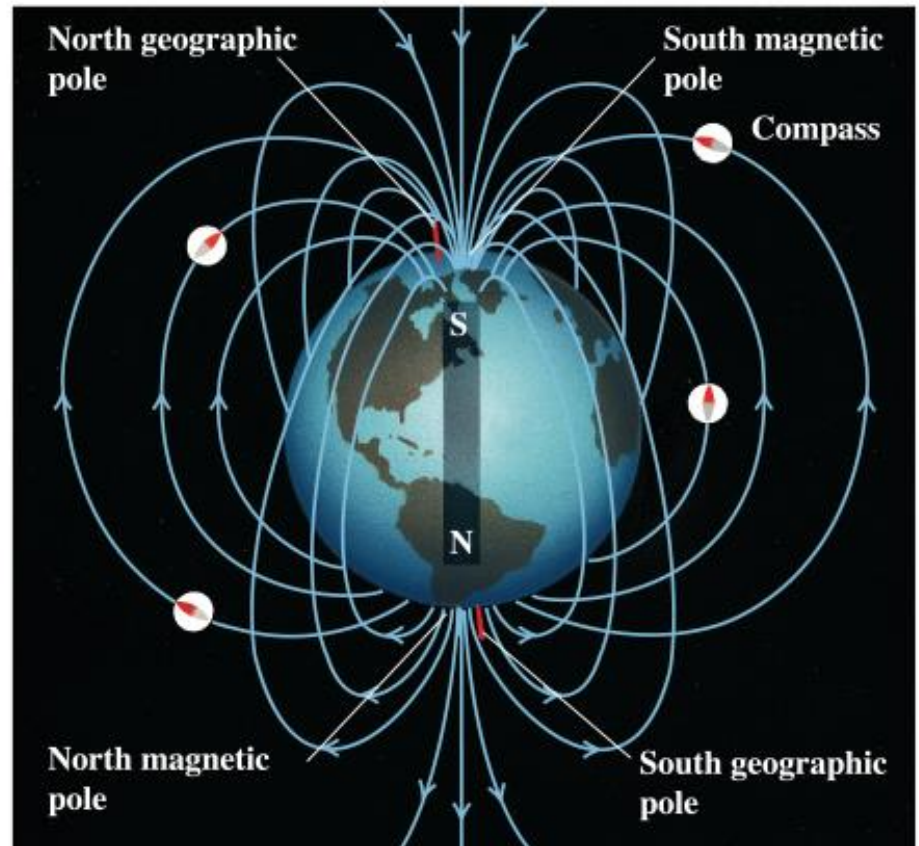
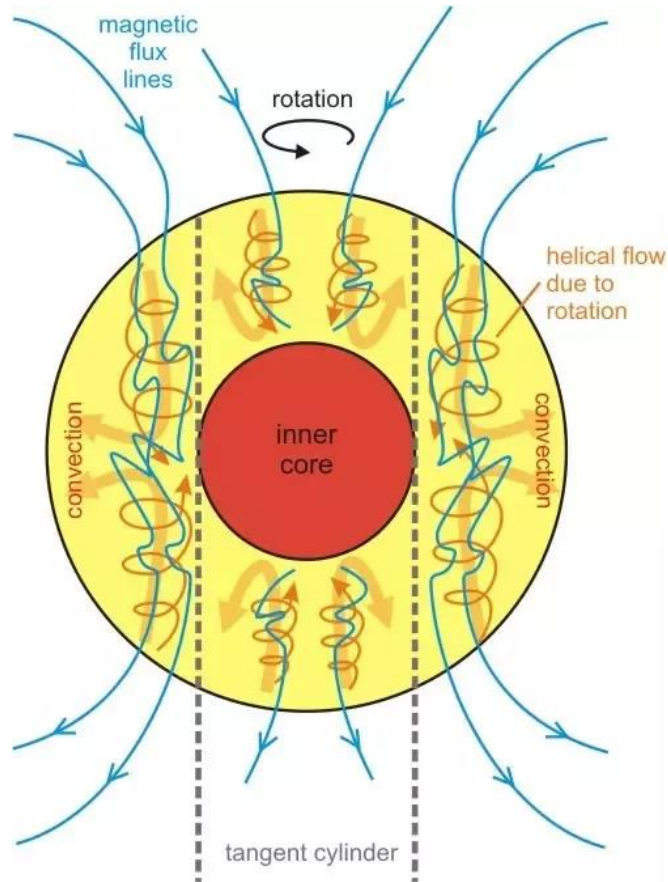


Magnetometria

zemské magnetické pole (ZMP)

- vznik a vlastnosti ZMP
- zložky totálneho vektora magnetickej indukcie
- časové zmeny (variácie) ZMP
- meranie ZMP – observatóriá
- matematický model popisu ZMP
- pole ΔT , normálne pole (metódy jeho určovania)

vznik ZMP

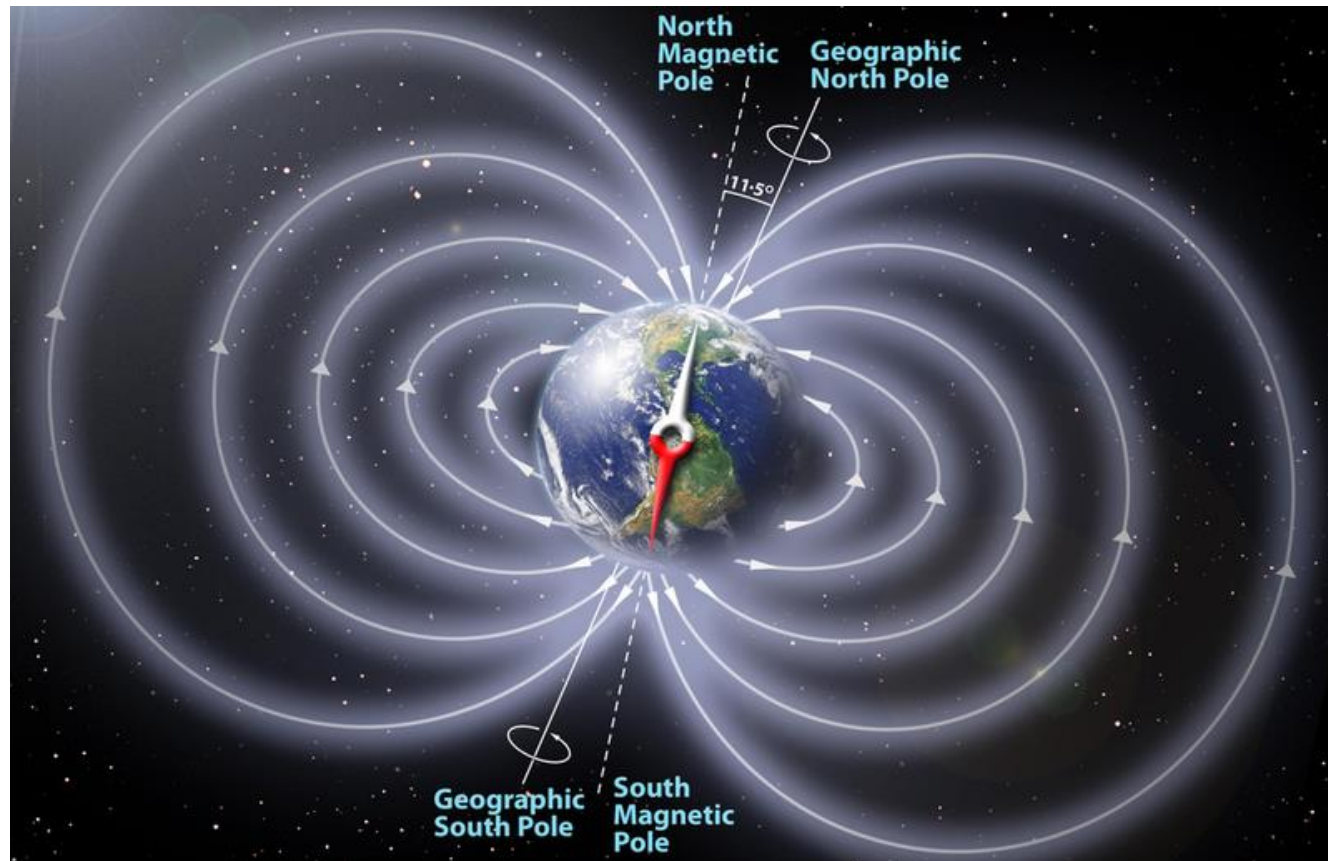


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

ZMP vzniká procesmi vo vonakjšom jadre Zeme (konvekčné prúdy v kombinácii s rotáciou Zeme).

V súčasnosti je severný magnetický pól na južnom geografickom pole (siločiary vektora totálnej magnetickej indukcie $\mathbf{T}$ vychádzajú z juhu a smerujú na sever).

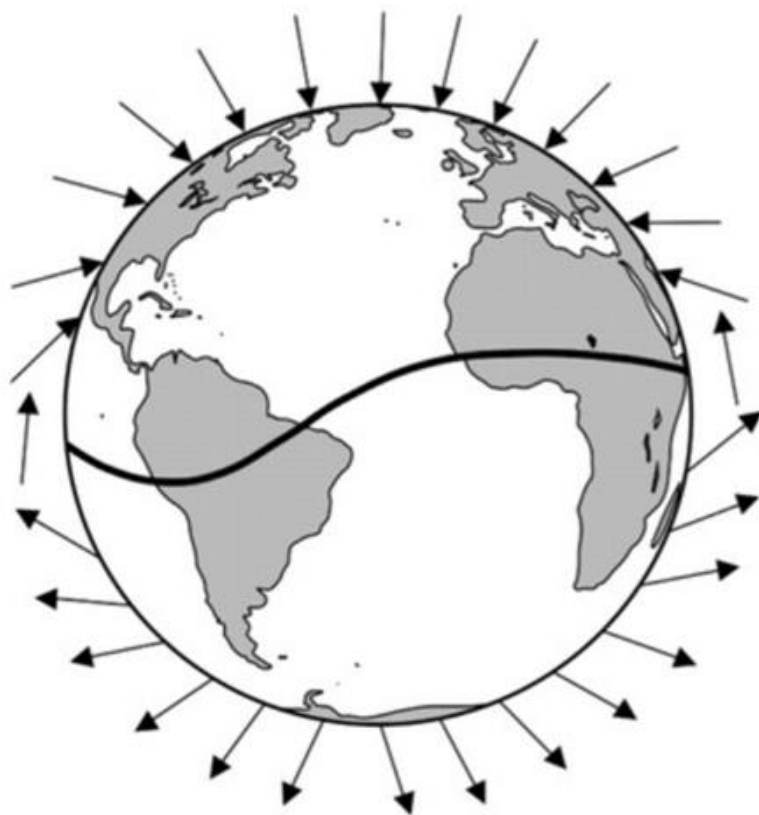
vlastnosti ZMP



ZMP má dominantný **dipólový charakter**, ale jeho os nie je identická s rotačnou osou Zeme, ale má odklon od nej 11.5° .

Okrem dipólového charakteru sa prejavujú aj ďalšie dominantné črty tohto poľa – tzv. **kontinentálne anomálie**. Spolu je ich 5, tri kladné (ázijská, antarktická, americká) a dve záporné (austrálska, africká). K tomu ešte neskôr.

