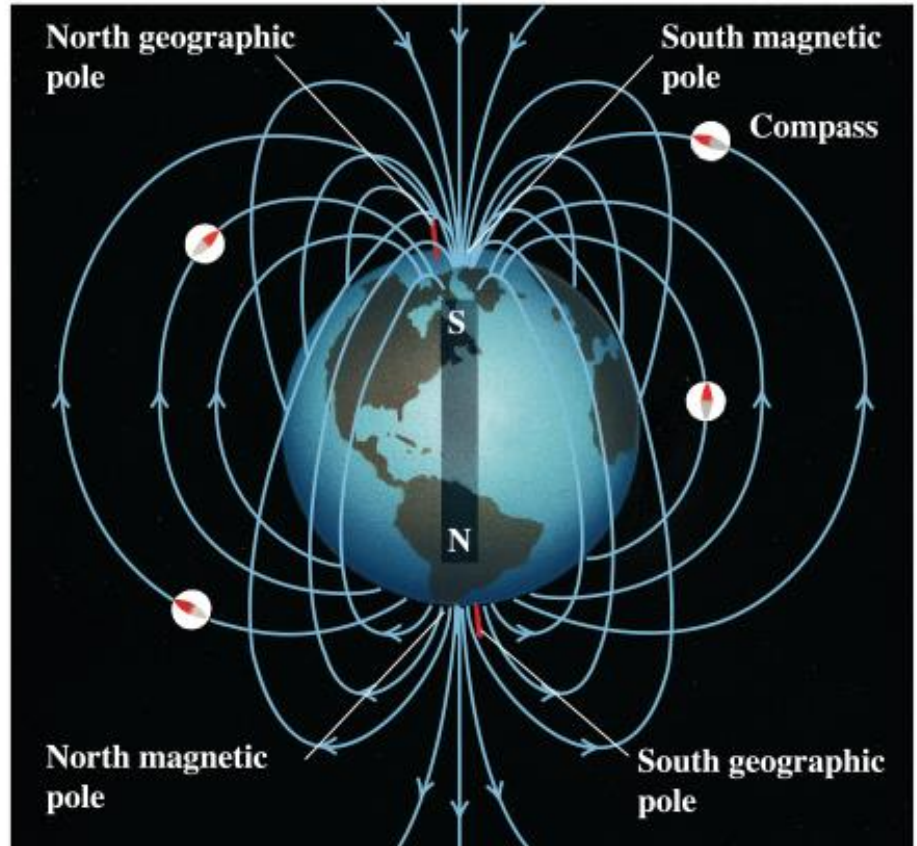
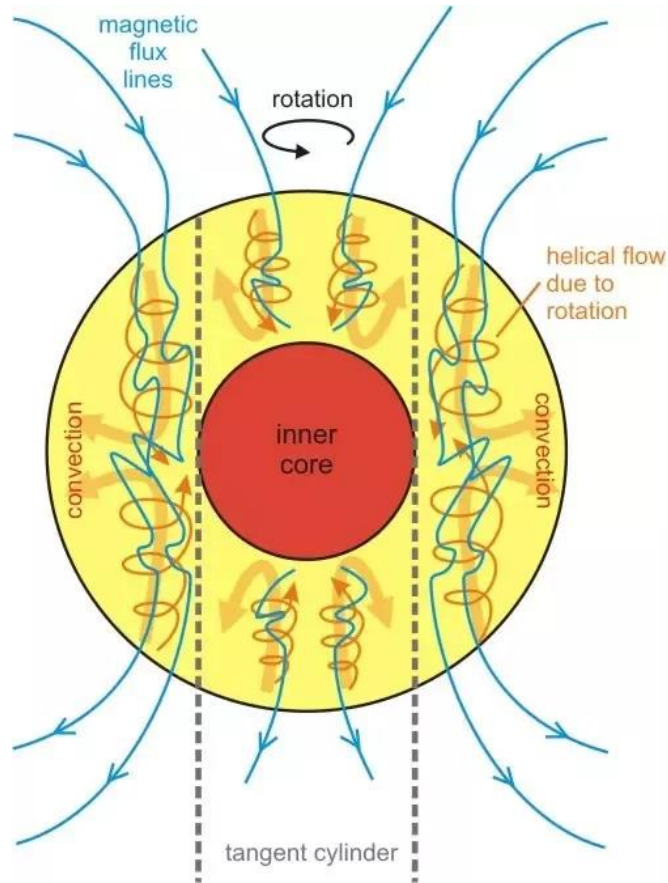


# Magnetometria

## 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  $\Delta T$ , normálne pole (metódy jeho určovania)

# vznik ZMP

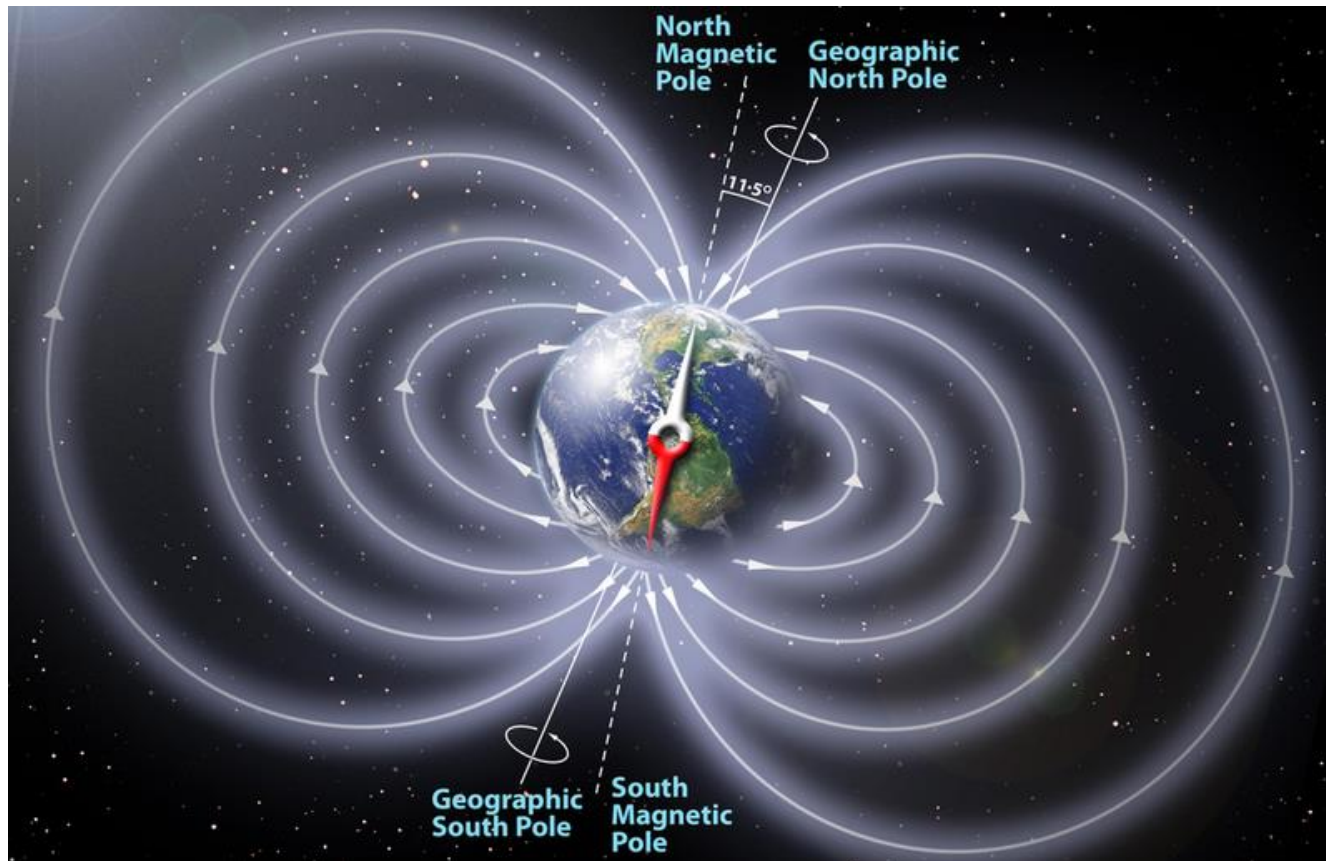


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

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).

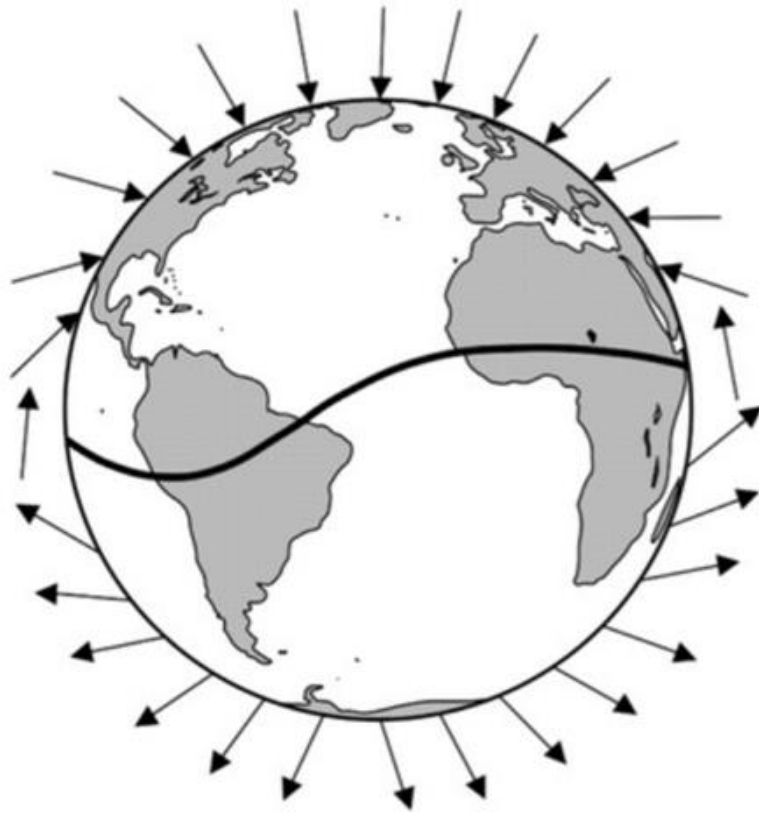
# vlastnosti ZMP



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

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.

