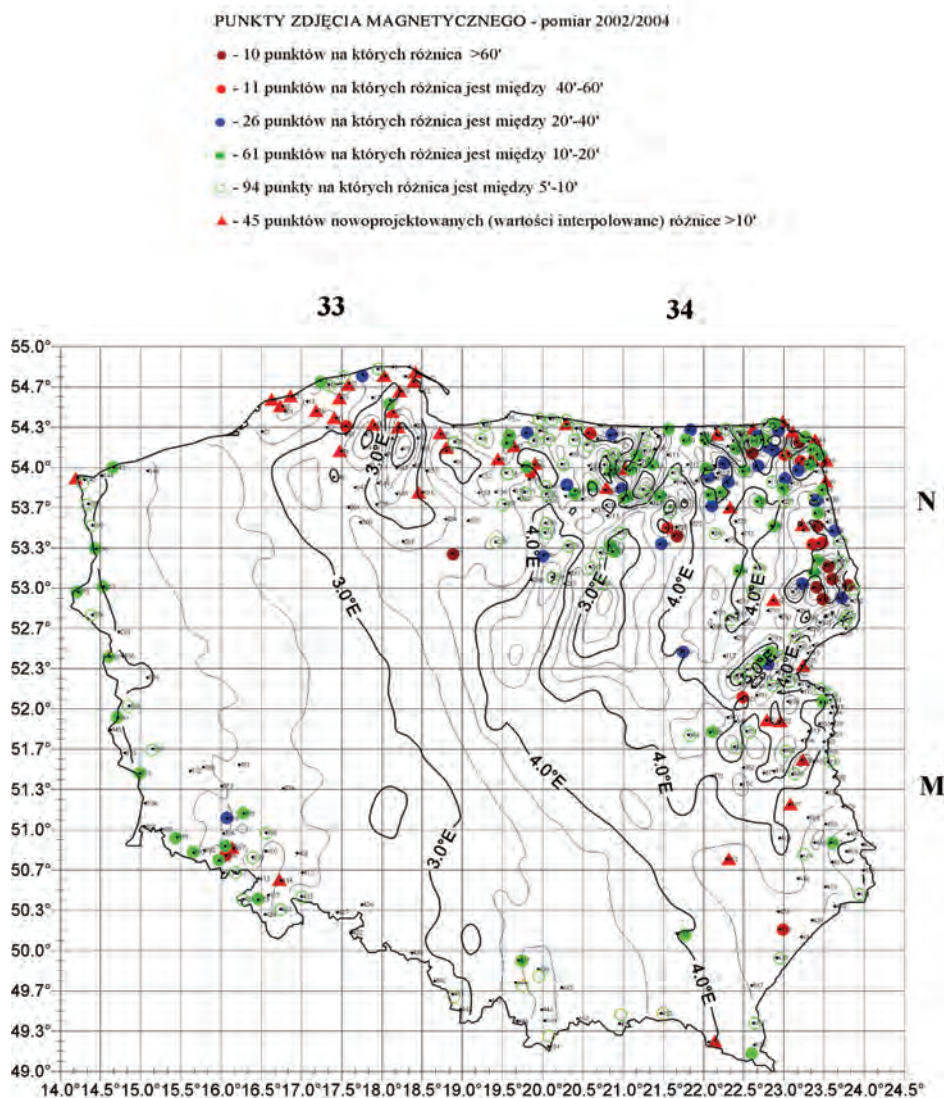
Uzupełniony o wartości deklinacji magnetycznej z nowych wyznaczeń zbiór punktów archiwalnych zredukowany do epoki 2000.5 (rozdział 7) stanowi teraz nową, wyjściową bazę cyfrową do opracowywania map deklinacji magnetycznej i analiz anomalii pola magnetycznego.

W latach 2003–2004 wykonano ponownie pomiary deklinacji magnetycznej na około 400 odtworzonych punktach starego zdjęcia deklinacji magnetycznej oraz na 45 nowo zaprojektowanych punktach. Wyniki pomiarów wykonanych za pomocą nowoczesnego magnetometru Flux-Gate *D/I* przez pracowników IGiK oraz pracowników wojskowych służb topograficznych poddano analizie porównawczej. Rysunek 6.7 przedstawia przykładowy opis punktu zdjęcia magnetycznego (Nienowice z 2003 roku).

W roku 2008 jeszcze raz powtórzono pomiary na 21 punktach, na których różnice między wartościami deklinacji z nowego wyznaczenia z epoki 2004.5 i z pierwszego zdjęcia archiwalnego przekraczały $40'$. Nowo wyznaczone wartości deklinacji magnetycznej dodatkowego zdjęcia zostały wprowadzone do banku danych geofizycznych IGiK. Na rysunku 6.8 pokazana jest lokalizacja punktów zdjęcia magnetycznego z lat 2003–2004 z uwzględnieniem różnic w wartościach deklinacji zredukowanych do epoki 2004.5, z pomiarów z lat 2003–2004 i z pierwszego archiwalnego zdjęcia.



Rys. 6.7. Opis topograficzny punktu zdjęcia magnetycznego Nienowice z 2003 r.

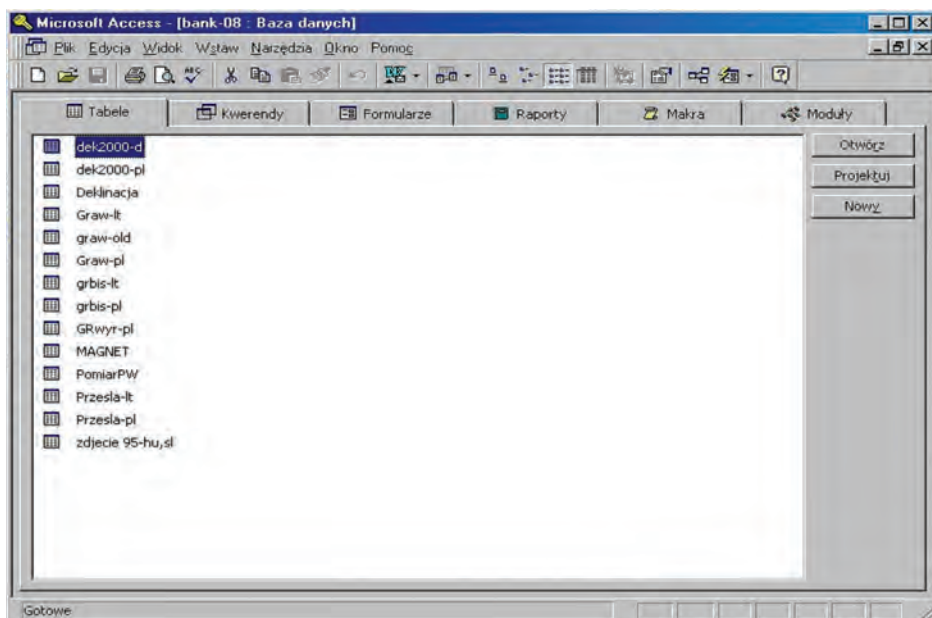


Rys. 6.8. Punkty archiwalnego zdjęcia magnetycznego wybrane do ponownego pomiaru w latach 2003–2004

7. BANK DANYCH GEOFIZYCZNYCH

Dane magnetyczne w postaci dzienników pomiarowych i wartości zredukowanych obserwacji magnetycznych były zawsze przechowywane w archiwum IGiK – początkowo w postaci teczek z danymi, wykresów i tabel (rozdz. 6). Po pojawieniu się w Instytucie pierwszych komputerów osobistych typu Schneider bazę danych magnetycznych przeniesiono na dyskiety. Do przechowywania da-

nych, ich opracowywania i uzupełniania zostały opracowane programy w języku Pascal i Basic (pracujące w środowisku DOS). Rozwój techniki komputerowej i wprowadzenie systemu Windows firmy Microsoft, jako systemu powszechnie dostępnego, wymagało transferu bazy danych i opracowanie nowych wersji oprogramowania. Aktualna wersja banku danych geofizycznych, w skład którego wchodzi nie tylko dane magnetyczne ale i grawimetryczne, obejmująca terytorium Polski i Europy Środkowej, została utworzona na początku lat 1990. przy wykorzystaniu bazy MS-ACCESS. Bank danych geofizycznych jest stale uzupełniany o dostępne dane z nowych pomiarów magnetycznych. Rysunek 7.1 pokazuje listę wszystkich tabel banku dostępnych dla użytkownika.



Rys. 7.1. Tabele banku danych magnetycznych i grawimetrycznych

- Bank zawiera 14 tabel, z których 6 dotyczy danych magnetycznych. Są to:
- *MAGNET* – tabela z danymi magnetycznymi dotyczącymi punktów wiekowych i obserwatoriów,
 - *PomiarPW* – tabela zawierająca pomiary magnetyczne wykonane na punktach wiekowych i w obserwatoriach magnetycznych,
 - *Deklinacja* – tabela zawierająca wyniki pierwszego zdjęcia magnetycznego Polski z lat 1952–1959, rozszerzana sukcesywnie o dostępne wyniki pomiarów magnetycznych z terenów Polski i z krajów sąsiednich,
 - *Dek2000-pl* – tabela wartości deklinacji magnetycznej zapisanych w tabeli archiwalnej *Deklinacja* i zredukowanych do jednej epoki 2000.5,
 - *Dek2000-d* – tabela z wynikami niemieckiego zdjęcia magnetycznego zredukowanymi do epoki 2000.5,
 - *Zdjecie95-hu,sl* – tabela z wynikami węgierskiego i słowackiego zdjęcia magnetycznego zredukowanymi do epoki 1995.5.

7.1. Opis tabel banku dotyczących magnetycznych obserwatoriów i punktów wiekowych

Tabela *MAGNET* (rys. 7.2) zawiera dane dotyczące magnetycznych obserwatoriów europejskich i punktów wiekowych magnetycznej osnowy polskiej, litewskiej i białoruskiej oraz dostępnych punktów wiekowych z krajów Europy Środkowej. Składa się ona z 7 kolumn:

- numer punktu (IDpunktu),
- nazwa obserwatorium lub punktu wiekowego,
- symbol punktu składający się z 4 znaków, np. O-pl oznacza obserwatorium polskie, A-bl to aktualny białoruski punkt wiekowy,
- szerokość geograficzna punktu (w stopniach, minutach i sekundach),
- długość geograficzna punktu (w stopniach, minutach i sekundach),
- kolumna przeznaczona na uwagi dotyczące punktu, warunków pomiaru itp.,
- kolumna wskazująca link do opisu topograficznego danego punktu.

IDpunktu	Nazwa	Symbol	Szerokosc	Dlugosc	Opis	Opis to
1	CISOWO	N-pl	54 26 06	16 27 34		Dc
2	CISOWO 2	A-pl	54 26 20	16 27 39		Dc
3	OGRODNIKI	A-pl	54 08 22	23 27 06		
4	MILAKOWO	A-pl	54 01 12	20 05 20		Microsoft Photo
5	RZEWNOWO	N-pl	53 56 02	14 49 15		
6	RZEWN2-KRZEPCCIN	A-pl	53 54 20	14 58 34		
7	SOLTMANY	A-pl	53 42 03	22 24 07		
8	SZCZECINEK	N-pl	53 40 17	16 40 60		
9	SZCZECINEK 2-KRAGI	A-pl	53 36 36	16 34 50		
10	KRUSZWICA	A-pl	52 40 25	18 18 30		
11	PECKOWO	N-pl	52 39 48	16 28 30		
12	LUDWINOW	N-pl	52 26 17	22 00 10		
13	RZEPIN	N-pl	52 20 09	14 49 21		
14	SIERADZ	N-pl	51 36 07	18 45 35		
15	PODZAMCIE	A-pl	51 24 16	18 09 06		
16	NALECZOW	N-pl	51 17 18	22 12 44		
17	OKMIANY	N-pl	51 15 24	15 46 29		
18	OKMIANY 2-KLUCZKOW	N-pl	51 19 48	15 26 17		
19	OKMIANY 3-CZAPLE	A-pl	51 07 33	15 44 26		
20	BELZEC	N-pl	50 24 05	23 26 20		
21	BELZEC 2-PASIEKI	A-pl	50 27 33	23 20 30		
22	KLONOW	A-pl	50 20 37	20 09 59		
23	DOMASZKOW	A-pl	50 13 20	16 40 05		
24	RACIBORZ	N-pl	50 05 04	18 11 37		
25	ZAKOPANE	A-pl	49 17 22	20 01 51		
26	CISNA	A-pl	49 12 44	22 19 39		
27	BIALOWIEZA	N-pl	52 44 03	23 43 12		
28	BIALOWIEZA-PALAC	A-pl	52 42 32	23 51 04		
30	KOMOROWO	N-pl	52 49 30	21 50 53		
31	BELSK	O-pl	51 50 12	20 47 30		
32	HEL	O-pl	54 36 24	18 49 18		

Rys. 7.2. Tabela *MAGNET* z danymi dotyczącymi wiekowych punktów magnetycznych

Tabela *PomiarPW* (rys. 7.3) zawiera średnie roczne wartości rejestrowanych w obserwatoriach elementów pola geomagnetycznego oraz wyniki pomiarów na punktach wiekowych zredukowane do epoki pomiaru, przyjętej jako środek roku. Składa się ona z 8 kolumn:

- numer porządkowy,
- numeru ID identyfikujący punkt w tabeli *MAGNET*,
- epoka pomiaru na punkcie,
- wartość deklinacji magnetycznej (stopnie, minuty, sekundy),

ID systemu	ID punktu	Rok pomiaru	Deklinacja	H	F	Inklinacja	Opis
93	6	1993	01 28 30	18006	49324		
94	6	1994	01 37 48		49352	68 37 01	
95	6	1995	01 40 30	18000	49376		
96	6	1996	01 48 25	18004	49398	68 37 30	
97	6	1997	01 54 54	18010	49431		
1196	6	1998	02 03 55		49469		
1242	6	1999	02 10 06		49500	68 39 36	
1753	6	2002	02 29 12		49609	68 41 12	
1979	6	2004	02 41 54			68 42 30	
2083	6	2005	02 49 25		49718	68 43 06	
2476	6	2007	03 01 42		49777	68 42 54	
2534	6	2009	-01 39 18		-00204	01 04 00	
98	7	1954	01 35 13				
99	7	1955	01 37 05				
100	7	1957	01 44 49				
101	7	1959	01 53 49				
102	7	1961	01 57 43	17882			
103	7	1963	02 02 17	17911	49261		
104	7	1965		17926	49307		
105	7	1966	02 06 18	17937	49325		
106	7	1970	02 04 48	17984	49440		
107	7	1973	02 08 17	18030	49543		

Rys. 7.3. Tabela PomiarPW z danymi z pomiarów magnetycznych

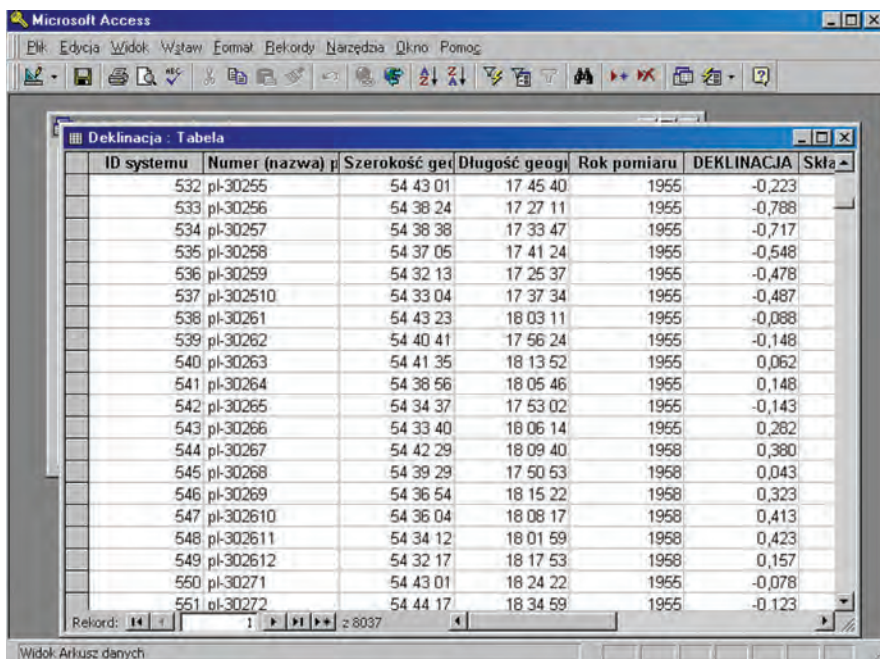
- wartość składowej poziomej pola magnetycznego [nT],
- wartość wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego [nT],
- wartość inklinacji magnetycznej podawana tak jak deklinacja,
- kolumna przeznaczona na opis warunków dotyczących pomiaru.

Wszystkie wartości elementów pola geomagnetycznego zredukowane są na środek roku.

7.2. Opis tabel banku dotyczących punktów zdjęcia magnetycznego

Tabela *Deklinacja* (rys. 7.4) zawiera wartości deklinacji magnetycznej pierwszego zdjęcia magnetycznego Polski z lat 1952–1959. Była ona sukcesywnie uzupełniana o dostępne wartości z pomiarów magnetycznych polskich i z krajów sąsiednich. I tak dodano do niej wartości pomiarów magnetycznych D , H i F na ponad 700 polskich punktach z 1965 roku, wartości deklinacji na Bałtyku (1971 rok) oraz wartości zdjęcia magnetycznego Litwy z 1936 roku (pełne zdjęcie), Bułgarii z 1960 roku (pełne zdjęcie), Czech z 1978 roku i Słowacji z roku 1980 (pełne zdjęcie). Dołączono też punkty uzyskane z danych archiwalnych, a leżące na obecnych terenach Rosji, Ukrainy, Białorusi i Litwy (rozdz. 2). Rekord tabeli składa się z 9 kolumn:

- numer ID identyfikujący punkt w tabeli banku,
- nazwa punktu,
- szerokość geograficzna punktu (stopnie, minuty, sekundy),
- długość geograficzna punktu (stopnie, minuty, sekundy),
- rok pomiaru na punkcie,



Microsoft Access

Plik Edycja Widok Wstaw Format Rekordy Narzędzia Okno Pomoc

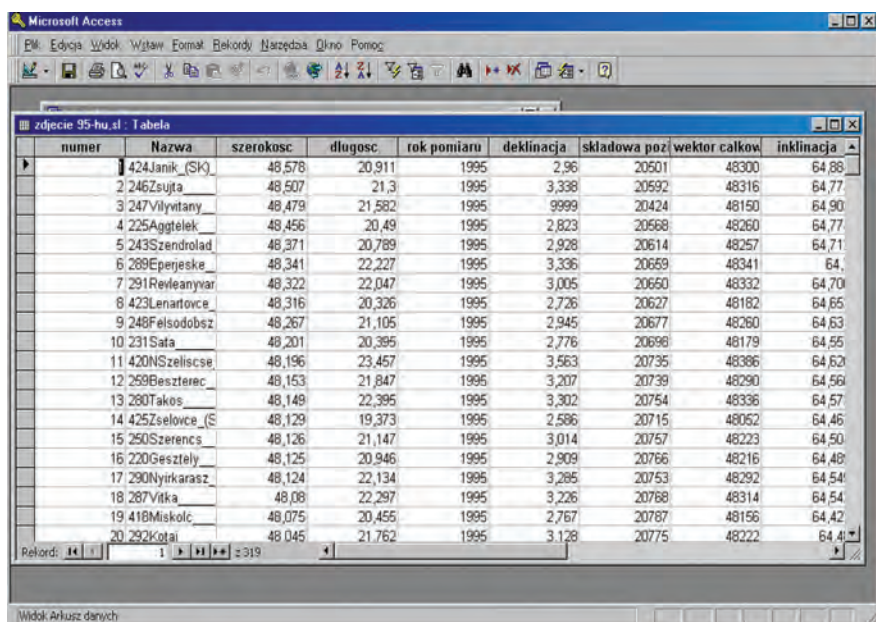
Deklinacja : Tabela

ID systemu	Numer (nazwa)	Szerokość geogr	Długość geogr	Rok pomiaru	DEKLINACJA	Skała
532	pl-30255	54 43 01	17 45 40	1955	-0,223	
533	pl-30256	54 38 24	17 27 11	1955	-0,788	
534	pl-30257	54 38 38	17 33 47	1955	-0,717	
535	pl-30258	54 37 05	17 41 24	1955	-0,548	
536	pl-30259	54 32 13	17 25 37	1955	-0,478	
537	pl-302510	54 33 04	17 37 34	1955	-0,487	
538	pl-30261	54 43 23	18 03 11	1955	-0,088	
539	pl-30262	54 40 41	17 56 24	1955	-0,148	
540	pl-30263	54 41 35	18 13 52	1955	0,062	
541	pl-30264	54 38 56	18 05 46	1955	0,148	
542	pl-30265	54 34 37	17 53 02	1955	-0,143	
543	pl-30266	54 33 40	18 06 14	1955	0,282	
544	pl-30267	54 42 29	18 09 40	1958	0,380	
545	pl-30268	54 39 29	17 50 53	1958	0,043	
546	pl-30269	54 36 54	18 15 22	1958	0,323	
547	pl-302610	54 36 04	18 08 17	1958	0,413	
548	pl-302611	54 34 12	18 01 59	1958	0,423	
549	pl-302612	54 32 17	18 17 53	1958	0,157	
550	pl-30271	54 43 01	18 24 22	1955	-0,078	
551	pl-30272	54 44 17	18 34 59	1955	-0,123	

Rekord: 1 z 8037

Widok Arkusz danych

Rys. 7.4. Tabela Deklinacja zawierająca punkty pomiarów magnetycznych i wartości wyznaczonych na nich elementów pola magnetycznego



Microsoft Access

Plik Edycja Widok Wstaw Format Rekordy Narzędzia Okno Pomoc

zdjecie 95-hu.sl : Tabela

numer	Nazwa	szerokosc	dlugosc	rok pomiaru	deklinacja	składowa pozi	wektor całkow	inklinacja
1	424Janik_(Sk)	48,578	20,911	1995	2,96	20501	48300	64,86
2	246Zsujta	48,507	21,3	1995	3,338	20592	48316	64,77
3	247Vilyitany	48,479	21,582	1995	9999	20424	48150	64,90
4	225Aggtelek	48,456	20,49	1995	2,823	20568	48260	64,77
5	243Szendrolad	48,371	20,789	1995	2,928	20614	48257	64,71
6	289Eperjeske	48,341	22,227	1995	3,336	20659	48341	64,
7	291Revleanyvar	48,322	22,047	1995	3,005	20660	48332	64,70
8	423Lenartovce	48,316	20,326	1995	2,736	20627	48182	64,65
9	248Felsodobsz	48,267	21,105	1995	2,945	20677	48260	64,63
10	231Sata	48,201	20,395	1995	2,776	20698	48179	64,55
11	420NSzeliscse	48,196	23,457	1995	3,563	20735	48386	64,62
12	259Beszterec	48,153	21,847	1995	3,207	20739	48290	64,56
13	280Takos	48,149	22,395	1995	3,302	20754	48336	64,57
14	425Zselovce_(S	48,129	19,373	1995	2,586	20715	48052	64,46
15	250Szerencs	48,126	21,147	1995	3,014	20757	48223	64,50
16	220Gesztele	48,125	20,946	1995	2,909	20766	48216	64,48
17	290Nyirkarasz	48,124	22,134	1995	3,285	20753	48292	64,54
18	287Vitka	48,08	22,297	1995	3,226	20768	48314	64,54
19	418Miskolc	48,075	20,455	1995	2,767	20787	48156	64,42
20	292Kotai	48,045	21,762	1995	3,128	20775	48222	64,4

Rekord: 1 z 319

Widok Arkusz danych

Rys. 7.5. Tabela – zdjęcie 95 hu,sl, zawierająca punkty pełnego zdjęcia magnetycznego z 1995 roku na Węgrzech i Słowacji

- wartość deklinacji magnetycznej [$^{\circ}$],
- wartości składowej poziomej pola geomagnetycznego [nT],
- wartość modułu wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego [nT],
- wartość inklinacji magnetycznej [$^{\circ}$].