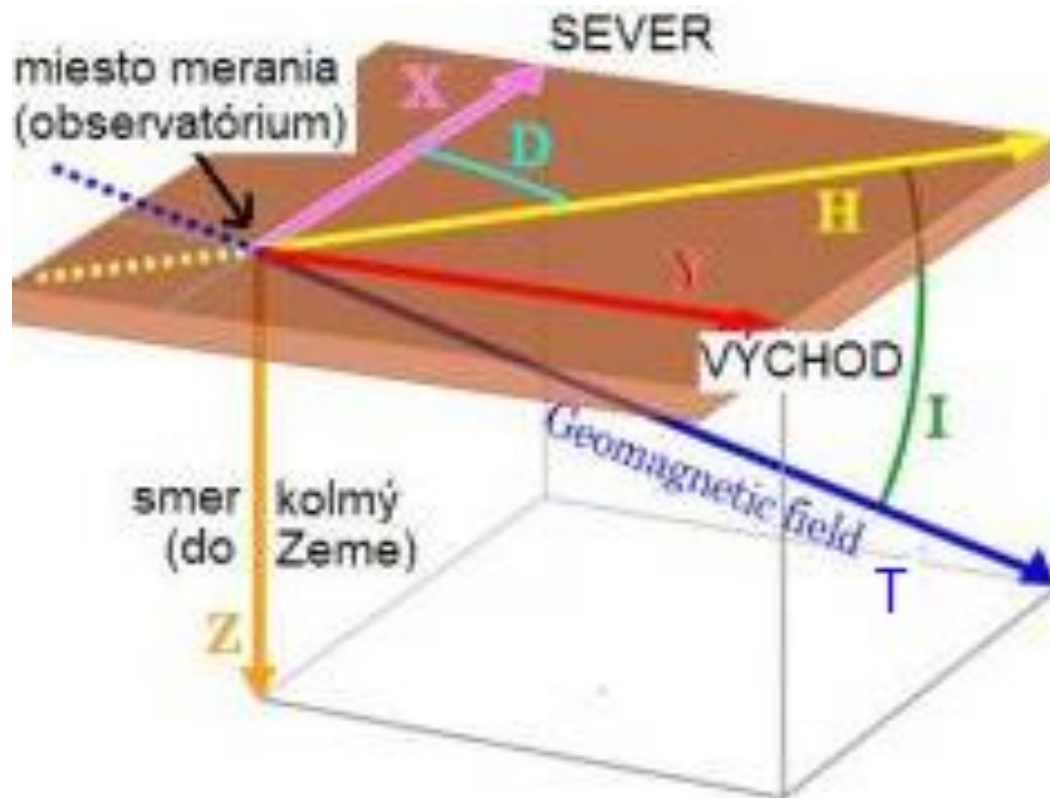
vlastnosti ZMP



PH0832N Magnetic Needle Inclination/Declination Demonstration Compass

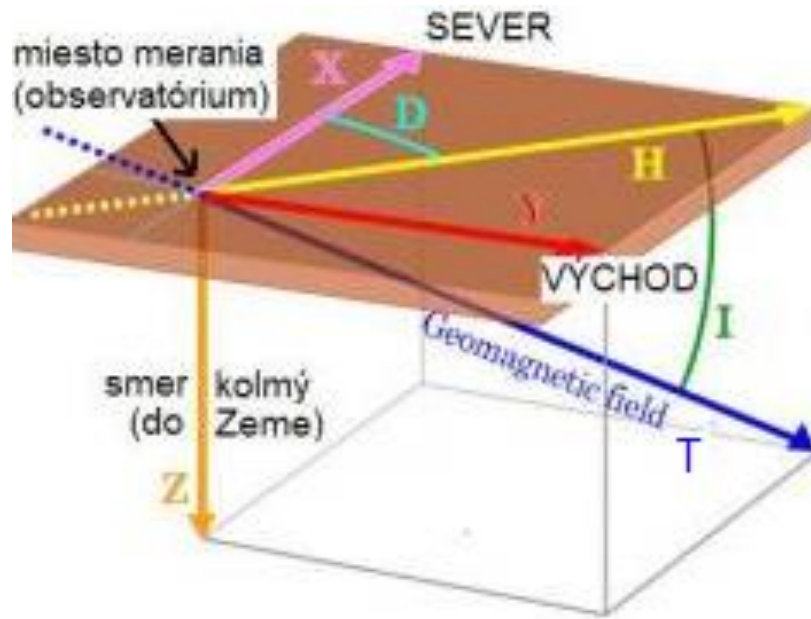
Smerovanie vektora $\mathbf{T}$ (voči horiz. rovine ku zemskému povrchu) sa mení so zmenou zemepisnej šírky – tzv. inklinácia vektora $\mathbf{T}$. S týmito vlastnosťami vektora $\mathbf{T}$ súvisia potom aj tvar a amplitúda “magnetických” anomálií na rôznych miestach na zemskom povrchu.

zložky ZMP



Rozklad vektora totálnej magnetickej indukcie (**T**) na zložky **H**, **X**, **Y** a **Z**. Dôležité sú tiež uhly **I** (inklinácia) a **D** (deklinácia). **H** smeruje na magn. sever, **X** smeruje na geogr. sever, **Y** je kolmý na **X** a **Z** kolmý na predchádzajúce v smere do stredu Zeme. Inklinácia je uhol medzi **H** a **T**, deklinácia uhol medzi **X** a **H**.

zložky ZMP



Podľa jednoduchých goniometrických funkcií platí
(X , Y , H , Z , T sú veľkosti vektorov $\mathbf{X}$, $\mathbf{Y}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{Z}$, $\mathbf{T}$):

$$Z = T \cdot \sin I, H = T \cdot \cos I, X = H \cdot \cos D, Y = H \cdot \sin D.$$

Celý vektor $\mathbf{T}$ vieme vyskladať z jeho zložiek:

$$\mathbf{T} = \mathbf{H} + \mathbf{Z} = \mathbf{X} + \mathbf{Y} + \mathbf{Z} = T(\mathbf{X} \cdot \mathbf{i} + \mathbf{Y} \cdot \mathbf{j} + \mathbf{Z} \cdot \mathbf{k}),$$

$$\mathbf{T} = T(\cos I \cdot \cos D \cdot \mathbf{i} + \cos I \cdot \sin D \cdot \mathbf{j} + \sin I \cdot \mathbf{k}),$$

kde $\mathbf{i}$, $\mathbf{j}$, $\mathbf{k}$ sú elementárne vektory v smere osí x , y a z .

zložky ZMP

Približná veľkosť elementov ZMP v μT

	Póly	Rovník	SR
H	0	30-40	20
Z	60-70	0	43
T	60-70	30-40	47
I	$\pm 90^\circ$	0°	65°
D	neurč.	$+10^\circ$ až -20°	$+5^\circ$

= 20000 nT

= 43000 nT

= 47000 nT

Existujú rôzne internet. kalkulačky parametrov geomagn. poľa, napr:
<https://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web/>

Skúste vypočítať hodnoty pre Bratislavu ($\varphi_i = 48.2^\circ$, $\lambda_m = 17.1^\circ$).

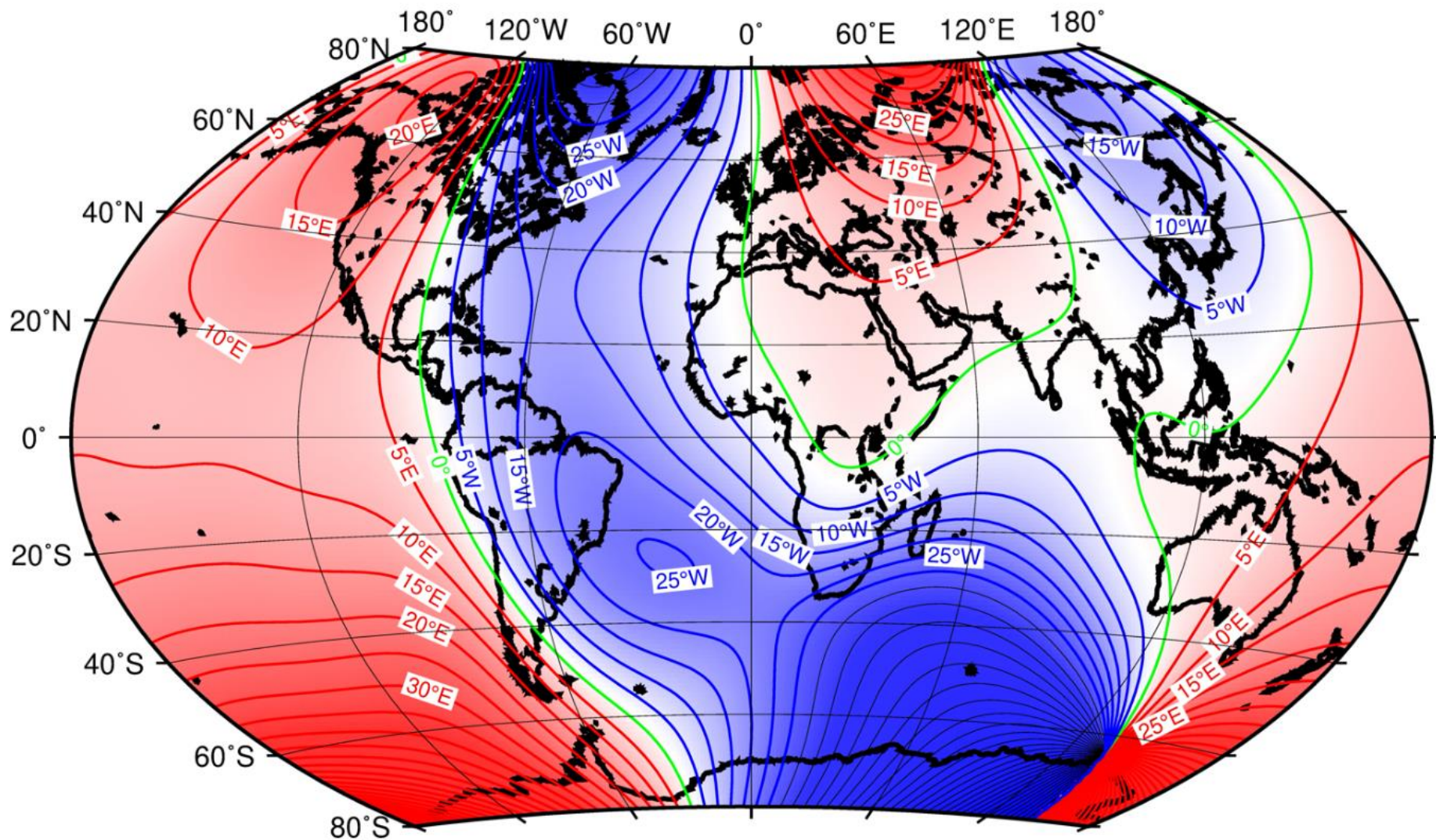
zložky ZMP

Tieto hodnoty (zložiek ZMP) sa menia v čase a z tohto dôvodu sa ich hodnoty (mapy) uvádzajú vždy pre určitú **epochu** (napr. 2019.0, 2019.5).

Existuje niekoľko matematických modelov (matematický aparát neskôr) Zemského magnetického poľa:

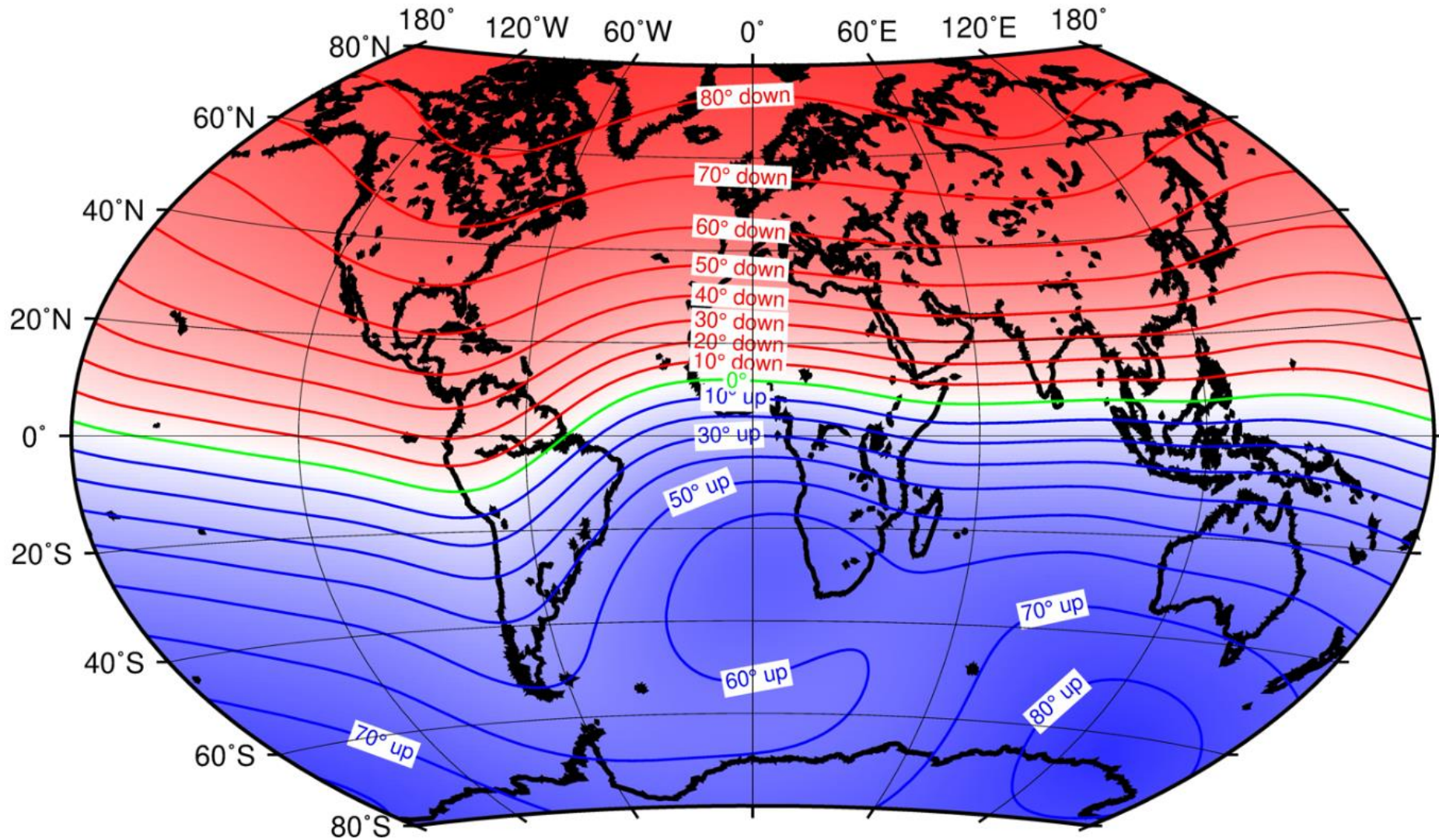
- **IGRF = International Geomagnetic Reference Field** (spravuje od roku 1965 asociácia IAGA = International Association of Geomagnetism and Aeronomy), súčasťou viacerých geof. softvérov (napríklad Geosoft Oasis Montaj)
- **WMM = World Magnetic Model** (spravovaný U.S. National Geophysical Data Center (NGDC), British Geological Survey (BGS) a National Geospatial-Intelligence Agency (NGA))
- **EMM = Enhanced Magnetic Model** (spravovaný National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA), na základe aj satelitných dát, posledná verzia EMM2017 platí pre periódy 2020.0 až 2022.0