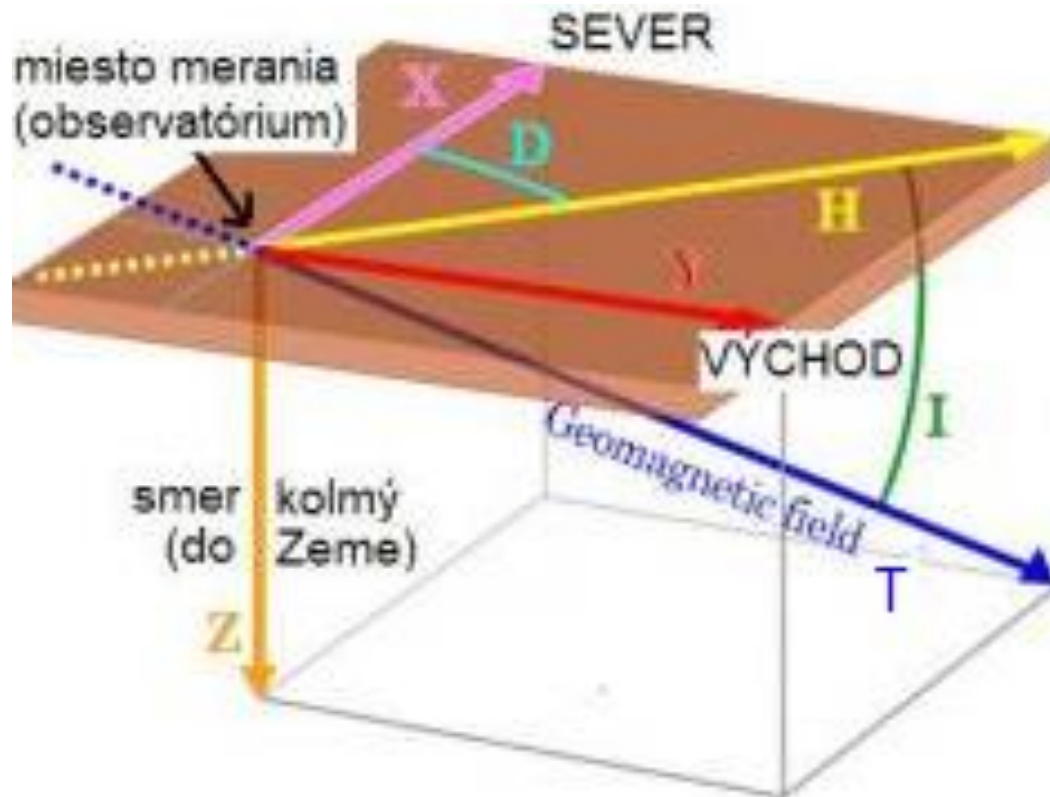
# vlastnosti ZMP



PH0832N Magnetic Needle Inclination/Declination Demonstration Compass

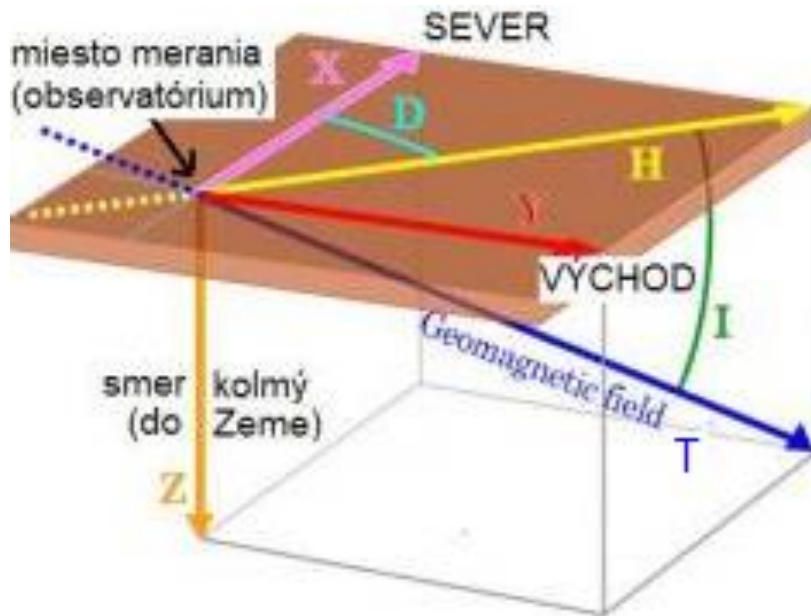
Smerovanie vektora  $\mathbf{T}$  (voči horiz. rovine ku zemskému povrchu) sa mení so zmenou zemepisnej šírky – tzv. inklinácia vektora  $\mathbf{T}$ . S týmito vlastnosťami vektora  $\mathbf{T}$  súvisia potom aj tvar a amplitúda “magnetických” anomálií na rôznych miestach na zemskom povrchu.

# 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:

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

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

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

# zložky ZMP

Približná veľkosť elementov ZMP v  $\mu\text{T}$

	<b>Póly</b>	<b>Rovník</b>	<b>SR</b>
<b>H</b>	0	30-40	20
<b>Z</b>	60-70	0	43
<b>T</b>	60-70	30-40	48
<b>I</b>	$\pm 90^\circ$	$0^\circ$	$65^\circ$
<b>D</b>	neurč.	$+10^\circ$ až $-20^\circ$	$+5^\circ$

= 20000 nT

= 43000 nT

= 48000 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

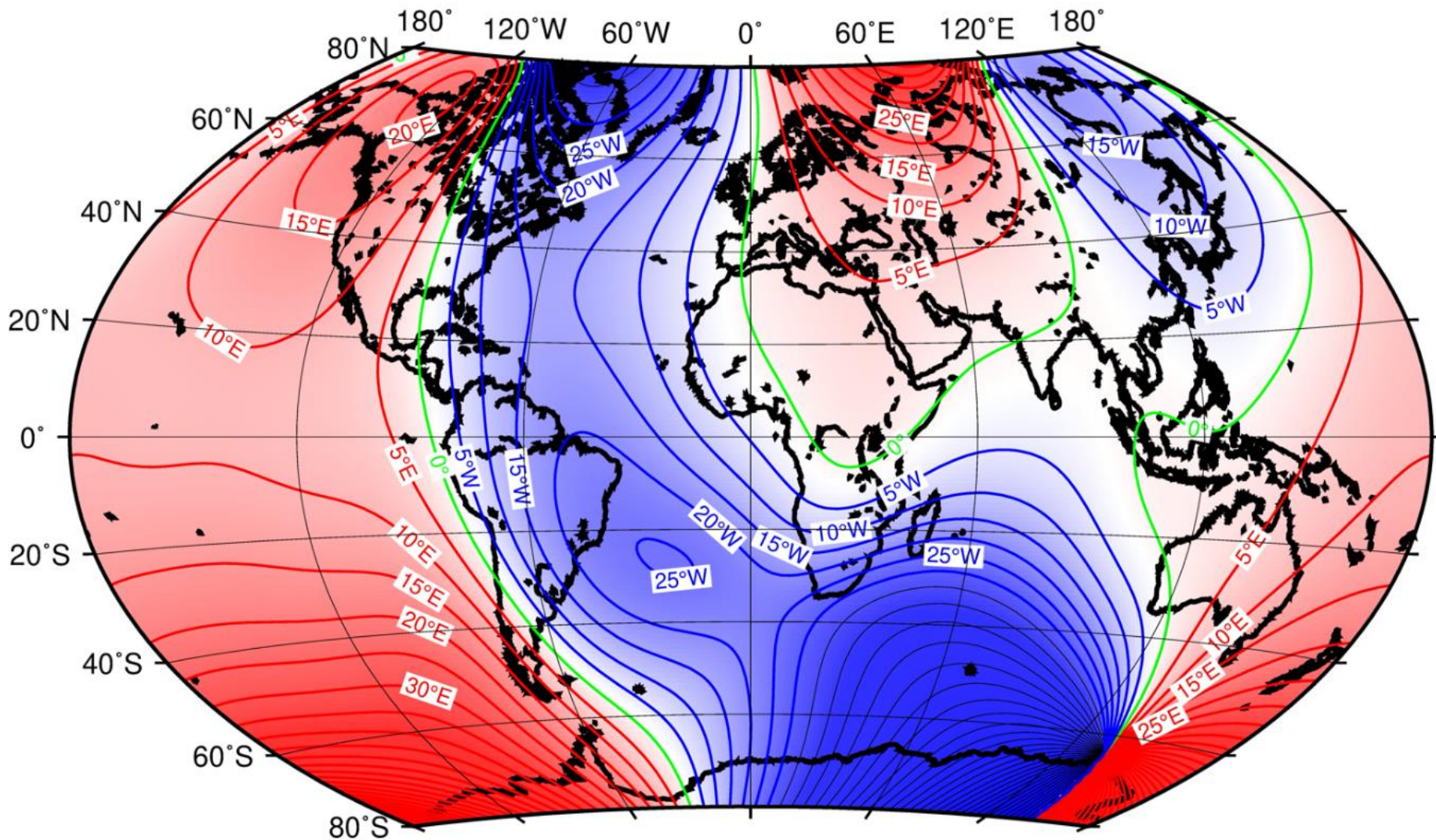
Tieto hodnoty (zložiek ZMP) sa menia v čase a z tohto dôvodu sa ich hodnoty (mapy) uvádzajú vždy pre určitú **epochu** (napr. 2019.0, 2019.5).

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

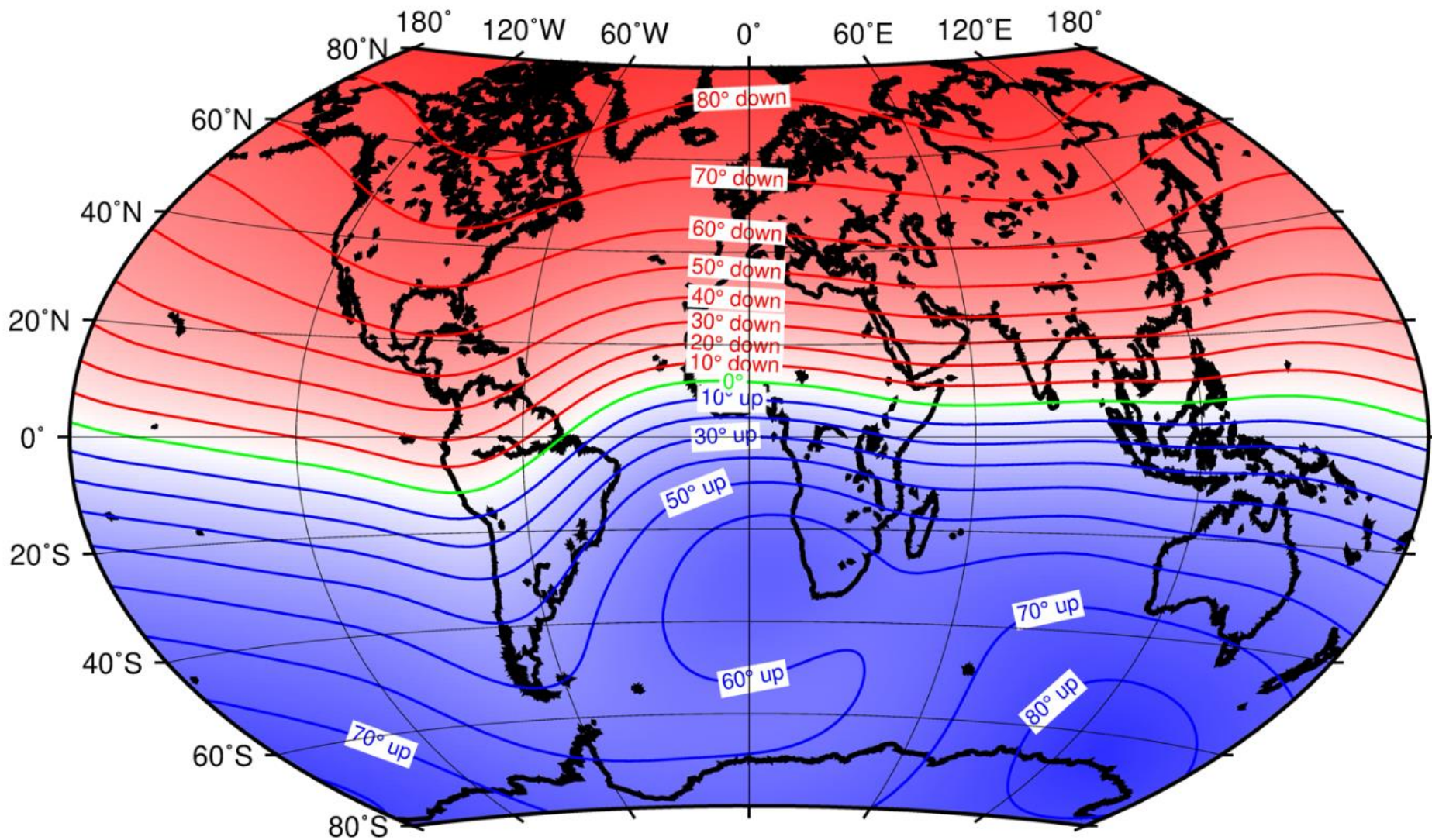


# zložky ZMP - deklinácia



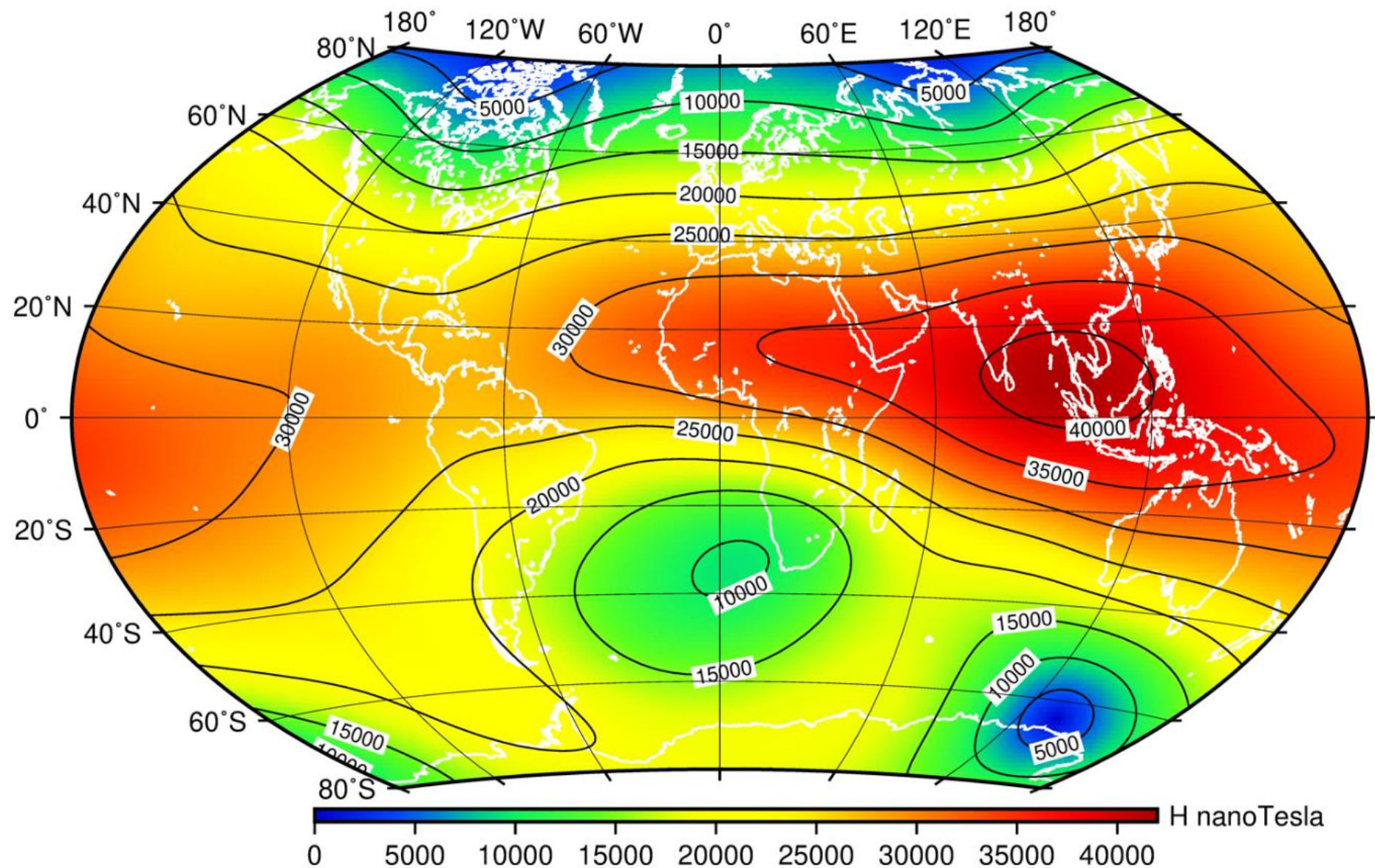
svetová mapa, izolínie deklinácie = tzv. izogóny (pre epochu 2020.0),  
zdroj: British Geological Survey

