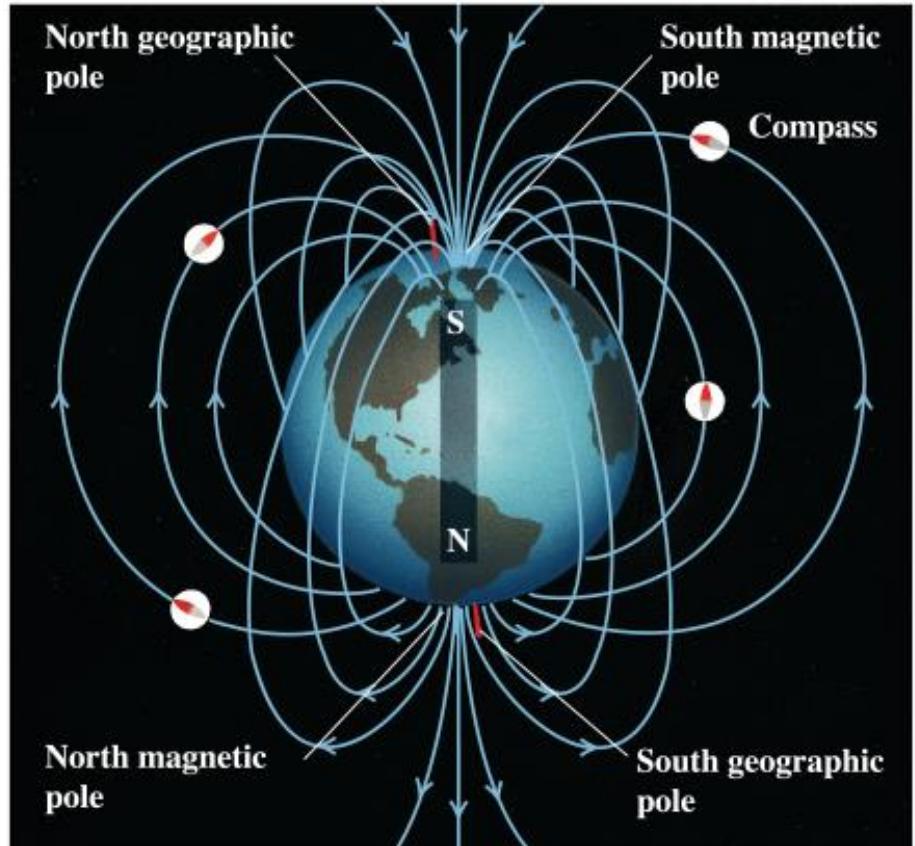
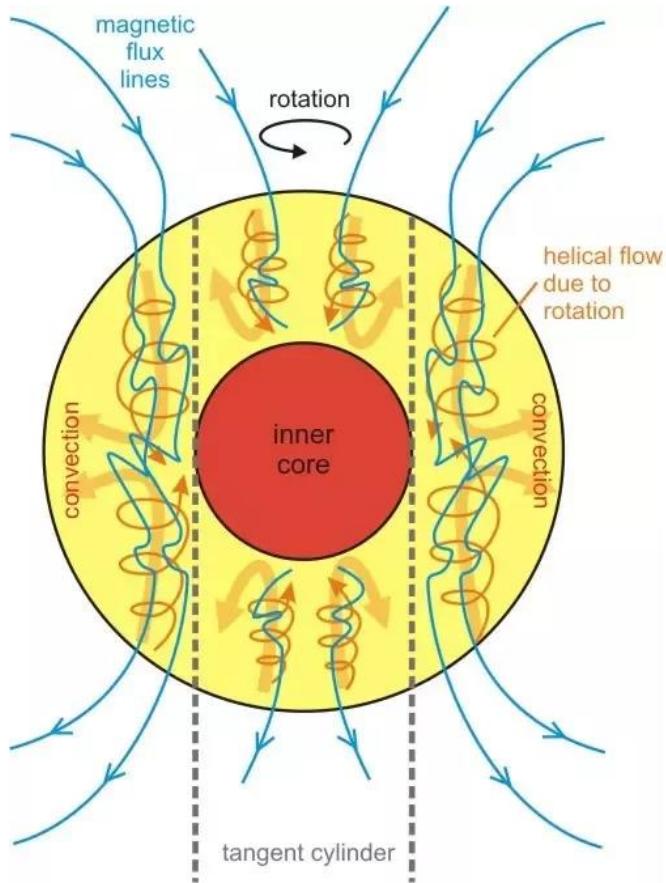