zložky ZMP - deklinácia



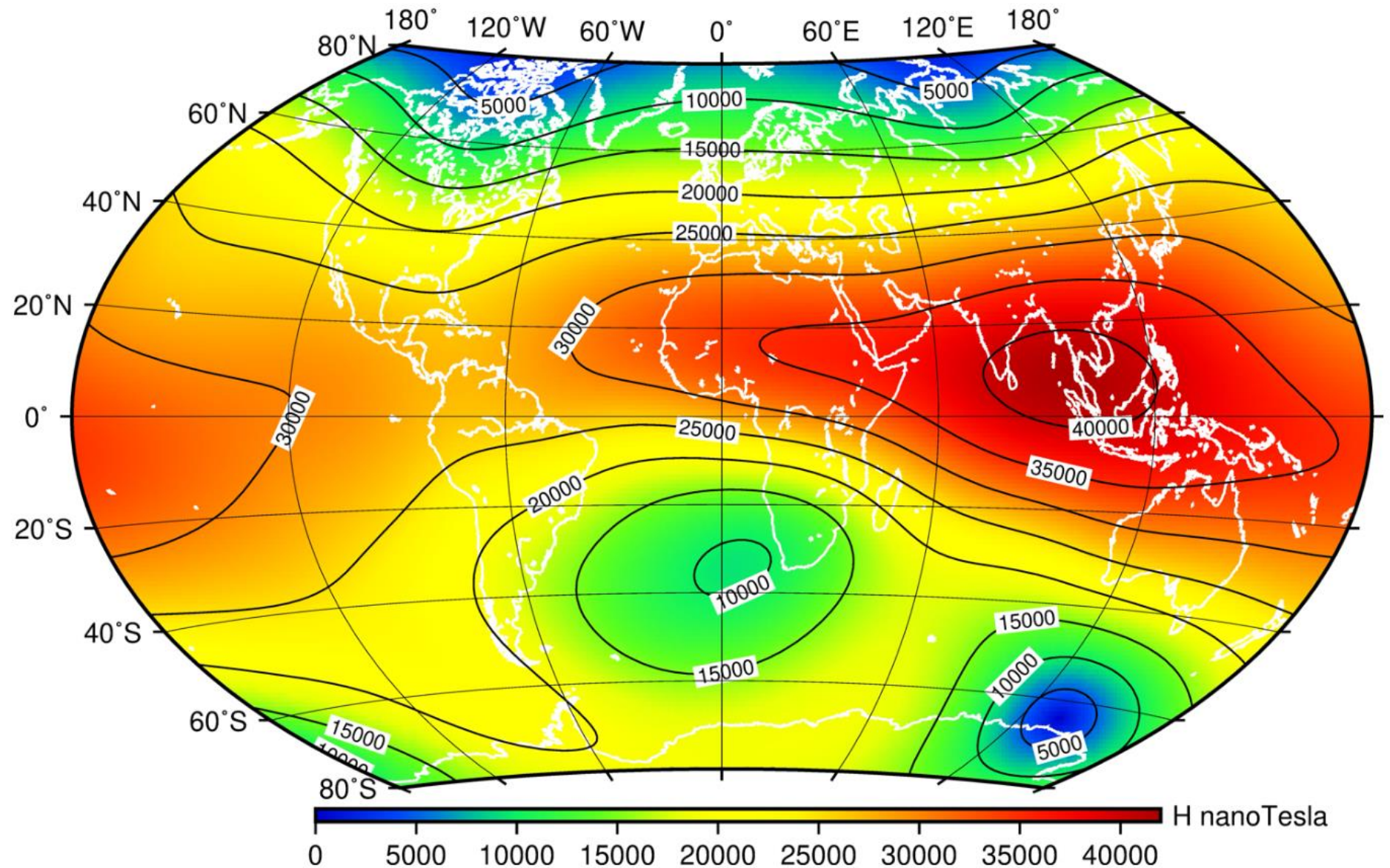
svetová mapa, izolínie deklinácie = tzv. izogóny (pre epochu 2020.0),
zdroj: British Geological Survey

zložky ZMP - inklinácia



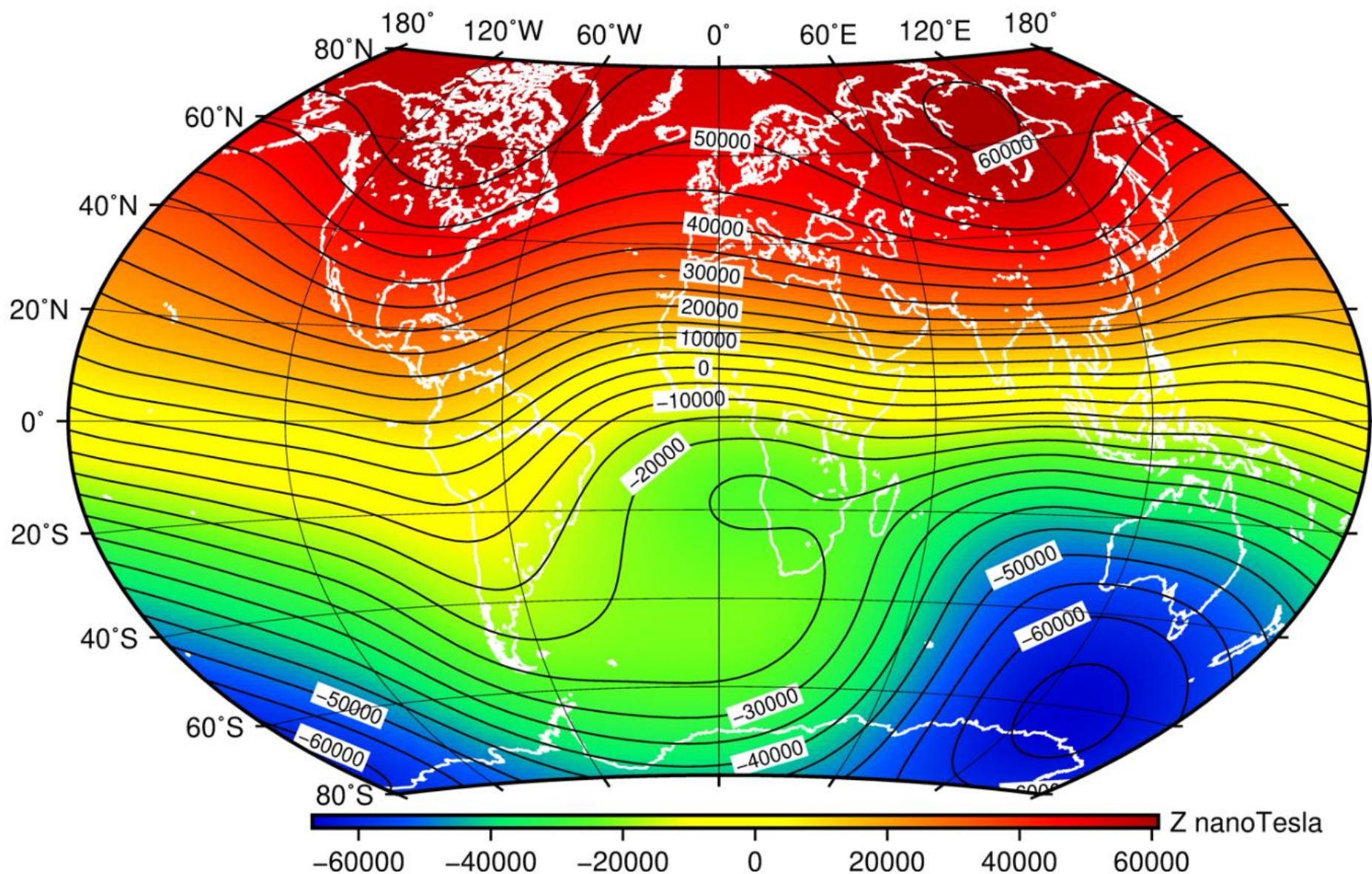
svetová mapa, izolínie inklinácie = tzv. izokliny (pre epochu 2020.0),
zdroj: British Geological Survey

zložky ZMP – veľkosť zložky H



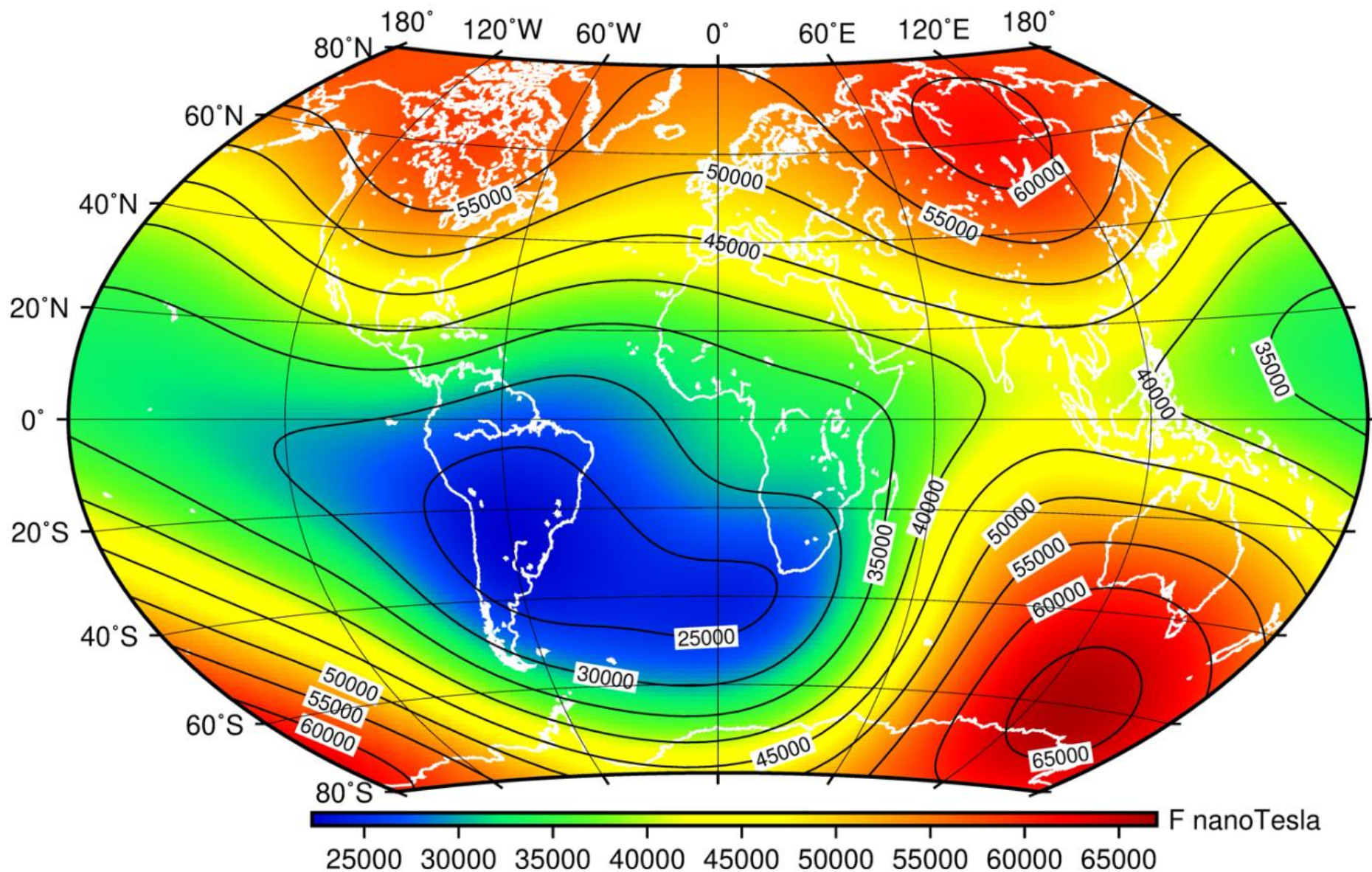
svetová mapa, izodynamy hodnôt zložky **H** (pre epochu 2020.0),
zdroj: British Geological Survey