# zložky ZMP - inklinácia



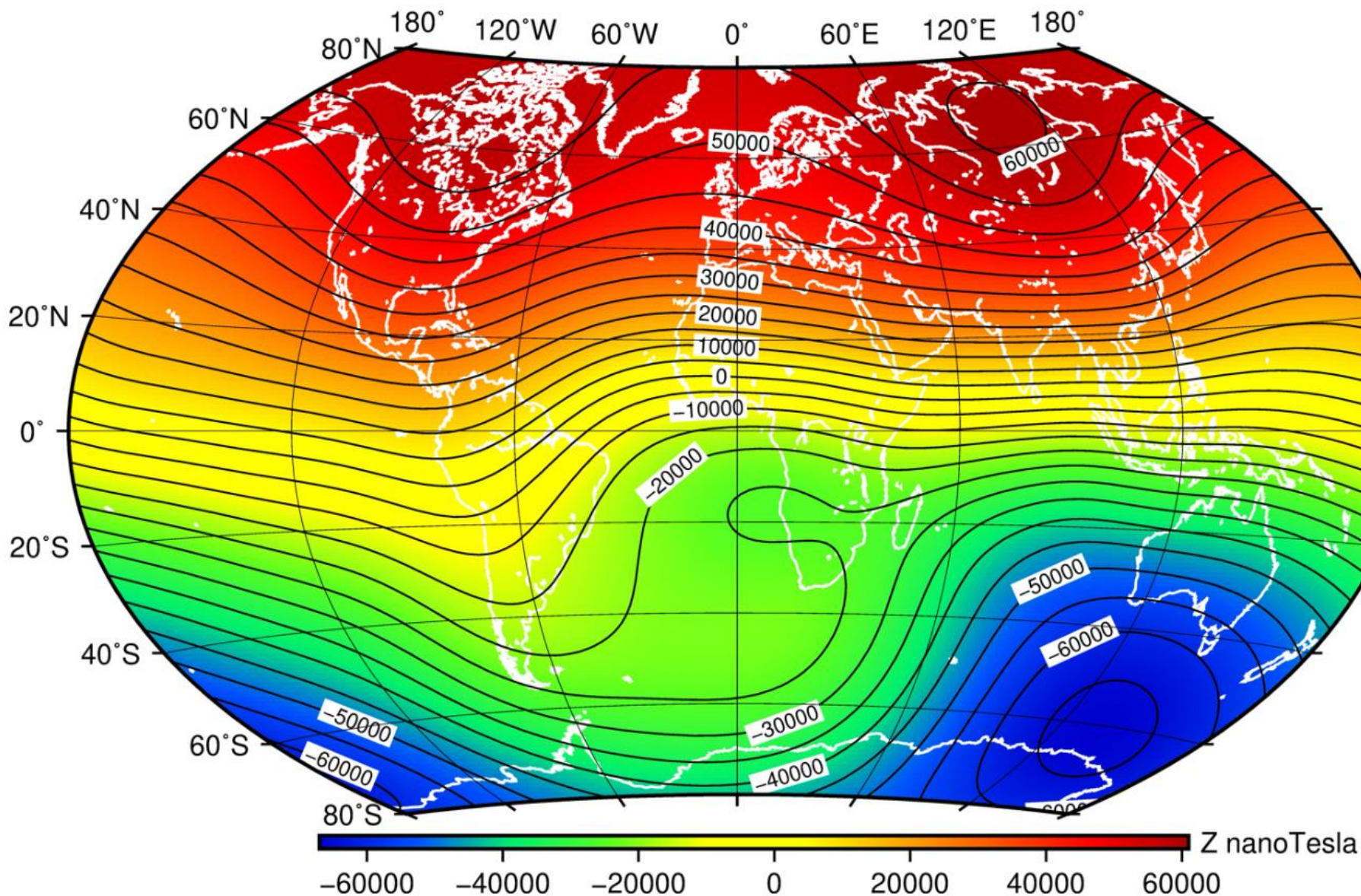
svetová mapa, izolínie inklinácie = tzv. izokliny (pre epochu 2020.0),  
zdroj: British Geological Survey

# zložky ZMP – veľkosť zložky H



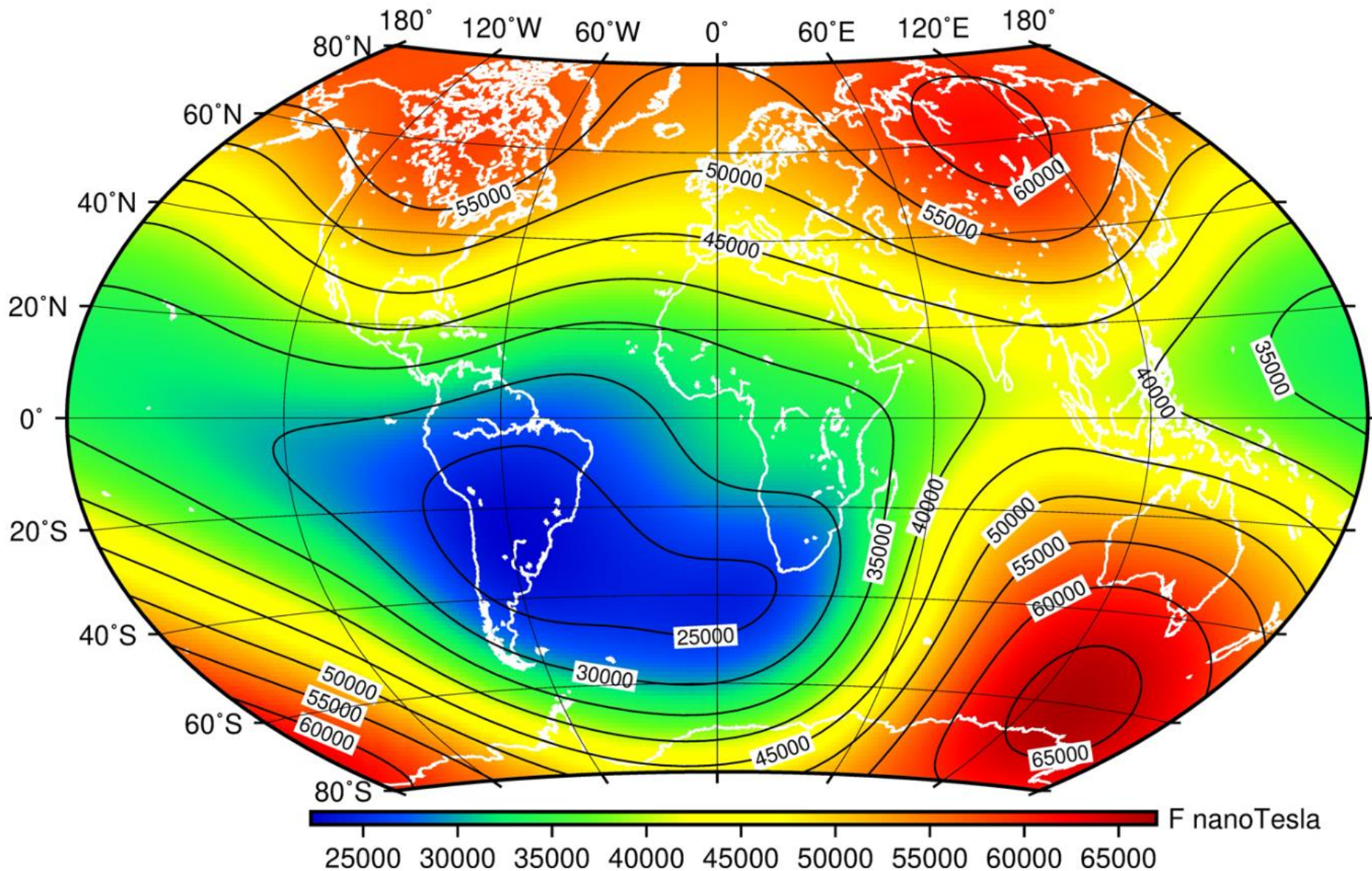
svetová mapa, izodynamy hodnôt zložky H (pre epochu 2020.0),  
zdroj: British Geological Survey

# zložky ZMP – veľkosť zložky Z



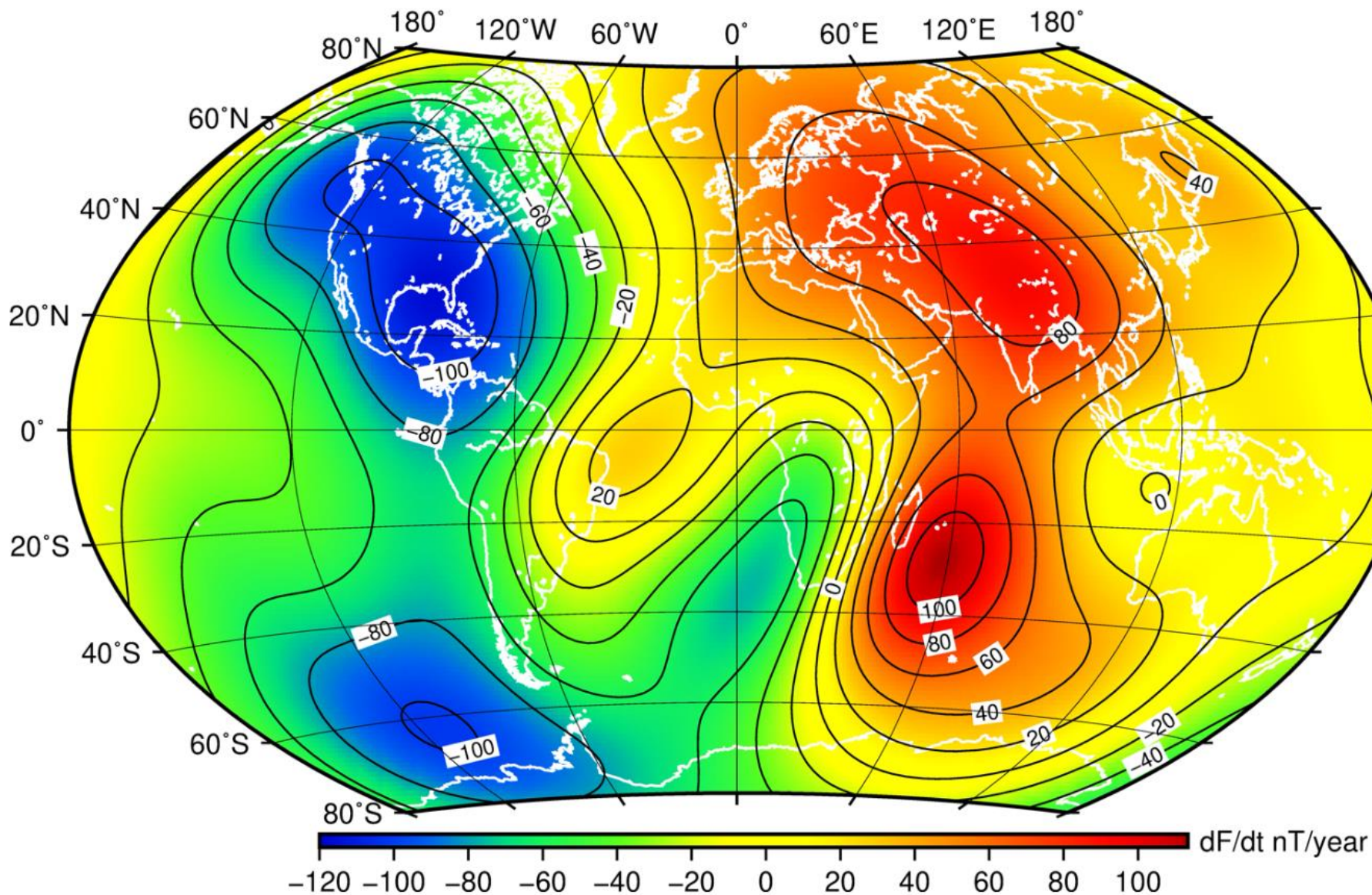
svetová mapa, izodynamy hodnôt zložky **Z** (pre epochu 2020.0),  
zdroj: British Geological Survey