Magnetometria

zemské magnetické pole (ZMP)

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

vznik ZMP

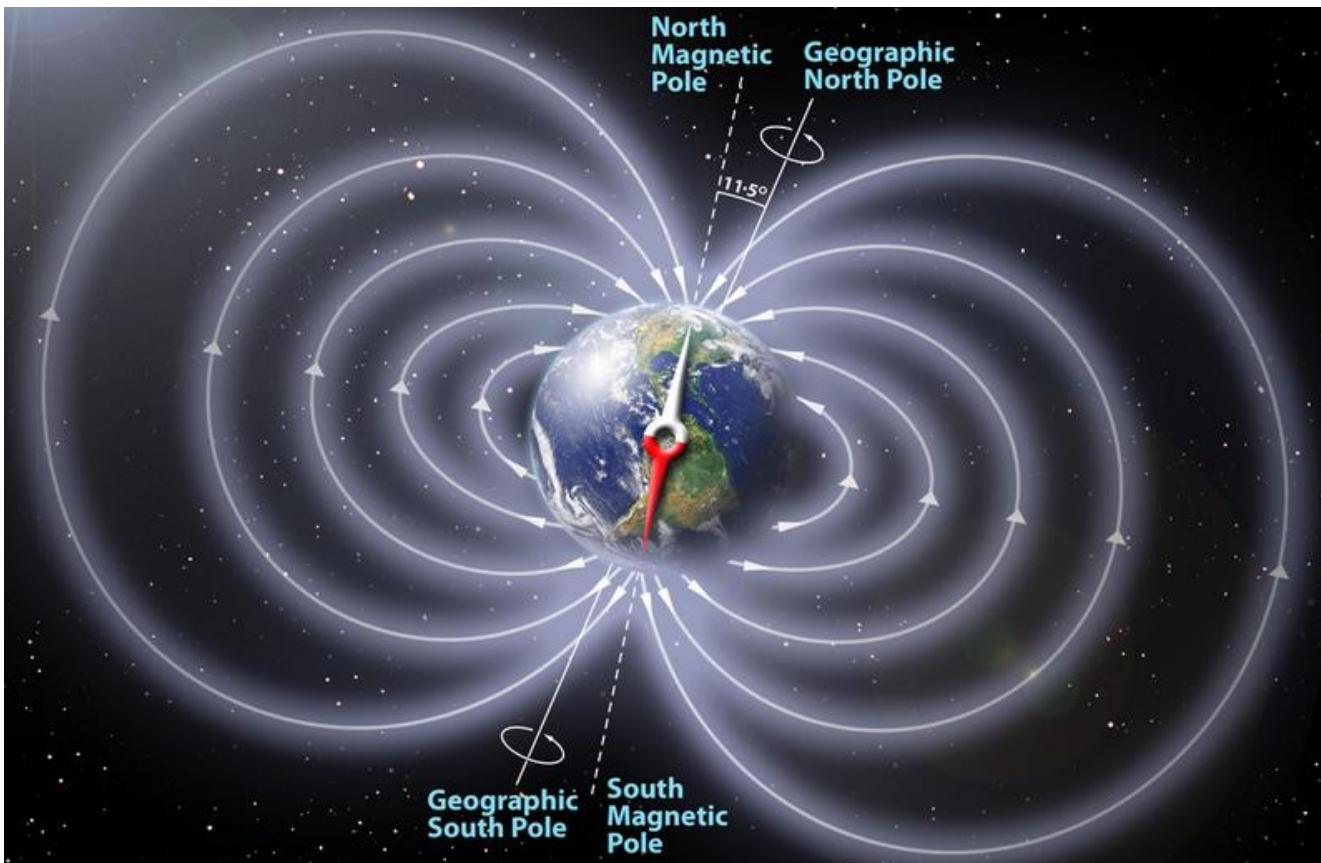


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

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).