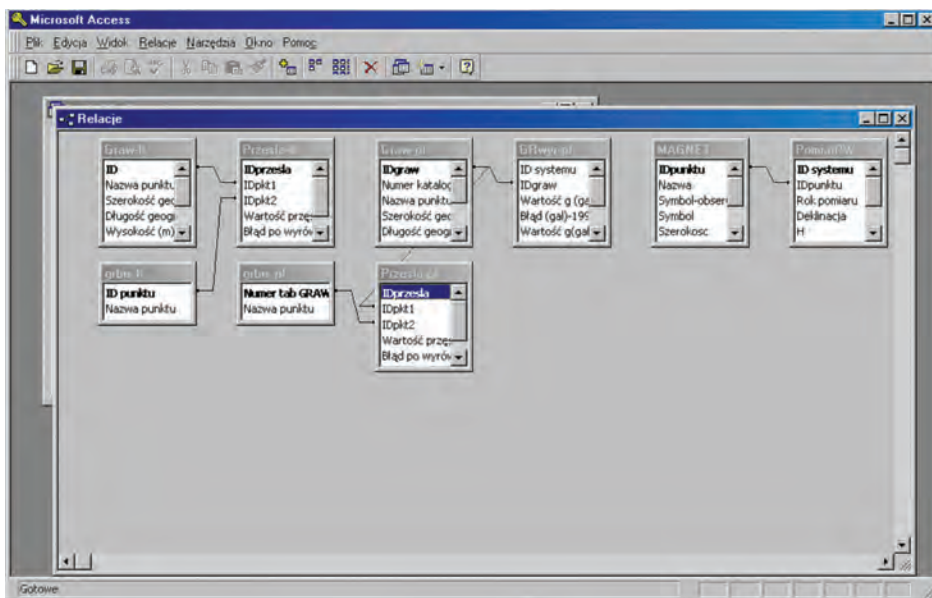
Wszystkie wartości elementów pola geomagnetycznego zredukowane są na środek roku.

Tabela *zdjecie 95hu,sl* (rys. 7.5) zawiera punkty i wartości z pomiarów nowego, pełnego zdjęcia magnetycznego węgierskiego i słowackiego z 1995 roku. Oprócz współrzędnych geograficznych punktu [$^{\circ}$] zapisane są pomierzone na nim wartości deklinacji D [$^{\circ}$], składowej poziomej H [nT], modułu F wektora całkowitego natężenia pola magnetycznego Ziemi [nT] i inklinacji I [$^{\circ}$] zredukowane na epokę 1995.5.

Tabele *dek2000-pl* i *dek2000-d* zawierają odpowiednio punkty pomiaru deklinacji magnetycznej Polski i obszarów sąsiednich zredukowane do epoki 2000.5 oraz punkty niemieckie (*dek2000-d*) zredukowane do tej samej epoki. Tabele oprócz nazwy (numeru) punktu i jego współrzędnych geograficznych [$^{\circ}$] zawierają tylko jedną kolumnę z danymi, w której zapisane są wartości deklinacji magnetycznej w stopniach. Szczegóły dotyczące redukcji polskich punktów zdjęcia magnetycznego z danych archiwalnych do epoki 2000.5 zawiera rozdział 8.

7.3. Wzajemne relacje między tabelami banku geofizycznego

Rysunek 7.6 pokazuje wzajemne powiązania między tabelami banku, ułatwiające tworzenie dowolnie skonfigurowanych raportów i kwerend.



Rys. 7.6. Wzajemne powiązania (relacje) między tabelami banku

Tabele *gr**** i *przesla*** zawierają dane dotyczące podstawowej osnowy grawimetrycznej Polski i Litwy, pomierzonej przez pracowników IGiK i wyrównanej pod koniec XX wieku.

8. REDUKCJA DANYCH MAGNETYCZNYCH

Ze względu na zmienność pola geomagnetycznego w czasie, wartości jego składowych, otrzymane w wyniku pomiarów terenowych, należy zredukować tak, aby mogły być wykorzystywane do opracowań magnetycznych w dowolnej epoce.

8.1. Metoda redukcji wartości elementów pola geomagnetycznego do dowolnej epoki – metoda wielomianowa

Na początku lat 1990. w IGiK opracowano metodę redukcji pomierzonych wartości elementów pola geomagnetycznego, opartą na analizie wcześniej wykonywanych prac (Żółtowski 1979, 1981). Metoda ta wykorzystywała dane z czterdziestoletnich obserwacji magnetycznych na punktach wiekowych i opisywała rozkład czasowo-przestrzenny zjawiska. Zakładała ona jednoczesne wyrównanie kilkuset równań (liczba punktów pomnożona przez liczbę obserwacji na nich wykonanych) i na ich podstawie wyznaczanie 18 współczynników wielomianu aproksymującego ten rozkład. Wartość elementu pola geomagnetycznego, otrzymanego w wyniku pomiaru, jest funkcją czasu (epoki pomiaru) oraz współrzędnych geograficznych miejsca pomiaru (punktu wiekowego) i można go zapisać za pomocą wzoru:

$$f(\varphi, \lambda, t) = a_1\varphi^2 + a_2\lambda^2 + a_3\varphi\lambda + a_4\varphi + a_5\lambda + a_6 + (a_7\varphi^2 + a_8\lambda^2 + a_9\varphi\lambda + a_{10}\varphi + a_{11}\lambda + a_{12}) \cdot t + (a_{13}\varphi^2 + a_{14}\lambda^2 + a_{15}\varphi\lambda + a_{16}\varphi + a_{17}\lambda + a_{18}) \cdot t^2 \quad (8.1)$$

gdzie (φ, λ) – współrzędne geograficzne punktu magnetycznego – wiekowego, t – epoka pomiaru, a_i – wyznaczone współczynniki.

Dla celów praktycznych przyjęto układ lokalny o współrzędnych początkowych $\varphi_0 = 52^\circ$ i $\lambda_0 = 19^\circ$ oraz epoce zerowej $t_0 = 1974.0$, co przełożyło się na ostateczny układ równań $f(x, y, t')$:

$$f(x, y, t') = a_1x^2 + a_2y^2 + a_3xy + a_4x + a_5y + a_6 + (a_7x^2 + a_8y^2 + a_9xy + a_{10}x + a_{11}y + a_{12}) \cdot t' + (a_{13}x^2 + a_{14}y^2 + a_{15}xy + a_{16}x + a_{17}y + a_{18}) \cdot t'^2 \quad (8.2)$$

gdzie:

$$x = (\varphi - \varphi_0)/dx$$

$$y = (\lambda - \lambda_0)/dy$$

$$t' = (t - t_0)/dt$$

oraz dx , dy – graniczne wartości różnic współrzędnych punktów i środka układu lokalnego w stopniach, dt – różnica lat między epoką pomiaru i epoką przyjętą jako zerową.

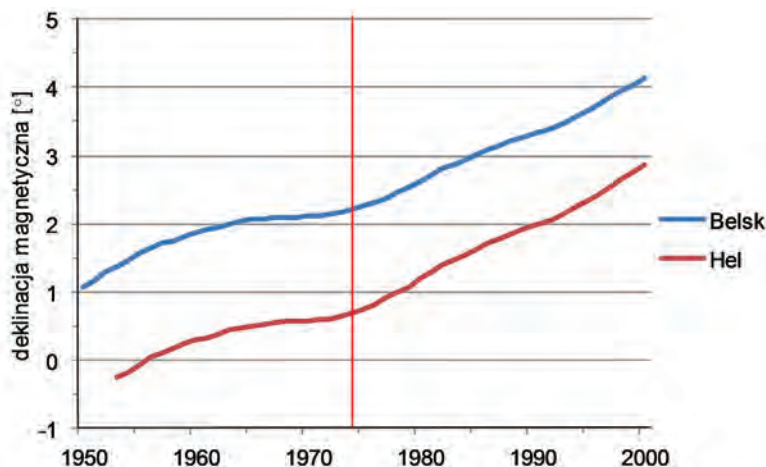
Na podstawie wyznaczonych metodą najmniejszych kwadratów współczynników wielomianu (8.2), opisującego zmiany przestrzenno-czasowe pola magnetycznego w obserwatoriach i na punktach wiekowych w wybranym okresie czasu, zredukowano wartości elementu pola magnetycznego z epoki pomiaru na dowolną, wybraną epokę opracowania. Możliwe jest także prognozowanie zmian wiekowych, ale z uwagi na przypadkowy charakter zmienności pola magnetycznego Ziemi, ekstrapolacja może dotyczyć najwyżej pięcioletniego okresu. Kolejne lata pomiarów dostarczały nowych danych, co skutkowało zwiększoną liczbą równań do rozwiązania. Proces obliczeniowy stawał się coraz bardziej czasochłonny i skomplikowany, a nie powodował podniesienia dokładności redukcji.

8.2. Przeliczenie wartości deklinacji magnetycznej na epokę 2000.5

Na początku XXI wieku, na podstawie rzeczywistych zmian deklinacji magnetycznej w latach 1952–2000 zaobserwowanych w polskich obserwatoriach magnetycznych, obserwatoriach krajów sąsiednich oraz na polskich punktach wiekowych, zredukowano wartości deklinacji zdjęcia magnetycznego z lat 1950. na epokę 2000.5. Powstały w ten sposób nowy zbiór został zweryfikowany poprzez zredukowanie go metodą wielomianów (Welker i Żółtowski, 1993b) oraz zaktualizowany nowymi pomiarami na punktach powtórnego zdjęcia magnetycznego (rozdz. 6). Stanowi on obecnie bazę wyjściową do dalszych opracowań magnetycznych, opierających się na znajomości rozkładu pola geomagnetycznego. W ten sposób znacznie uproszczono proces redukcji oraz uniknięto błędów wynikających z coraz trudniejszego dopasowania funkcji wielomianu do ciągu wieloletnich obserwacji.

Zmiany deklinacji magnetycznej zostały prześledzone na wszystkich polskich punktach wiekowych oraz w 6 obserwatoriach europejskich – Belsk i Hel (Polska), Niemegk (Niemcy), Lwów (Ukraina), Budkow (Czechy) oraz Hurbanowo (Słowacja). Analiza przebiegu rozkładu wyników pomiarów na wszystkich punktach pozwoliła na wyodrębnienie dwóch przedziałów czasowych, w których zmiany deklinacji D dają się opisać za pomocą różnych krzywych. Rysunek 8.1 pokazuje przebieg deklinacji magnetycznej w polskich obserwatoriach magnetycznych w badanym okresie oraz granicę zmiany jej trendu.

Od 1952 do 1973 roku zmiany deklinacji można opisać wielomianem 2-go stopnia, zaś zmiany deklinacji od 1973 do 2000 roku za pomocą funkcji liniowej. W przypadku braku pomiarów na punktach wiekowych w epokach wyznaczających wybrane przedziały czasowe obliczono dla nich wartości deklinacji na podstawie równań (8.2) lub korzystając z prostej zależności liniowej. Wartości otrzymane w wyniku pomiaru nie podlegały żadnym zmianom. W ten sposób powstał zbiór zawierający punkty wiekowe i obserwatoria, opisane współrzed-



Rys. 8.1. Zmiany deklinacji magnetycznej w polskich obserwatoriach w latach 1952–2000

nymi geograficznymi (j , l) z wartościami deklinacji pomierzonymi lub obliczonymi na nich dla epok 1952.5, 1973.5 i 2000.5. Na jego podstawie obliczono średnie roczne zmiany deklinacji na poszczególnych punktach w latach 1952–1973 oraz 1973–2000. Po odjęciu od nich zmiany deklinacji zarejestrowanej w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym IGF PAN w Belsku (przyjętym jako obserwatorium odniesienia), otrzymano dane pozwalające na opracowanie regularnych siatek punktów z rocznymi zmianami deklinacji magnetycznej, w stosunku do obserwatorium w Belsku, dla obszaru Polski w latach 1952–1973 i 1973–2000. Dysponując zbiorem z wartościami deklinacji na punktach archiwalnego zdjęcia magnetycznego oraz siatką zmian deklinacji magnetycznej uzyskanej z bezpośrednich pomiarów na obszarze Polski w latach 1952–2000, opracowano program, pozwalający wyinterpolować z siatki wartość zmiany rocznej dla dowolnego punktu, w stosunku do obserwatorium w Belsku, i w oparciu o serię danych z obserwatorium obliczyć dla tego punktu wartość zredukowaną od epoki pomiaru do epoki 2000.5 na podstawie wzoru:

$$D_{2000} = D_{\text{pom.}} + (E_{2000} - E_p) \Delta d + \Delta D \quad (8.3)$$

gdzie:

D_{2000} – wartość deklinacji obliczona na epokę 2000.5,

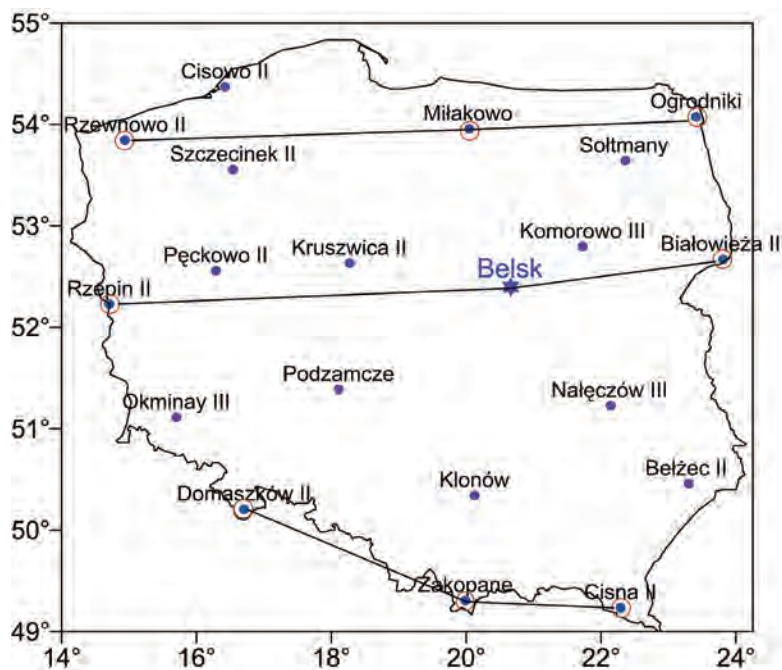
$D_{\text{pom.}}$ – wartość deklinacji pomierzona na punkcie osnowy,

E_p – epoka pomiaru,

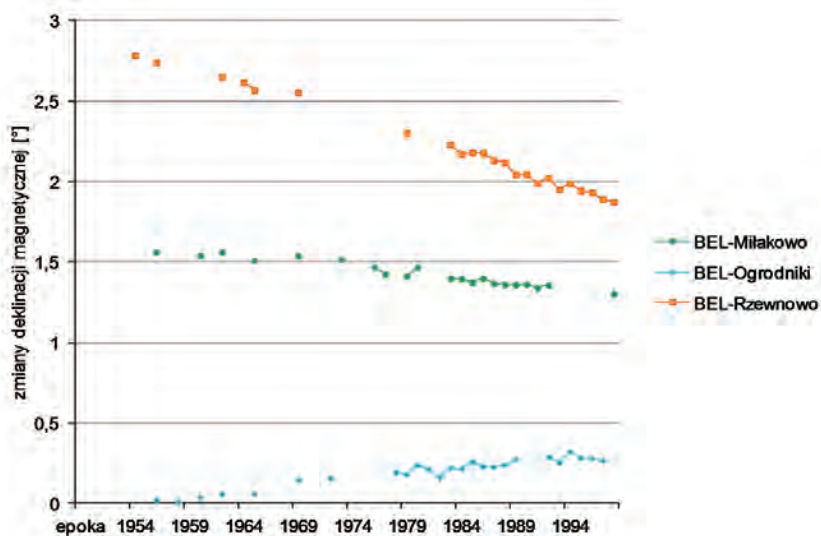
Δd – wartość zmiany rocznej otrzymana ze zbioru cyfrowego lub wyinterpolowana z mapki zmian, będąca funkcją położenia punktu,

ΔD – różnica zmiany deklinacji w obserwatorium w Belsku między epoką 2000.5 i epoką pomiaru.

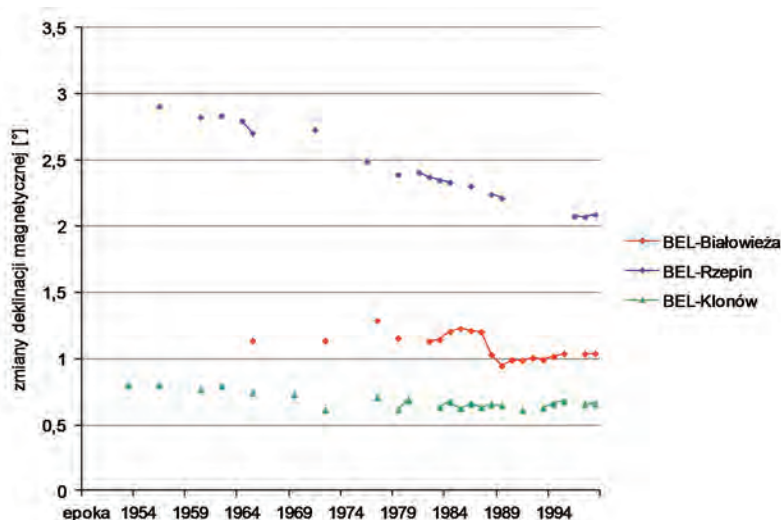
Na rysunku 8.2 pokazano punkty wiekowe wybrane do prezentacji zmian deklinacji magnetycznej leżące na liniach wschód – zachód, północ – południe, a na rysunkach 8.3, 8.4 i 8.5 obserwowane na nich zmiany deklinacji.



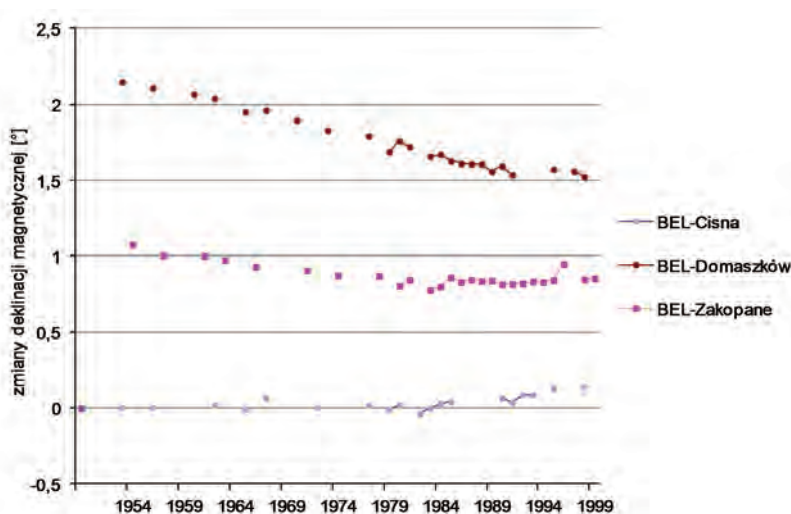
Rys. 8.2. Punkty wiekowe i obserwatoria polskie wybrane do prezentacji zmian deklinacji magnetycznej



Rys. 8.3. Zmiany deklinacji magnetycznej na linii „północnej”

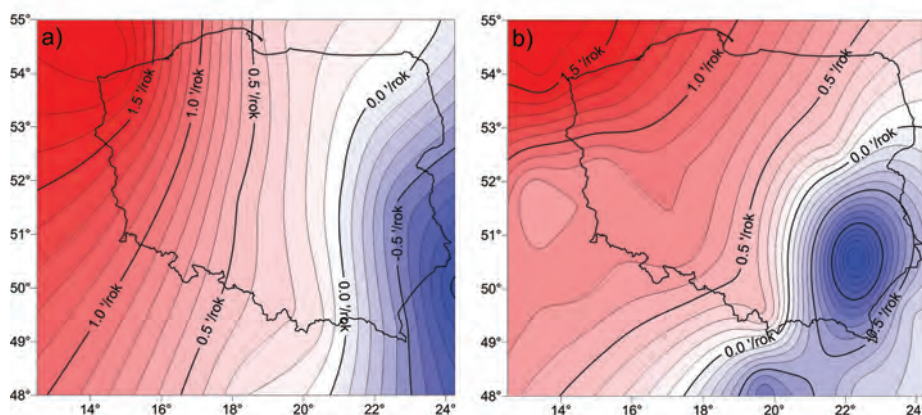


Rys. 8.4. Zmiany deklinacji magnetycznej na linii „centralnej”

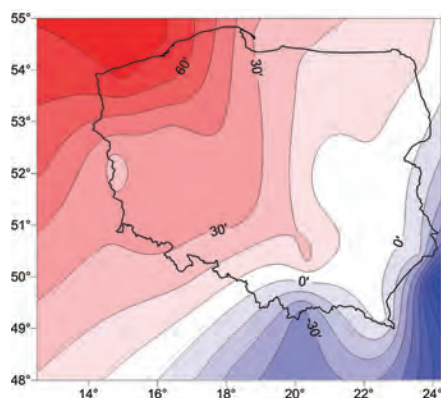


Rys. 8.5. Zmiany deklinacji magnetycznej na linii „południowej”

Rysunki 8.6a i 8.6b to przykładowe obrazy przebiegu rocznych zmian deklinacji magnetycznej względem Centralnego Obserwatorium Geofizycznego IGF PAN w Belsku na terenie Polski w latach 1952–1973 i 1973–2000. Rysunek 8.7 pokazuje całkowitą zmianę deklinacji względem obserwatorium w Belsku w całym rozpatrywanym 48-letnim okresie.