# 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)

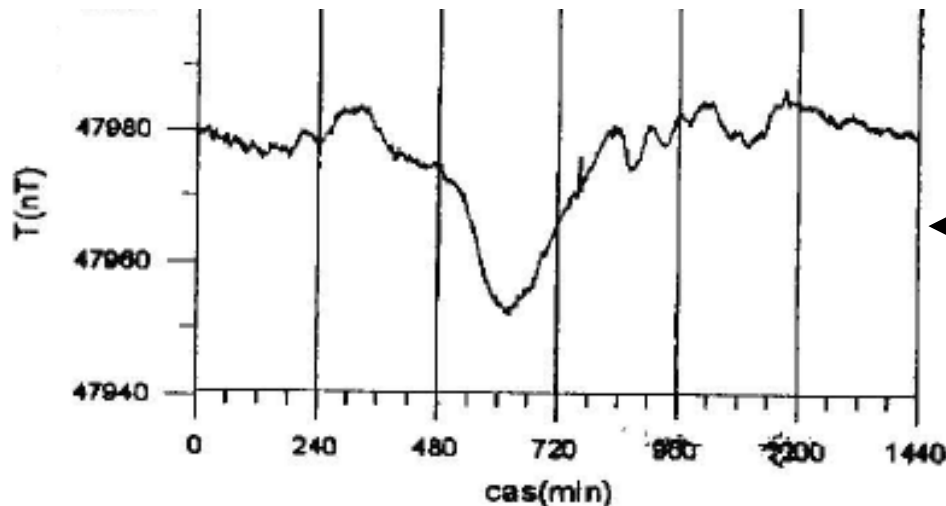
variácie geomagnetického poľa – časové zmeny:

## 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).

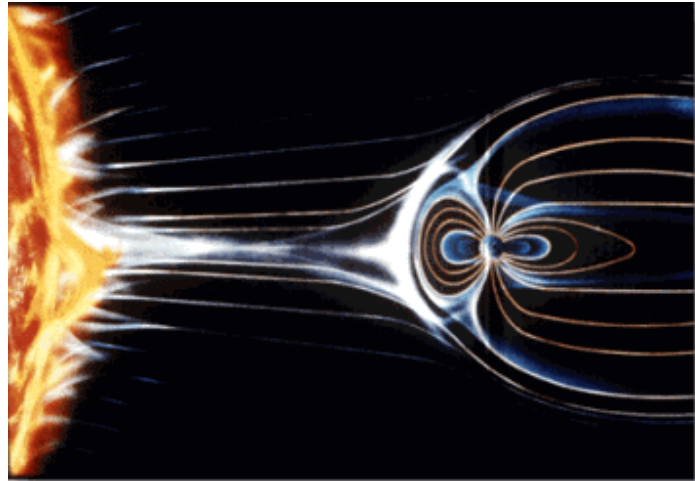


Typický záznam  
z variačného magnetometra  
(na poludnie dochádza  
k poklesu veľkosti poľa  $T$ )

# časové zmeny ZMP (variácie)

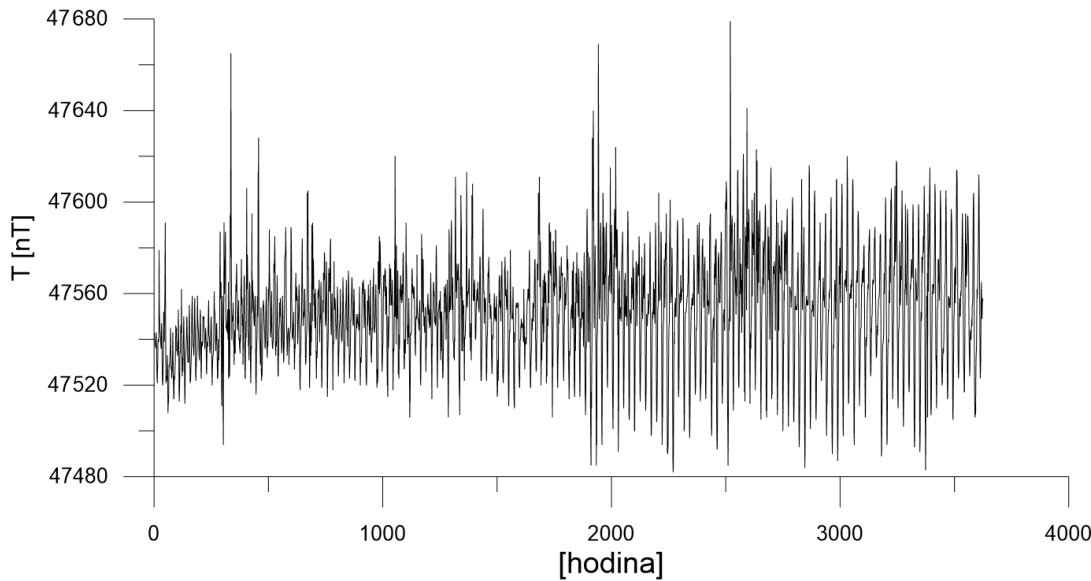
## magnetické búrky (SSC - sudden storm commencement)

- krátkodobé náhle zvýšenie horizontálnej zložky magnetického poľa (H), čo je spôsobené zvýšeným tlakom slnečného vetra na čelnej strane magnetosféry
- sprevádzané vznikom polárnej žiary, poruchami na elektrických zariadeniach, výpadkami komunikačných zariadení, poruchami navigácie, poškodeniami satelitov, až výpadkami typu black-out
- známe historické udalosti:
  - Newyorská železničná búrka (13.–15. máj 1921)
  - Quebec, Kanada - 13. marca 1989: spôsobila tzv. black-out na niekoľko hodín
  - búrka zo 16. apríla 1938 (v Podstame namerané výchylky až 500 nT)

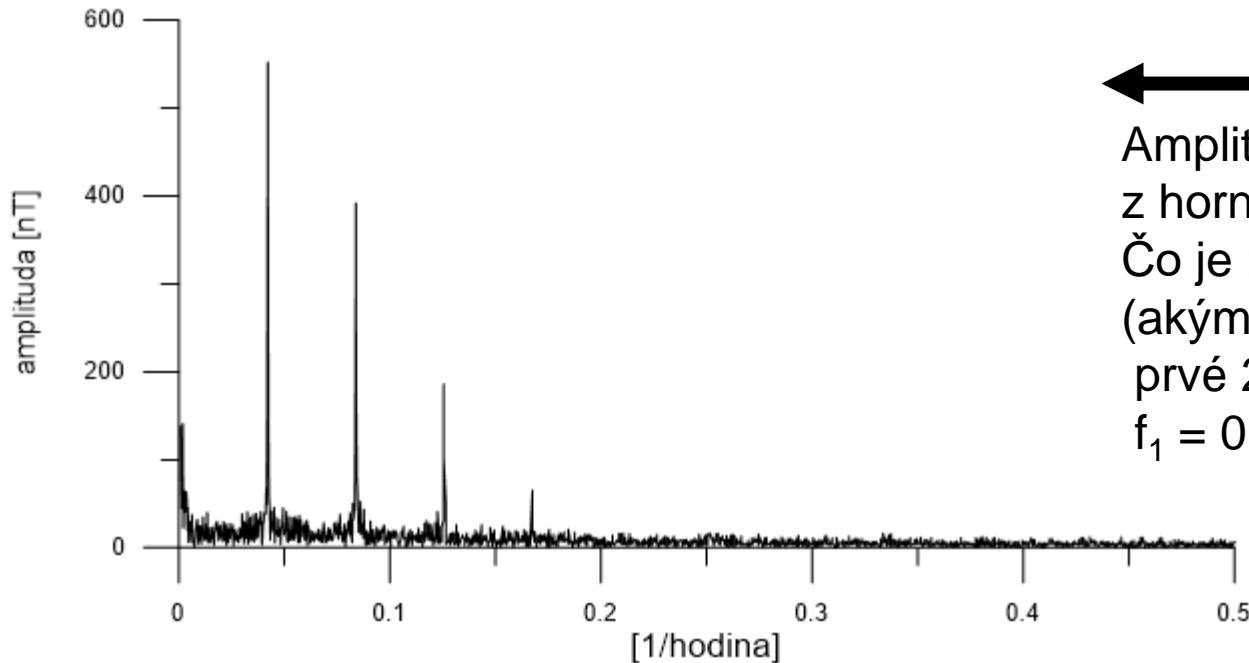




# časové zmeny ZMP (variácie)



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



Amplitúdové spektrum 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).