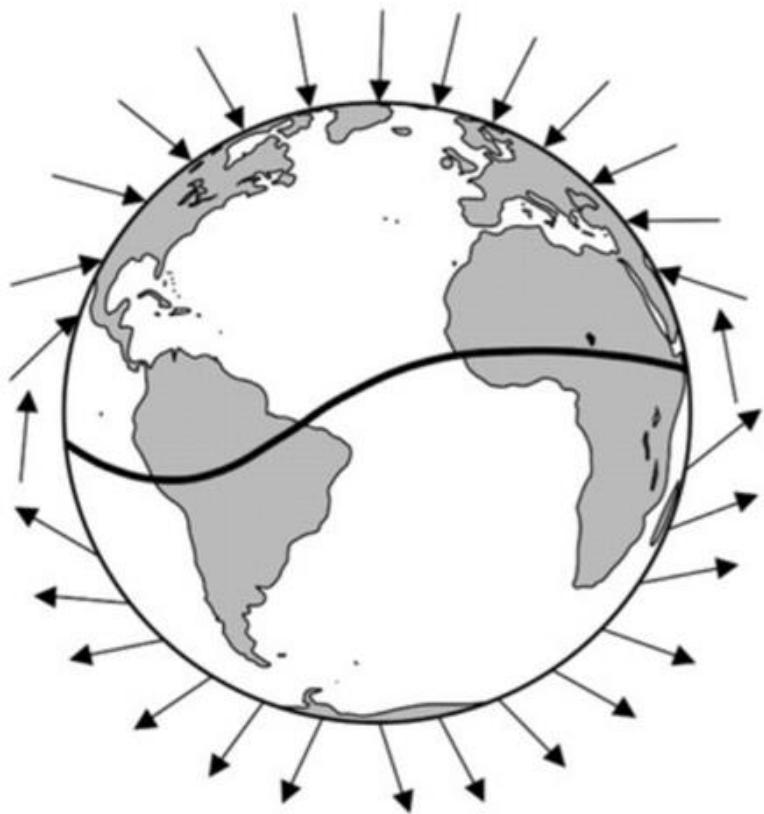
vlastnosti ZMP



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 pola – tzv. **kontinentálne anomálie**. Spolu je ich 5, tri kladné (ázijská, antarktická, americká) a dve záporné (austrálska, africká). K tomu ešte neskôr.