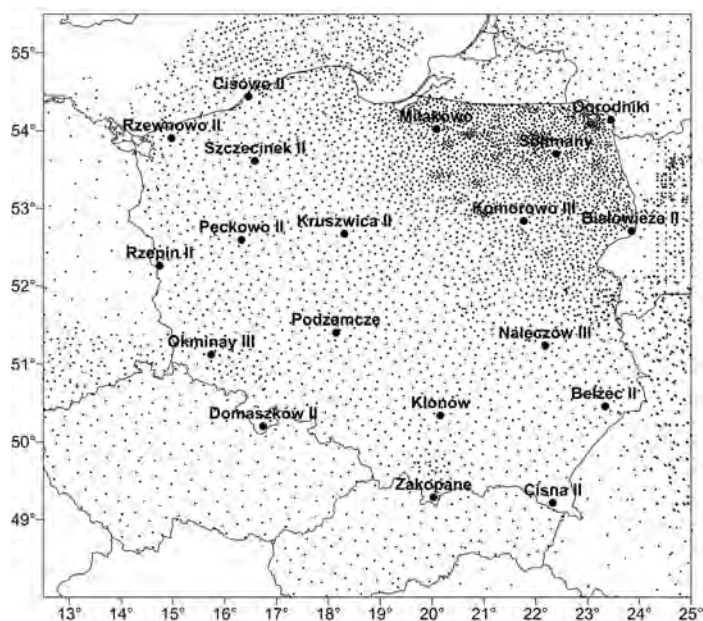
Rys. 8.6. Roczna zmiana deklinacji magnetycznej [$'$] na obszarze Polski względem obserwatorium w Belsku w latach: a) 1952–1973 i b) 1973–2000



Rys. 8.7. Całkowita zmiana deklinacji magnetycznej [$'$] względem obserwatorium w Belsku w latach 1952–2000

Wartości deklinacji na punktach archiwalnego zdjęcia magnetycznego, zredukowane w oparciu o obliczone siatki zmian, posłużyły do opracowania mapy deklinacji magnetycznej na epokę 2000.5. Taką samą mapę deklinacji opracowano na podstawie wartości na punktach zdjęcia, zredukowanych poprzednio opisywaną i używaną metodą wielomianową. W wyniku porównania przebiegu izolinii z obu opracowań (rys. 8.9) zaobserwowano największe różnice między wartościami deklinacji na punktach północno-zachodniego obszaru Polski: punkty wiekowe Pęckowo i Kruszwica. Te różnice są spowodowane prawdopodobnie małą liczbą pomiarów w tym rejonie, w okresie drugiej połowy XX wieku, oraz błędami przenoszenia serii obserwacji na punkt wiekowy po zmianie jego lokalizacji (punkty te były dwukrotnie przenoszone). Maksymalne różnice deklinacji magnetycznej wahają się wokół jej średniej zmiany rocznej, wynoszącej od $5'$

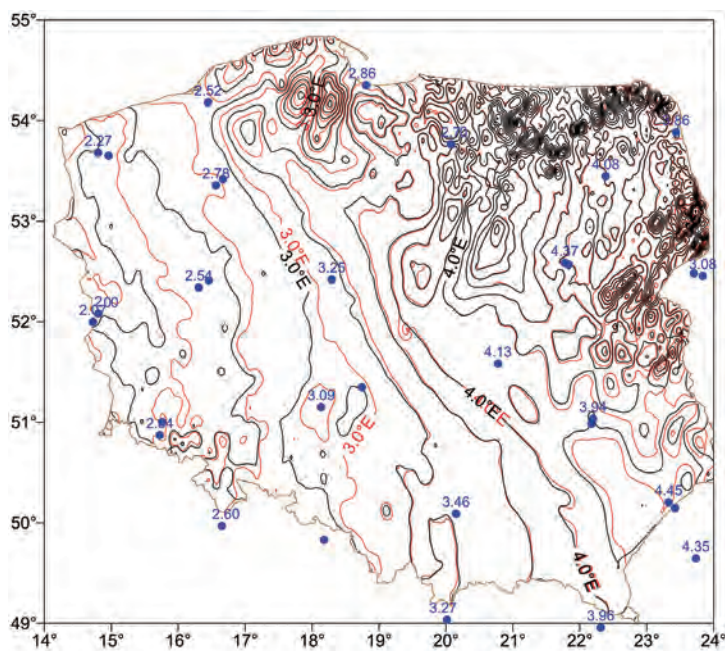
do 7'. Przy całkowitej zmianie D w ciągu półwiecza wynoszącej ponad 4° różnice te stanowią około 3% jej wartości i można potraktować je jako zanedbywalnie małe. Na mapę nałożono punkty wiekowe i obserwatoria z wartościami deklinacji magnetycznej otrzymanymi z pomiarów w 2000 roku. Jeszcze raz potwierdziło to słuszność przyjętego sposobu redukcji danych archiwalnych, gdyż zgodności między wartościami wyinterpolowanymi z mapy i otrzymanymi z pomiaru są bardziej zbliżone na mapie opracowanej na podstawie redukcji w oparciu o siatkę zmian.



Rys. 8.8. Punkty zbioru bazowego deklinacji magnetycznej 2000 na tle osnowy magnetycznej kraju

Podobnie, w oparciu o odpowiednio przygotowane siatki zmian, zredukowano wartości deklinacji magnetycznej na punktach Bałtyku oraz na punktach w krajach sąsiednich i dołączono je do zbioru zdjęcia magnetycznego 2000. Zbiór ten zapisany w banku danych geofizycznych IGiK (rozdz. 7) traktowany jest jako baza do dalszych opracowań pola geomagnetycznego. Składa się on z punktów pokazanych na rysunku 8.8 obejmujących:

- zredukowany na epokę 2000.5 zbiór zdjęcia magnetycznego Polski (z lat 1950.),
- zredukowane na epokę 2000.5 wyniki pomiarów na Bałtyku (z 1971 roku),
- zredukowane na epokę 2000.5 wartości deklinacji magnetycznej na punktach zdjęcia niemieckiego (z 1965 roku), czeskiego (z 1968 roku), słowackiego (z 1971 roku) i litewskiego (z 1936 roku),
- zredukowane do epoki 2000.5 dane archiwalne ze wschodnich terenów Polski przedwojennej, pomiary z lat 1936–1942 (Welker i Sas-Uhrynowski, 2004).



Rys. 8.9. Obraz deklinacji magnetycznej opracowany metodą wielomianową (kolor czarny) i za pomocą siatki zmian (kolor czerwony) z punktami wiekowymi i wartościami deklinacji z pomiarów w 2000 roku (kolor niebieski)

8.3. Redukcja deklinacji magnetycznej od epoki 2000.5 do dowolnej epoki na podstawie siatki zmian

Bazując na jednorodnym zbiorze deklinacji magnetycznej i na aktualnych wynikach pomiarów magnetycznych na punktach wiekowych i w obserwatoriach, do opracowania danych magnetycznych na dowolną epokę każdorazowo opracowuje się aktualną siatkę zmian elementu od epoki 2000.5 do epoki redukcji. Na tej podstawie, korzystając z opracowanego w IGiK programu, oblicza się średnią zmianę roczną odpowiednią dla konkretnego punktu opisanego współrzędnymi geograficznymi (obecnie coraz częściej współrzędnymi systemu GNSS). Zmiana ta, przemnożona przez różnicę lat między epoką pomiaru i epoką opracowania, a następnie dodana do odpowiedniej zmiany tego elementu w obserwatorium w Belsku, stanowi wartość zmiany elementu na punkcie pomiarowym w zadanym przedziale czasu. Dla każdego aktualizowanego elementu tworzy się osobną siatkę zmian.

Cały proces można powtórzyć dla pozostałych elementów pola geomagnetycznego i opisać za pomocą wzoru:

$$E_{akt} = E_{pom} + \Delta E_s(\varphi, \lambda) \cdot (eo - ep) + \Delta E_{obs}^{eo-epo} \quad (8.4)$$

gdzie:

E_{akt} – wartość zaktualizowanego elementu pola geomagnetycznego na epokę opracowania eo ,

E_{pom} – wartość elementu wyznaczona na punkcie w epoce pomiaru ep ,

$\Delta E_S(\varphi, \lambda)$ – wartość średniej zmiany rocznej elementu (względem obserwatorium w Belsku) odczytana ze zbioru gridowego – siatka odpowiednia dla konkretnego punktu o współrzędnych (j, l) ,

ΔE_{obs}^{eo-epo} – wartość zmiany opracowywanego elementu w obserwatorium odniesienia (Belsk) między epokami eo i ep .

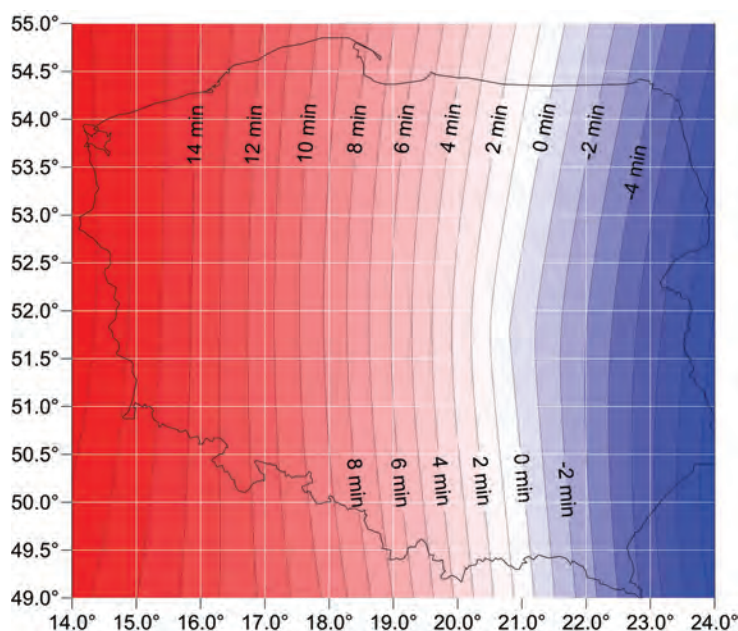
8.4. Poprawki redukcyjne

Zmiany elementów pola geomagnetycznego rejestrowane na różnych punktach magnetycznych mają różne amplitudy i są przesunięte w czasie, co jest związane głównie z ruchem Słońca. Pierwsze próby określenia rozkładu tych zmian na terenie Polski podjęte zostały przez zespoły IGiK i IGF PAN w latach 1954–1970. Były to prace pionierskie w Europie. Rozstawiono wtedy kilkanaście stacji polowych z wariografami Askania i Bobrova (rozdz. 4) rejestrującymi zmiany elementów D , H i Z . Opracowanie wyników z graficznych zapisów pomiarów nie pozwoliło na wyciągnięcie jednoznacznych i pewnych wniosków co do charakteru tych zmian (Jankowski i Królikowski, 1962). Być może wynikało to z krótkiego czasu pracy stacji nie przekraczającego 10–14 dni.

Na początku XXI wieku wyposażenie aparaturowe IGiK zostało wzbogacone o nowoczesny sprzęt do cyfrowej rejestracji polowych zmian elementów pola geomagnetycznego. Rozstawiono wtedy kilka stacji polowych rejestrujących lokalne zmiany składowych X , Y , Z pola w tym samym czasie, w którym wykonywano pomiary magnetyczne na punktach wiekowych leżących w bliskim sąsiedztwie stacji (Sas-Uhrynowski i in., 2006). Wyniki obserwacji na punktach wiekowych zredukowano bezpośrednio do obserwatorium w Belsku na podstawie magnetogramu i pośrednio poprzez wartości z zapisów na stacji polowej. Przyrost składowej między wartością zarejestrowaną w obserwatorium i na stacji obliczano jako różnicę odpowiednio dobranych średnich wartości nocnych. Wynikało to ze znacznie spokojniejszego przebiegu zmian elementów pola geomagnetycznego w godzinach nocnych. Wartości końcowe mierzonych elementów otrzymane z obu redukcji różniły się w granicach błędów pomiarów.

W latach 2010–2011 w ramach grantu Nr N N526 153237 *Określenie przestrzenno-czasowego rozkładu wariacji pola magnetycznego Ziemi na obszarze Polski i jego wpływu na wyniki pomiarów magnetycznych* rozstawiono w Polsce 15 stacji polowych pracujących od 3 do 5 miesięcy i rejestrujących zmiany składowych D , H , Z lub X , Y , Z (Welker, 2011). Uzyskano w ten sposób pełniejszy materiał do matematycznego opracowania. Zakładano, że przy wykorzystaniu nowoczesnej aparatury pomiarowej, przy długich i ciągłych rejestracjach będzie można wykonać mapy rozkładu zmian amplitud elementów pola geomagnetycznego oraz mapy przesunąć czasowych tych rejestracji na terenie Polski wzglę-

dem obserwatorium bazowego w Belsku. Po analizie danych i ich „oczyszczeniu” z błędów przypadkowych opracowano je przy wykorzystaniu szeregów Fouriera. Wyniki końcowe z analiz zmian amplitud składowych pola geomagnetycznego, względem obserwatorium w Belsku, wykazały przypadkowy ich charakter, a ich zakres wielkości $\pm 2\text{--}3$ nT mieści się w granicach błędów pomiarowych. Trudno więc opracować formułę eliminującą ich wpływ na wartości ostateczne opracowywanych pomiarów na punktach magnetycznych. Mapka przesunięcia czasowego rejestracji na terenie Polski względem obserwatorium bazowego (rys. 8.10) uzasadnia wprowadzanie do czasu obserwacji na punkcie magnetycznym poprawki czasowej od -6 do $+15$ minut w zależności od położenia punktu pomiarowego. W celu określenia wpływu tej poprawki na wartości końcowe opracowywanych składowych wykonano testy polegające na opracowaniu pomiarów magnetycznych wykonanych na punktach wiekowych skrajnie odsuniętych od obserwatorium odniesienia (maksymalne i minimalne wartości poprawek). Wprowadzenie do redukcji poprawek czasowych zmieniło wartości końcowe mierzonych elementów o wielkości mieszczące się w granicach błędów pomiarowych. Można więc przyjąć, że obserwacje na punktach magnetycznych leżących w odległości do 200–300 km od obserwatorium odniesienia mogą być redukowane bezpośrednio przy wykorzystaniu magnetogramu z obserwatorium. Nie zniekształca to ostatecznych wartości elementów pola geomagnetycznego wyznaczanych na punkcie pomiarowym, pod warunkiem że obserwacje będą wykonywane w czasie spokoju magnetycznego.



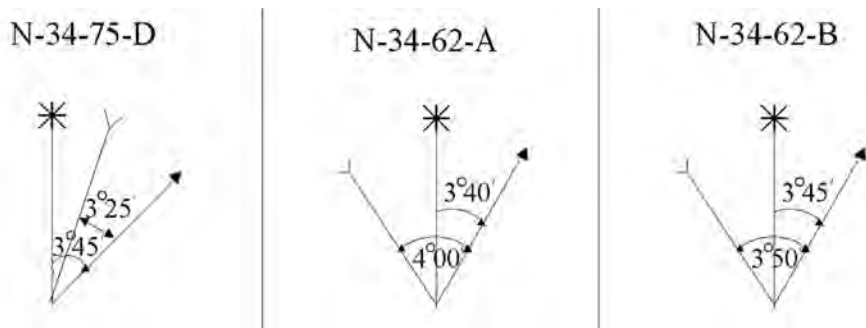
Rys. 8.10. Przesunięcie czasowe rejestracji deklinacji magnetycznej względem obserwatorium w Belsku

9. PRAKTYCZNE WYKORZYSTANIE WYNIKÓW POMIARÓW MAGNETYCZNYCH

9.1. Wykorzystanie aktualnych wartości deklinacji magnetycznej

Wyniki pomiarów magnetycznych mają praktyczne zastosowanie głównie w geofizyce i geologii oraz w geodezji, gdzie są przede wszystkim wykorzystywane do wykonywania map magnetycznych potrzebnych dla służb cywilnych i wojskowych.

W geodezji i w nawigacji największe znaczenie mają pomiary deklinacji magnetycznej D , gdyż właśnie deklinacja potrzebna jest do prawidłowego określenia kierunku północy magnetycznej. Praktycznym wykorzystaniem znajomości deklinacji magnetycznej było umieszczanie na mapach topograficznych odpowiednich rysunków (rozetek). Obraz takich rozetek opracowywany ostatnio dla arkuszy map w skali 1:50 000 pokazany jest na rysunku 9.1. Na rozetkach zaznaczony jest kierunek na północ geograficzną i północ magnetyczną (do wyznaczenia deklinacji) oraz kierunek na północ siatki kartograficznej (do wyznaczenia zbieżności południków). Wartości podawane na rozetkach to wartości deklinacji magnetycznej zwane inaczej wartościami zboczenia magnetycznego oraz wartości uchylenia magnetycznego czyli kąta między kierunkiem północy magnetycznej i północy topograficznej, obliczanego jako różnica wartości deklinacji i zbieżności południków.



Rys. 9.1. Obraz rozetek umieszczanych na mapach topograficznych z wartościami deklinacji magnetycznej i uchylenia magnetycznego (* – kierunek północy geograficznej, ✕ – kierunek północy magnetycznej, Y – kierunek północy topograficznej)

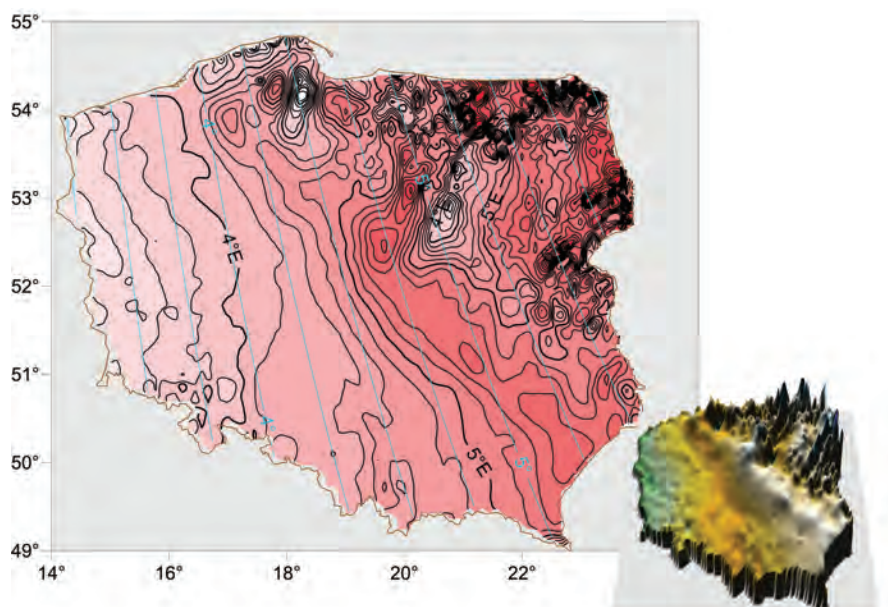
9.2. Mapy magnetyczne

9.2.1. Mapy deklinacji magnetycznej

Do zadań geodetów należy także opracowywanie aktualnych map deklinacji magnetycznej oraz map izopor – linii jednakowych rocznych, przewidywanych zmian deklinacji. Mapy muszą być oparte na wynikach z bezpośrednich pomiarów magnetycznych na punktach naziemnych, gdyż tylko takie pomiary uwidocznia

klinacji magnetycznej w celu wyznaczenia azymutu magnetycznego pasa startowego. Wartość ta, otrzymana po redukcji wyników obserwacji do obserwatorium magnetycznego, jest dla lotniska obowiązującym parametrem wprowadzanym do bazy danych. Lotniska dysponujące tarczą dewiacyjną potrzebną do prawidłowego ustawienia girokompasu i busoli w samolocie, też raz na 5 lat muszą mieć korygowane położenie wskaźnika północy magnetycznej na tarczy (Załącznik).

Aktualną mapę deklinacji magnetycznej Polski na epokę 2012.5 wraz z jej obrazem przestrzennym i izoliniami z modelu IGRF (niebieskie linie) przedstawia rysunek 9.3.