zložky ZMP – veľkosť zložky Z



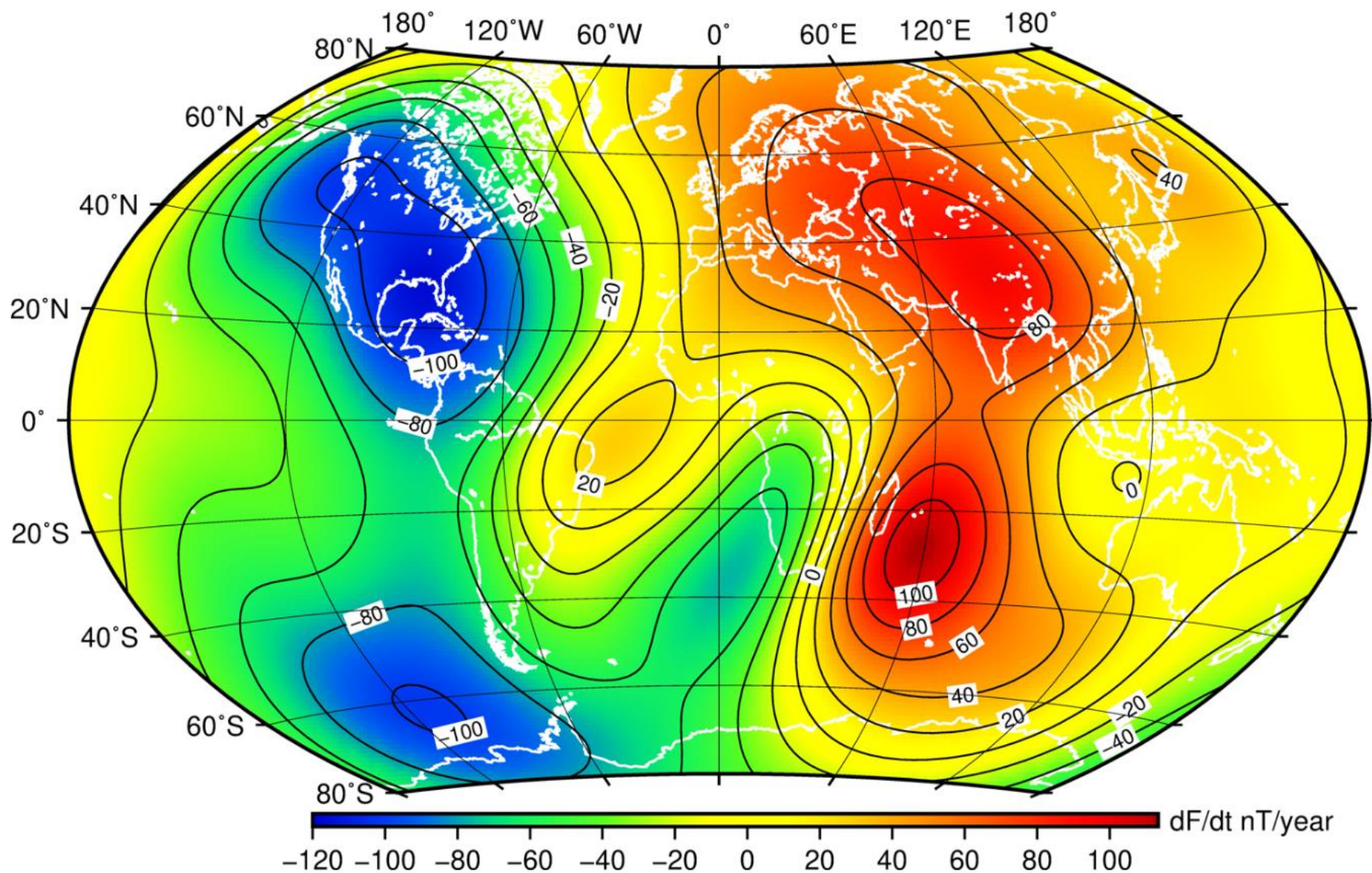
svetová mapa, izodynamy hodnôt zložky Z (pre epochu 2020.0),
zdroj: British Geological Survey

zložky ZMP – veľkosť zložky T



svetová mapa, izodynamy hodnôt zložky T (pre epochu 2020.0),
zdroj: British Geological Survey

zložky ZMP – zmena zložky T



izolínie hodnôt predpokladanej zmeny zložky T (epochy 2020.0 – 2025.0),
zdroj: British Geological Survey

časové zmeny ZMP (variácie)

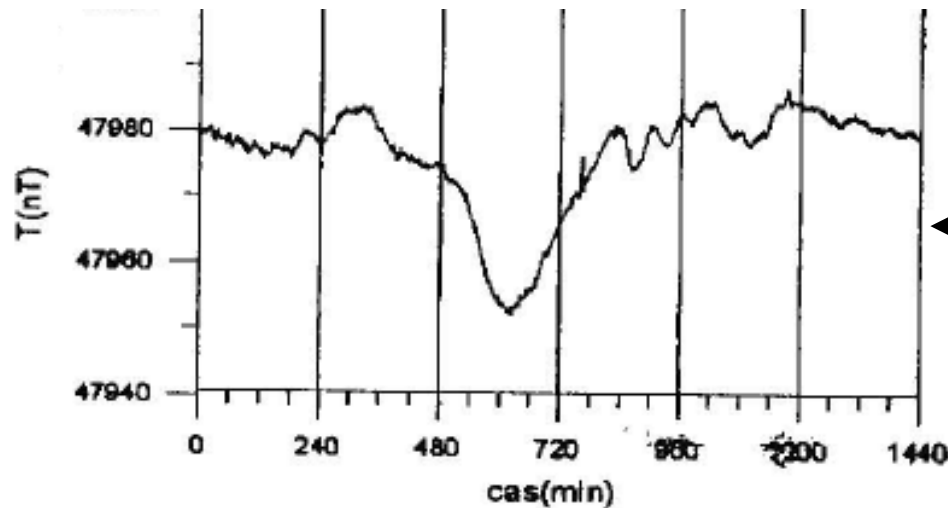
variácie geomagnetického poľa – časové zmeny:

dlhodobé:

sekuárne – procesy vo vnútri zemského telesa (500 rokov);
zmeny aktivity Slnka – 11.5 ročná periodicitá

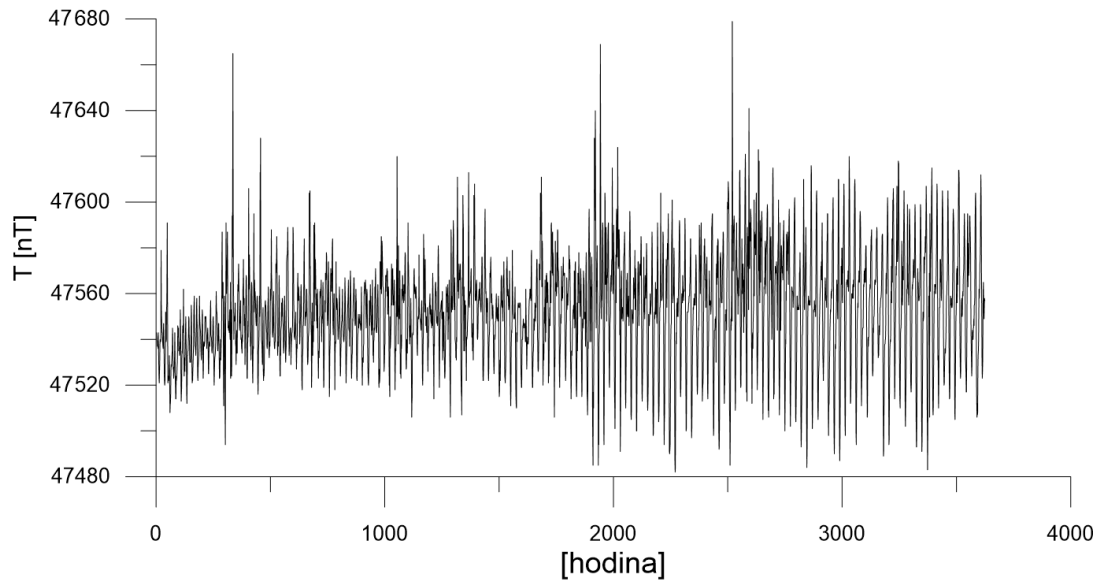
krátkodobé:

denné a poldenné variácie (súvisia s rotáciou Zeme),
magnetické búrky – nepravidelné (súvisia so slnečnou činnosťou)
Sú registrované v observatóriách alebo v teréne tzv. variačným
(staničným, stacionárnym) magnetometrom. Niekedy sa z dát
odstraňujú pomocou špeciálnych filtrov (medián. a low-pass filtre).

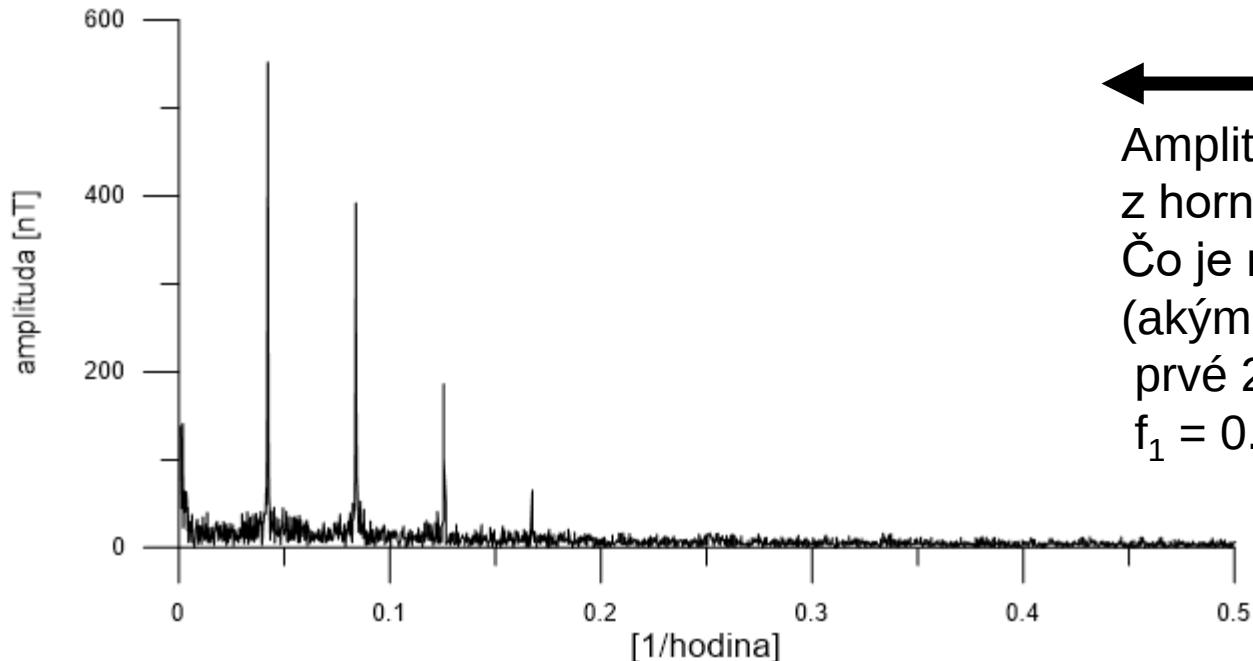


Typický záznam
z variačného magnetometra
(na poludnie dochádza
k poklesu veľkosti poľa T)

časové zmeny ZMP (variácie)



Príklad záznamu zložky T
z observatória
(Kobezi pri Viedni)
(hodinový záznam
z intervalu cca 5 mesiacov)



Amplitúdové spectrum
z horného záznamu zložky T .
Čo je možné z neho vyčítať?
(akým periódam zodpovedajú
prvé 2 píky?
 $f_1 = 0.0417$ 1/h, $f_2 = 0.0834$ 1/h)

časové zmeny ZMP (variácie)

variácie geomagnetického poľa – časové zmeny:

Poznámka: Pri meraní s gradiometrami sa opravy o variácie nemusia vykonávať (tieto pôsobia naraz približne rovnako na horný a spodný senzor).