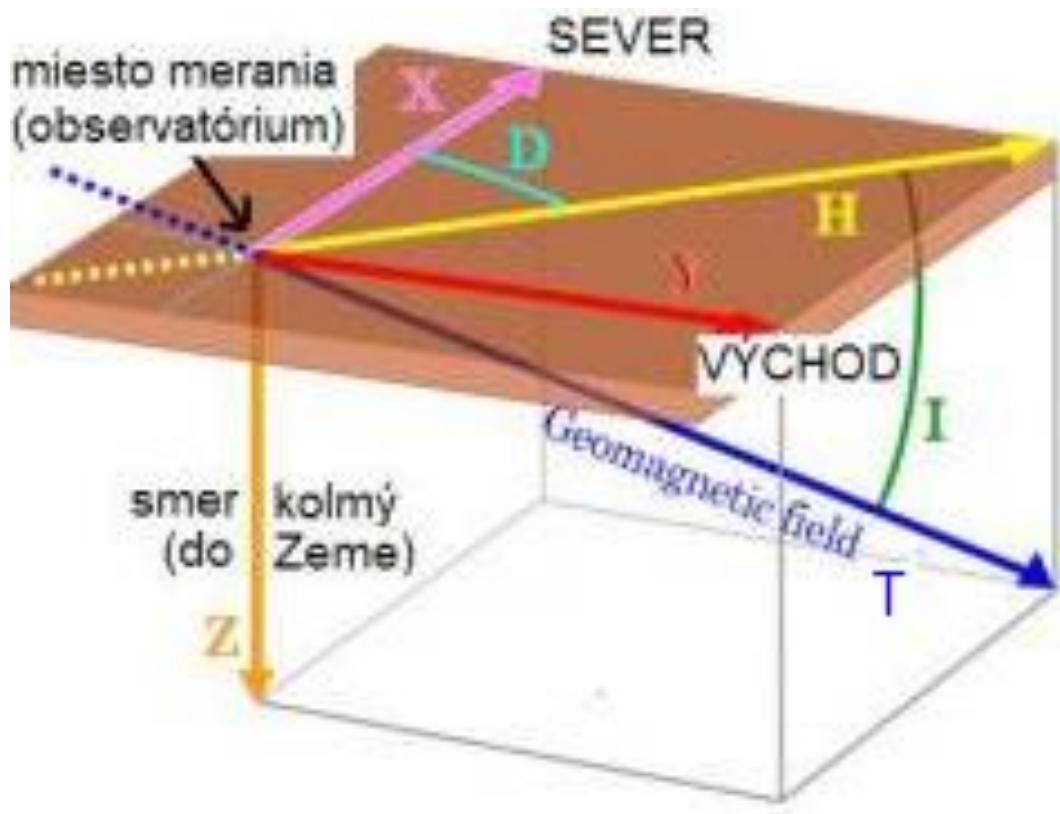
vlastnosti ZMP



PH0832N Magnetic Needle Inclination/Declination Demonstration Compass

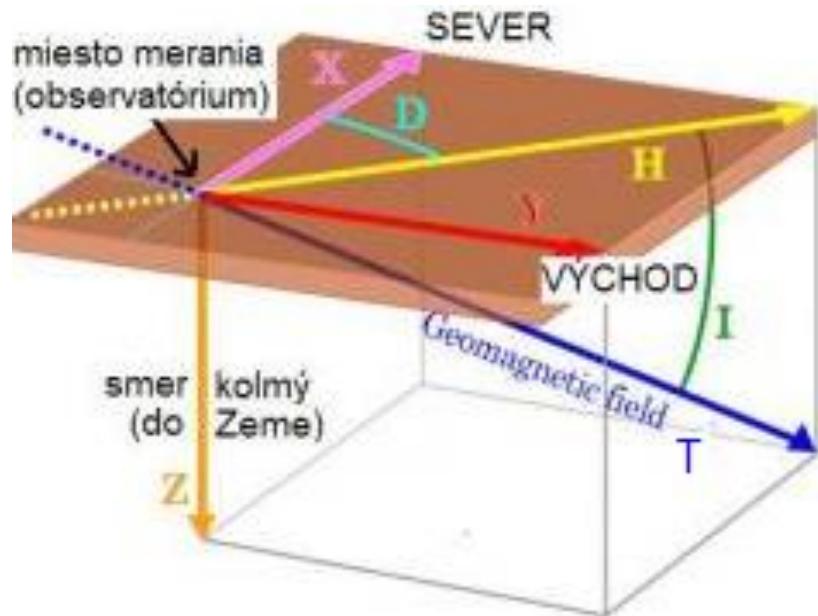
Smerovanie vektora **T** (voči horiz. rovine ku zemskému povrchu) sa mení so zmenou zemepisnej šírky – tzv. inklinácia vektora **T**. S týmito vlastnosťami vektora **T** súvisia potom aj tvar a amplitúda “magnetických” anomálií na rôznych miestach na zemskom povrchu.

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:

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

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

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°

= 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 ($\phi = 48.2^\circ$, $\lambda = 17.1^\circ$).