Rys. 9.3. Mapa deklinacji magnetycznej na epokę 2012.5 z izogonami IGRF (niebieskie linie) i jej obrazem przestrzennym

9.2.2. Atlas map magnetycznych Bałtyku

Od lat 1970. zespół IGiK aktywnie uczestniczył w pracach prowadzonych przez Oddział Instytutu Ziemijskiego Magnetyzmu Jonosfery i Propagacji Fal Radiowych Rosyjskiej Akademii Nauk IZMIRAN w St. Petersburgu, dotyczących pomiarów magnetycznych na Bałtyku. Były to pionierskie pomiary magnetyczne na morzu prowadzone na tak dużą skalę i obejmujące praktycznie cały akwen. Prowadzenie pomiarów magnetycznych na wodach wiąże się z trudnościami dotyczącymi przede wszystkim określenia lokalizacji punktu pomiarowego oraz możliwości ponownego wykonania pomiaru w tym samym punkcie (Mroczek i Sas-Uhrynowski, 1986). Należy także brać pod uwagę deformacje mierzonego przez aparaturę pomiarową pola geomagnetycznego spowodowane istnieniem na statku pól zakłócających. To wszystko jest źródłem wielu błędów, których

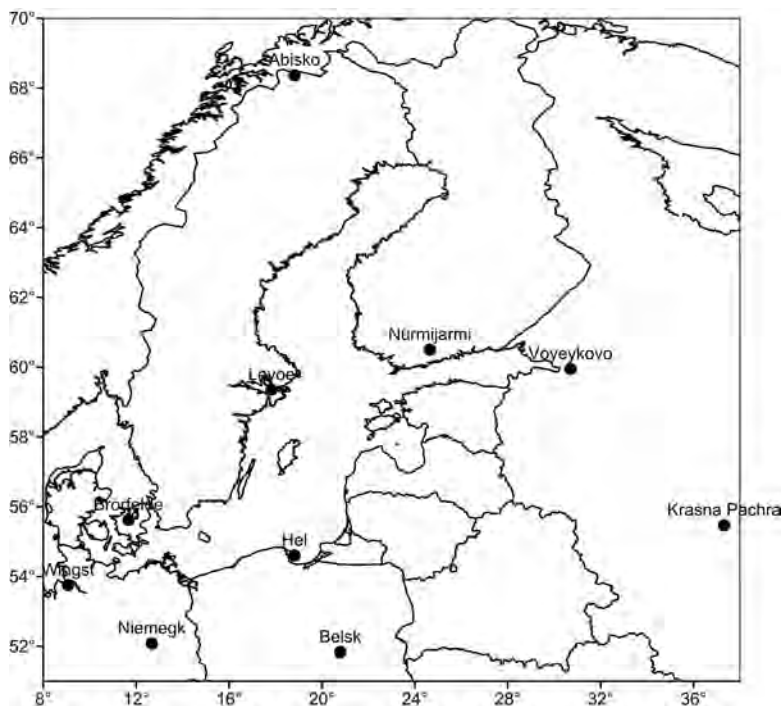
wplywu nie da się całkowicie wyeliminować, ale można je znacznie ograniczyć (Kasyanenko i Sas-Uhrynowski, 1995). Do pomiarów magnetycznych na Bałtyku wykorzystano, jedyny w tamtym czasie, szkuner niemagnetyczny „Zaria”, na którym wpływ pól zakłócających pole magnetyczne został zminimalizowany. Za pomocą specjalistycznej aparatury pomiarowej w czasie 9 ekspedycji wykonywano ciągłą, analogową rejestrację wartości czterech elementów pola geomagnetycznego: D , F , H , Z . Pomiary były wykonywane wzdłuż profilów, których całkowita długość wyniosła około 55 000 km, przy odległościach między profilami średnio około 5 km. Zdjęcie magnetyczne objęło obszar całego Bałtyku i zostało zakończone w 1990 roku (Sas-Uhrynowski i in., 2001). Ostatecznie dla obszaru Bałtyku uzyskano ponad 220 000 punktów z wartościami elementów pola geomagnetycznego. Zakłócenia pola geomagnetycznego, pochodzące od działających na statku urządzeń, eliminowano za pomocą poprawek dewiacyjnych, wyznaczanych dla każdego profilu. Uzyskane wyniki zostały poddane opracowaniu, które obejmowało:

- przejście z zapisu analogowego do cyfrowego,
- wyeliminowanie błędnych pomiarów (poprawki instrumentalne, dewiacyjne i wariacyjne),
- wprowadzenie poprawek dobowych w oparciu o dane z obserwatoriów i stacji geomagnetycznych,
- zredukowanie danych do jednolitej epoki,
- wykonanie oceny dokładności zgromadzonego materiału, na podstawie rozbieżności wartości otrzymanych w punktach przecięć profilów itp.

Wartości elementów pola geomagnetycznego na punktach zredukowano do epoki 1990.5, z wyjątkiem deklinacji magnetycznej, którą zredukowano na epokę 1995.5. Deklinacja jako składowa wykorzystywana w nawigacji, powinna być aktualizowana co 5 lat. Pozostałe składowe mogą być aktualizowane co 10 lat. Zmiany roczne dla Bałtyku zostały obliczone w oparciu o dane z obserwatoriów krajów nadbałtyckich oraz sieć polskich punktów wiekowych (rys. 9.4). Jako obserwatorium odniesienia przyjęto Obserwatorium Geofizyczne IGF na Helu. W wyniku opracowania otrzymano 18 współczynników pozwalających na redukcję dowolnej danej magnetycznej na dowolną epokę w dowolnym punkcie Bałtyku, określonym poprzez współrzędne geograficzne.

Na podstawie tych danych opracowano w IGiK atlas map magnetycznych Bałtyku. Pierwsza wersja atlasu powstała w 1998 roku i zawierała mapy magnetyczne na epokę 1990.5 z wyjątkiem mapy deklinacji, którą opracowano na epokę 1995.5. W 2006 roku wartości pomiarów magnetycznych na Bałtyku zostały zredukowane do nowej epoki 2005.5 i w oparciu o nie wykonano nową wersję atlasu. Atlas w postaci drukowanej oraz w wersji cyfrowej jest udostępniony w siedzibie IGiK (rys. 9.5). Zawiera on 10 map magnetycznych o następującej treści:

- mapa profili pomiarowych,
- mapa deklinacji magnetycznej D ,
- mapa modułu F wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego,



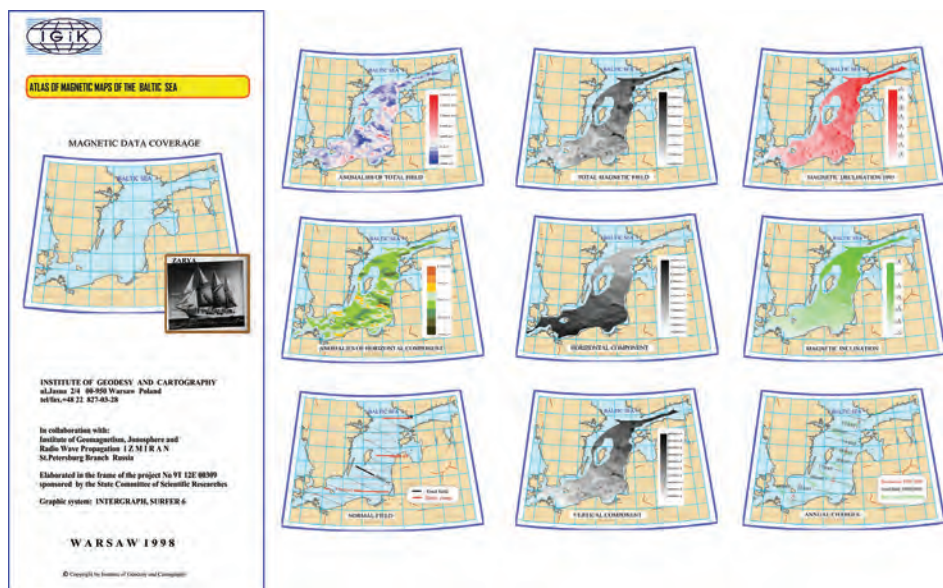
Rys. 9.4. Nadbałtyckie obserwatoria magnetyczne przyjęte do opracowania danych z Bałtyku

- mapa składowej poziomej H ,
- mapa składowej pionowej Z ,
- mapa inklinacji magnetycznej I ,
- mapa anomalii F ,
- mapa anomalii H ,
- mapa zmian rocznych D , F i H ,
- mapa pola normalnego F i H .

Mapy magnetyczne Bałtyku mogą być materiałem wyjściowym do analiz i interpretacji geologiczno-geofizycznych pozwalających na:

- badania rozkładu ziemskiego pola geomagnetycznego (Demina i in., 1996),
- wyznaczenie zalegania fundamentu krystalicznego Bałtyku i określenie namagnesowania jego warstw (Dąbrowski i Uhrzynowski, 1976),
- lokalizację rozłamów dna Bałtyku, zalegania grup skał ferromagnetycznych (Bilińska i in., 1979),
- wyznaczenie przebiegu strefy T–T w rejonie Bornholmu oraz wykorzystanie do innych prac geofizycznych.

Opracowany materiał jest niezbędny do korygowania i aktualizowania danych magnetycznych (szczególnie D) na nawigacyjnych mapach Bałtyku lub w bazach danych lotnictwa cywilnego lub wojskowego.

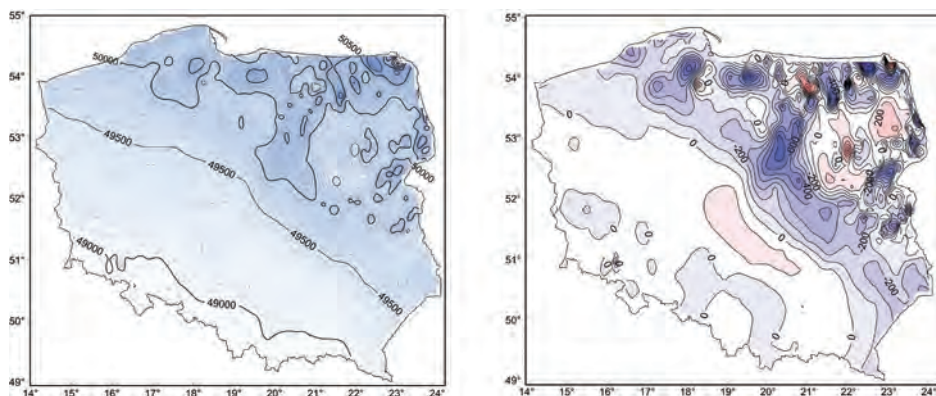


Rys. 9.5. Folder map atlasu magnetycznego Bałtyku na epokę 2005.5

Materiał pomiarowy pozyskany na Bałtyku w latach 1970–1990 jest pierwszym w świecie zbiorem morskich, kompleksowych i jednorodnych danych magnetycznych. Zarówno gęstość punktów pomiarowych, jak i dokładność ich magnetycznych wyznaczeń (10–30 nT) umożliwiają opracowanie map magnetycznych dowolnego fragmentu Bałtyku w skali do 1:200 000. Więcej szczegółów na temat pomiarów na Bałtyku i ich opracowania znajduje się w monografii (Sas-Uhrynowski i in., 2001).

9.2.3. Mapy magnetyczne opracowywane na potrzeby innych dziedzin

Wyniki pomiarów magnetycznych mają znaczącą wartość dla badań geofizycznych oraz w geologii poszukiwawczej. Geofizycy skupiają swoją uwagę głównie na wynikach pomiarów modułu F wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego, a dokładniej na anomaliach tej składowej. Jak już wspomniano anomalie regionalne i lokalne są to różnice między wartościami pola normalnego (otrzymanego z globalnego modelu matematycznego IGRF) i pola rzeczywistego (otrzymanego z wyników lokalnych pomiarów bezpośrednich). Anomalie te są wywołane obecnością w górnych warstwach skorupy ziemskiej skał o własnościach ferromagnetycznych, zakłócających pole geomagnetyczne. Znajomość rozkładu i wielkości tych anomalii ma praktyczne zastosowanie w geologii poszukiwawczej (rys. 9.6).



Rys. 9.6. Obraz izodynam dla epoki 2005.5 modułu F wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego (rysunek lewy) i jego anomalii (rysunek prawy) na terenie Polski [nT]

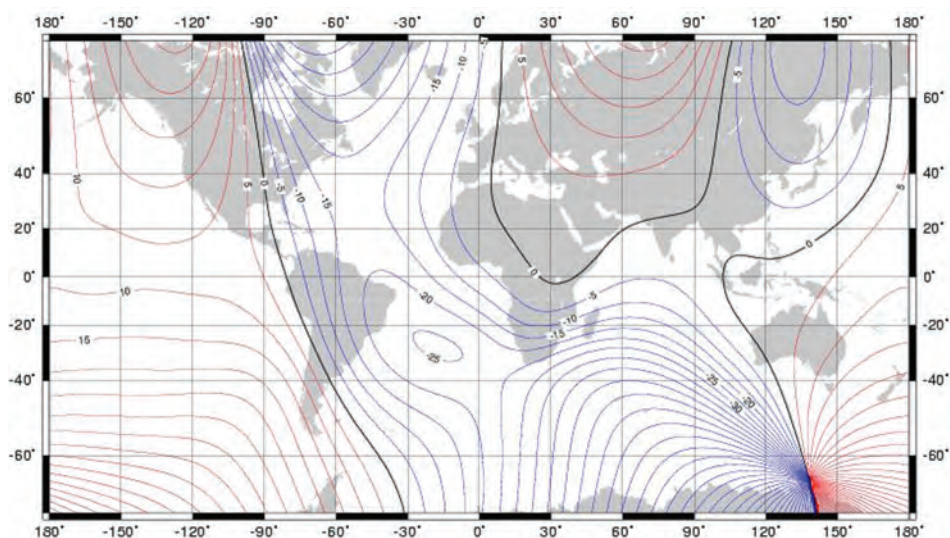
Pomiary deklinacji magnetycznej wykonuje się także w razie potrzeby na odwiertach geologicznych, stacjach radionawigacyjnych, w miejscach ustawiania anten kierunkowych itp. Wykonuje się także pomiary magnetyczne na profilach wybranych w rejonach objętych badaniami geofizycznymi lub geologicznymi, np. na linii T–T.

Jako ciekawostkę można podać wykorzystanie znajomości inklinacji i deklinacji magnetycznej do opracowywania symulacji tras migracji ptaków. Opracowany jeszcze w latach 1980. w IGiK program, po wczytaniu danych cyfrowych, opisujących aktualne izolinie inklinacji i deklinacji magnetycznej oraz po wprowadzeniu innych niezbędnych parametrów, przetwarzał je przy wykorzystaniu opracowanej przez ornitologów formuły matematycznej i „wykreślał” na ekranie komputera trasę przelotu ptaków z zadanego punktu globu, np. z północy Afryki, do miejsca gniazdowania.

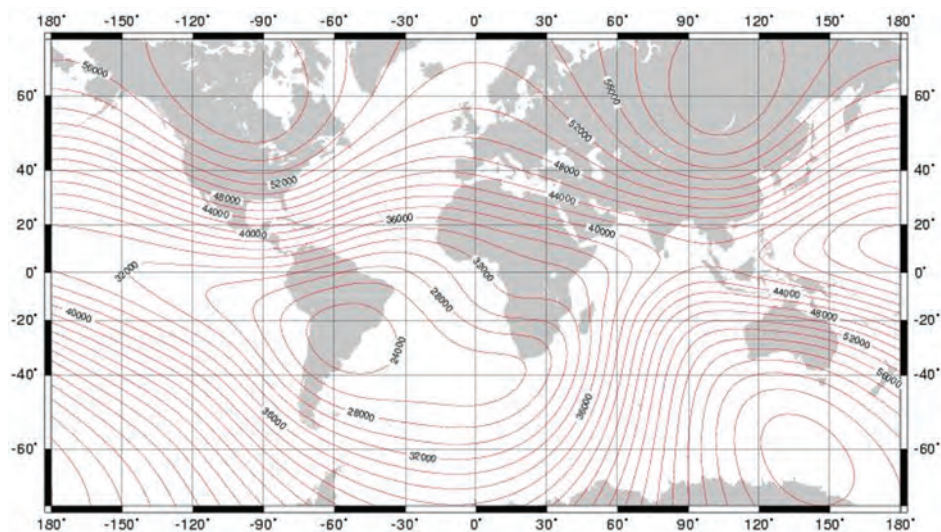
9.3. Modele matematyczne pola geomagnetycznego

Jak już opisano w rozdziałach pracy dotyczących punktów wiekowych i obserwatoriów magnetycznych, pomiary elementów pola magnetycznego Ziemi systematycznie wykonywane na punktach wiekowych i w obserwatoriach magnetycznych są wykorzystywane do opracowywania globalnych modeli pola magnetycznego Ziemi. Są one podstawą do badań charakteru pola geomagnetycznego, jego zmian wiekowych oraz do tworzenia map izopor niezbędnych do aktualizacji danych magnetycznych na dowolną epokę. Rysunek 9.7 przedstawia przykładową, światową mapę deklinacji magnetycznej na epokę 2005.5, otrzymaną z modelu IGRF.

Rysunek 9.8 przedstawia mapę izodynam modułu wektora natężenia całkowitego F z cięciem 2000 nT opracowaną według modelu WMM2005 (odzworowanie Mercatora).



Rys. 9.7. Mapa izogon deklinacji magnetycznej D (IGRF 2005)



Rys. 9.8. Mapa izodynam modułu wektora natężenia całkowitego F (WMM2005)

9.4. Pomiary magnetyczne na lotniskach

Zgodnie z wytycznymi europejskimi dotyczącymi funkcjonowania lotnisk, na każdym z nich powinien znajdować się punkt do pomiarów magnetycznych. Na tym punkcie raz na 5 lat należy wykonać bezpośredni pomiar deklinacji magnetycznej potrzebny do wyznaczenia azymutu magnetycznego pasa startowego.

Należy też wyznaczyć wartość zmiany rocznej deklinacji, potrzebną do jej aktualizowania w ciągu następnych 5 lat. Dokładny opis prac z tym związanych zawiera Załącznik.

Niektóre lotniska posiadają płytę dewiacyjną wykorzystywaną do sprawdzania pokładowych urządzeń nawigacyjnych. Płyta posiada zaznaczone kierunki magnetyczne i ze względu na przesunięcie kierunku północy magnetycznej w czasie, opisy należy także aktualizować co 5 lat. Opis pracy na tarczy dewiacyjnej zawiera Załącznik.

9.5. Atestacje i wzorcowania

Sprzęt do pomiarów magnetycznych, zarówno ten specjalistyczny, jak i powszechnie stosowany, musi być co najmniej raz w roku sprawdzany. Atestację busoli i pelengatorów lotniczych należy wykonać na stanowisku pomiarowym z wyznaczonym wcześniej kierunkiem na północ magnetyczną. Sprzęt specjalistyczny powinien być sprawdzany w Centralnym Obserwatorium Geofizycznym IGF PAN w Belsku. W wyniku pomiarów magnetycznych na wyznaczonych stanowiskach w obserwatorium, dla każdego instrumentu otrzymuje się poprawki, które są różnicą między wartością wyznaczoną z obserwacji a wartością wzorcową obserwatorium. Jeśli wartość poprawki przekracza połowę wielkości błędu pomiaru to należy ją uwzględniać podczas opracowywania wyników pomiarów terenowych. Procedury postępowania podczas wzorcowania i wzory formularzy atestacji zawiera Załącznik.

10. PODSUMOWANIE

Mimo, że pole magnetyczne Ziemi jest przedmiotem badań już od kilku wieków, pozostaje ciągle zjawiskiem nie do końca rozpoznanym. Teorie na temat źródeł jego powstania oraz przyczyn jego zmian wiekowych i regionalnych ciągle są weryfikowane. Szczególnie obecnie, od drugiej połowy XX wieku, szybki rozwój technik pomiarowych i coraz bogatszy materiał obserwacyjny ze specjalistycznych, geofizycznych satelitów pozwala na opracowywanie coraz dokładniejszych modeli globalnego pola magnetycznego oraz prognoz jego zmian wiekowych.

Dla małych obszarów takich jak obszar Polski, dane satelitarne mogą być jedynie wykorzystywane jako materiał porównawczy – weryfikujący wstępnie wyniki magnetycznych pomiarów naziemnych. Tylko systematycznie wykonywane pomiary magnetyczne na punktach wiekowych osnowy magnetycznej kraju oraz na wybranych punktach zdjęcia magnetycznego, pozwalają na dokładne określenie zmian wiekowych pola geomagnetycznego na terenie Polski. Jednocześnie tylko pomiary naziemne mogą ujawnić lokalne anomalie magnetyczne, co wiąże się z wyznaczeniem ich zasięgu i „głębokości”. Przykładowo anomalie deklinacji magnetycznej w północno-wschodniej części Polski dochodzą nawet do poziomu kilku stopni. Opracowania wyników naziemnych pomiarów magnetycznych z tego

terenu różnią się znacznie od opracowań opartych na danych z modeli pola magnetycznego Ziemi.

W wyniku pomiarów magnetycznych na punktach terenowych otrzymuje się bezpośrednie, momentalne wartości 3 niezależnych elementów pola geomagnetycznego: deklinacji D , inklinacji I i modułu F wektora natężenia całkowitego pola. Wartości te, ze względu na dobowy cykl zmian pola geomagnetycznego, zależą od momentu, w którym wykonywany jest pomiar. Po uwzględnieniu poprawek wariacyjnych, na podstawie zapisu stacji polowej lub zapisu z obserwatorium, wartości uzyskane w wyniku pomiaru redukuje się do Centralnego Obserwatorium Geofizycznego IGF PAN w Belsku. Obserwatorium to ze względu na swoje położenie w środku Polski może być wykorzystane do redukcji danych z całego obszaru kraju. Jak wykazały badania, błędy wynikające z przyjęcia takiego rozwiązania nie przekraczają dokładności samych pomiarów. W zależności od potrzeb, dla których wykonuje się pomiar magnetyczny wyniki jego opracowania redukuje się do wartości średniej dobowej, miesięcznej lub rocznej w obserwatorium bazowym. Związane jest to ze zmianą pola magnetycznego w czasie (cykle dobowe, zmiany wiekowe). Obecnie zmiany wiekowe pola magnetycznego Ziemi mają tendencję wzrostową, i tak np. średnia zmiana roczna deklinacji magnetycznej D dla Polski w epoce 2012 wyniosła $+8'$ podczas gdy na początku XXI wieku wynosiła $+5'$. W tym samym czasie zmiana roczna modułu F wektora natężenia całkowitego pola magnetycznego uległa zmniejszeniu z $+35$ nT do $+25$ nT.