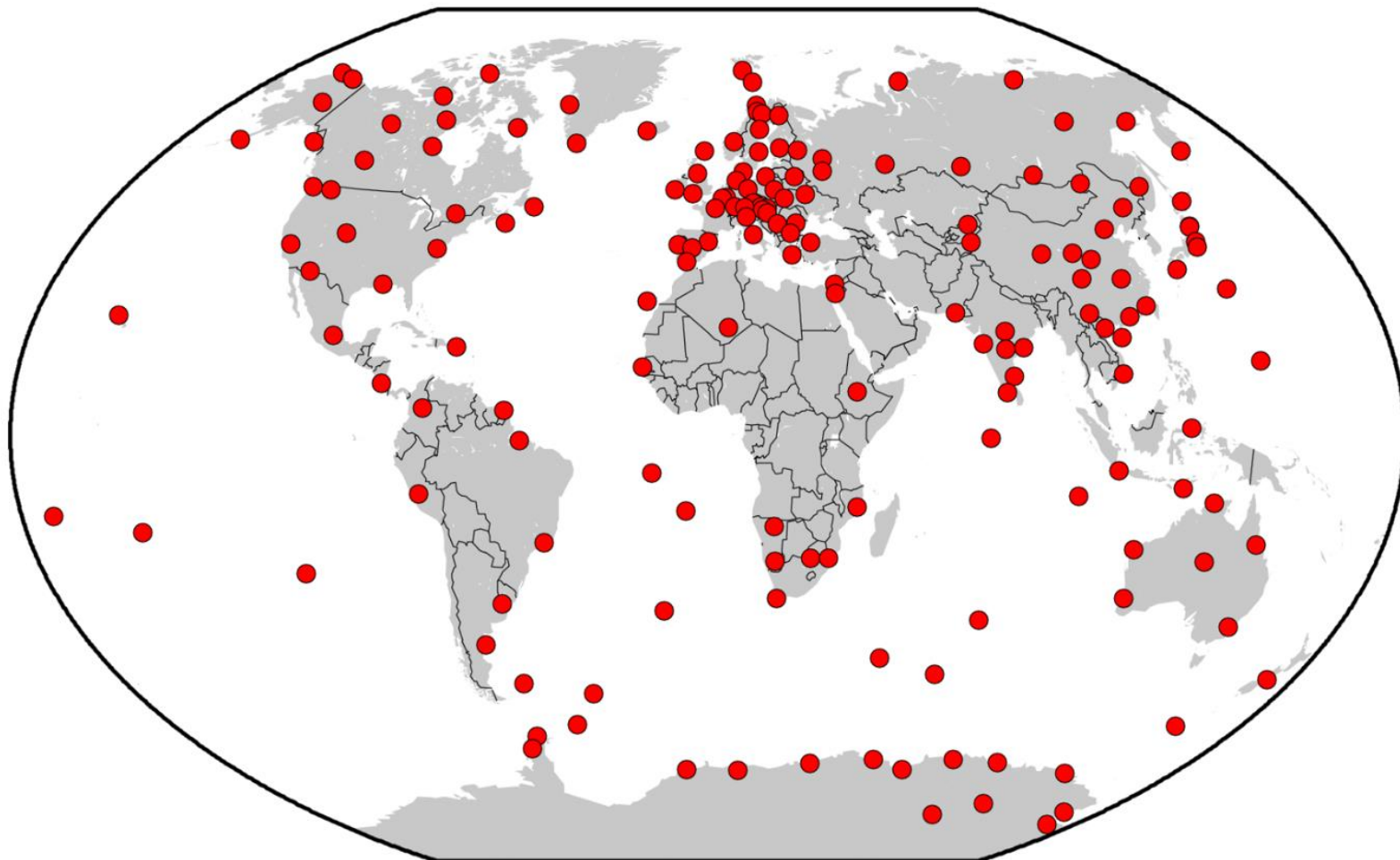


Magnetometria

zemské magnetické pole (ZMP)

- vznik a vlastnosti ZMP
- zložky totálneho vektora magnetickej indukcie
- časové zmeny (variácie) ZMP
- meranie ZMP – observatóriá
- matematický model popisu ZMP
- pole ΔT , normálne pole (metódy jeho určovania)

meranie ZMP - observatóriá

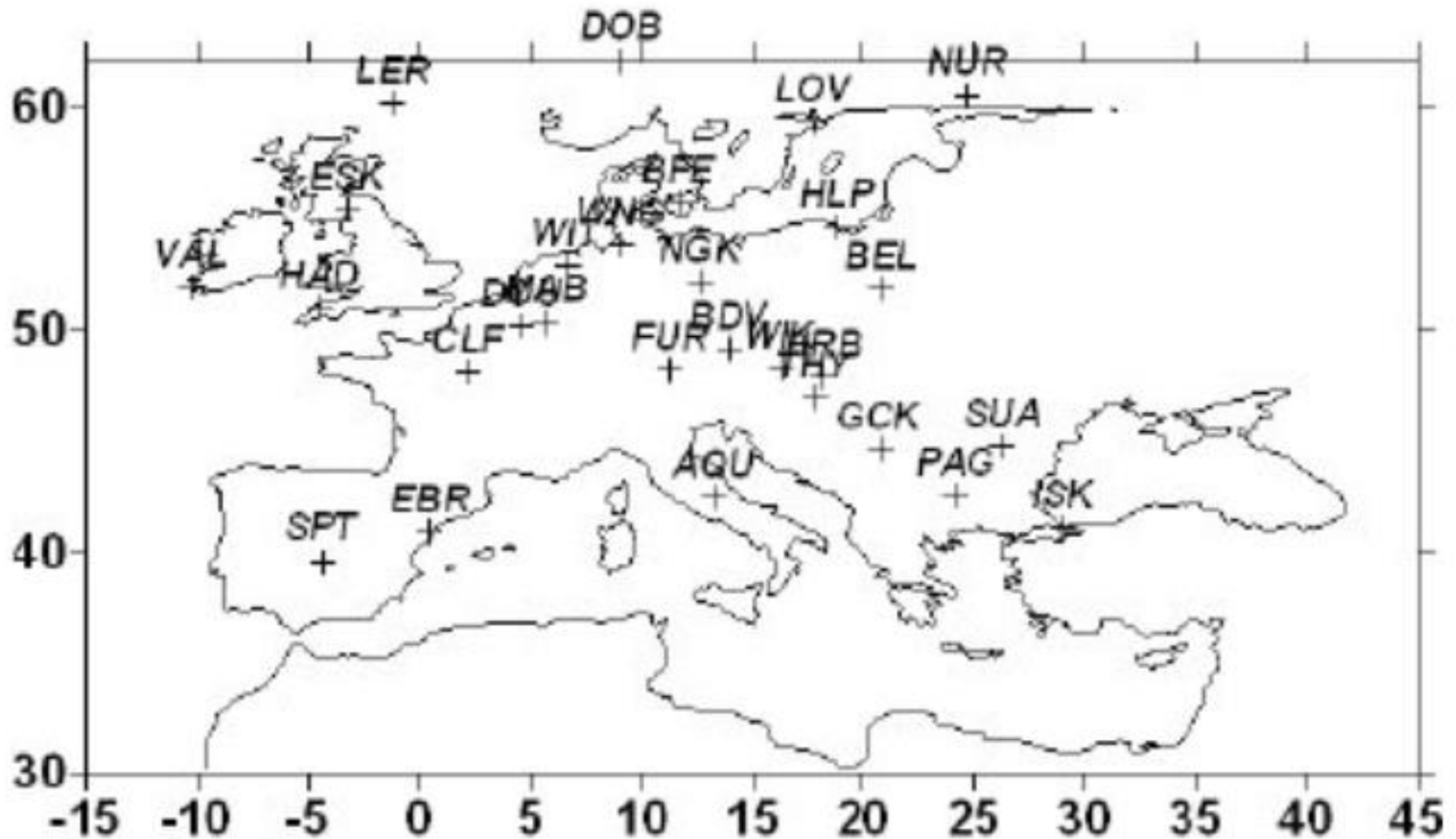


Rozmiestnenie súčasných magnetometrických observatórií
(zdroj: webstránka British Geological Survey - BGS)

Zaujímavá stránka: projekt INTERMAGNET

<https://www.intermagnet.org/imos/imomap-eng.php>

meranie ZMP - observatóriá



U nás sa nachádza dôležité observatórium v Hurbanove (HRB).
Nepretržitá observácia (dokonca aj počas 2. sv. vojny) viac ako 100 rokov!



[Home](#) » [Magnetic Observatories \(IMOs\)](#) » [List of IMOs and Responsible GINs](#) » [Hurbanovo \(HRB\)](#)

[List of IMOs](#)[Maps of IMOs](#)[Photos of IMOs](#)[Membership Application Form](#)

Hurbanovo (HRB)

Station (ID)	HRB
Location	Hurbanovo
Country	Slovakia
Institutes	Geophysical Institute of Slovak Academy of Sciences (Slovakia)
Co-latitude	42.14°
Longitude	18.19°
Elevation	112 meters
Orientation	XYZF
Instruments	Absolutes: DI-fluxgate magnetometer (type ELSEC 810) proton magnetometer (type ELSEC 820 M2) Variations: Torsion photoelectric magnetometer TPM employing Bobrov-type quartz variometers

U nás sa nachádza dôležité observatórium v Hurbanove (HRB).
Nepretržitá observácia (dokonca aj počas 2. sv. vojny) viac ako 100 rokov!

Magnetometria

zemské magnetické pole (ZMP)

- vznik a vlastnosti ZMP
- zložky totálneho vektora magnetickej indukcie
- časové zmeny (variácie) ZMP
- meranie ZMP – observatóriá
- matematický model popisu ZMP
- pole ΔT , normálne pole (metódy jeho určovania)

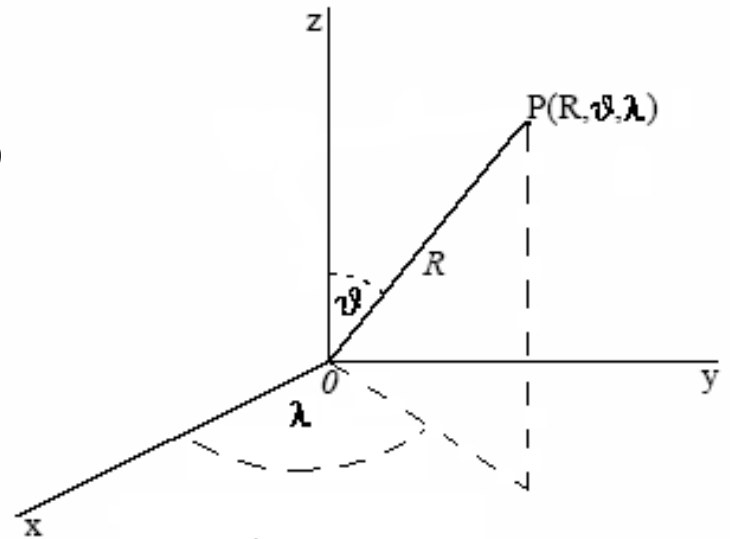
matematický model ZMP

Je spojený s riešením Laplaceovej rovnice vo sférických súradniciach (už od čias F. Gaussa)

R – centrálna vzdialenosť

ϑ – doplnok zemepisnej šírky, $\varphi = 90^\circ - \vartheta$

λ – azimutálny uhol (zemepisná dĺžka)



prvky sfér. súradnicového systému

$$U(R, \vartheta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{R} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\cos \vartheta)$$

kde:

tzv. sférické funkcie (spherical harmonics)

R, ϑ, λ - sú sférické súradnice,

a – polomer Zeme (pri guľovej aproximácii),

A_{nm}, B_{nm} – koeficienty tzv. sférických funkcií,

P_n^m – tzv. pridružené Legendreove polynómy

matematický model ZMP

Riešene Laplaceovej rovnice vo sférických súradniciach.