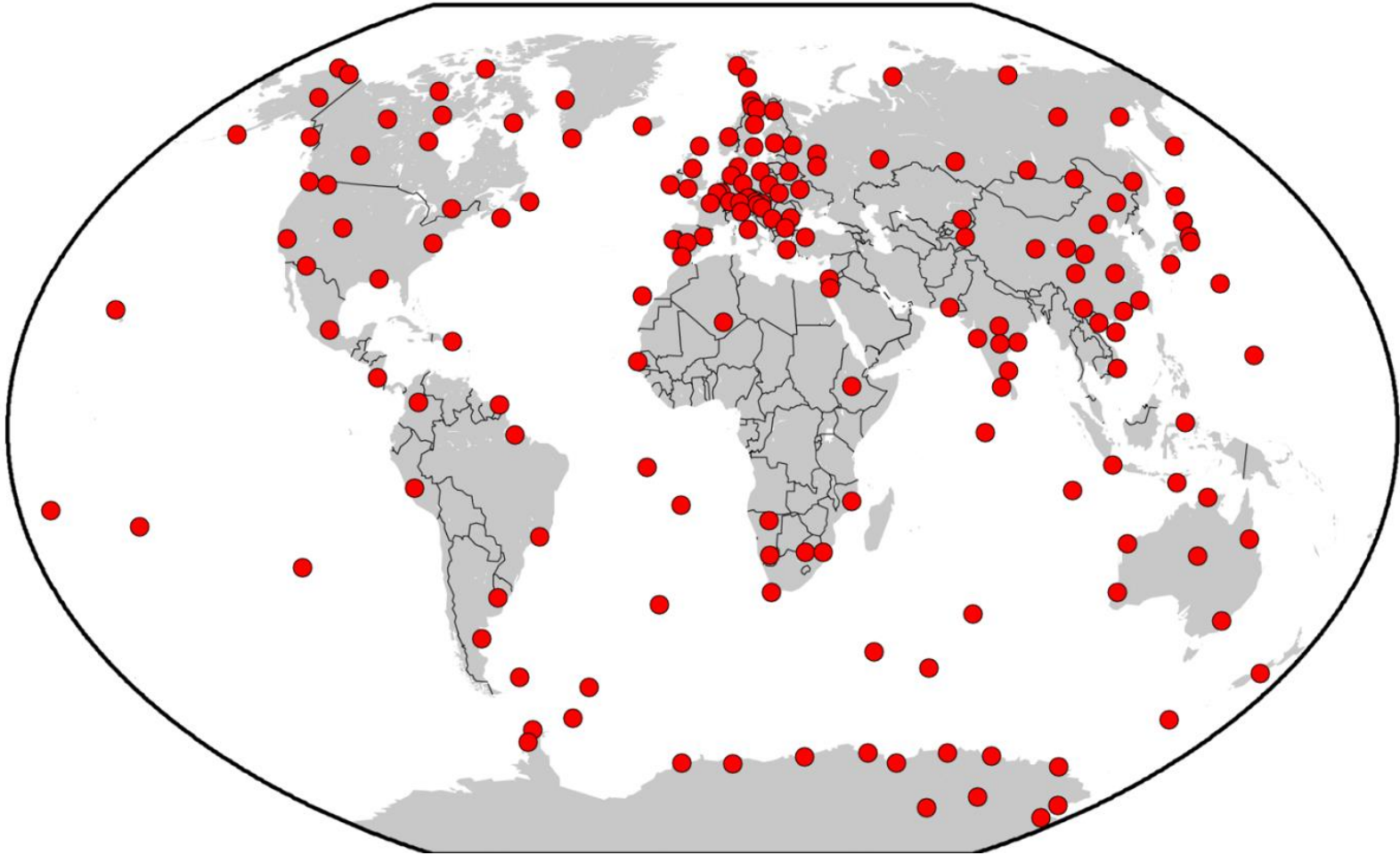


# Magnetometria

## 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  $\Delta T$ , normálne pole (metódy jeho určovania)

## meranie ZMP - observatóriá

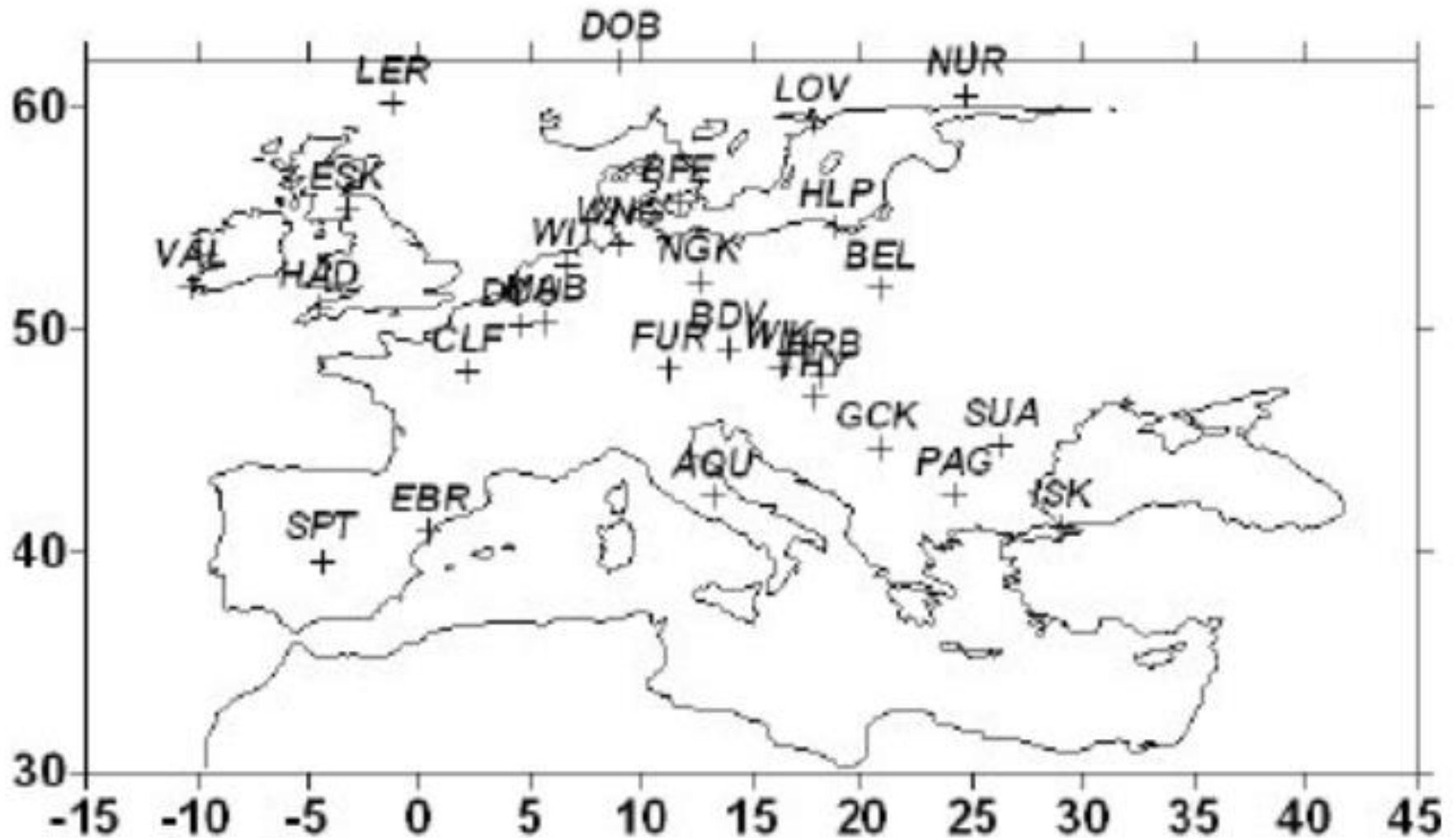


Rozmiestnenie súčasných magnetometrických observatórií  
(zdroj: webstránka British Geological Survey - BGS)

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)

<b>Station (ID)</b>	HRB
<b>Location</b>	Hurbanovo
<b>Country</b>	Slovakia
<b>Institutes</b>	<a href="#">Geophysical Institute of Slovak Academy of Sciences</a> (Slovakia)
<b>Co-latitude</b>	42.14°
<b>Longitude</b>	18.19°
<b>Elevation</b>	112 meters
<b>Orientation</b>	XYZF
<b>Instruments</b>	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!

príklad (22.august 2023):

https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN\_V1/GINForms2?observatoryIagaCode=HRB&publicationState=Best+available&dataStartDate=2023-08-22&dataDuration=1&submitValue=%28next%29+%3E%3E&samplesPerDay=minute&request=DataView

# INTERMAGNET - British Geological Survey

## INTERMAGNET Data Viewer

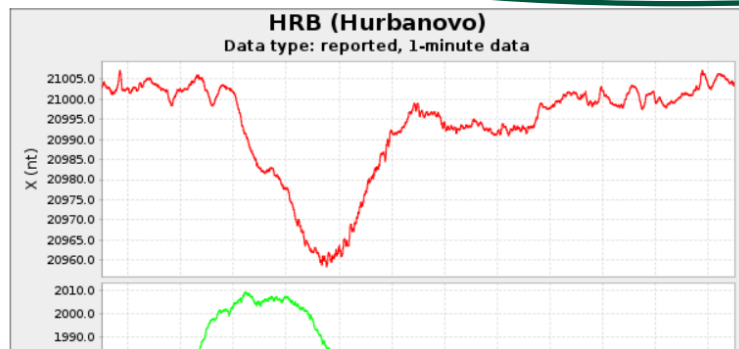
For help using the form click on any of the descriptive text 'labels' to the left of each of the text input boxes.

Observatory:  Data type:

Start date:  Duration (days):

Sample period:

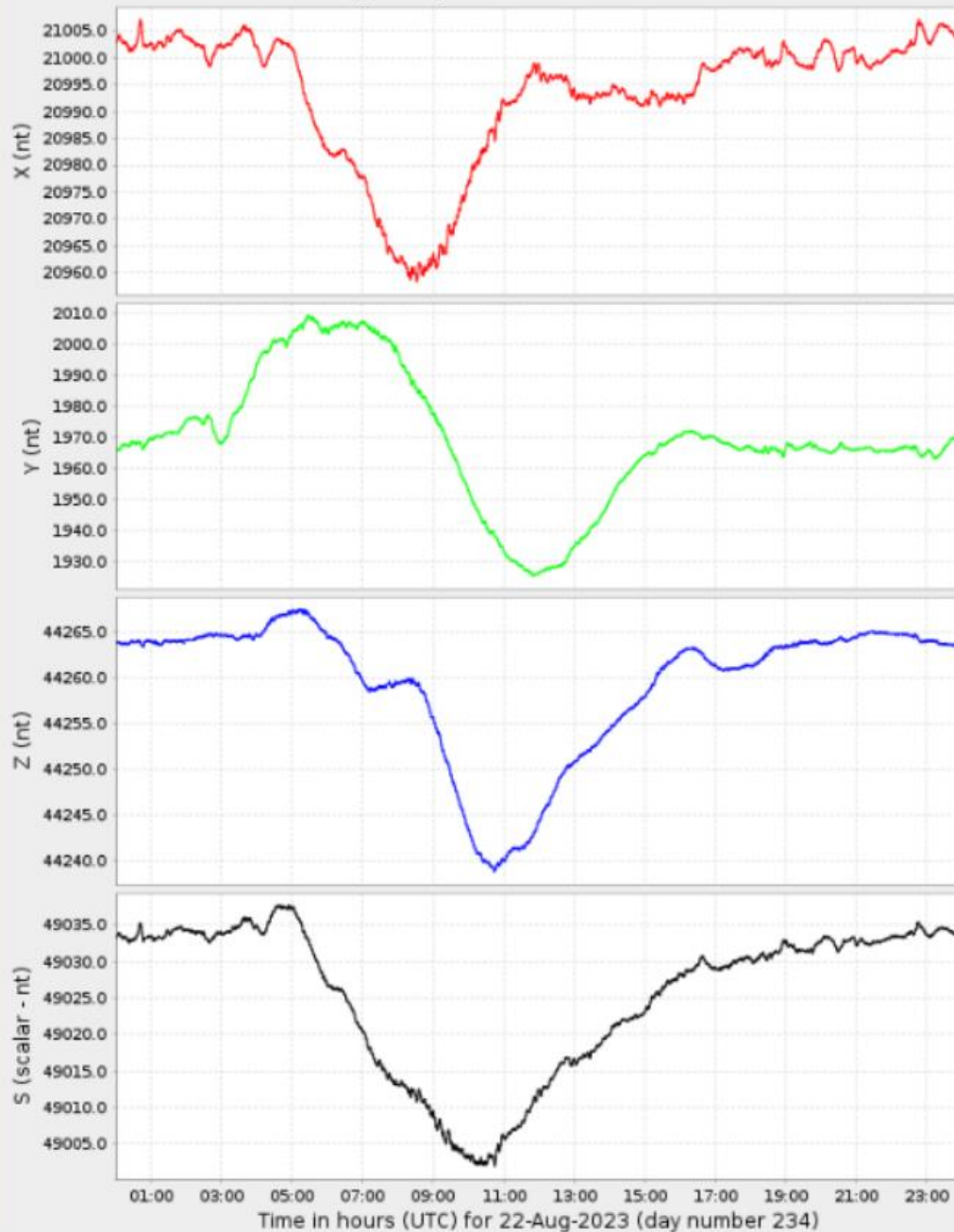
Download data (in native orientation): [XML](#) [JSON](#) [COVJSON](#) [HTML](#) [IAGA-2002](#) [ImagCDF](#) [IMFv1.22](#) [WDC](#) Download magnetogram: [PDF](#) [JPG](#) [PNG](#)



typický vzhľad denného záznamu zo stránky INTERMAGNET (priemerné údaje zložiek X, Y, Z a T v minútových intervaloch, je možné ich stiahnuť ako údaje alebo ako grafické súbory)