Ciągły monitoring zmian wiekowych pola magnetycznego Ziemi na terenie Polski wymaga bezpośrednich, systematycznych pomiarów 3 niezależnych elementów pola geomagnetycznego na punktach wiekowych osnowy magnetycznej. Wyniki opracowań tych pomiarów są niezbędne do aktualizowania danych magnetycznych uzyskanych z pomiarów w różnych epokach. Aktualne wartości elementów pola geomagnetycznego, a w szczególności D i F , są wykorzystywane dla potrzeb niektórych służb cywilnych i wojskowych związanych z nawigacją lub badaniami geofizyczno-geologicznymi.

Nieprzewidywalność zmian wiekowych pola magnetycznego Ziemi wymusza opracowywanie globalnych modeli pola magnetycznego (np. IGRF) co 5 lat, a mimo to zdarza się, że 5-letnia prognoza musi być po 2-3 latach weryfikowana.

Na dokładność opracowywanych modeli wpływa w dużym stopniu ilość i jakość danych uzyskanych z pomiarów naziemnych, jak również z pomiarów morskich, satelitarnych, lotniczych i innych. W celu ujednolicenia sieci europejskich punktów wiekowych i wypracowania standardów pomiarów magnetycznych w Europie, powołano w 2003 roku grupę MagNetE, w skład której wchodzi ponad 20 krajów z naszego kontynentu. Są to kraje zarówno z pewną historią pomiarową na punktach wiekowych jak np. Polska (60-letni okres pomiarowy), Czechy, Słowacja (pomiarzy w latach 1950. i systematyczne od 1980 roku), Niemcy (pomiarzy systematyczne od lat 1980.), lub kraje z nowo założonymi osnowami (Litwa, Estonia, Mołdawia itp.). Co dwa lata odbywają się zjazdy, na których przedstawiane są aktualne raporty z pomiarów magnetycznych w krajach współ-

pracujących w ramach grupy. W latach 2009-2011 grupa MagNetE opracowała, na podstawie aktualnych danych deklinacji magnetycznej 2006, mapę deklinacji magnetycznej dla Europy (Duma i Leichter, 2011).

Coraz większa dostępność wyników pomiarów magnetycznych i coraz wyższa ich dokładność pozwala na lepsze opracowywanie prognoz zmian pola geomagnetycznego i na bieżące weryfikacje danych uzyskanych na podstawie globalnych modeli magnetycznych. Obecnie kraje o dużych obszarach (Niemcy, Francja), dysponujące aktualnymi danymi satelitarnymi tworzą własne modele matematyczne pola geomagnetycznego dobrze dopasowane do ich obszarów (Korte, 2011). Modele takie lepiej wpasowują się w model uzyskany z wyników pomiarów naziemnych i pozwalają na dokładniejszą ekstrapolację zmian pola geomagnetycznego. Jest to jednak ciągle prognoza zjawiska fizycznego i tak jak prognozy kierunków i tempa przesuwania się biegunów ziemskich lub prognozy meteorologiczne może sprawdzić się w większym lub mniejszym stopniu.

PODZIĘKOWANIA

Niniejsze opracowanie mogło powstać dzięki pracy i dorobkowi wszystkich pracowników pracowni Magnetyzmu Ziemskiego IGiK, obecnie Zakładu Geodezji i Geodynamiki. Wiele zadań wykonano w ramach grantów uzyskanych z Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego. Wszyscy uczestnicy tych prac przysłużyli się do rozwoju badań magnetycznych i ich wykorzystaniu w praktyce. Szczególne podziękowania należą się prof. dr hab. inż. Andrzejowi Sas-Uhrynowskiemu, który prawie całe zawodowe życie poświęcił badaniom pola geomagnetycznego. Nieoceniona wiedza, rady i sugestie profesora przyczyniły się do lepszego i pełniejszego opracowania monograficznego. Szczególnie jeśli chodzi o prace wykonywane w drugiej połowie XX wieku. Skarbnicą wiedzy z tego okresu okazał się także dr inż. Andrzej Marek Żółtowski. Jego wiedza i znajomość archiwum Instytutu pomogła w rozwiązaniu kilku problematycznych kwestii.

Podziękowania należą się także pracownikom Instytutu Geofizyki PAN i Centralnego Obserwatorium Geofizycznego PAN w Belsku, a szczególnie dr Januszowi Marianiukowi, dr Janowi Redzie, mgr inż. Mariuszowi Nesce i mgr inż. Mieczysławowi Rekowskiemu za przyjazną współpracę i wszelką pomoc związaną z atestacją i konserwacją aparatury pomiarowej oraz za pomoc w uruchomieniu rejestracji elementów pola magnetycznego Ziemi w Obserwatorium Geodezyjno-Geofizycznym IGiK Borowa Góra.

Wyrazy podziękowania kieruję pod adresem pani mgr Barbary Smal, kierownika biblioteki IGiK, za jej bezcenną pomoc w odszukiwaniu archiwalnych i współczesnych publikacji krajowych i zagranicznych wykorzystanych do opracowania monografii.

Ostateczny kształt praca uzyskała dzięki ogromnej pomocy prof. dr hab. Jana Kryńskiego. Jego merytoryczne i redakcyjne uwagi i sugestie okazały się bardzo celne i pozwoliły na pełne i spójne jakościowo opracowanie monografii.

11. BIBLIOGRAFIA

- Acker F.E., (1971): *Calculation of the Signal Voltage Induced in a Toroidal Proton-Precession Magnetometer Sensor*, IEEE Trans. Geosci. Electronics, GE-9, pp. 98-103.
- Askania-Werke A.G., (1953): *Magnetischer Reisetheodolit*, nr 1501/B, G, Berlin-Friedenau.
- Babour K., Mosnier J., Daignieres M., Vasseur G., le Mouel J.L., Rossignol J.C., (1976): *Geomagnetic Variation Anomaly in the Northern Pyrenees*, Geophysical Journal International, T. 45, pp. 583-600.
- Barracough D.R., de Santis A., (2011): *Repeat Station Activities*, Special Sopron Book Series 5, rozdz. 3, IAGA. M. Manda and M. Korte (eds.) Geomagnetic Observations and Models, IAGA Special Sopron Book Series 5, DOI 10.1007/978-90-481-9858-0_3, © Springer Science+Business Media B.V. 2011.
- Bartington, (1988): *Operation manual for MAG-01H theodolite Declinometer/Inclinometer for use with 010B theodolite*, serial nr 018 Onwards, Charlbury, England.
- Barton C.E., (1988): *Global and regional geomagnetic reference fields*, Exploration Geophysics, 19, pp. 401-416.
- Barton C.E., (1989): *Geomagnetic secular variation: direction and intensity*, The Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, (ed.) D.E. James Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 560-577.
- Barton C.E., (1991): *Standards and reporting for magnetic repeat station and data*, Materiały IAGA Working Group V-4 – Magnetic Surveys and Charts.
- Bauer L.A., Fleming J.A., Fisk H.W., Peters W.J., Barnett S.J., (1921): *Land magnetic observations, 1914-1920 and special reports*, Researches of the Department of Terrestrial Magnetism, IV, Carnegie Institution of Washington, Nr 175.
- Bauer L.A., (1923): *Chief results of a preliminary analysis of the Earth's permanent magnetic field*, Terrestrial Magnetism, T. 28, pp. 1.
- Beblo M., Schultz G., (1983): *On the reduction of time variations for geomagnetic repeat station measurement*, Geophysical Surveys, T. 6, Issue 3-4, pp. 323-332.
- Bilińska M., Karaczunowa M., Karaczun K., Uhrynowski A., (1978): *Magnetic map of Poland: anomalies of vertical component Z of the geomagnetic field, scale 1: 500 000*, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Bock R., Burmeister F., Errulat F., (1948): *Magnetische Reichsvermessung 1935.0*, Geophysikalisches Institut Potsdam, Akademie verlag Berlin, Nr 6, pp. 53.
- Champan S., Bartels J., (1940): *Geomagnetism*, Tom 1-2, Oxford Uni. Press, Oxford.

- Cook A.H., (1973): *Physics of the Earth and planet*, Mc Millan, London.
- Dąbrowski A., (1952): *Pomiary absolutne na punktach wiekowych w 1949 roku*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa, Biuletyn 82, pp. 21–42.
- Dąbrowski A., Uhrynowski A., (1976): *Budowa podłoża krystalicznego Południowego Bałtyku w świetle wyników zdjęcia magnetycznego z lat 1971–1972*, Kwartalnik Geologiczny, T. 20, Nr 3, pp. 473–484.
- Demina I.M., Kasyanenko L.G., Sas-Uhrynowski A., Siporski L., Fairhead D.J., Williams J., (1996): *Digital Bathymetric and Magnetic Model of the Baltic*, Materiały X Konferencji Naukowo-Technicznej nt. Zabezpieczenie działalności ludzkiej na morzu, Gdynia, T. 1, pp. 55–60.
- Demina I.M., Kasyanenko L.G., Sas-Uhrynowski A., (1998a): *On vector representation of secular variation of the geomagnetic field*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, Vol. XLV, Nr 96, Warsaw, pp. 73–107.
- Demina I., Kasyanenko L., Sas-Uhrynowski A., Welker E., (1998b): *Atlas of magnetic maps of the Baltic Sea*, XXIII EGU General Assembly, Nice, April 1998.
- Демина И.М., Фрарфонова Ю.Г., Сас-Ухрыновский А., Велкер Е., (2006): *Мировые аномалии главного магнитного поля Земли и динамическая модель их источников*, Геомагнетизм и Аэрономия, Т. 46, No 1, pp. 1–11.
- Dłuski S., Cynk B., (1933): *Pomiary elementów pola magnetycznego Ziemi na polskim wybrzeżu morza Bałtyckiego w roku 1932*, Prace Państwowego Instytutu Meteorologicznego, Nr 3, Warszawa, pp. 1–35.
- Duma G., (2009): *Magnetic repeat station measurements in Europe*, MagNetE–Report, Updata 2009-1, 4th MagNetE Workshop, Helsinki.
- Duma G., Leichter B., (2011): *The Magnetic Declination Chart 2006 of Europe - produced by MagNetE*, 5th MagNetE Workshop, Rome.
- Dziewulski W., (1912): *O pomiarach magnetycznych na ziemiach polskich*, Encyklopedia Polska, t. I, PAU, Kraków.
- Fisk H.W., (1931): *Isopors and isoporic movements*, Intern. Geodetic And Geophysical Union. Section Terr. Magn. Electr., Bulletin No 8, Stockholm Assembly 1930, Paris 1931, pp. 280–292.
- Hine A., (1968): *Magnetic Compasses and Magnetometers*, Adam Hilger Ltd., London.
- Janowski B.M., (1958): *Magnetyzm ziemski*, PWN, Warszawa.
- Jankowski J., Królikowski C., (1962): *On short variations of the geomagnetic field on Polish territory*, Acta Geoph. Pol., Vol. X, No 3, Warsaw, pp. 281–289.
- Jankowski J., Sucksdorf C., (1996): *Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice*, IAGA, Warsaw.
- Jędrzejewska A., Welker E., (2011): *The new aspect of the geomagnetic field variations in Poland*, 5th MagNetE Workshop on European geomagnetic repeat station survey, 9–11 May 2011, Rome.

- Kalinin J.D., (1946): *Geomagnitnoje wiekowyye wariacii w SSSR i wnutriennyye strojenie Ziemi*, Trudy Nauczno-issled. Uczreżdiennyy, Gidrometeoizdat.
- Kalinin J.D., (1953): *Geomagnitnoje wiekowyye wariacij i geomagnitnoje polie residualnoie*, Trudy Nauczno-issled. Uczreżdiennyy, Leningrad, Gidrometeoizdat, T. 9, Nr 3.
- Kalinowski S., (1930): *Wyniki spostrzeżeń magnetycznych w Świdrze 1921–1929*, Prace Obserwatorium Magnetycznego w Świdrze, Nr 4, Warszawa.
- Kalinowski S., (1933): *Zdjęcie magnetyczne Polski, Mapa zboczeń magnetycznych w Polsce na rok 1927*, Prace Obserwatorium Magnetycznego w Świdrze, Drukarnia Zakładów Wydawniczych M. Arct., S.A, Nr 5, pp. XXIX, 152, 4 mapy.
- Kania A., (1938): *Pomiary deklinacji magnetycznej w Obserwatorium Krakowskim*, Reprint 21, Cracow Observatory.
- Kasyanenko L.G., Uhrynowski A., (1995): *Determination of secular changes of the geomagnetic field overseas and oceans*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, Vol. XLII, No 91, pp. 7-94.
- Koehler J.A., (2004): *Proton Precession Magnetometers*, Rev 2, Comox, BC, Canada.
- Korepanov V., (2006): *Geomagnetic instrumentation for repeat station survey*, In: Rasson, Delipetrov (eds), pp. 145–166, AQ6.
- Korte M., Haak V., (2000): *Modelling European magnetic repeat station and survey data by SCHA in search of time-varying anomalies*, Physics of the Earth and Planetary Interior 122(2000), pp. 205-220.
- Korte M., Fredow M., (2001): *Magnetic repeat station survey of Germany 1999/2000*, Scientific Technical Report, GeoForschungsZentrum Potsdam 2001, pp. 1-4.
- Korte M., (2011): *Comparison of Germany from repeat station data to a recent global field model*, 5th MagNetE Workshop, Rome.
- Krassowski J., (1920): *O wyznaczeniu szerokości i zboczenia magnetycznego w Polsce w XVII wieku*, Sprawozdanie Polskiej Akademii Umiejętności, Kraków, pp. 121-129.
- Krzemiński W., (1952): *Analiza dokładności wyznaczenia deklinacji magnetycznej na 7 punktach wiekowych zmian magnetyzmu ziemskiego*, Praca dyplomowa, Katedra Geodezji Wyższej Politechniki Warszawskiej.
- Krzemiński W., (1954): *O niektórych problemach opracowania mapy izogon Polski*, Geodezja i Kartografia, T. 3, Nr 2, pp. 97-107.
- Krzemiński W., (1959): *Mapa izogon Polski 1955.0*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, Vol. VII, z. 1a, Warsaw, pp. 77.
- Krzemiński W., Uhrynowski A., Żółtowski A., (1960): *Observation of the net of secular variation stations in Poland*, PAN IGIK, XII IUGG General Assembly, Helsinki.

- Krzemiński W., Uhrynowski A., Żółtowski A., (1961): *Sieć magnetycznych punktów wiekowych w Polsce*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, T. VIII, Nr 2(18), Warszawa, pp. 93–154.
- Krzemiński W., Uhrynowski A., Żółtowski A., (1963a): *Sieć magnetycznych punktów wiekowych w Polsce (II)*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, T. X, Nr 2(22), Warsaw, pp. 90–120.
- Krzemiński W., Uhrynowski A., Żółtowski A., (1963b): *Mapa izogon Polski dla epoki 1961.0*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, pierworysy w skali 1:500 000, Warsaw.
- Krzemiński W., Uhrynowski A. (1969): *Standardy obserwatoriów magnetycznych Europy Wschodniej*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, T. XVI, Nr 3, pp. 65 – 89.
- Langel R.A., Hinze W.J., (1998): *The magnetic field of the Earth's Lithosphere*, Cambridge University Press.
- Lauridsen E.K., (1985): *Experiences with the DI-Fluxgate Magnetometer inclusive theory of the instrument and comparison with other methods*, Geophysical Papers of Danish Meteorological Institute, Nr R-71, Copenhagen, pp. 30.
- Małkowski Z., (1962): *The field research of magnetic variations in Poland*, Acta Geoph. Pol., Vol. X, No 1, Warszawa, pp. 63–68.
- Matzka J., (2005): *150 years of regional geomagnetic maps published by Johann von Lamont in 1895*, 2nd MagnetE Workshop, Warsaw.
- Maus S., Macmillan S., Chernova T., Choi S., Dater D., Golovkov V., Lesur V., Lowes F., Luhr H., Mai W., McLean S., Olsen N., Rother M., Sabaka T., Thomson A., Zvereva T., (2005): *The 10th generation international geomagnetic reference field*, Phys. Earth Planetary Intern., 151, pp. 320–322.
- McLean S., Macmillan S., Maus S., Lesur V., Thomson A., Dater D., (2004): *The US/UK World Magnetic Model for 2005–2010*, NOAA Technical Report NESDIS/NGDC-1.
- Mroczek S., Sas-Uhrynowski A., (1986), *Pomiary na morskich magnetycznych punktach wiekowych na Bałtyku*, Biuletyn Informacyjny BOINTE Geodezji i Kartografii, Nr 1, pp. 28–35.
- Mroczek S., Sas-Uhrynowski A., Welker E., Żółtowski A.M., (1996): *Magnetic secular variation network in Poland and result of observation in the period 1970–1990*, VII IAGA Workshop, Niemegk.
- Newitt L.R., Barton C.E., Bitterly J., (1996): *Guide for magnetic repeat station surveys*, International Association of Geomagnetism and Aeronomy, Working Group V-8, Boulder, Colorado.
- Olczak T., (1948): *Pomiary deklinacji magnetycznej w Krakowie*, Polska Akademia Umiejętności, Kraków.
- Olczak T., (1952): *Zmiany wiekowe magnetyzmu ziemskiego na ziemiach polskich w pięćdziesięcioleciu 1900–1950*, Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa, Biuletyn 82, pp. 5–20.

- Olczak T., (1955a): *Secular variation of the magnetic declination of Gdańsk*, Acta Geophysica Polonica, Vol. III, Nr 1, Warszawa, pp. 27–33.
- Olczak T., (1955b): *Jan Heweliusz i magnetyzm ziemski*, Postępy Astronomii, T. III, z. 2.
- Pochtàrev V.I., Mikhlin B.Z., (1985): *Taina Namagnichennoi Zemli*, Publ. House M, Pedagogika, 1985, Moscow.
- Reda J., Fouassier D., Isac A., Linthe H.J., Matzka J., Turbitt Ch.W., (2011): *Improvements in Geomagnetic Observatory Data Quality*, In (Eds.) M. Mandaand and M. Korte „Geomagnetic observations and Models”, IAGA Special Sopron Book Series 5, DOI 10.1007/978-90-481-9858-0_6, © Springer Science+Business Media B.V. 2011.
- Reda J., Neska M., Wójcik S., (2006-2013): *Results of Geomagnetic Observations Belsk, Hel Hornsund*, Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences, Warsaw (wydanie coroczne).
- Rishbeth H., (1996): *Guide to the World Data Center System*, General Principles World Data Centers Data Services, issued by the Secretariat of the IC-SU Panel on World Data Centers.
- Rotanova N., Odincov S., Sas-Uhrynowski A., Welker E., (2000), *The magnetic anomaly field over Poland and adjacent regions by using MAGSAT Satellite data*, Acta Geophysica Polonica, Instytut Geofizyki PAN, Vol. XLVIII, No. 2, pp. 223–240.
- Sas-Uhrynowski A., (1968): *Magnetometr protonowy*, Przegląd Geod., nr 4. Warszawa, pp. 131–132.
- Sas-Uhrynowski A., (1977a): *Badania zmian wiekowych magnetycznego pola Ziemi na terenie Polski*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, Vol. XXIV, Nr 2, Warsaw, pp. 3–33.
- Sas-Uhrynowski A., (1977b): *Izopory magnetycznego pola Ziemi w Polsce w okresie 1957–1971*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, Vol. XXIV, Nr 3, Warsaw, pp. 63–82.
- Sas-Uhrynowski A., (1984): *Podstawowa osnowa magnetyczna kraju*, Przegląd Geodezyjny, Nr 11, Warszawa, pp. 29–33.
- Sas-Uhrynowski A., (1992): *Zmiany wiekowe magnetycznego pola Ziemi w Polsce w latach 1971–1990*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, Vol. XXXIX, Nr 1, Warsaw, pp. 59–83.
- Sas-Uhrynowski A., Żółtowski A., (1980): *Adjustment of the Standards of Magnetic Observatories in Central and South-Eastern Europe*, Gerlands Beiträge zur Geophysik, Nr 6, Leipzig, pp. 527–533.
- Sas-Uhrynowski A., Ritter E., (1992): *Standards of Magnetic Observatories in Central Europe*, Gerlands Beiträge zur Geophysik, Nr 99, Leipzig, pp. 523–530.
- Sas-Uhrynowski A., Welker E., (1999): *Magnetic Maps of the Baltic Sea 1999*, Technika Poszukiwań Geologicznych-Geosynoptyka i Geotermia PAN, Vol. XXXVIII, z. 1(195), Cracow, pp. 94–95.

- Sas-Uhrynowski A., Welker E., Demina I., Kasyanenko L., (2000): *Atlas map magnetycznych Bałtyku*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, Vol. 47, z. 100, Warsaw, pp. 9–24.
- Sas-Uhrynowski A., Welker E., Demina I., Kasyanenko L., (2001): *Vector magnetic survey on the Baltic Sea by schooner „Zarya”*, Seria monograficzna IGIK, Nr 1/2001, Warszawa, pp. 1–108.
- Sas-Uhrynowski A., Welker E., Demina I.M., Farafonova J.G., (2002): *Modeling of the main geomagnetic field by set of optimal dipoles*, Proceedings of the 4th Oersted International Science Team Conference, Copenhagen, 23–27 September 2002, pp. 43–44.
- Sas-Uhrynowski A., Welker E., Demina I.M., Farafonova J.G., (2004): *Dipolowy model zmian wiekowych pola magnetycznego Ziemi*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, Vol. L, z. 107, Warsaw, pp. 85–108.
- Sas-Uhrynowski A., Kowalik B., Welker E., (2006): *Using of field variometer to survey at the magnetic repeat stations*, IAGA Symposium, Belsk.
- Sas-Uhrynowski A., Welker E., (2006): *Mapa deklinacji magnetycznej*, Geodeta, Nr 10/2006, Warszawa, pp. 50–55.
- Sas-Uhrynowski A., Welker E., (2008): *Secular variation of the geomagnetic field in Europe, 1995–2005*, Reports on Geodesy, Warsaw University of Technology, No 2 (85), pp. 71–79.
- Sas-Uhrynowski A., Welker E., (2009): *Secular variation of the geomagnetic field in Europe*, Geoinformation Issues, IGIK, Warsaw, Vol. 1, No 1, pp. 33–40.
- Schmidt A., (1922): *Die magnetische Declination in West und Ostpreussen*, Veroffentl. d. Preuss. Meteorol. Instituts, Nr 318, Berlin.
- Schultz G., Beblo M., Best A., Auster V., Gropius M., (1997): *Definitive results of the 1992.5 geomagnetic repeat station survey of Germany: normal field model and anomalies*, Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Vol. 49, No 1, pp. 21–33.
- Schultz G., Beblo M., Gropius M., (1997): *The 1982.5 geomagnetic normal field of the Federal Republic of Germany and the secular variation field from 1965 to 1992*, Deutsche Hydrographische Zeitschrift, Vol. 49, No 1, pp. 5–20.
- Shanahan T.J.G., McMillan S., (2009): *Status of Edinburgh WDC global survey data*, MagNetE Workshop, Helsinki.
- Slezevicius K., Saldukas I., (1941): *Magnetic Survey of Lithuania in 1936–1938*, Vilniaus Universiteto Matematikos – gamtos fakultetas, Vilnius, pp. 5–11.
- Socias I., Marín V., Covisa P., Domingo C., (2005): *Repeat Station Observation Using Variometer. An Example: Tardajos*, Proceedings of the 2nd Workshop on European Geomagnetic Repeat Station Survey 2004–2005, 6–8 April 2005, Warsaw (CD).