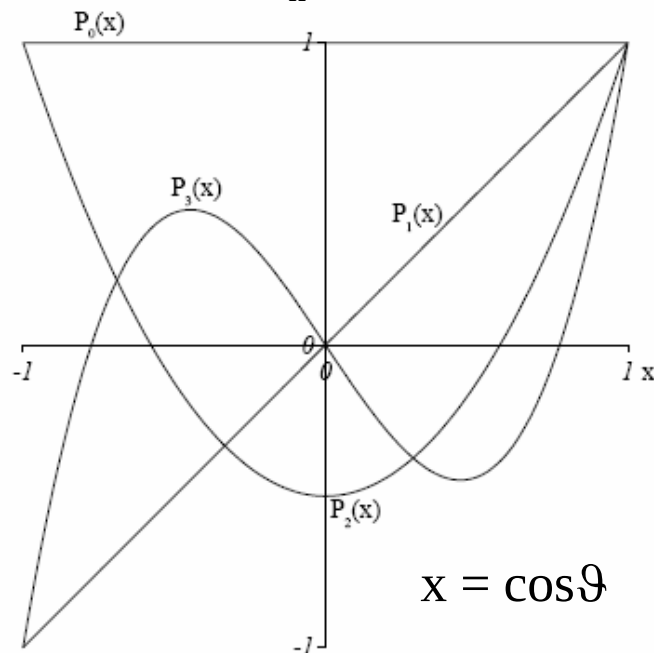
$$U(R, \vartheta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{R} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\cos \vartheta)$$

tzv. sférické funkcie (spherical harmonics)

kde:

R, ϑ, λ - sú sférické súradnice, a – polomer Zeme (pri guľovej aproximácii),

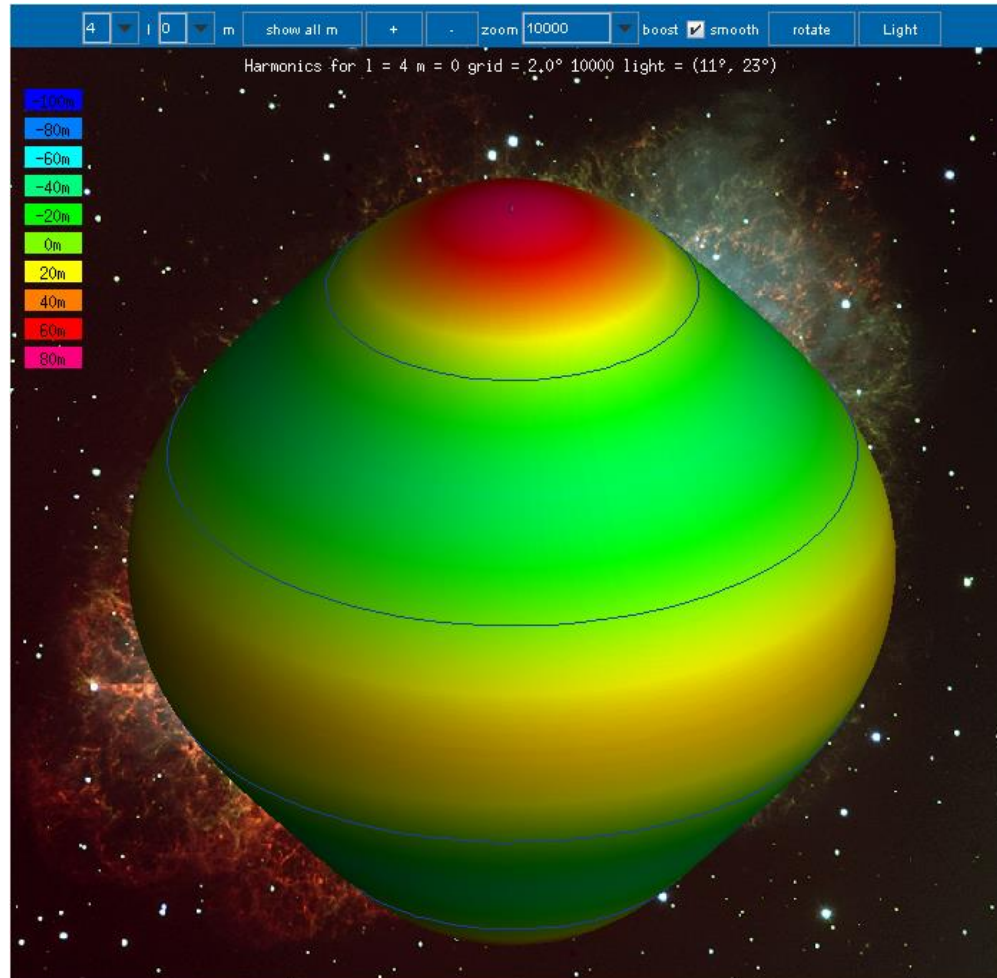
A_{nm}, B_{nm} – koef. tzv. sférických funkcií, P_n^m – tzv. pridružené Legendreove polynómy



matematický model ZMP

$$U(R, \vartheta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{R} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\cos \vartheta)$$

tzv. sférické funkcie (spherical harmonics)



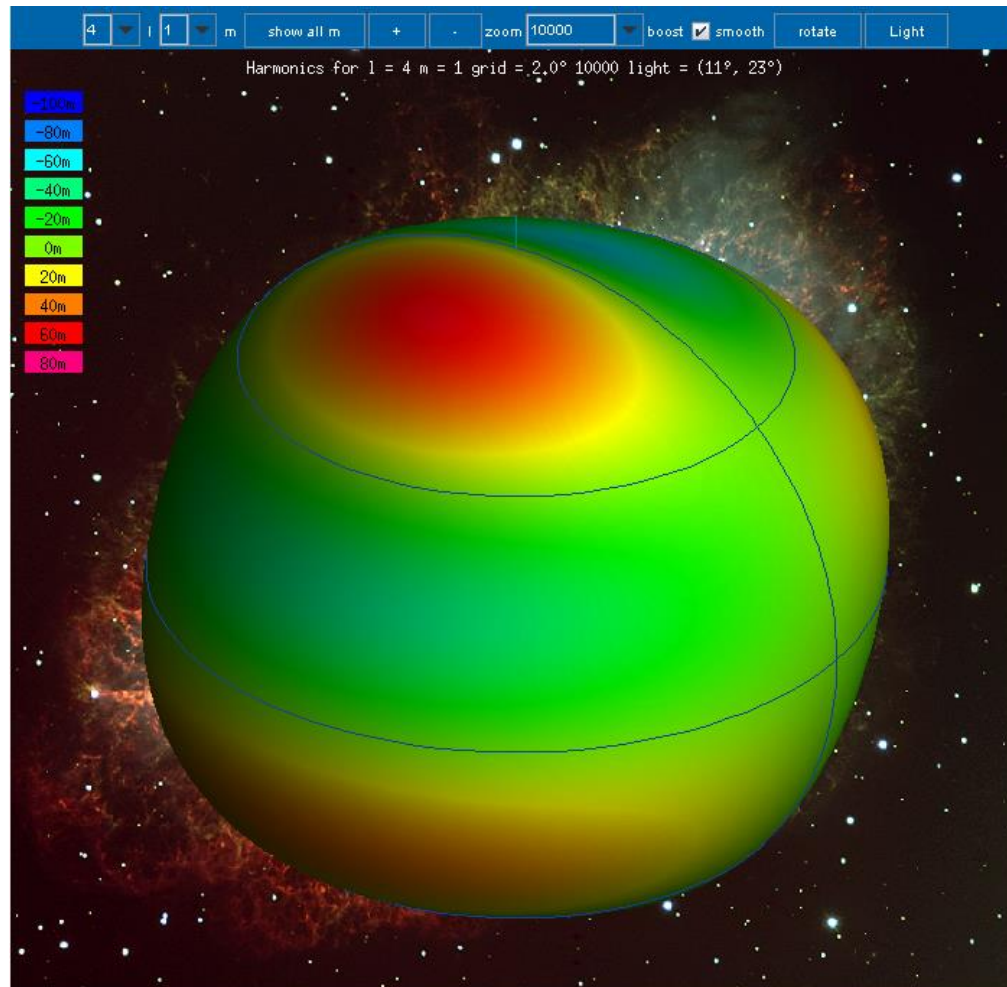
$$n = 4$$
$$m = 0$$

tzv. zonálne
sférické fun.

matematický model ZMP

$$U(R, \vartheta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{R} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\cos \vartheta)$$

tzv. sférické funkcie (spherical harmonics)

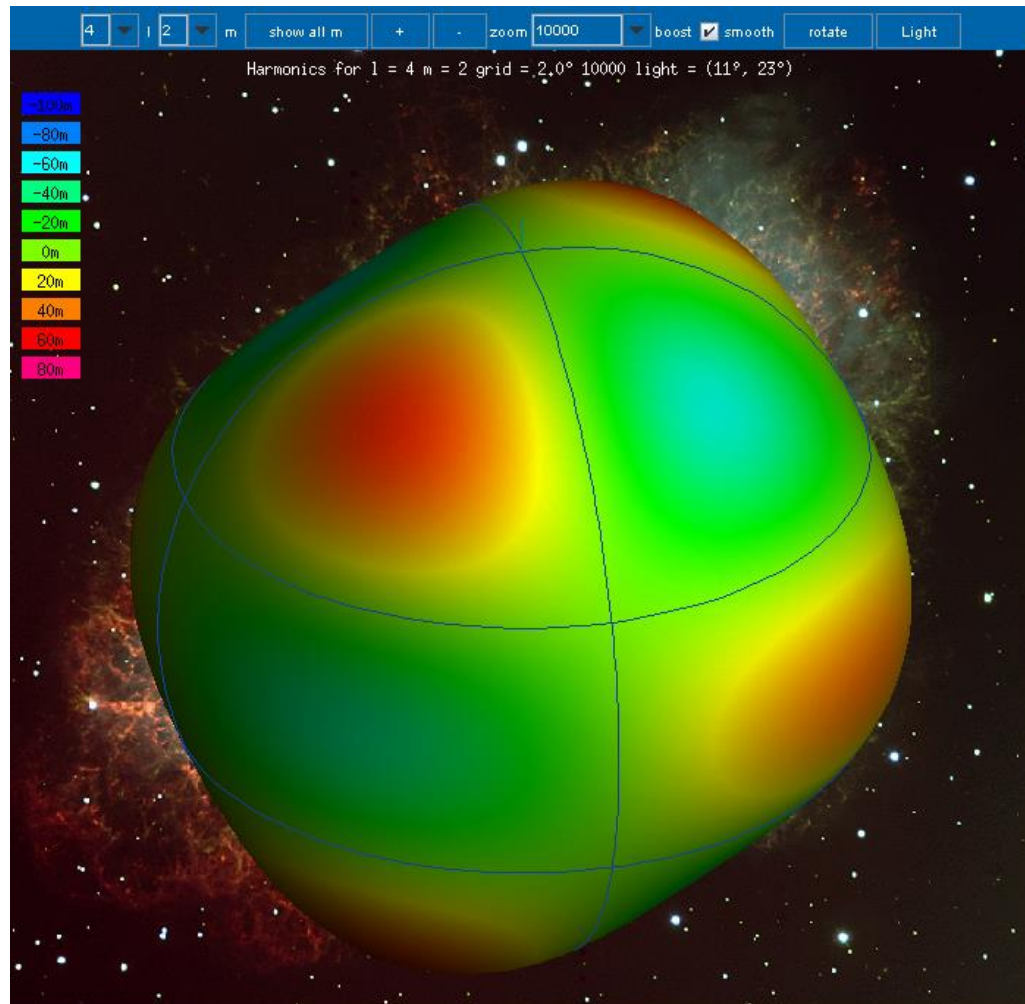


$$n = 4$$
$$m = 1$$

matematický model ZMP

$$U(R, \vartheta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{R} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\cos \vartheta)$$

tzv. sférické funkcie (spherical harmonics)