# HRB (Hurbanovo)

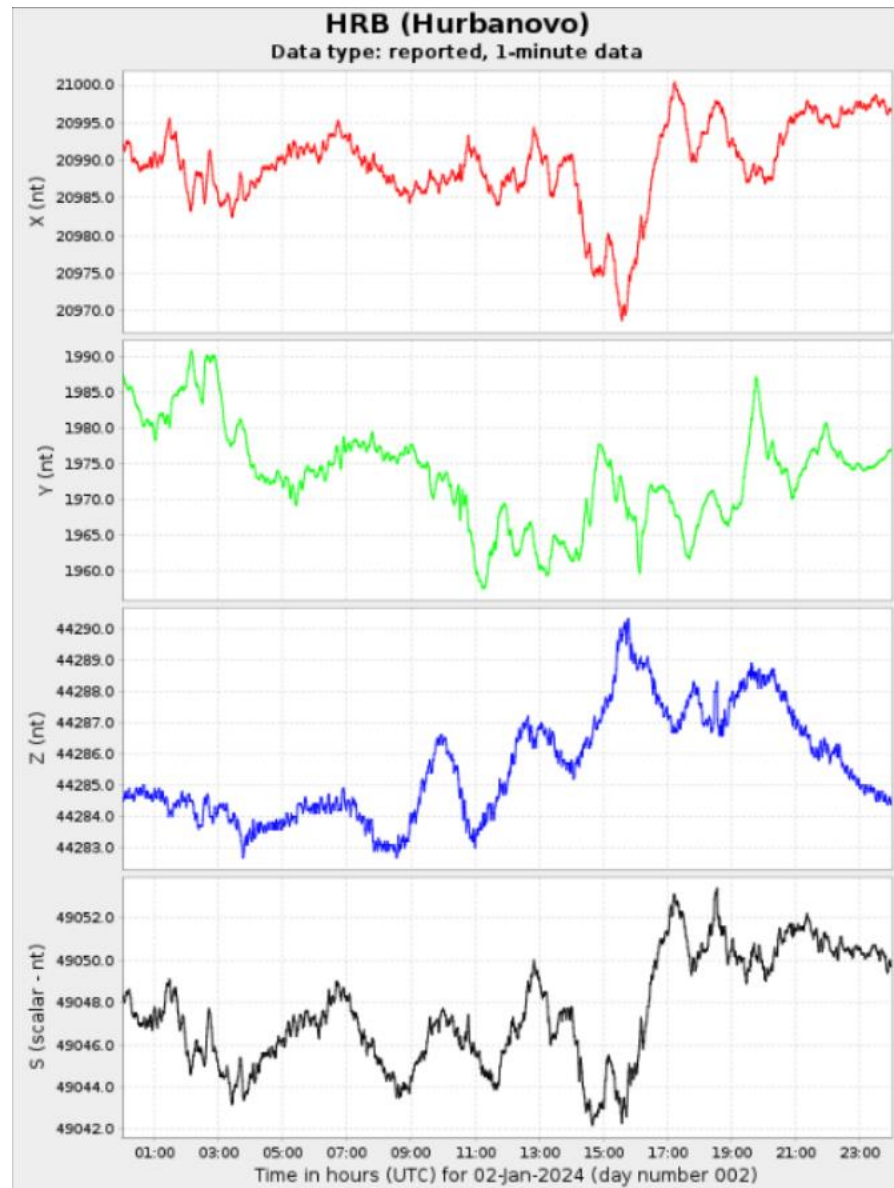
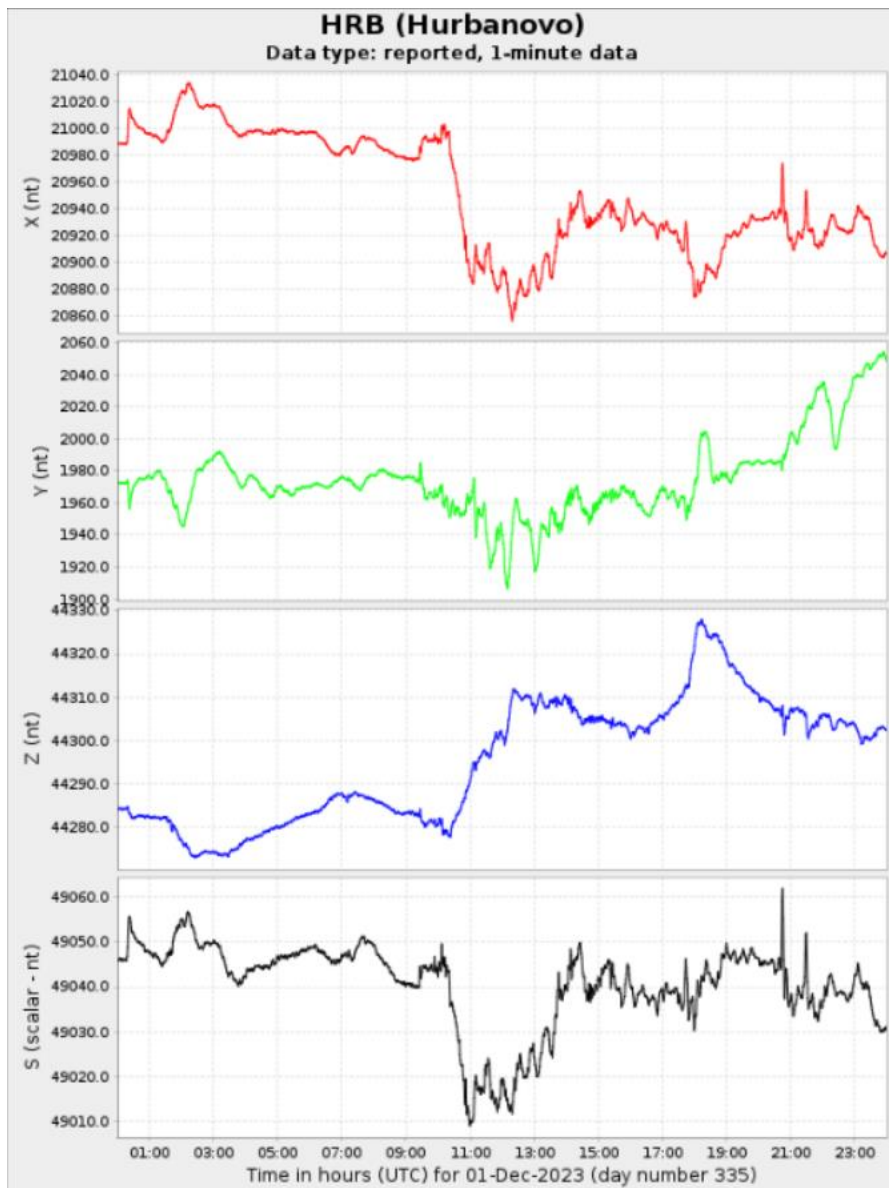
Data type: reported, 1-minute data



grafický záznam  
z observatória HRB  
zo dňa 22.8.2023

(pozor, zložka T je  
označená ako S)





záznam z observatória HRB zo dní 01.-02.12.2023 (prejav slabšej magn. búrky)

# 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  $\Delta T$ , normálne pole (metódy jeho určovania)

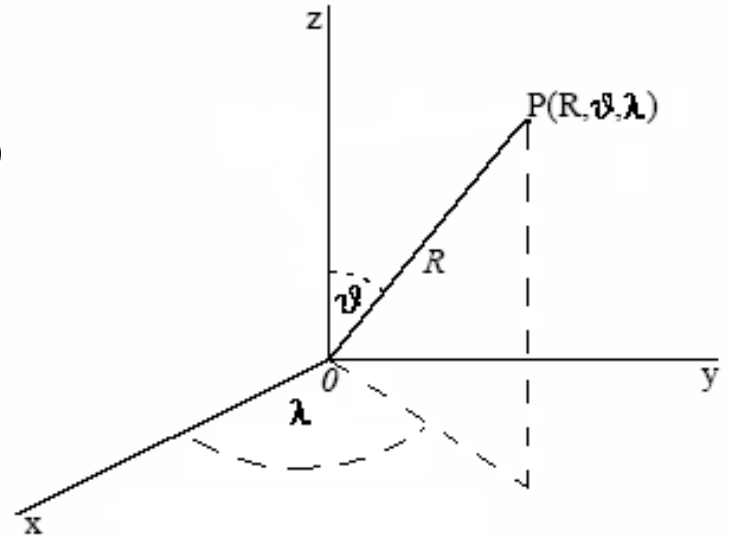
# matematický model ZMP

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

$R$  – centrálna vzdialenosť

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

$\lambda$  – 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)

$R, \vartheta, \lambda$  - 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.

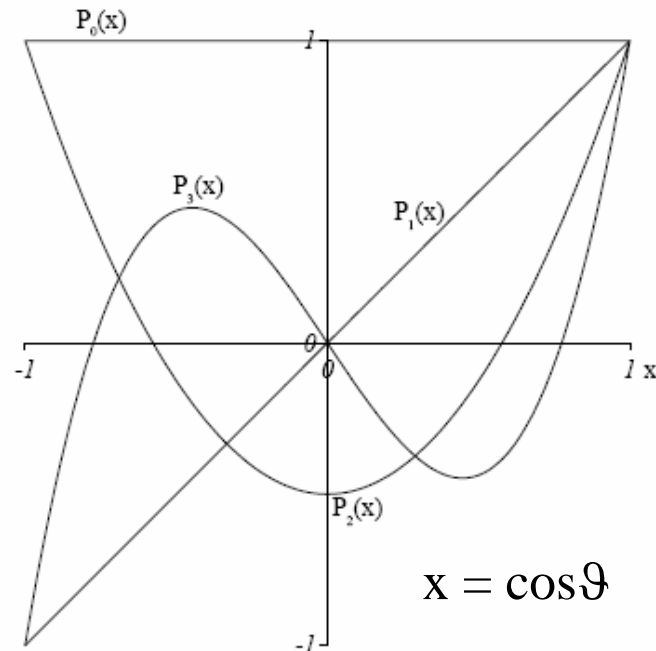
$$U(R, \vartheta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{a}{R} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\cos \vartheta)$$

tzv. sférické funkcie (spherical harmonics)

kde:

$R, \vartheta, \lambda$  - sú sférické súradnice,  $a$  - polomer Zeme (pri guľovej aproximácii),

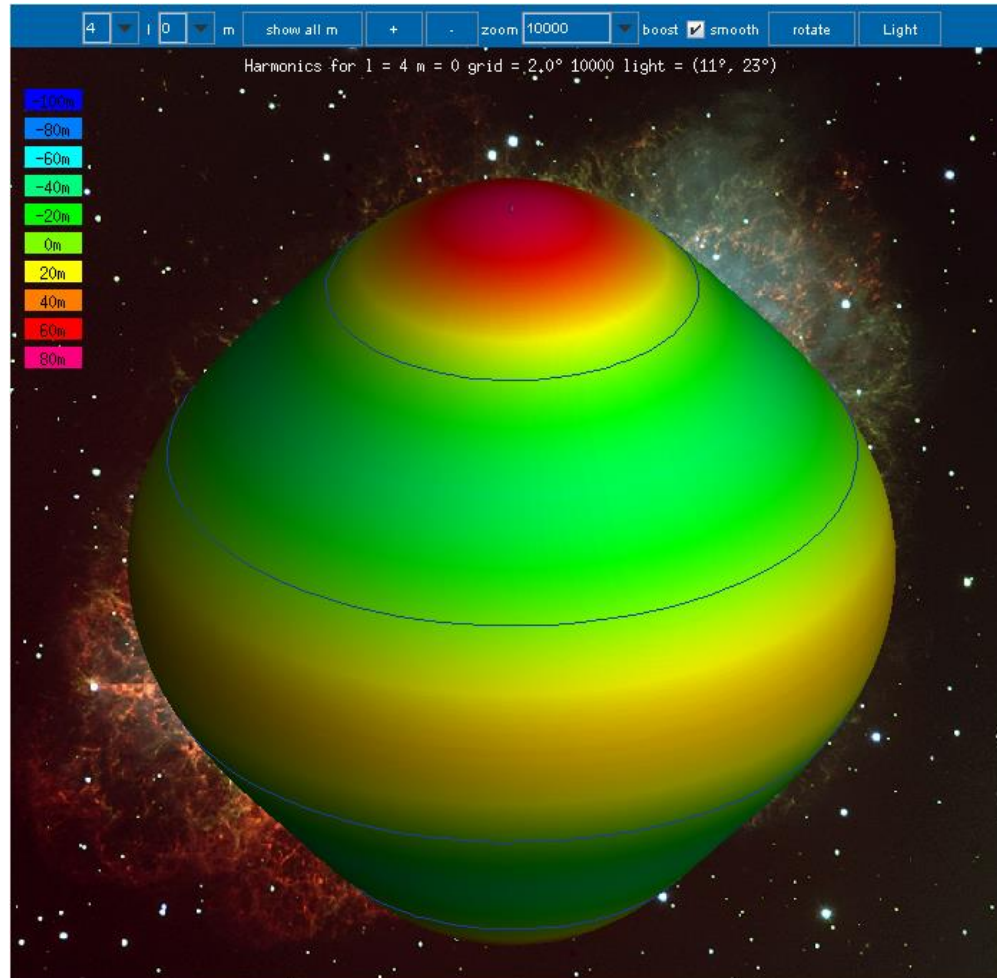
$A_{nm}, B_{nm}$  - koef. tzv. sférických funkcií,  $P_n^m$  - tzv. pridružené Legendreove polynómy



# 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)



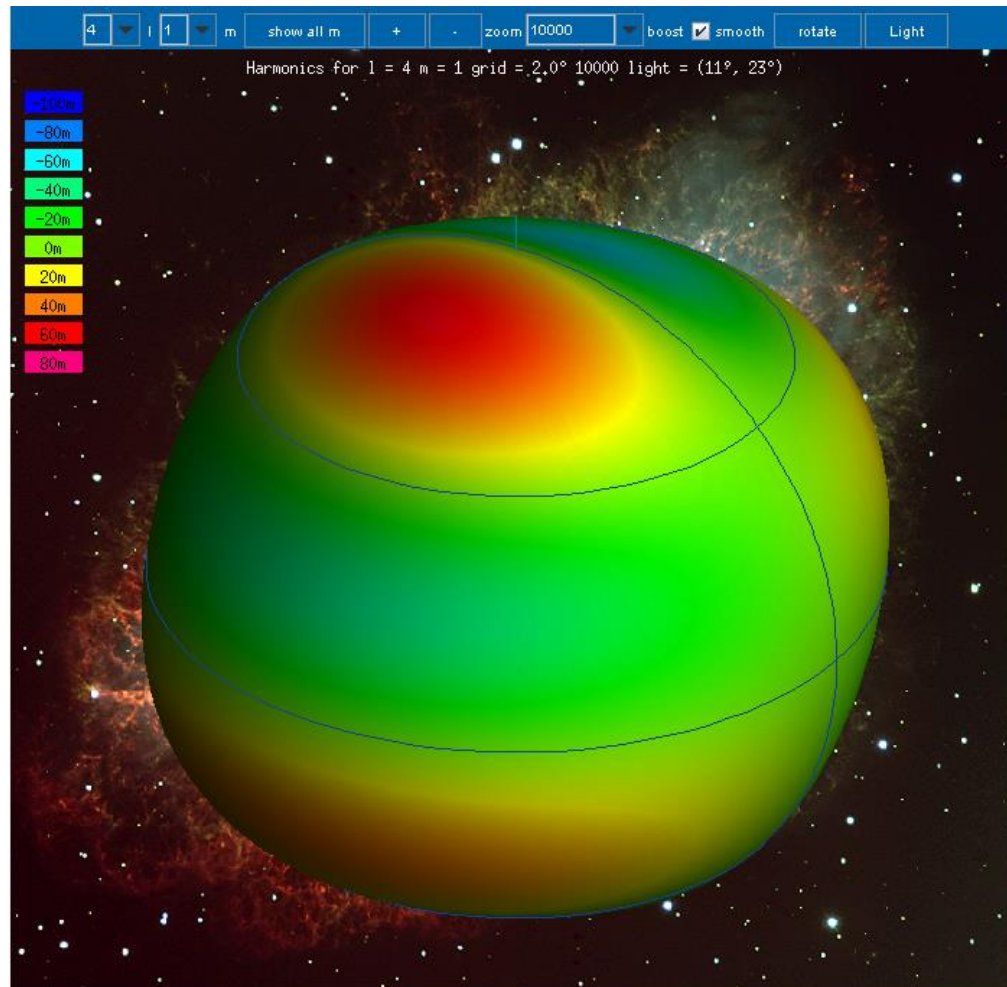
$$n = 4$$
$$m = 0$$

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)