- Soffel H.C., Matzka J., (2005): *Johann von Lamont (1805–1879) his life and his Geomagnetic Charts for Bavaria, Western and Central Europe published between 1854–1859*, 2nd MagNetE Workshop, Warsaw.
- Stenz E., (1936): *Pomiary deklinacji magnetycznej w Krakowie*, Biuletyn Towarzystwa Geofizycznego, z. 13, Warszawa.
- St-Louis B.J., (ed), (2008): *INTERMAGNET Technical Reference Manual*, Version 4.4, Available at www.intermagnet.org.
- Uhrynowski A., (1962): *Field magnetic station of the Institute of Geodesy and Cartography in year 1959 in Rajgrad* (in Polish), Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, T. IX, No 2, Warsaw, pp. 109–132.
- Uhrynowski A., (1964): *About recording of variograph Gv3* (in Polish), Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, T. XI, No 2, Warsaw, pp. 36–62.
- Uhrynowski A., (1968): *Variations of geomagnetic field record using Variograph Bobrova* (in Polish), Guide of the Institute of Geodesy and Cartography (INTE), Warsaw, pp. 10–11.
- Uhrynowski A., (1972): *Analityczne wyznaczenie współczynnika termicznego magnetycznego wariografu polowego*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, T. XIX, Nr 2, Warsaw, pp. 3–13.
- Uhrynowski A., (1975): *Zdjęcie deklinacji magnetycznej Bałtyku Południowego na epokę 1971.5*, Materiały Konferencji NOT „Geodezja w Gospodarcie Morskiej”, Gdańsk, pp. 6.
- Welker E., Żółtowski A.M., (1993a): *Podstawowa sieć magnetyczna Kraju w służbie aktualizacji map i danych magnetycznych*, V Sympozjum nt. Współczesnych problemów podstawowych sieci geodezyjnych, Warszawa.
- Welker E., Żółtowski M., (1993b): *Normalne pole zmian wiekowych magnetyzmu ziemskiego na obszarze Polski*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, T. XL, z. 1(88), Warsaw, pp. 103–118.
- Welker E., Sas-Uhrynowski A., Obuchowski R., (2003): *Changes of magnetic declination in the period of 1941–2000 at the former eastern Polish and near-by territories*, Geodesy and Cartography, t. XXIX, Nr 4, Vilnius Gediminas Technical University Vilnius, pp. 106–115.
- Welker E., Sas-Uhrynowski A., (2004): *Zmiany deklinacji magnetycznej w okresie 1941–2000 na dawnych polskich terenach wschodnich*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, Vol. L, z. 106, Warsaw, pp. 5–25.
- Welker E., (2007): *Zmiana pola geomagnetycznego Ziemi w latach 1980–2005 na przykładzie dynamicznych modeli zmian jego dwóch wybranych elementów*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, Vol. 53, z. 111, Warsaw, pp. 47–63.
- Welker E., (2011): *The influence of Variations of the Earth's Magnetic Field Intensity on the Elaboration of Geomagnetic Observations in Poland*, Geoinformation Issues, Vol. 3, No 1(3), pp. 19–37, Warsaw.

- Żółtowski A.M., (1972): *Zdjęcie magnetyczne Polski na rok 1965.0*, Informator branżowy Ośrodka Informacji Technicznej i Ekonomicznej Geodezji i Kartografii, T. XVII, z. 2, pp. 19–21.
- Żółtowski A.M., (1979): *Numeryczna metoda aktualizacji zdjęcia deklinacji magnetycznej obszaru Polski*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, T. XXVI, z. 1(61), Warsaw, pp. 63–78.
- Żółtowski A.M., (1981): *Numeryczna metoda aktualizacji zdjęcia deklinacji magnetycznej obszaru Polski cz. II*, Proceedings of the Institute of Geodesy and Cartography, T. XXVIII, z. 1(67), Warsaw, pp. 3–18.
- Verzeichnis der Deklinationswerte für das Gebiet des ehemaligen Staates Polen und Isogonenkarte, Jahresmittelwerte 1941, Kr. Kart. U. Verm. Amt Warschau 1942.
- INTERMAGNET <http://ottawa.intermagnet.org>; www.geomag.bgs.ac.uk

SUMMARY

The Earth's magnetic field as a physical phenomenon changing in time requires constant monitoring and investigation of the origin and nature of the changes. Chapter 1 presents the theory (hypothesis) the generation of the Earth's magnetic field and sources of its long- and short-term changes. These changes are determined using data records from the magnetic observatories and repeat stations as well as permanent variation stations. This data as well as data from all other magnetic measurements (satellite data, marine, aviation, etc.) is used to develop global models of the Earth's magnetic field, such as IGRF.

Chapter 2 is devoted to the presentation of magnetic observations in Polish territory since Hevelius to the present day. More attention was paid to the activities in the field of magnetic measurements in the period between World War I and World War II, especially to the activities of prof. Kalinowski and his involvement in the establishment of a magnetic observatory in Swider. In the second half of the 20th century fast development of activities related to the design and establishment of magnetic networks in post-war Poland is observed. Researchers of the Institute of Geodesy and Cartography, Warsaw, not only participated in them but also provided professional supervision. They also carried out magnetic measurements according to procedures developed by them. Magnetic declination surveys conducted 1950. in Poland are the basis for developing charts of magnetic declination (Chapter 6). Also in 1950. the basic geomagnetic control with repeat stations at which regularly every 2-3 years are made absolute measurements of three independent components of the Earth magnetic field (Chapter 5) was established. All magnetic points were stabilized in accordance with the standards presented in Chapter 4. All magnetic measurements were carried out using specialized equipment (Chapter 3) according with procedures described in Chapter 4. Initially, in the years 1950–1980, magnetic declination was measured with the use of declinator, horizontal component H – with QHM, and vertical component Z with the so-called magnetic weight. Currently, Flux-Gate D/I magnetometer is applied for the measurements of declination and inclination and proton magnetometer – for the measurements of the module F of the total intensity vector of the geomagnetic field.

In 1990., all the data from magnetic measurements acquired in Poland were stored in geophysical database developed in the Institute of Geodesy and Cartography. The magnetic measurements from repeat stations in neighbouring countries, and the average annual values of the geomagnetic field components recorded in the magnetic observatories of Europe are also stored at the database. Database tables are described in Chapter 7.

Data from magnetic measurements stored in the database of geophysical data are used to study secular changes of the geomagnetic field (normal field model development) in Poland and to develop charts of magnetic declination at the

appropriate epoch. Data from different periods should thus be reduced to the epoch of the study. Polynomial, spatio-temporal method of reduction of magnetic data compiled by the staff of the Institute of Geodesy and Cartography is described in Chapter 8

The practical ways of using the results of magnetic measurements and their processing as charts, models or normal fields or as rosettes placed on topographic maps are described in Chapter 9. The magnetic declination changes are systematically verified at domestic airports and attestation of their compasses.

The atlas of magnetic map of the Baltic Sea for epoch 1990.5 developed in the Institute of Geodesy and Cartography in 1998, and then modernized and reduced to the epoch 2005.5 was described. This work was the result of a collaboration between the Institute of Geodesy and Cartography and Russian Institute LOIZMIRAN, performing measurements of 4 components of geomagnetic field on a special schooner “Zarya” in the years 1970–1990. Reduced to one epoch components of the geomagnetic field from more than 220 000 points were used to develop the atlas maps.

An attempt to separate and describe the main parameters of the dipoles generate magnetic fields of the Earth was made within the common project of the Institute of Geodesy and Cartography, Warsaw, and LOIZMIRAN. Although it was a typical inverse problem, the optimum solution was obtained after thousands of iterations due to the use of a relatively fast computer. We examined Trajectories in the 20th century of the 14 main dipoles generating the largest continental magnetic anomalies were investigated and an attempt of modeling their movements was made. Unfortunately, the results were not satisfactory because the variability of Earth’s magnetic field was not found possible to describe with the mathematical formula.

In conclusion, the need for constant monitoring the changes of Earth’s magnetic field, and therefore the implementation of systematic measurements in the observatories not only but also at Europe repeat stations has been stressed. The increasing use of satellite data will certainly contribute to a better understanding of internal and external sources that generate the Earth’s magnetic field, but they cannot substitute direct terrestrial magnetic measurements.

The measurement procedures used at the points of magnetic networks, airports and other selected objects as well as procedures used for attesting magnetic instruments are described in the Appendix. There are also presented the forms for magnetic measurements and sheets for attestation of magnetic instruments.

ZAŁĄCZNIK

POMIAR DEKLINACJI I INKLINACJI MAGNETYCZNEJ, WZORCOWANIA, WZORY DZIENNIKÓW POMIAROWYCH

Spis treści:

1. Procedury pomiarowe stosowane w czasie pomiarów elementów D , I i F pola geomagnetycznego
 - 1.1. Wyznaczenie kierunku na północ magnetyczną magnetometrem Flux-Gate D/I
 - 1.2. Wyznaczenie kierunku na północ geograficzną
 - 1.3. Wyznaczenie inklinacji magnetometrem Flux-Gate D/I
 - 1.4. Wyznaczenie kierunku na północ magnetyczną za pomocą deklinatora
 - 1.5. Pomiar modułu F wektora natężenia całkowitego pola magnetycznego Ziemi
 - 1.6. Ustawienie sondy i przygotowanie magnetometru LEMI do rejestracji ciągłego zapisu zmian elementów pola geomagnetycznego na stacji pomiarowej
2. Procedury zalecane dla pomiarów magnetycznych na lotniskach
 - 2.1. Procedury wzorcowania i atestacji tarcz dewiacyjnych
 - 2.2. Procedury pomiarów na punktach magnetycznych lotnisk
3. Procedury zalecane przy wzorcowaniu instrumentów do pomiarów magnetycznych
 - 3.1. Procedury wzorcowania busoli (pelengatorów)
 - 3.2. Procedury wzorcowania magnetometru protonowego
 - 3.3. Procedury wzorcowania magnetometru Flux-Gate D/I
4. Wzory dzienników do pomiarów magnetycznych

1. PROCEDURY POMIAROWE STOSOWANE W CZASIE POMIARÓW ELEMENTÓW D , I I F POŁA GEOMAGNETYCZNEGO

1.1. Wyznaczenie kierunku na północ magnetyczną magnetometrem Flux-Gate D/I

Na punkcie wskazanym do wykonania pomiarów magnetycznych najpierw wykonuje się pomiar deklinacji magnetycznej. Obliczony z pomiaru kierunek północy magnetycznej potrzebny jest do ustawienia sondy przy pomiarze inklinacji.

Po wykonaniu odczytu koła poziomego teodolitu przy lunecie skierowanej na cel ziemski, lunetę ustawia się w poziomie. Wszystkie następne obserwacje wykonuje się przy poziomym położeniu lunety, które przed każdą obserwacją musi być sprawdzone na kole pionowym (odczyt koła pionowego 90° lub 270°). Odczyty koła poziomego wykonuje się przy ustawieniu osi sondy, a tym samym lunety, prostopadłe do południka magnetycznego. Po ustawieniu lunety z grubsza równoległe do kierunku wschód-zachód, włącza się magnetometr i tak obraca się teodolit, aby na monitorze magnetometru pokazały się zera. Oznacza to, że oś sondy jest prostopadła do południka magnetycznego. Po dodaniu do odczytu koła poziomego teodolitu odpowiednio $+90^\circ$ lub -90° , otrzyma się odczyt koła, przy którym luneta będzie skierowana na północ magnetyczną (Bartington, 1988).

Z uwagi na to, że praktycznie nie da się umocować sondy idealnie równoległe do osi optycznej lunety, w celu wyeliminowania kolimacji, obserwacje wykonuje się w czterech możliwych poziomych położeniach sondy a, b, c, d, pokazanych na rysunku 4.7:

- a – sonda w górnym położeniu i luneta skierowana na zachód;
- b – sonda w górnym położeniu i luneta skierowana na wschód;
- c – sonda w dolnym położeniu i luneta skierowana na wschód;
- d – sonda w dolnym położeniu i luneta skierowana na zachód.

W każdym położeniu sondy teodolit obraca się tak, aby na monitorze pojawiło się zero. W tym momencie odczytuje się na zegarze czas oraz dokonuje się odczytu koła poziomego. Po wykonaniu obserwacji oblicza się wstępnie średnią wartość odczytu, którą przyjmuje się jako miejsce północy magnetycznej na kole w pierwszym momencie obserwacji.

Ostateczną średnią wartość odczytu oblicza się po wprowadzeniu poprawek do odczytów koła poziomego przy obserwacjach b, c i d, uwzględniających wariacje deklinacji magnetycznej, jakie miały miejsce w czasie obserwacji. Poprawki te oblicza się na podstawie danych z obserwatorium magnetycznego lub z rejestracji polowej stacji wariograficznej, uruchamianej na czas obserwacji w rejonie przeprowadzanych pomiarów.

Azymut magnetyczny celu ziemskiego w momencie obserwacji otrzymuje się przez odjęcie od odczytu koła przy lunecie skierowanej na cel ziemski, wartości odczytu przyjętego jako miejsce północy magnetycznej na kole (rys. 1).

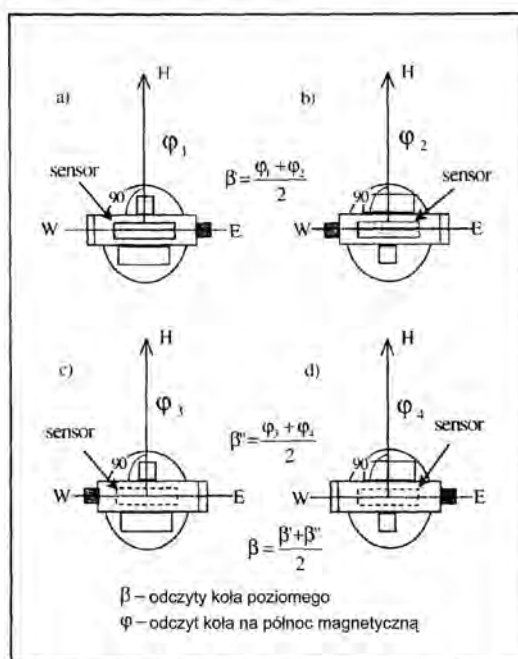
1.2. Wyznaczenie kierunku na północ geograficzną

Obserwacje Słońca polegają na zanotowaniu momentu przejścia obrazu Słońca przez nitkę pionową w okularze teodolitu i zanotowaniu odczytu koła poziomego teodolitu dla tego momentu. Obserwacje te mają na celu wyznaczenie azymutu geograficznego Słońca A_S , który oblicza się jako funkcję współrzędnych miejsca obserwacji i kąta godzinnego Słońca t czyli czasu (rozdz. 4 – wzór 4.1).

Azymut geograficzny celu ziemskiego A_G oblicza się ze wzoru:

$$A_G = A_S - (H_S - H_C)$$

gdzie H_S i H_C są odczytami koła poziomego teodolitu przy wycelowaniu lunety odpowiednio na Słońce i na cel ziemski.



Rys. 1. Położenia lunety z sondą przy wyznaczaniu kierunku na północ magnetyczną (widok z góry)

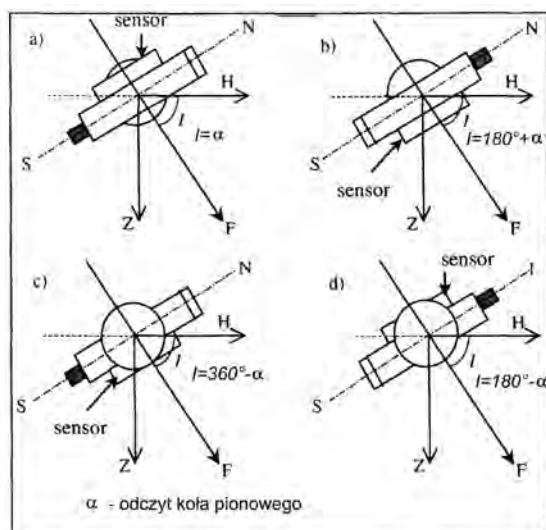
Wartość obliczonego azymutu Słońca odjęta od odpowiadającego mu odczytu koła poziomego wskaże na kole miejsce północy geograficznej. Kąt zawarty między tym kierunkiem a kierunkiem na cel ziemski jest azymutem geograficznym tego celu. W ten sposób kierunek na północ geograficzną jest niejako „zastabilizowany”, co pozwala na jego odtworzenie, np. w razie podjęcia prac po przerwie.

Moment przejścia obrazu Słońca przez nitkę pionową w okularze teodolitu wystarczy wyznaczyć z dokładnością 0.5 sekundy. Można to osiągnąć jeśli zaobserwuje się moment wejścia krawędzi tarczy Słońca na nitkę a zaraz potem, po odpowiednim skręceniu teodolitu, moment zejścia z nitki krawędzi przeciwległej. Do obliczenia azymutu przyjmuje się średni moment i średni odczyt koła poziomego teodolitu dla tych obu momentów. Przy pewnej wprawie i wykonaniu kilku (6–10) serii obserwacji w obu położeniach lunety teodolitu, azymut można wyznaczyć w ciągu kilku minut, z dokładnością 5–8 sekund łuku, zwłaszcza przy obserwacjach wykonanych rano lub wieczorem, kiedy horyzontalna składowa ruchu Słońca jest najmniejsza. Przykład dziennika do zapisywania wyników obserwacji Słońca znajduje się w rozdziale 4. Wyposażenie zespołu pomiarowego w rocznik astronomiczny i w przenośny komputer z odpowiednim programem obliczeniowym umożliwi obliczenie wartości pomierzonego azymutu natychmiast po wykonaniu obserwacji.

1.3. Wyznaczenie inklinacji magnetometrem Flux-Gate D/I

Do ustawienia lunety w płaszczyźnie południka magnetycznego służy wyznaczona już podczas pomiaru deklinacji wartość odczytu koła, przyjęta jako położenie miejsca północy magnetycznej. Położenie lunety w południku magnetycznym sprawdza się na kole poziomym przed każdą obserwacją. Na kole powinien być odpowiednio odczyt miejsca północy lub odczyt różny od niego o 180° (Bartington, 1988).

Obserwacje wykonuje się również w czterech położeniach sondy a, b, c, d, które zostały pokazane na rysunku 4.9:



Rys. 2. Położenia lunety z sondą przy wyznaczaniu inklinacji magnetycznej (widok z boku z kierunku W-E)

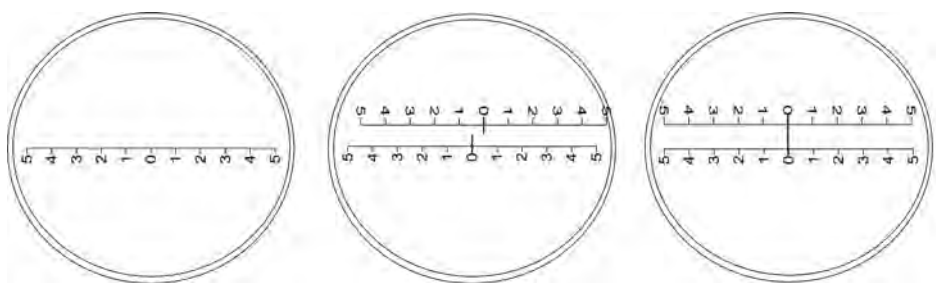
- a – sonda w górnym położeniu i luneta skierowana do góry;
- b – sonda w dolnym położeniu i luneta skierowana do dołu;
- c – sonda w dolnym położeniu i luneta skierowana do góry;
- d – sonda w górnym położeniu i luneta skierowana do dołu.

W każdym położeniu sondy lunetę obraca się tak, aby na monitorze pojawiło się zero. Oznacza to, że sonda jest ustawiona prostopadłe do linii sił pola geomagnetycznego. W tym momencie odczytuje się na zegarze czas oraz dokonuje się odczytu koła pionowego. Wariacje inklinacji magnetycznej, jakie mają miejsce w czasie obserwacji są najczęściej tak małe, że nie wprowadza się poprawek. Inklinację momentalną oblicza się od razu na punkcie pomiarowym, jako średnią wartość z czterech obserwacji w położeniach sondy, pokazanych na rysunku 2.

$$I = \alpha; \quad I = 180^\circ + \alpha; \quad I = 360^\circ - \alpha; \quad I = 180^\circ - \alpha$$

1.4. Wyznaczenie kierunku na północ magnetyczną za pomocą deklinatora

Przy wyznaczaniu kierunku na północ magnetyczną do obserwacji magnesu, który umieszczony jest w komorze deklinatora, służy luneta (rys. 3).