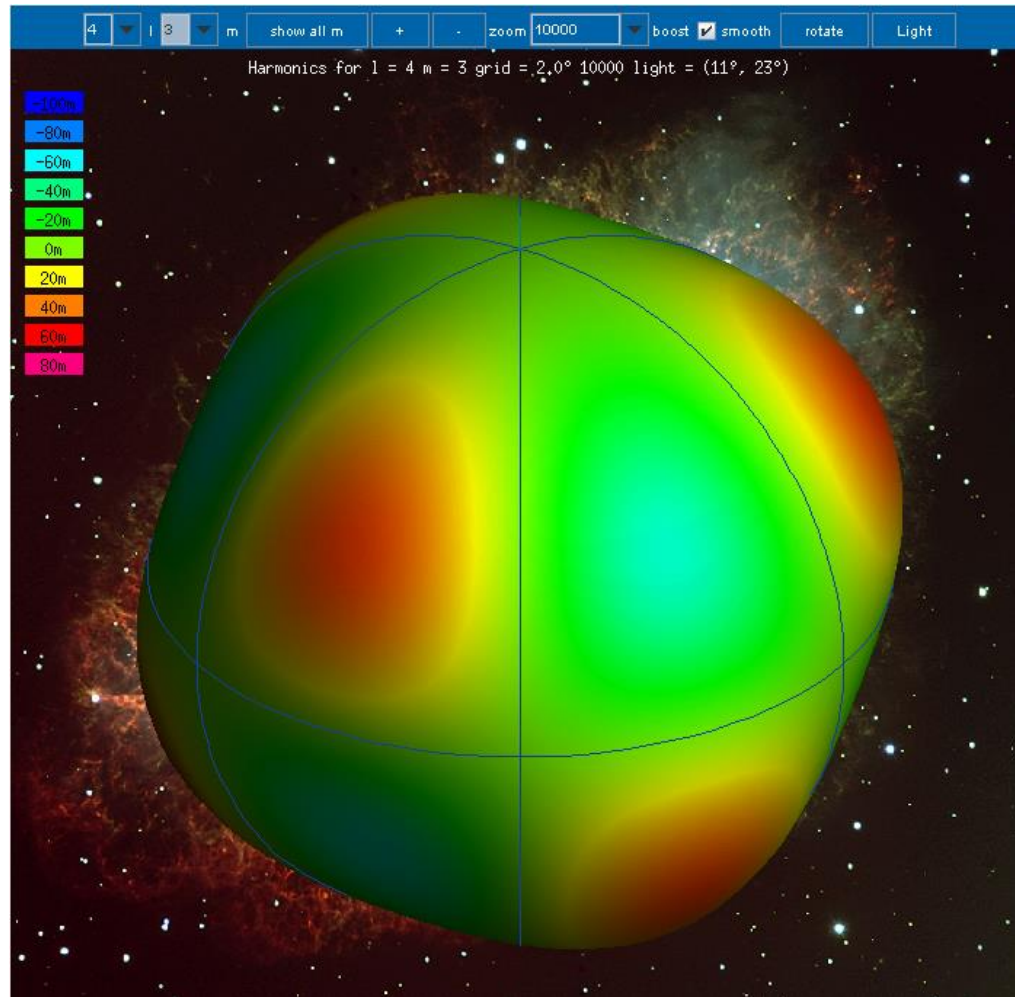


$$n = 4$$
$$m = 2$$

matematický model ZMP

$$U(R, \vartheta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{R} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\cos \vartheta)$$

tzv. sférické funkcie (spherical harmonics)

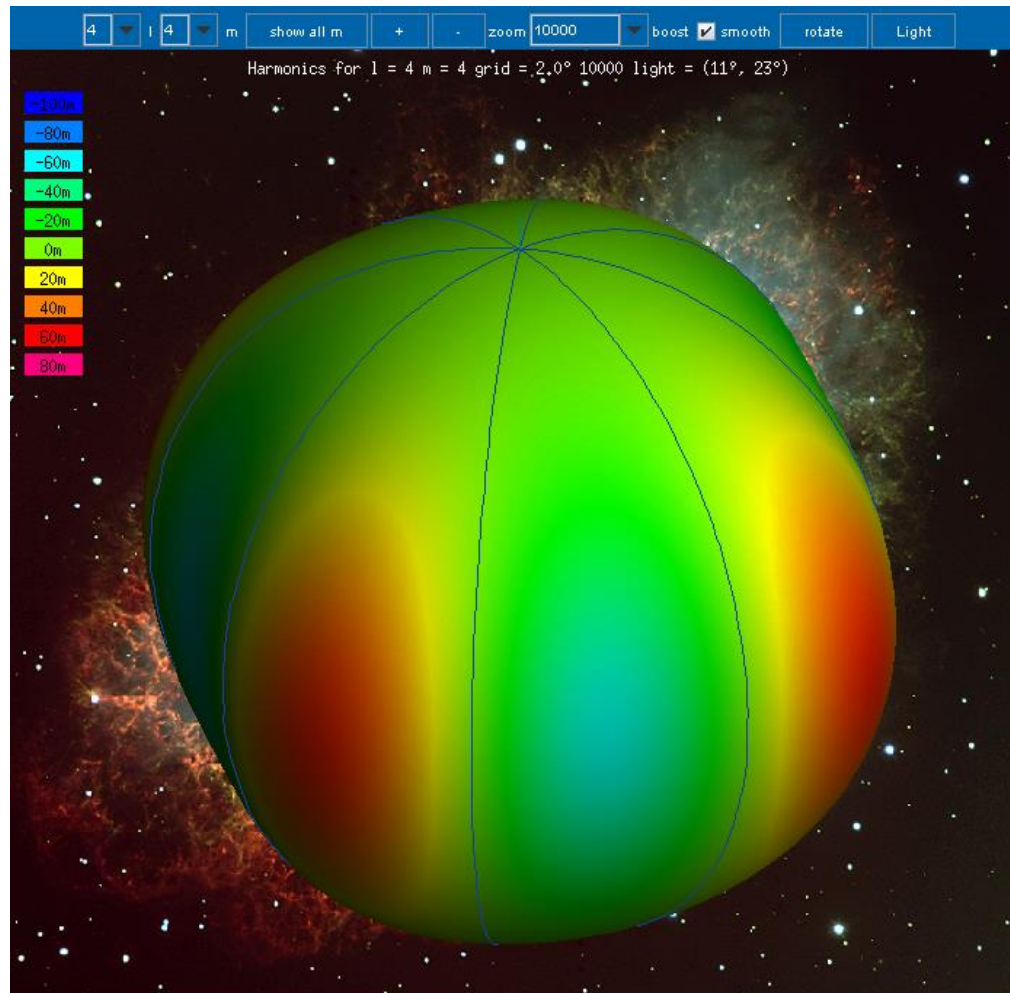


$$n = 4$$
$$m = 3$$

matematický model ZMP

$$U(R, \vartheta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{R} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\cos \vartheta)$$

tzv. sférické funkcie (spherical harmonics)



$$n = 4$$

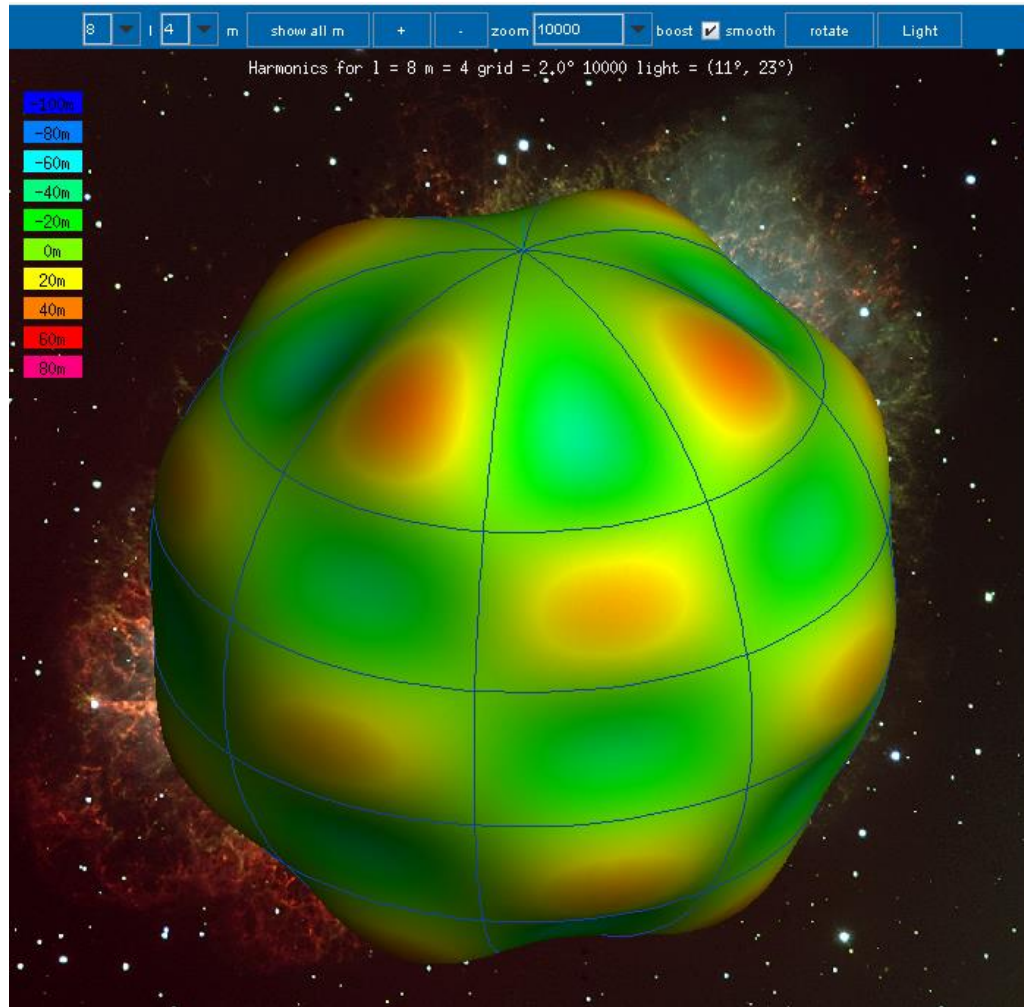
$$m = 4$$

tzv. sektorálne
sférické fun.

matematický model ZMP

$$U(R, \vartheta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{R} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\cos \vartheta)$$

tzv. sférické funkcie (spherical harmonics)



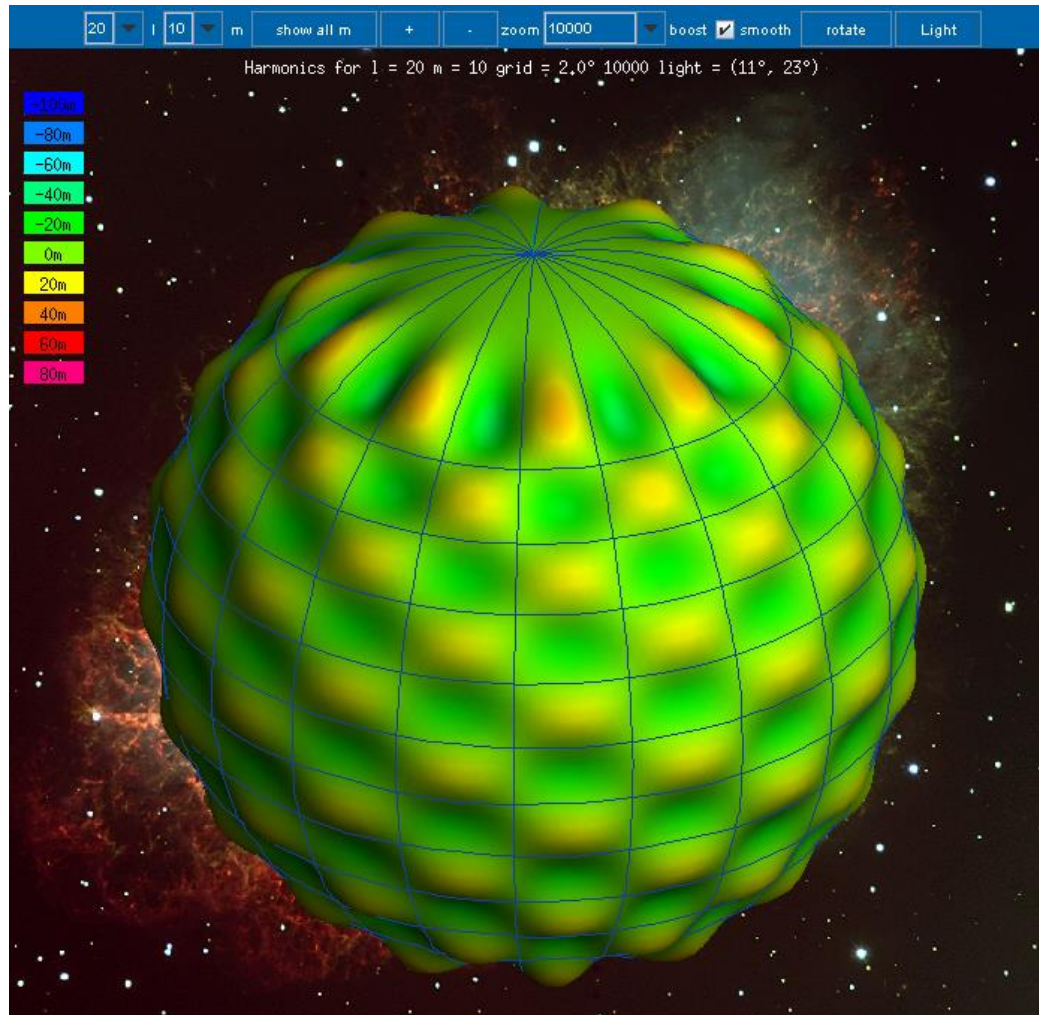
$$n = 8$$
$$m = 4$$

tzv. tesserálne
sférické fun.