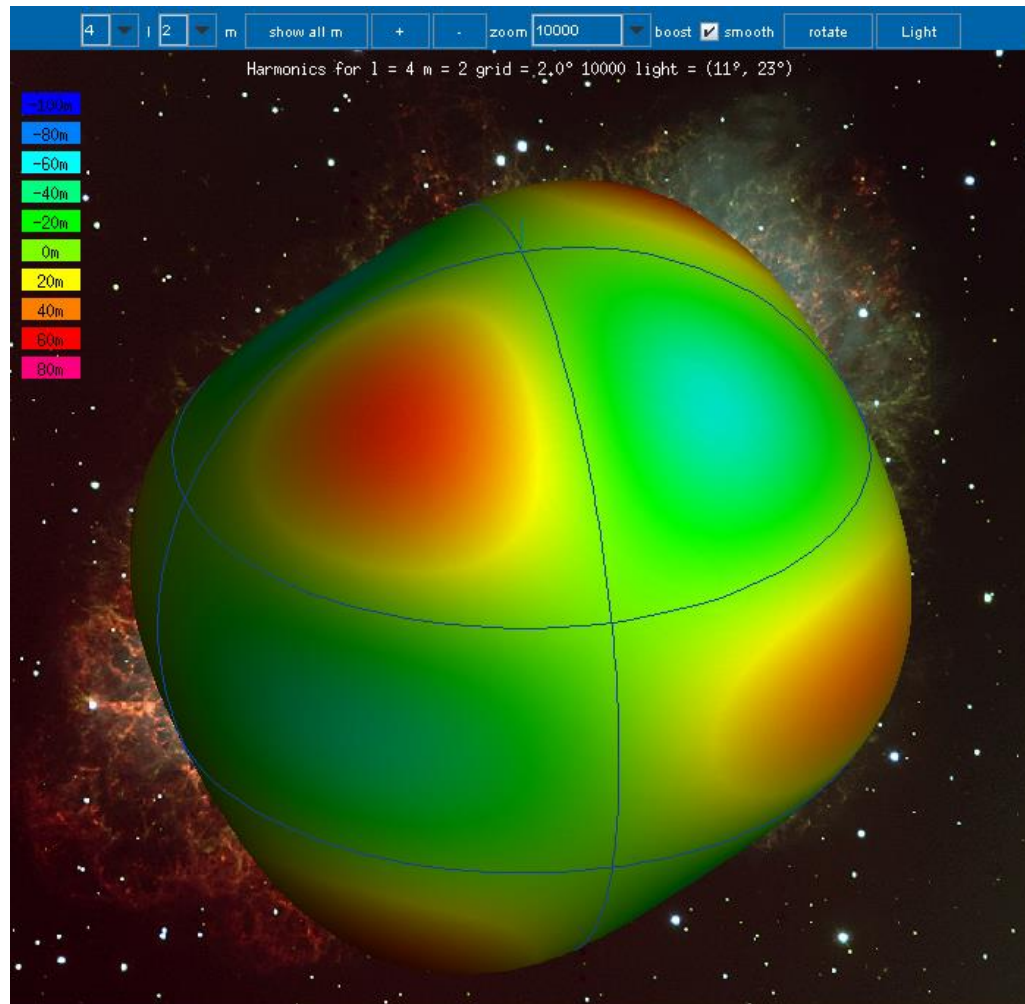


$$n = 4$$
$$m = 1$$

# 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)

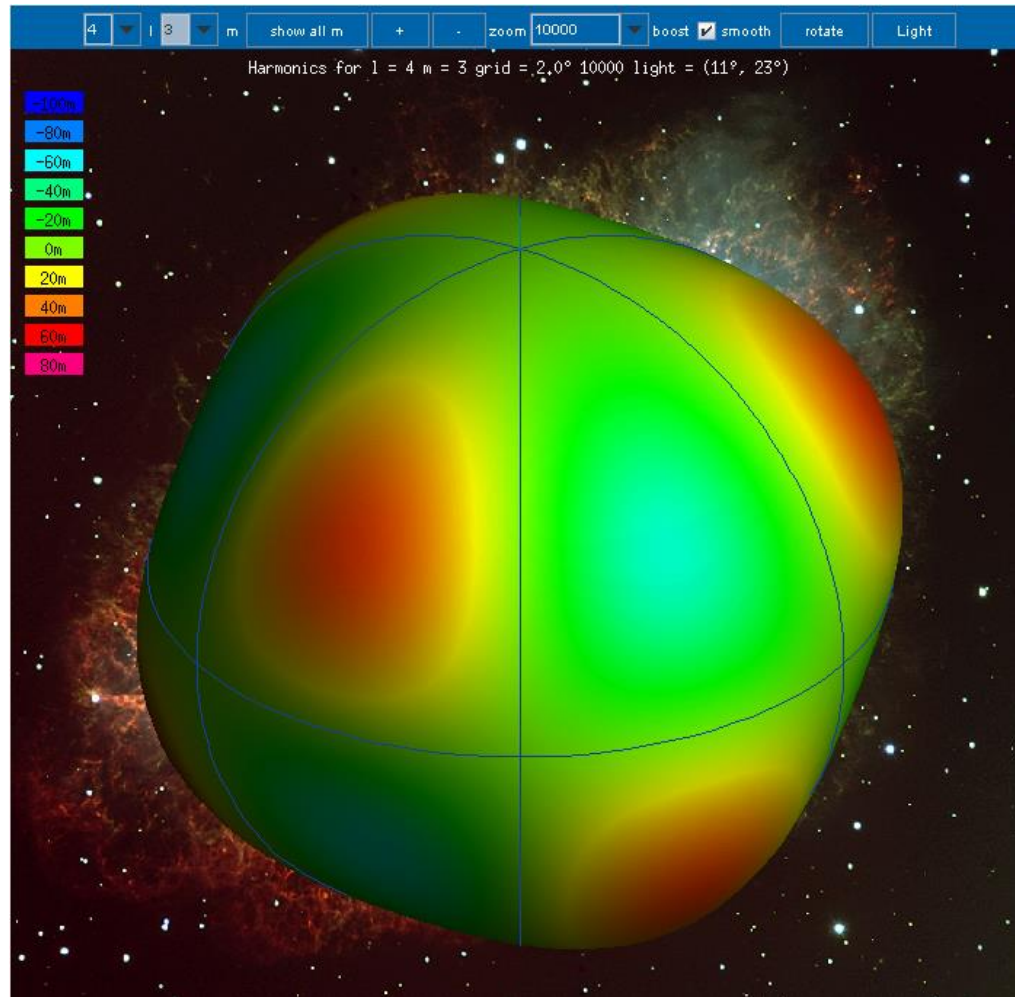


$$n = 4$$
$$m = 2$$

# 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)



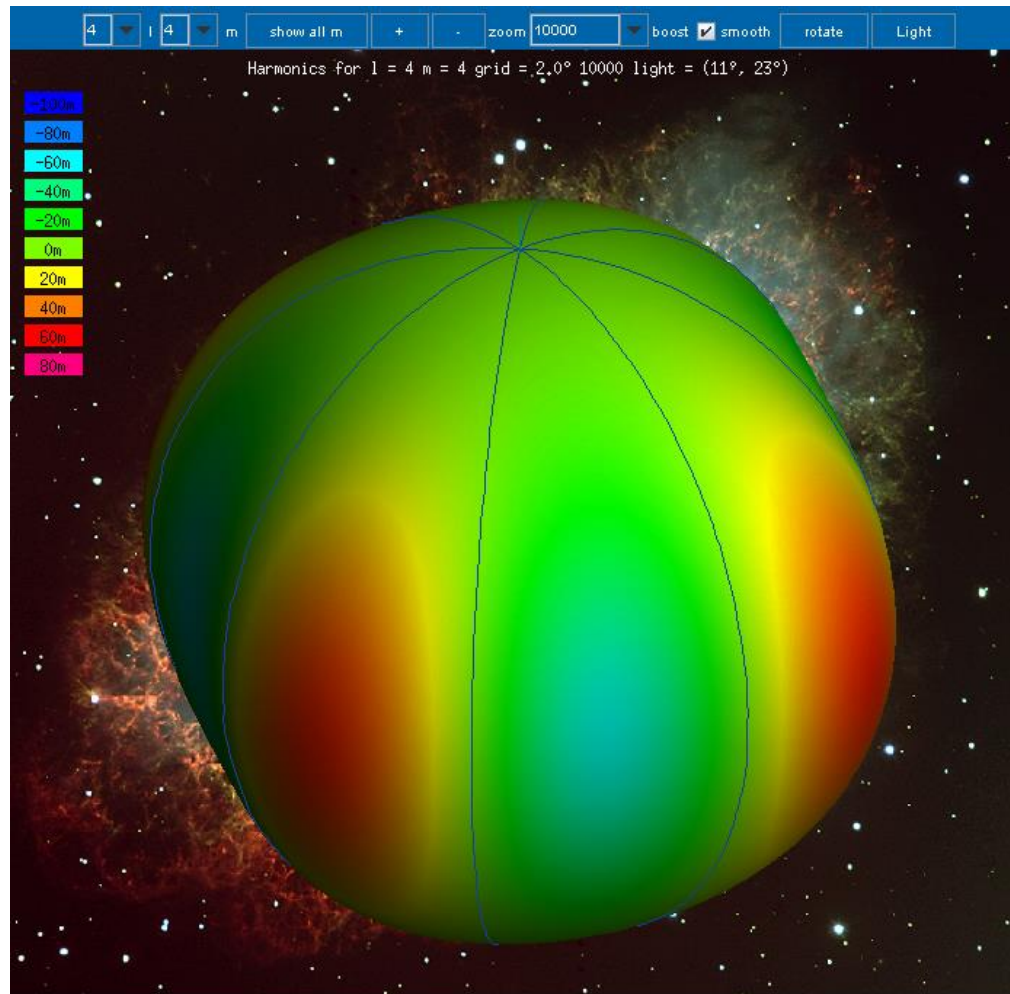
$$n = 4$$
$$m = 3$$



# 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)



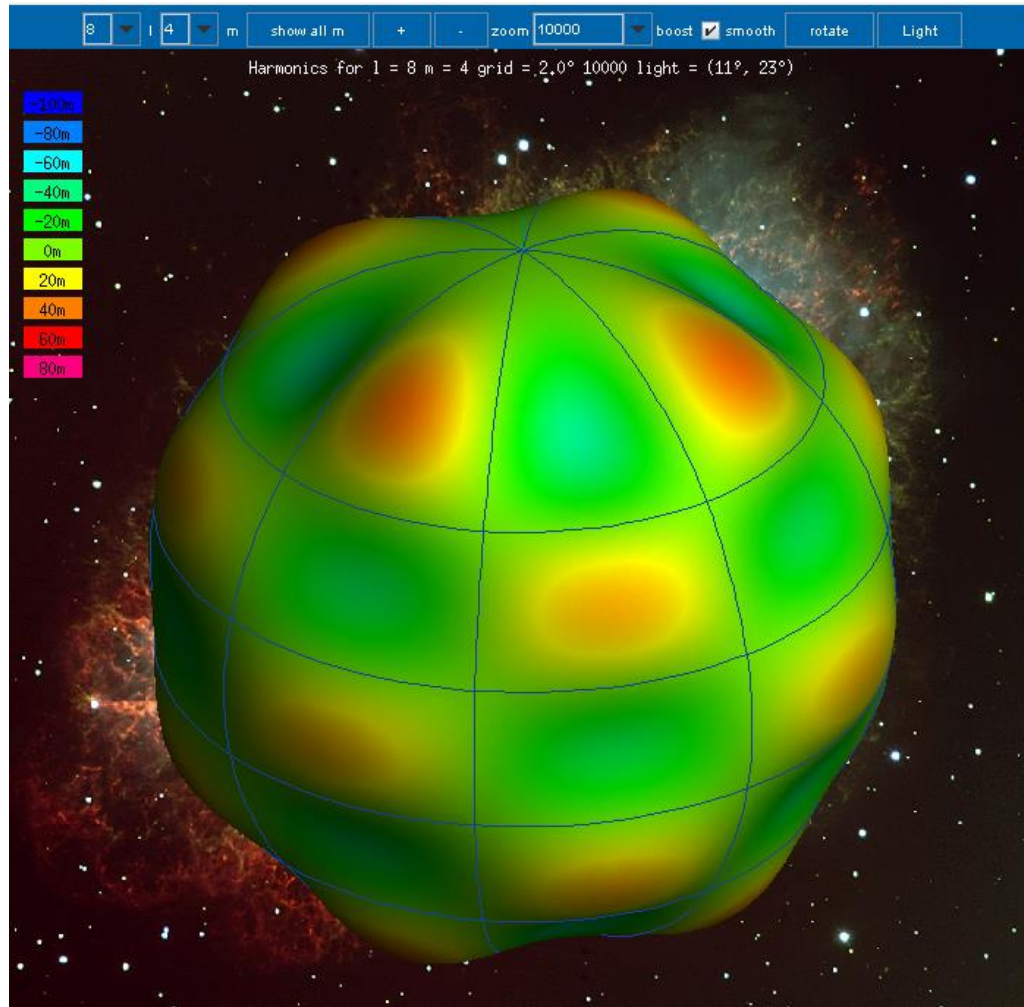
$$n = 4$$
$$m = 4$$

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)