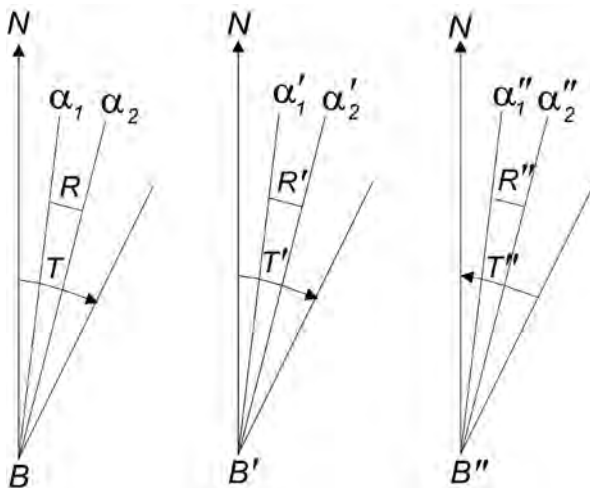
Rys. 3. Obraz widoczny w okularze lunety podczas obserwacji magnesu; a) widok skali, b) widok skali i jej odbicie od lusterka magnesu, c) widok obu skal po koincydencji

Obserwacje położenia systemu magnetycznego od strony południowej i od strony północnej umożliwiają dwa lusterka. Luneta autokolimacyjna teodolitu umożliwia takie ustawienie teodolitu, aby jej oś optyczna była prostopadła do powierzchni lusterka. W tym położeniu, podziałka widoczna w okularze lunety i jej odbicie od lusterka powinny się pokrywać. Do koincydencji obu działek zerowych – skali w okularze i skali odbitej od lusterka – doprowadza się przez obrót śruby leniwej, zawsze w kierunku ściskającym sprężynę śruby. Ponieważ nie ma możliwości umocowania lusterek idealnie prostopadłe do osi magnetycznej systemu, w celu wyeliminowania błędu kolimacji, obserwacje systemu dokonuje się w dwóch położeniach różnych o 180° . Średni odczyt koła teodolitu w obu położeniach systemu magnesów będzie odpowiadał skierowaniu lunety na północ magnetyczną. W celu podniesienia dokładności wyznaczenia D obserwacje magnesu i celu ziemskiego należy wykonać kilkakrotnie. Jedna seria wyznaczeń obejmuje zwykle 4–6 obserwacji.

W deklinatorze niciowym do wyznaczania kierunku północy magnetycznej potrzebne są dwa magnesy (rozdział 3.1.) (Askania-Werke, 1953). Zanim przystąpi się do obserwacji magnesów w celu wyznaczenia kierunku na północ magnetyczną, nici wolframowa, na której system magnesów jest zawieszany musi być możliwie dokładnie rozkręcona. Do tego celu służy specjalny szklany ciężarek. Rozkręcenia nici dokonuje się przez odpowiedni obrót głowicy, do której nici jest przymocowana. Z uwagi na bezwładność ciężarka, nici nie można rozkręcić za pomocą ciężarka idealnie a jedynie z grubszą. Do dokładnego rozkręcenia trzeba wykorzystać dwa magnesy (systemy magnetyczne) o różnych momentach magnetycznych. Należy zwrócić uwagę, że tylko wówczas kiedy nici jest idealnie rozkręcona, oba magnesy – słabszy i mocniejszy pokażą ten sam kierunek na północ magnetyczną. W przeciwnym wypadku magnes słabszy odchyli się od kierunku północnego pod wpływem siły torsyjnej nici bardziej niż magnes mocniejszy. To zjawisko wykorzystuje się do znalezienia odczytu głowicy, gdy nici jest rozkręcona oraz do wyznaczenia wielkości współczynnika torsyjnego nici. Znajomość tej wielkości jest niezbędna, gdyż skrócenie głowicy można ustawić za pomocą mikrometru z dokładnością $3'$, wobec czego zawsze pozostanie jakieś szcążkowe skrócenie nici, które będzie fałszować wyniki pomiarów. Usunięcie tego wpływu trzeba zatem wykonać rachunkowo.

Na rysunku 4 pokazany jest układ kierunków, jaki ma miejsce podczas procedury wyznaczania odczytu głowicy dla nici rozkręconej (Askania-Werke, 1953).

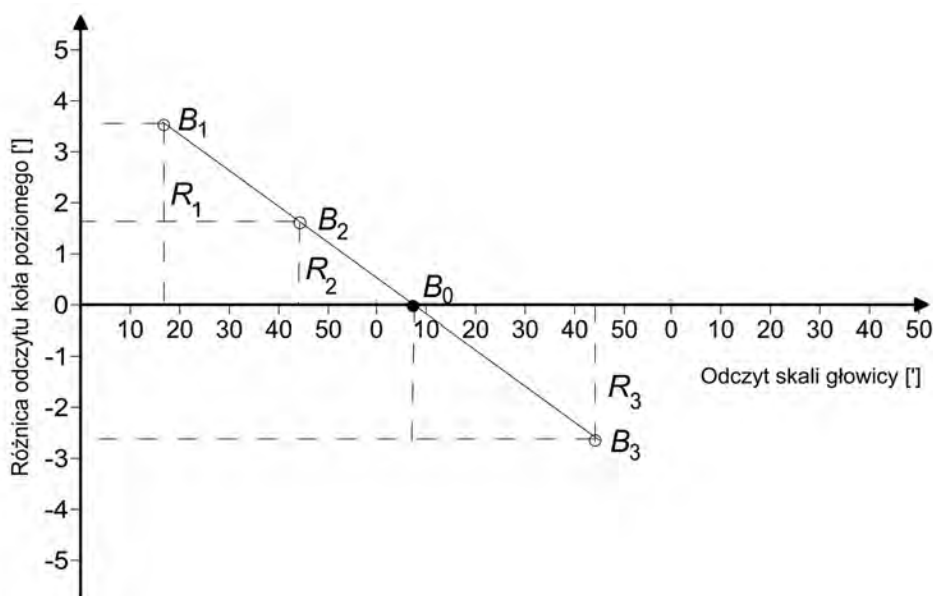
Po rozkręceniu nici z grubszą za pomocą szklanego ciężarka i zanotowaniu odczytu głowicy B , zakłada się na haczyk magnes silniejszy, a następnie, po zaobserwowaniu jego ustawienia w obu położeniach, różnych o 180° , notuje się średni odczyt koła α_2 . Podobnie, po zaobserwowaniu ustawienia magnesu słabszego, notuje się średni odczyt koła α_1 . Jest to sytuacja pokazana na rysunku 4.



Rys. 4. Układ kierunków, jaki ma miejsce podczas procedury wyznaczania odczytu głowicy dla nici rozkręconej; B – odczyt na podziałce głowicy, T – kąt skrócenia nici, $R = \alpha_1 - \alpha_2$ – różnica między odczytami koła

Tylko wtedy, gdy nić jest rozkręcona, oba odczyty α_1 i α_2 będą jednakowe. Jak już wspomniano, kierunek ustawienia się magnesu silniejszego będzie zawsze bliższy kierunku południka magnetycznego niż magnesu słabszego.

Następnie przy odaretowanym deklinatorze skręca się głowicę o pewien niewielki kąt w kierunku południka magnetycznego, czyli w kierunku ustawienia się magnesu silniejszego tak, aby uzyskać podobne ustawienie magnesów po przeciwnej stronie południka magnetycznego. Jeśli to skrócenie będzie za małe, magnesy stawia się podobnie, jak poprzednio. Należy wówczas powtórzyć skrócenie, aż uzyska się zamierzony cel. Obliczone różnice odczytów koła, naniesione na wykres pokazany na rysunku 5, pozwalają na odczytanie działki skali na głowicy, przy której nić powinna być rozkręcona.



Rys. 5. Znalazienie działki skali głowicy B_0 , przy której nić powinna być rozkręcona (ponieważ operuje się różnicami odczytów koła poziomego i faktycznie różnicami odczytów głowicy, skala pionowa wykresu (R) jest naniesiona w minutach z pominięciem stopni)

Zwykle pozostaje pewne szczątkowe skrócenie nici w granicach $\pm 2'$, wynikające z względnie małej dokładności podziału koła poziomego teodolitu i podziału koła głowicy nici torsyjnej. Niezbędne jest w związku z tym wyznaczenie współczynnika torsyjnego nici, aby wpływ szczątkowego skrócenia nici na pomiar deklinacji, można było uwzględnić rachunkowo. Współczynnik torsyjny nici Q można wyznaczyć z obserwacji magnesów. Należy w tym celu wykonać odczyty koła poziomego teodolitu po skróceniu głowicy o $+90^\circ$ i -90° od położenia wolnego od skrócenia, czyli od położenia B_0 . Jeśli oznaczymy przez α_1

różnicę odczytów dla magnesu słabszego i przez α_2 dla magnesu silniejszego, to współczynnik torsyjny nici można obliczyć ze wzoru:

$$Q = \alpha_2 (\alpha_1 - \alpha_2)^{-1}$$

Wzór na obliczenie deklinacji magnetycznej wyznaczanej przy pomocy deklinatora niciowego, uwzględniający zmiany deklinacji jakie zachodziły podczas obserwacji magnesów, będzie miał postać:

$$D = [\alpha_2 + Q(\alpha_2 - \alpha_1)] - A_G + \Sigma\delta_D$$

gdzie A_G jest azymutem geograficznym celu ziemskiego, $\Sigma\delta_D$ jest sumą poprawek uwzględniających zmiany deklinacji podczas jej pomiaru.

Poprawki do wyznaczeń deklinacji wprowadza się na podstawie danych z najbliższego obserwatorium magnetycznego lub z polowej stacji wariograficznej, którą instaluje się w rejonie pomiarów na okres prowadzonych obserwacji magnetycznych.

1.5. Pomiar modułu F wektora natężenia całkowitego pola magnetycznego Ziemi

Pomiar modułu wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego Ziemi powinien przebiegać w następującej kolejności:

1. W promieniu kilkunastu metrów od miejsca pomiaru należy usunąć wszystkie przedmioty, które mogłyby zakłócić obserwacje.
2. Sondę należy przykręcić do statywu-tyczki i podłączyć kablem do bloku elektroniki.
3. Przełącznik zakresów pola geomagnetycznego należy ustawić na odczyt odpowiadający zakresowi, w którym będą się zawierać wartości mierzonego elementu pola.
4. Ustawić żadaną dokładność pomiaru – zwykle 1 nT.
5. Pomiaru dokonuje się wciskając przycisk „Start” przy pojedynczym pomiarze lub „Auto” przy pomiarach ciągłych wykonywanych w dowolnym przedziale czasu z dowolnie wybraną częstotliwością. Po kilku sekundach na monitorze pojawia się wynik pomiaru, który zapisuje się w dzienniku (dziennik do pomiaru inklinacji) i/lub rejestruje się w pamięci instrumentu (nowsza generacja instrumentu). Jedna seria pomiaru przy pojedynczych wyznaczeniach powinna obejmować 6 obserwacji wykonanych w ciągu jednej minuty. W dzienniku należy wtedy zapisać moment pierwszego i ostatniego pomiaru. Wyniki obserwacji uśrednia się i zapisuje w dzienniku. Zaleca się rozpoczęcie obserwacji o pełnej minucie. Przy rejestracji „Auto” wartości pomiarowe i czas ich wykonania zapisują się w pamięci wewnętrznej instrumentu i można je po pomiarach przenieść za pomocą specjalnego kabla (RS) i oprogramowania do komputera.

6. W razie zaburzeń pola geomagnetycznego podczas pomiarów, co się ujawni zwiększonymi rozrzutami odczytów (powyżej ± 5 nT), należy zwiększyć liczbę wykonywanych serii pomiarowych lub przerwać pomiary.
7. Jeśli na punkcie magnetycznym wykonuje się pomiary trzech niezależnych składowych pola geomagnetycznego D , I i F to obserwacje F zapisuje się w tym samym dzienniku co obserwacje inklinacji (przy wyznaczeniach jednorazowych modułu składowej natężenia całkowitego). Jeśli wykonuje się tylko pomiary F , obserwacje zapisuje się w dzienniku pomiarowym dla pomiarów absolutnych F lub bezpośrednio w pamięci przyrządu w postaci pliku binarnego.
8. Gdy w miejscu przewidzianej lokalizacji punktu magnetycznego potrzebne jest wykonanie zdjęcia mikromagnetycznego w celu zbadania czy poziomy gradient pola geomagnetycznego nie przekracza 3 nT/m, wyniki obserwacji magnetometrem protonowym zapisuje się bezpośrednio na formularzu mikrozdjęcia.

1.6. Ustawienie sondy i przygotowanie magnetometru LEMI do rejestracji ciągłego zapisu zmian elementów pola geomagnetycznego na stacji pomiarowej

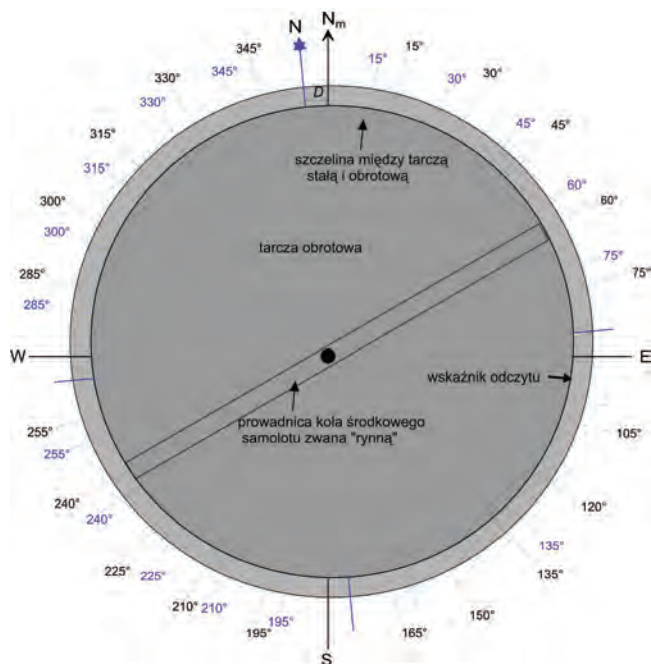
W celu zapewnienia prawidłowej rejestracji zmian składowych X , Y , Z lub D , H i Z wektora natężenia całkowitego pola geomagnetycznego magnetometrem LEMI należy obliczyć lub wyznaczyć przybliżone wartości składowych X , Y , Z pola w miejscu pracy stacji. Po wyzerowaniu wszystkich wskaźników magnetometru, po stabilizacji czujnika i spoziomowaniu go za pomocą libelki, należy wykonywać obrót sondy aż do momentu kiedy wartość w okienku „Y” osiągnie przybliżoną, wyliczoną wartości składowej poziomej Y (ustawienie sondy na północ magnetyczną). Ustawienie sondy na odczyt $Y = 0$ oznacza ustawienie jej w kierunku północy geograficznej. Po ustawieniu sondy na północ geograficzną lub magnetyczną należy skonfrontować wskazania odczytu X i Z z wartościami wyznaczonymi wcześniej, aby wyeliminować ewentualne skręcenie sondy o 180° . Następnie należy za pomocą pokręteł kompensacyjnych tak przestawiać ich położenia aby wyzerować odczyty wszystkich trzech składowych. Pokręta są trzy – pierwsze do usuwania skokowego wartości pola co 10 000 nT, drugie do usuwania skokowego pola co 1000 nT i trzecie pokrętło kompensacyjne do płynnego usuwania wartości mniejszych od 1000 nT. Przy pierwszym pokrętle znajduje się przełącznik pozwalający na kompensację pola także od wartości ujemnych w górę. Dokładność wyzerowania wskazań nie powinna przekraczać ± 100 nT. Przy takich ustawieniach stacja może rejestrować wahania składowych pola geomagnetycznego w zakresie ± 1000 nT. Należy pamiętać o odpowiednim przygotowaniu i zabezpieczeniu stanowiska dla sondy. Powinno to być miejsce utwardzone, wypoziomowane i odległe od źródeł zakłócających pole geomagnetyczne.

2. PROCEDURY ZALECANE DLA POMIARÓW MAGNETYCZNYCH NA LOTNISKACH

2.1. Procedury wzorcowania i atestacji tarcz dewiacyjnych

Busola na samolocie, mimo że instalowana jest w miarę możliwości daleko od źródeł zakłócających ziemskie pola magnetyczne, np. na końcu skrzydła lub na końcu statecznika, znajduje się pod wpływem pól zakłócających, pochodzących od ferromagnetycznych części samolotu i urządzeń elektrycznych, zwłaszcza tych, które są zasilane prądem stałym. Wpływ ten, zwany dewiacją busoli, fałszuje wskazania busoli i musi być usunięty. Dokonuje się tego przy pomocy kilku małych magnesów, które ustawia się tak, aby kompensowały pola, zakłócające główne pole geomagnetyczne. W tym celu samolot ustawia się na specjalnym stanowisku, zwanym tarczą dewiacyjną, która ma oznakowany kierunek na północ magnetyczną oraz oznakowany na krawędzi tarczy podział stopniowy, zwykle opisany co 15° lub co 45° . Na tarczy mogą też być zaznaczone azymuty kierunków na odległe, dobrze widoczne cele ziemskie, np. wieżę kościoła, komin fabryczny, maszt antenowy, znak geodezyjny itp. lub na radiostacje.

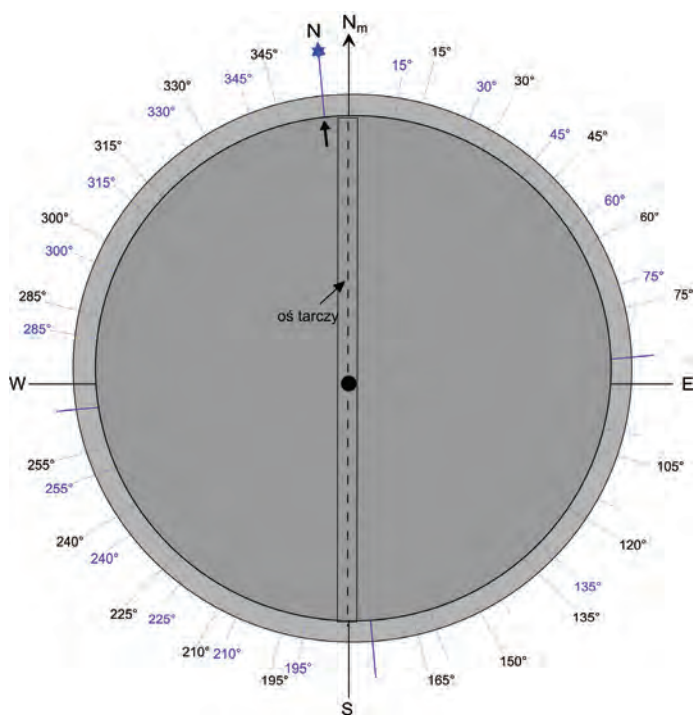
Miejsce przewidziane na tarczę dewiacyjną musi być zbadane czy jest wystarczająco jednorodne pod względem magnetycznym. Dokonuje się tego przeprowadzając mikrozdjęcie magnetyczne za pomocą magnetometru protonowego. Gradient natężenia pola na obszarze przeznaczonym na zbudowanie tarczy nie może być większy niż ± 3 nT/m.



Rys. 6. Obrotowa tarcza dewiacyjna

Dla mniejszych samolotów i śmigłowców stosuje się drewnianą tarczę obrotową. Dla samolotów większych tarczę w postaci płyty betonowej, która jest stała. Jako płytę tymczasową można wykorzystać drogę kołowania lub inną drogę dojazdową, na której nanosi się odpowiednie opisy.

Wskaźnik do odczytywania kątów na tarczy obrotowej jest tak ustawiony, aby pokazywał 0° gdy oś rynnny jest skierowana na północ magnetyczną. Oś samolotu wprowadzonego kołem środkowym na tarczę będzie wówczas także skierowana na północ magnetyczną. Ponieważ kierunek na północ magnetyczną zmienia się na skutek zmian wiekowych magnetycznego pola Ziemi, konstrukcja umocowania wskaźnika umożliwia jego przesunięcie w granicach kilku stopni. Kiedy kontrolne wyznaczenie azymutu wykaże taką konieczność, wskaźnik, po zwolnieniu odpowiednich śrub można przesunąć o potrzebny kąt, żeby znowu pokazywał 0° gdy oś rynnny jest skierowana na aktualną północ magnetyczną. Na płytach tymczasowych, przy braku ruchomego przesuwania wskaźnika, należy wykonać nowy opis kierunków.



Rys. 7. Obrotowa tarcza dewiacyjna ustawiona osią rynnny na północ magnetyczną

Wprowadzony na tarczę obrotową samolot zostaje ustawiony tak, aby oś samolotu leżała w płaszczyźnie południka magnetycznego. W tym położeniu odczytywane jest wskazanie busoli. Następnie samolot jest obracany o stały interwał kątowy, zwykle o 45° i podobnie jak poprzednio, w każdym położeniu

wykonywany jest odczyt busoli. Orientacja samolotu odczytana według busoli powinna być taka sama jak orientacja samolotu ustawionego według podziału kąтового tarczy. Rozbieżności, zwane dewiacją busoli, spowodowane są zakłóceniami wskazań busoli, pochodzącymi od źródeł znajdujących się na samolocie. Rozbieżności te, naniesione na wykres jako funkcja azymutu magnetycznego, czyli kursu samolotu, układają się w kształcie zbliżonym do sinusoidy. Taki wykres ułatwia specjalistom zajmującym się dewiacją, dokonanie kompensacji pól zakłócających przy pomocy specjalnych magnesów odpowiednio umieszczanych w pobliżu busoli.