matematický model ZMP

$$U(R, \vartheta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{R} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\cos \vartheta)$$

tzv. sférické funkcie (spherical harmonics)



n = 20

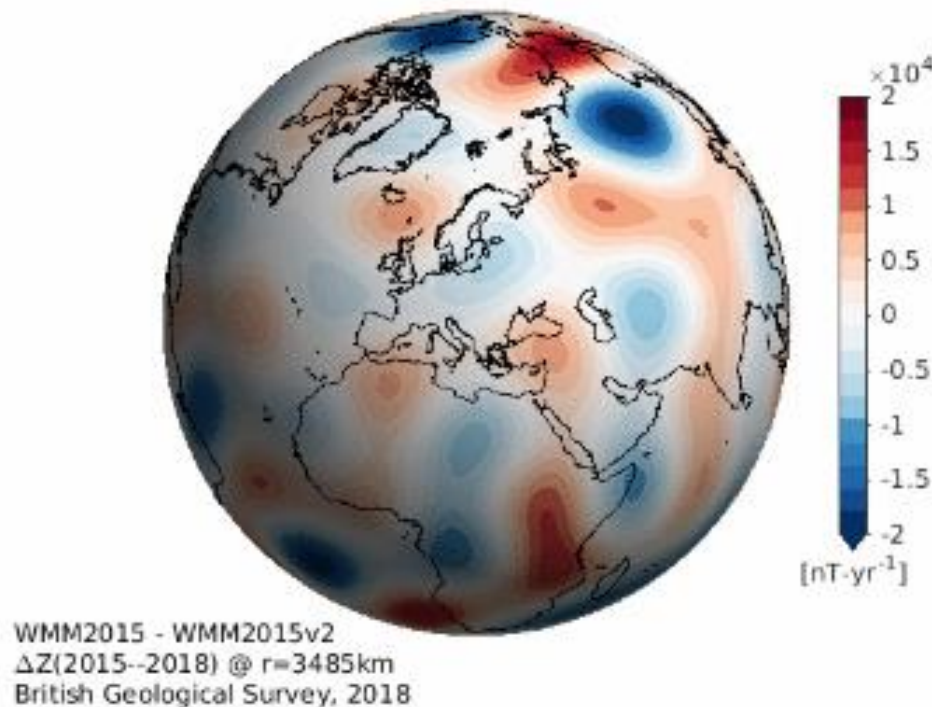
m = 10

tzv. tesserálne
sférické fun.

matematický model ZMP

$$U(R, \vartheta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{R} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\cos \vartheta)$$

Tieto rozvoje sférických funkcií sú základom používaných modelov ZMP: IGRF, WMM a EMM.



príklad WMM2015 model - index “n” je do stupňa 12

Magnetometria

zemské magnetické pole (ZMP)

- vznik a vlastnosti ZMP
- zložky totálneho vektora magnetickej indukcie
- časové zmeny (variácie) ZMP
- meranie ZMP – observatóriá
- matematický model popisu ZMP
- pole ΔT , normálne pole (metódy jeho určovania)

výpočet anomálií magnetického poľa ΔT

Pre účely kvalitatívnej a kvantitatívnej interpretácii v aplikovanej magnetometrii je dôležité na prieskumných profiloch a plochách odpočítat' od hodnôt meraného poľa T určité pozadie –

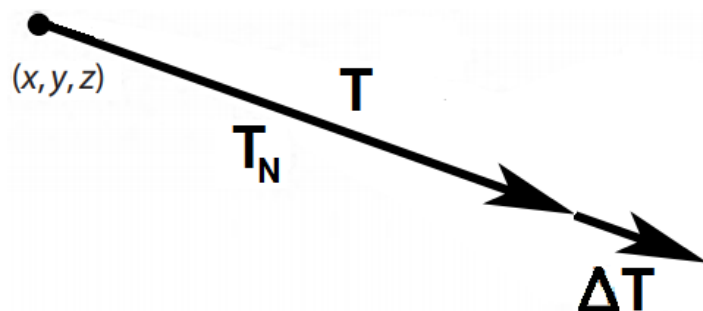
tzv. **normálne pole** T_N , aby sme získali tzv. **anomálie** ΔT , ktoré vyjadrujú dipólový charakter (+/- časti) zmeraného anomálneho magnetického poľa.

Napriek tomu, že pole T je vektorového charakteru, väčšina bežných magnetometrov sú skalárne – merajú veľkosť totálneho vektora T .

Pozn.: Pri gradiometrických prieskumoch sa normálne pole neurčuje a neodpočítava.

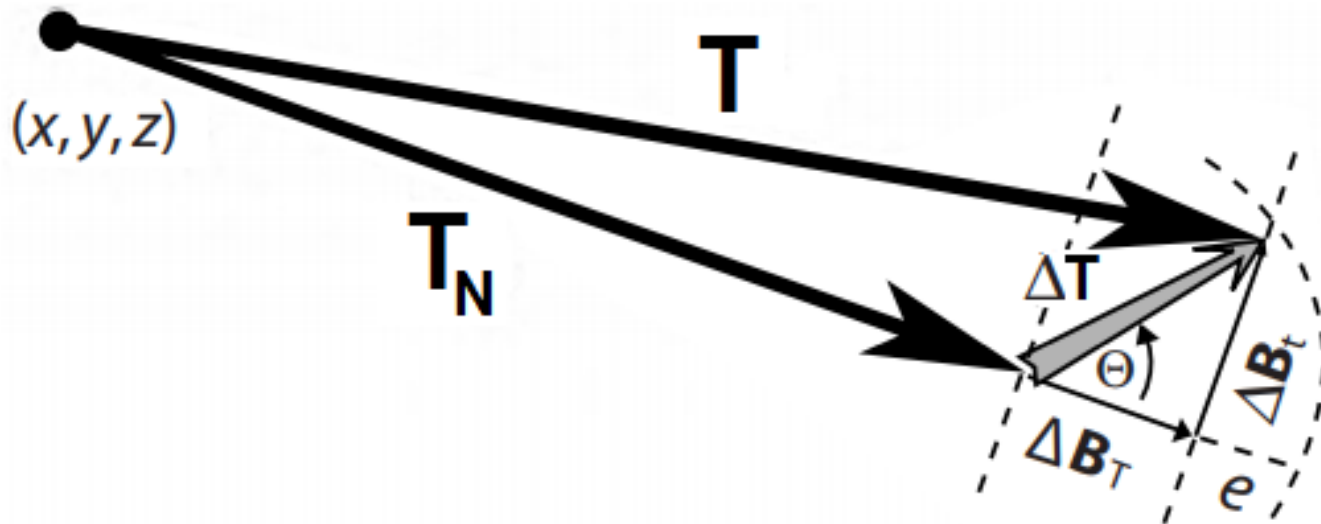
Základný vzťah pre výpočet poľa ΔT :

$$\Delta T = |\vec{T}| - |\vec{T}_N| = T - T_N$$



odhad chyby pri výpočte poľa ΔT (1/3)

V skutočnosti je však situácia zložitejšia, vektor poľa ΔT nemusí smerovať v tom istom smere, ako vektor T_N . V takom prípade sa dopúšťame pri tomto jednoduchom výpočte poľa ΔT určitej chyby $e_{\Delta T} = e$ (ktorú vieme približne odhadnúť):



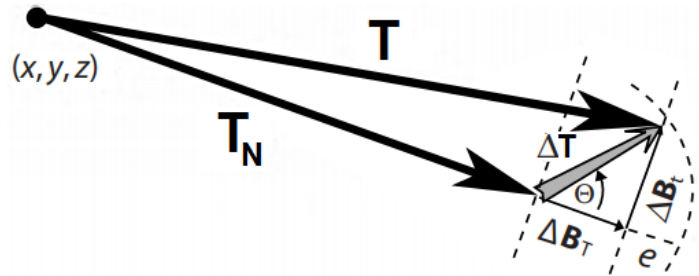
Úsečka e na obrázku znázorňuje rozdiel, ktorý vznikne, keď vektor ΔT natočíme (nie premietneme) do smeru hlavného vektora T_N . Pomocou jednoduchšej geometrie 2 pravouhlých trojuholníkov na obrázku je možné približne odhadnúť veľkosť tejto chyby e .

odhad chyby pri výpočte poľa ΔT (2/3)

Klasický vzorec pre ΔT :

$$\Delta T = |\vec{T}| - |\vec{T}_N| = T - T_N$$

V skutočnosti ale platí pre T (vid' obr.):



$$T = T_N + \Delta B_T + e$$

Z čoho sa dá vyjadriť chyba e :

$$e = T - (T_N + \Delta B_T) = \sqrt{(T_N + \Delta B_T)^2 + (\Delta B_t)^2} - (T_N + \Delta B_T) =$$

Pod odmocninou vyjmeme dvojčlen $(T_N + \Delta B_T)$:

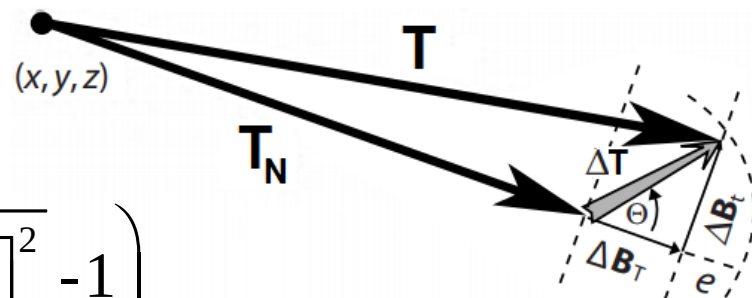
$$e = \sqrt{(T_N + \Delta B_T)^2 \left[1 + (\Delta B_t)^2 / (T_N + \Delta B_T)^2 \right]} - (T_N + \Delta B_T) =$$

$$= (T_N + \Delta B_T) \sqrt{1 + [\Delta B_t / (T_N + \Delta B_T)]^2} - (T_N + \Delta B_T) =$$

$$= (T_N + \Delta B_T) \left(\sqrt{1 + [\Delta B_t / (T_N + \Delta B_T)]^2} - 1 \right) =$$

odhad chyby pri výpočte poľa ΔT (3/3)

Pokračovanie:



$$e = (T_N + \Delta B_T) \left(\sqrt{1 + \left[\Delta B_t / (T_N + \Delta B_T) \right]^2} - 1 \right)$$

Na základe binomickej vety pre odmocninu platí: $\sqrt{1+x} \approx 1 + \frac{1}{2}x + \dots$

$$e \approx (T_N + \Delta B_T) \left(1 + \left[\Delta B_t / 2(T_N + \Delta B_T) \right]^2 - 1 \right)$$

$$e \approx (T_N + \Delta B_T) \left(\left[\Delta B_t / 2(T_N + \Delta B_T) \right]^2 \right)$$

$$e \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta B_t^2}{T_N + \Delta B_T}$$

T_N	ΔT	e (max)
30,000 nT	500 nT	4 nT
30,000 nT	10,000 nT	1,667 nT
70,000 nT	10,000 nT	714 nT

z učebnice Hinze et al. (2013)

normálne magnetické pole T_N

Normálne magnetické pole v sebe zahŕňa celkové magnetické pole Zeme (čosi ako normálne pole v gravimetrii) plus vplyv hlbších zdrojov – tzv. kontinentálne anomálie (čosi ako regionálne pole v gravimetrii).

Vo všeobecnosti existujú **2 hlavné metódy** určenia normálneho poľa:

- štatistická (stredné hodnoty: aritm. priemer, median, móduš,...),
- využitie matematických modelov ZMP (IGRF, WMM, EMM).

Viacej v rámci zadania (cvičenie).