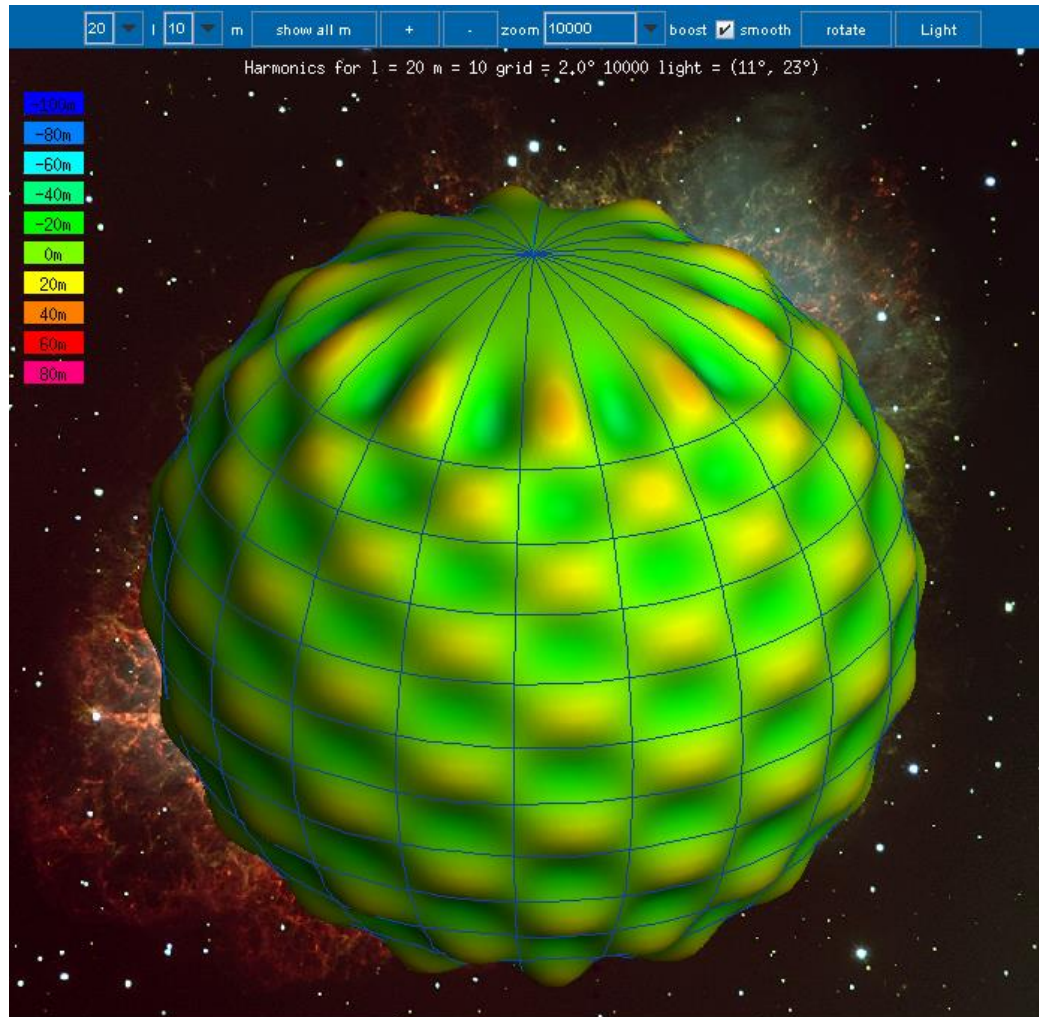
$$n = 8$$
$$m = 4$$

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)



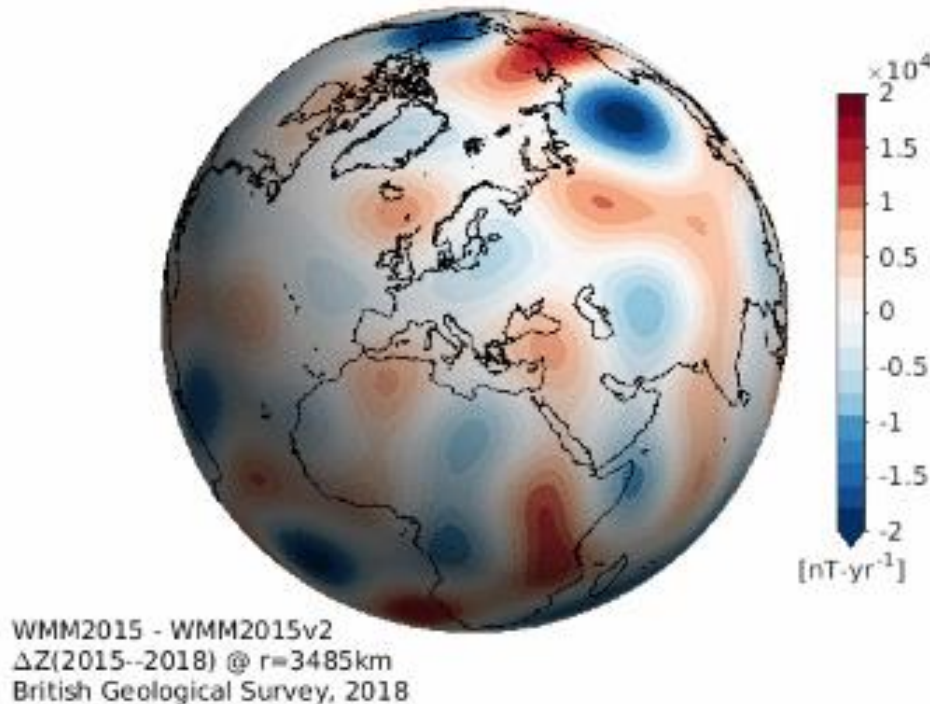
$$n = 20$$
$$m = 10$$

tzv. tesserálne  
sférické fun.

# matematický model ZMP

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

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  $\Delta T$ , normálne pole (metódy jeho určovania)

# výpočet anomálií magnetického poľa $\Delta T$

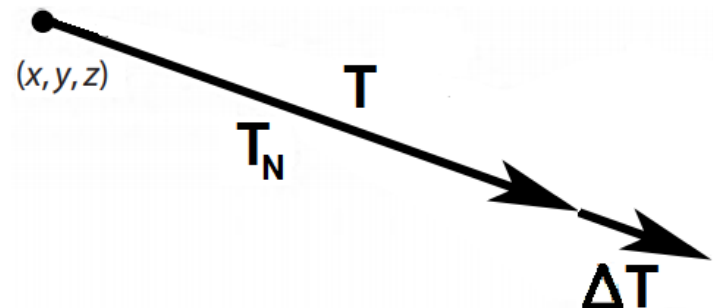
Pre účely kvalitatívnej a kvantitatívnej interpretácii v aplikovanej magnetometrii je dôležité na prieskumných profiloch a plochách odpočítať od hodnôt meraného poľa  $T$  určité pozadie – tzv. **normálne pole**  $T_N$ , aby sme získali tzv. **anomálie**  $\Delta T$ , ktoré vyjadrujú dipólový charakter (+/- 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.

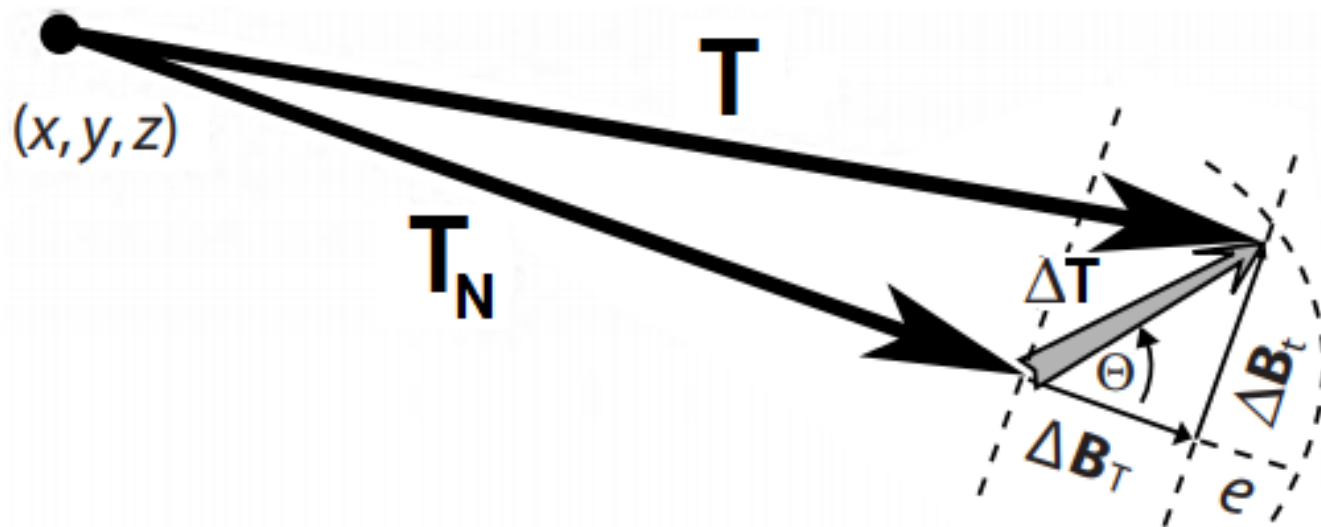
Základný vzťah pre výpočet poľa  $\Delta T$ :

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



## odhad chyby pri výpočte poľa $\Delta T$ (1/3)

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



Úsečka  $e$  na obrázku znázorňuje rozdiel, ktorý vznikne, keď vektor  $\Delta T$  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 $\Delta T$ (2/3)

Klasický vzorec pre  $\Delta T$ :

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

V skutočnosti ale platí pre  $T$  (viď obr.):

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

Z čoho sa dá vyjadriť chyba  $e$ :

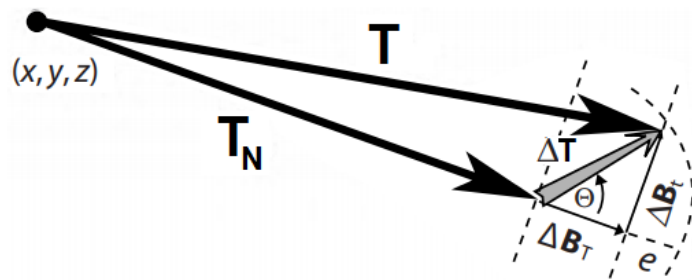
$$e = T - (T_N + \Delta B_T) = \sqrt{(T_N + \Delta B_T)^2 + (\Delta B_t)^2} - (T_N + \Delta B_T) =$$

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

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

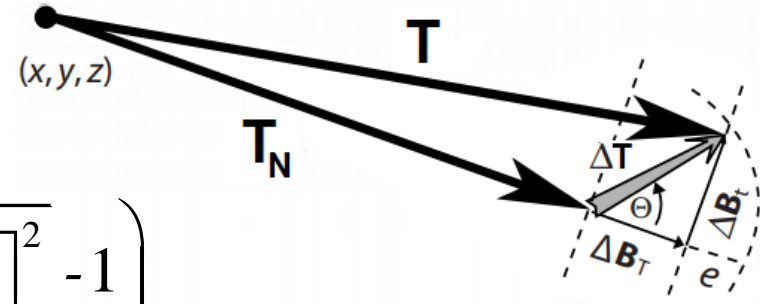
$$= (T_N + \Delta B_T) \sqrt{1 + \left[ \Delta B_t / (T_N + \Delta B_T) \right]^2} - (T_N + \Delta B_T) =$$

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





# odhad chyby pri výpočte poľa $\Delta T$ (3/3)



Pokračovanie:

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

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

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

$$e \approx (T_N + \Delta B_T) \left( \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta B_t}{(T_N + \Delta B_T)} \right]^2 \right)$$

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

$T_N$	$\Delta T$	$e$ (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).