2.2. Procedury pomiarów na punktach magnetycznych lotnisk

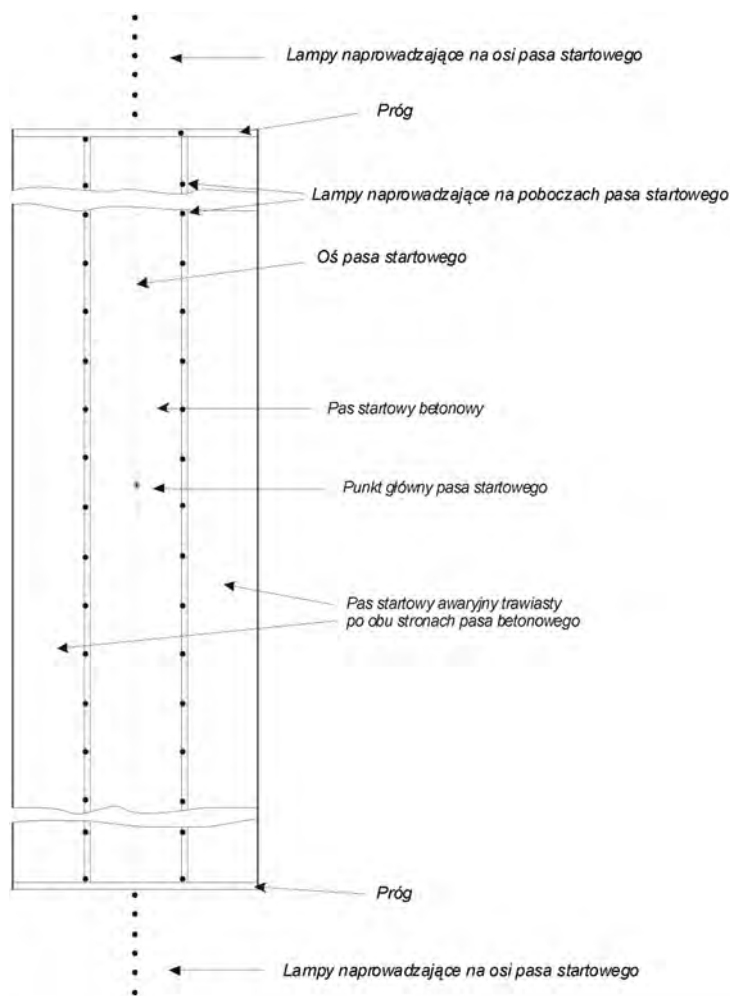
Na pasie startowym lotniska wzorcowaniu podlegają:

- azymut magnetyczny pasa startowego,
- deklinacja magnetyczna głównego punktu lotniska, który znajduje się w pobliżu pasa startowego, w przybliżeniu w połowie jego długości.

Z uwagi na ruch samolotów oraz uzbrojenie stalowymi prętami betonowego pasa startowego i jego okablowanie, wyznaczenie azymutu magnetycznego pasa i deklinację magnetyczną dla punktu głównego lotniska, wykonuje się na punkcie ekscentrycznym odsuniętym około 50 m od pasa startowego. Oczywiście miejsce lokalizacji punktu musi być sprawdzone poprzez wykonanie mikrozdjęcia magnetometrem protonowym. Opis elementów pasa startowego, potrzebnych przy wzorcowaniu jego azymutu magnetycznego i punktu głównego lotniska, pokazany jest na rysunku 8.

Schematyczny szkic fragmentu lotniska, na którym wykonywane są pomiary magnetyczne z lokalizacją ekscentrycznego punktu pomiarowego, pokazany jest na rysunku 9.

Punkt do pomiarów deklinacji magnetycznej powinno się wybierać na trawiastym pasie awaryjnym, nie bliżej niż 50 m od krawędzi pasa startowego i w miarę możliwości na linii prostopadłej do pasa, poprowadzonej od jednego z trwałych punktów charakterystycznych – od punktu głównego pasa, od punktu, w którym znajduje się jedna z lamp naprowadzających na krawędzi pasa betonowego lub od punktu gdzie znajduje się słupek hektometrowy. Wykonanie opisu topograficznego wybranego punktu do pomiarów magnetycznych musi być bardzo staranne i dokładne. Na lotnisku w rejonie punktu jedynymi obiektami, które mogą być wykorzystane przy sporządzaniu opisu topograficznego, są lampy na krawędzi pasa, punkt główny lotniska i słupki hektometrowe na pasie. W wyniku remontu lub modernizacji pasa startowego lampy umieszczone na jego krawędzi mogą zostać przesunięte. Odtworzenie miejsca ich poprzedniego położenia w celu odszukania punktu magnetycznego na podstawie opisu topograficznego, będzie wtedy niemożliwe. Lepiej zatem wykorzystać jako punkty orientacyjne raczej słupki hektometrowe i punkt główny. Obecnie współczesne pomiary wyznaczania współrzędnych (GNSS) pozwalają na dokładną lokalizację miejsca pomiarowego.

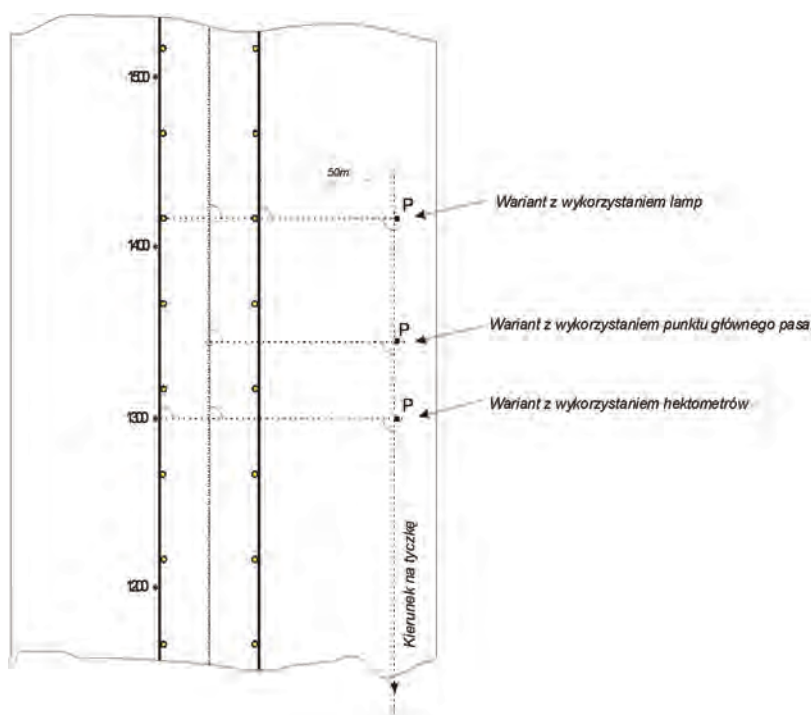


Rys. 8. Elementy pasa startowego

Punkt magnetyczny na lotnisku jest stabilizowany tak samo jak inne terenowe punkty magnetyczne – zakopaną w ziemi winidurówką o średnicy 5 cm i długości 40–50 cm lub tymczasowo palikiem drewnianym. Rurka nie może wystawać nad powierzchnię ziemi, bo zostanie zniszczona podczas koszenia trawy na lotnisku. W celu wzmocnienia tego rodzaju stabilizacji, rurkę można wypełnić zaprawą betonową, lub inną dostępną w sklepach gotową zaprawą budowlaną. Wokół rurki można wykonać opaskę z tej zaprawy, która poza wzmocnieniem stabilizacji, ułatwi odszukanie punktu w kolejnych latach. W miarę możliwości (zgoda służb lotniska) punkt można zastabilizować granitowym słupem.

Na punkcie powinny być wybrane dwa, mniej więcej prostopadłe do siebie kierunki na cele ziemskie – jeden dalszy i drugi bliski (ok. 300 m) na wypadek, gdyby podczas następnych pomiarów cel dalszy był niewidoczny, na przykład

z powodu mgły. Kąt zawarty pomiędzy tymi kierunkami stanowi dodatkową kontrolę identyfikacji punktu pomiarowego podczas następnych pomiarów wzorcujących. Zaleca się ponadto zastabilizować w podobny sposób, również rurką winidurową, w odległości około 150 m, na linii równoległej do krawędzi pasa startowego, punkt kierunkowy i w razie potrzeby, po ustawieniu na nim tyczki, korzystać z niego jak z każdego innego celu ziemskiego. Posiadanie takich punktów, stabilizujących niejako kierunki o wyznaczonych azymutach geograficznych, pozwalają uniknąć w przyszłości dość kłopotliwego, zwłaszcza w okresie złej pogody, wyznaczania azymutów podczas kolejnych pomiarów na lotnisku. Ponadto, posiadanie na lotnisku dodatkowego punktu, zwiększa szanse na szybsze odnalezienie lokalizacji punktu pomiarowego



Rys. 9. Szkic lokalizacji punktu magnetycznego na lotnisku

Azymuty geograficzny i magnetyczny pasa startowego wyznaczane są zatem pośrednio, drogą geometrycznego przeniesienia jego wartości z kierunków obserwowanych na punkcie ekscentrycznym. Różnica między azymutem geograficznym i azymutem magnetycznym jest oczywiście deklinacją magnetyczną na punkcie głównym lotniska.

Na punkcie zaleca się wykonywać pomiary w dwóch kolejnych dniach, po 4 serie wyznaczeń deklinacji w każdym. Dla kontroli można także wykonać pomiary na punkcie kierunkowym.

W przypadku kiedy punkt ekscentryczny jest punktem nowym należy wykonać na punkcie dwie serie pomiaru azymutu astronomicznego. Pomiary takie należy wykonać także wówczas, gdy istnieją wątpliwości co do identyczności wyznaczonego poprzednio azymutu geograficznego,

Po wykonaniu pomiarów deklinacji magnetycznej należy obliczyć jej przybliżoną wartość (bez poprawek wariacyjnych) i porównać ją z ostatnią wartością pomierzoną kilka lat temu, poprawioną o odpowiednią zmianę wiekową. Jest to wstępna kontrola wykonanych pomiarów eliminująca ewentualne grube błędy.

Dane magnetyczne na skutek zmian wiekowych pola magnetycznego Ziemi, po pewnym czasie tracą aktualność. Okres, dla którego dane te mogą być ekstrapolowane, zależy od stopnia nieliniowości przebiegu zmian wiekowych, ich wielkości oraz od potrzebnej użytkownikowi dokładności tych danych. Dla celów nawigacyjnych, aktualizację danych magnetycznych na lotniskach wykonuje się w Polsce i w całej Europie nie rzadziej niż co 5 lat. Ponadto, po każdym remoncie, przebudowie lub innym wydarzeniu, które może budzić podejrzenie, że spowodowało lokalną zmianę elementów ziemskiego pola magnetycznego, aktualizacja danych magnetycznych musi być ponownie wykonana.

Obliczenia ostateczne wykonuje się po powrocie z terenu i po uzyskaniu z Centralnego Obserwatorium Magnetycznego Instytutu Geofizyki PAN w Belsku potrzebnych danych magnetycznych – poprawek wariacyjnych do obserwacji oraz poprawki redukcyjnej, sprowadzającej otrzymane wyniki wyznaczeń do średniej rocznej lub średniej wartości dobowej deklinacji w obserwatorium. Liczona jest także wartość rocznej zmiany deklinacji magnetycznej w miejscu pomiaru, która jest niezbędnym elementem wykonanej atestacji.

3. PROCEDURY ZALECANE PRZY WZORCOWANIU INSTRUMENTÓW DO POMIARÓW MAGNETYCZNYCH

3.1. Procedury wzorcowania busoli (pelengatorów)

1. Przed przystąpieniem do pomiarów należy sprawdzić stan busoli, a w szczególności:
 - skuteczność mocowania busoli do statywu;
 - stan części optycznych lub urządzeń celowniczych;
 - skuteczność mechanizmu aretowania igły magnetycznej;
 - powtarzalność wskazań igły magnetycznej przy kilkakrotnym zwolnieniu mechanizmu aretowania;
 - luzy w częściach ruchomych busoli itp.
2. Pomiary atestacyjne należy wykonywać w obserwatorium magnetycznym, na stanowisku do wyznaczeń deklinacji magnetycznej, czyli na stanowisku, na którym istnieje zastabilizowany kierunek na cel ziemski o znanym azymucie geograficznym.
3. W razie pilnej potrzeby wykonania atestacji busoli, pomiary atestacyjne mogą być wykonane na stanowisku terenowym, na którym istnieje aktualnie

- wyznaczony azymut geograficzny wybranego celu ziemskiego. Azymut geograficzny może być wyznaczony bezpośrednio przed wzorcowaniem busoli, wg procedury opisanej w rozdziale 4.
4. W pierwszej kolejności należy wyznaczyć azymut magnetyczny celu ziemskiego, o którym mowa w punkcie 2 i 3. Wyznaczenie musi być wykonane aparaturą, która ma aktualny atest, wystawiony w obserwatorium magnetycznym.
 5. W następnej kolejności należy ustawić na tym samym stanowisku busolę i wyznaczyć azymut magnetyczny tego samego celu ziemskiego wg procedury stosowanej przy pomiarach busolą. Wyznaczenia należy przeprowadzić co najmniej 4 razy w odstępach 15-minutowych.
 6. Po wprowadzeniu do wyników obserwacji poprawek wariacyjnych, uwzględniających zmiany deklinacji magnetycznej podczas wykonywanych pomiarów, należy obliczyć uśrednioną wartość azymutu magnetycznego obserwowanego celu ziemskiego oraz jej błąd średni, który nie powinien przekraczać 0.2° . Poprawki wariacyjne oblicza się na podstawie danych z obserwatorium magnetycznego.
 7. Różnica pomiędzy azymutem magnetycznym wyznaczonym za pomocą aparatury wzorcowej a azymutem wyznaczonym za pomocą busoli jest poprawką busoli.

Jeśli azymut magnetyczny otrzymany za pomocą busoli jest większy od azymutu wyznaczonego za pomocą aparatury wzorcowej, poprawka busoli ma znak minus. Jeśli jest mniejszy – poprawka busoli ma znak plus.

3.2. Wzorcowanie magnetometru protonowego

Wzorcowanie magnetometru protonowego, należy przeprowadzać w obserwatorium magnetycznym na jednym ze stanowisk pawilonu pomiarowego lub w specjalnych cewkach indukujących zmienne pole magnetyczne (Jankowski i Sucksdorf, 1996). Wartości wzorcowe modułu F wektora natężenia pola geomagnetycznego w obserwatorium są stale kontrolowane w ramach projektów realizowanych we współpracy międzynarodowej.

Wzorcowanie polega na porównaniu wskazań magnetometru z wartościami wyznaczonymi w obserwatorium lub indukowanymi w cewce.

W obserwatorium należy wykonać co najmniej trzy serie wyznaczeń po 12 obserwacji w każdej. Pomiedzy wyznaczeniami powinna być 30-minutowa przerwa. Wyznaczenia składowej F wykonuje się co minutę i zapisuje w dzienniku pomiaru jednocześnie z zapisem F zarejestrowanym przez wzorcowy magnetometr pracujący w obserwatorium. Daje to możliwość wstępnego wyznaczenia poprawki instrumentu. W nowoczesnych instrumentach, z zapisem cyfrowym rejestrowanych wartości na dysku wewnętrznym, można prowadzić ciągłą rejestrację F trwającą 2 do 3 godzin i porównać jej zapisy z zapisem cyfrowym rejestracji na punktach odniesienia w obserwatorium.

Średnia z różnic między wartościami rejestrowanymi przez magnetometr sprawdzany i magnetometr wzorcowy, wyznaczona ostatecznie po otrzymaniu „wyczyszczonego” zapisu magnetogramu z obserwatorium na dany dzień pomiarowy, stanowi poprawkę magnetometru protonowego.

Poprawka ta nie powinna być większa od 1 nT. Jeśli przekracza tę wartość, należy oddać instrument specjalście w celu sprawdzenia częstotliwości generatora w magnetometrze lub uwzględnić ją przy opracowywaniu wyników pomiarów terenowych.

Wynik badania zostaje zapisany w protokole wzorcowania, który powinien być podpisany przez obserwatora i przedstawiciela obserwatorium.

Blankiet firmowy Instytutu Geofizyki PAN

**POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT GEOFIZYKI
OBSERWATORIUM MAGNETYCZNE BELSK**

Obserwatorium Magnetyczne IG PAN, 05-622 Belsk Duży
tel.: (+48) 48 66 42056, fax: (+48) 48 66 11373

znak

Belsk, dn.

**Świadectwo wzorcowania
magnetometru protonowego**

W dniu na zlecenie Instytutu Geodezji i Kartografii w Warszawie,
poddany został wzorcowaniu magnetometr protonowy Nr produkcji firmy
.Instytut Geofizyki Warszawa .

Badania zostały przeprowadzone przez na słupie Nr
w pawilonie pomiarowym. Wykonano obserwacji kontrolnych.

Średnia wartość różnicy między pomiarami natężenia całkowitego wektora pola
geomagnetycznego F a wartością wzorcową (ΔF -słup II) wyniosła $\pm$

Poprawka do wartości wektora po uwzględnieniu różnicy poziomu słupa II i słupa na
którym wykonano pomiary wynosi

Bezwzględna wartość poprawki ΔF większa od $1nT$ stanowi poprawkę wzorcowanego
magnetometru, którą należy uwzględnić ze znakiem przeciwnym.

Potwierdzenie wzorcowania:

Podpis wykonawcy:

Rys. 10. Protokół wzorcowania magnetometru protonowego

3.3. Wzorcowanie magnetometru Flux-Gate D/I

1. Wzorcowanie magnetometru stanowiącego wzorzec pośredni, należy przeprowadzać w obserwatorium magnetycznym na stanowisku do pomiarów magnetycznych. Wartości wzorcowe w obserwatorium są stale kontrolowane w ramach projektów realizowanych we współpracy międzynarodowej.
2. Obserwacje należy wykonywać bez pośpiechu, w dniu magnetycznie spokojnym.
3. Procedura obserwacji magnetometrem Flux-Gate D/I została opisana w rozdz. 4.
4. Wyniki obserwacji zapisuje się w dzienniku przeznaczonym do zapisów pomiarów terenowych.
5. Należy wykonać co najmniej 3 serie niezależnych wyznaczeń azymutu magnetycznego kierunku wzorcowego.
6. Do wyników obserwacji należy wprowadzić poprawki uwzględniające wariacje dobowe deklinacji magnetycznej, obliczone na podstawie magnetogramów obserwatorium.
7. Obliczenia azymutu magnetycznego kierunku wzorcowego wykonuje się na bieżąco, oddzielnie dla każdej serii obserwacji, a następnie liczy się jego wartość średnią i błąd średni.
8. Otrzymana wartość średnia i azymut kierunku wzorcowego powinny być w granicach błędu takie same.
9. Różnica pomiędzy wartością średnią a wartością wzorcową jest poprawką badanego instrumentu, którą należy uwzględnić przy wykonywaniu pomiarów magnetycznych. Jeśli azymut otrzymany z obserwacji jest większy niż azymut wzorcowy, poprawka ma znak minus; jeśli mniejszy – plus.
10. Wynik badania zostaje zapisany w protokole atestacji, który powinien być podpisany przez obserwatora i przedstawiciela obserwatorium.

Wszystkie opisane procedury zgodne są ze standardami polskimi i europejskimi (Newitt i in., 1996).

Blankiet firmowy Instytutu Geofizyki PAN

**POLSKA AKADEMIA NAUK
INSTYTUT GEOFIZYKI
OBSERWATORIUM MAGNETYCZNE BELSK**

Obserwatorium Magnetyczne IG PAN, 05-622 Belsk Duży
tel.: (+48) 48 66 42056, fax: (+48) 48 66 11373

znak

Belsk, dn.

**Świadectwo wzorcowania
magnetometru FLUX D/I**

W dniu na zlecenie Instytutu Geodezji i Kartografii w Warszawie, poddany został wzorcowaniu magnetometr FLUX D/I, Nr produkcji firmy Bartington, Anglia.

Badania zostały przeprowadzone przez na słupie Nr w pawilonie pomiarowym. Wykonano.....serii obserwacji kontrolnych.

Średnia wartość różnicy między wyznaczaną deklinacją a deklinacją wzorcową - słup II (rejestrowaną w obserwatorium) wyniosła..... ±.....

Poprawka do deklinacji po uwzględnieniu różnicy poziomu słupa II i słupa na którym wykonano pomiary wynosi

Bezwzględna wartość poprawki większa od 1' stanowi poprawkę wzorcowanego deklinatora, którą należy uwzględnić ze znakiem przeciwnym

Średnia wartość różnicy między wyznaczaną inklinacją a inklinacją wzorcową (rejestrowaną w obserwatorium) wyniosła..... ±.....

Poprawka do inklinacji po uwzględnieniu różnicy poziomu słupa II i słupa na którym wykonano pomiary wynosi

Bezwzględna wartość poprawki większa od 0.5' stanowi poprawkę wzorcowanego inklinatora, którą należy uwzględnić ze znakiem przeciwnym.

Potwierdzenie wzorcowania:

Podpis wykonawcy:

NR PUNKTU								OBSERWATOR										
DATA		INSTRUMENT						PROTOKULANT										
CEL	ODCZYTY CHRONOMETRU									KOŁO HORYZONTALNE								
	CSE			ŚREDNI			I			II			ŚREDNI			ŚREDNI		
	h	m	s	h	m	s	O	"	''	"	''	"	''	O	"	''		
M.																		
•																		
•																		
•																		
•																		
•																		
•																		
•																		
•																		
•																		
•																		
M.																		
SLUŻBA CZASU		DATA						δ		$\Delta\delta/24^h$		E_o		$\Delta E/24^h$				
DATA																		
TU																		
CHRONOMETR																		

*Rys. 12. Dziennik do pomiaru azymutu geograficznego celu ziemskiego z obserwacji
pozycji Słońca*

Data		Numer i nazwa punktu				Obserwator		Protokulanci		MAG-01 A		Deklinacja		Wektor F
										Nr teodolitu				
Sonda	Kierunek	Czas	Odczyt koła horyz.			Oblicz. kontrolne średnie				Redukcje momentalne	Obliczenie deklinacji		Data/Czas	
			0	°	'"		0	°	′		″			
↑	W					Średni	↑					Śr.		
	E											Śr.		
	↓	E				Śred.	Kier. pół.					Śr pom		
		W										M.		
						Średni	↓					Am		
												Aa		
												Dpom		
M.	KL				KP					Śr.		Dobs		Data/Czas
M.	KL				KP					Śr.		Δ		
↑	W					Średni	↑					Śr.		
	E											Śr.		
	↓	E				Śred.	kier. Pół.					Śr pom		
		W										M.		
						Średni	↓					Am		
												Aa		
												Dpom		
M.	KL				KP					Śr.		Dobs		
M.	KL				KP					Śr.		Δ		

Rys. 13. Dziennik do zapisania obserwacji dla dwóch wyznaczeń D