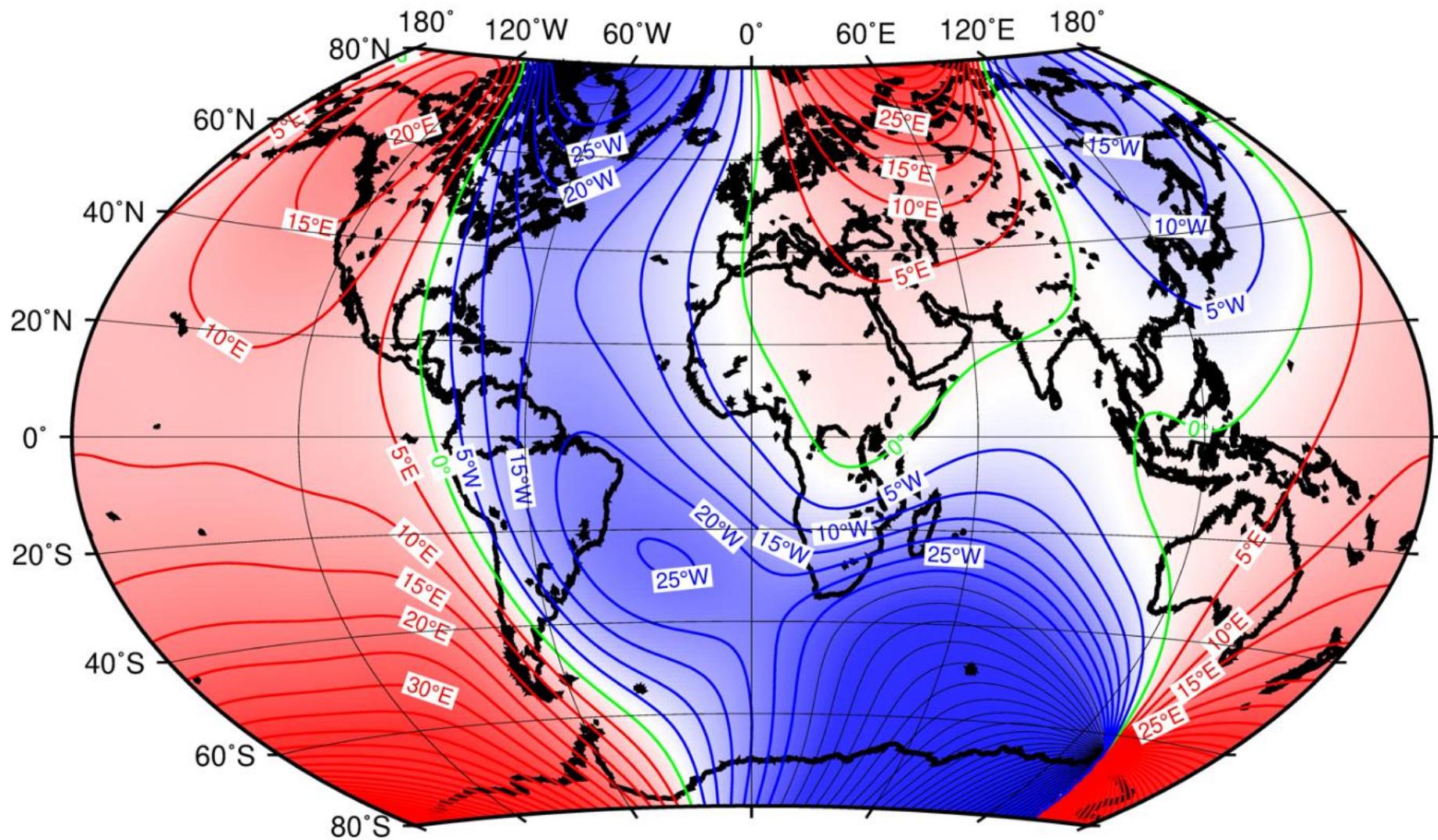
zložky ZMP

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:

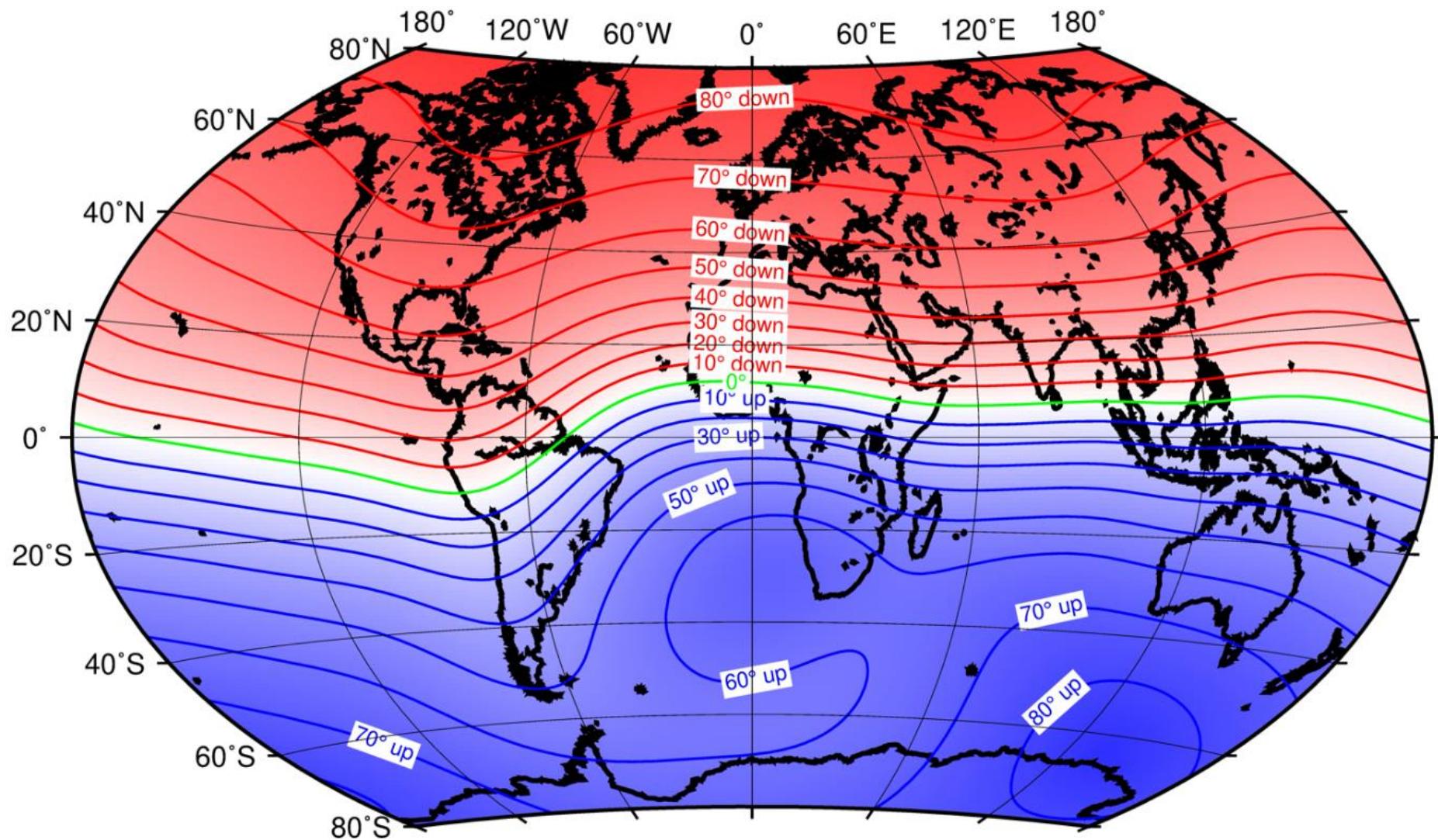
- **IGRF = International Geomagnetic Reference Field** (spravuje od roku 1965 asociácia IAGA = International Association of Geomagnetism and Aeronomy),
súčasťou viacerých geof. softvérov (napríklad Geosoft Oasis Montaj)
- **WMM = World Magnetic Model** (spravovaný U.S. National Geophysical Data Center (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 periody 2020.0 až 2022.0

zložky ZMP - deklinácia



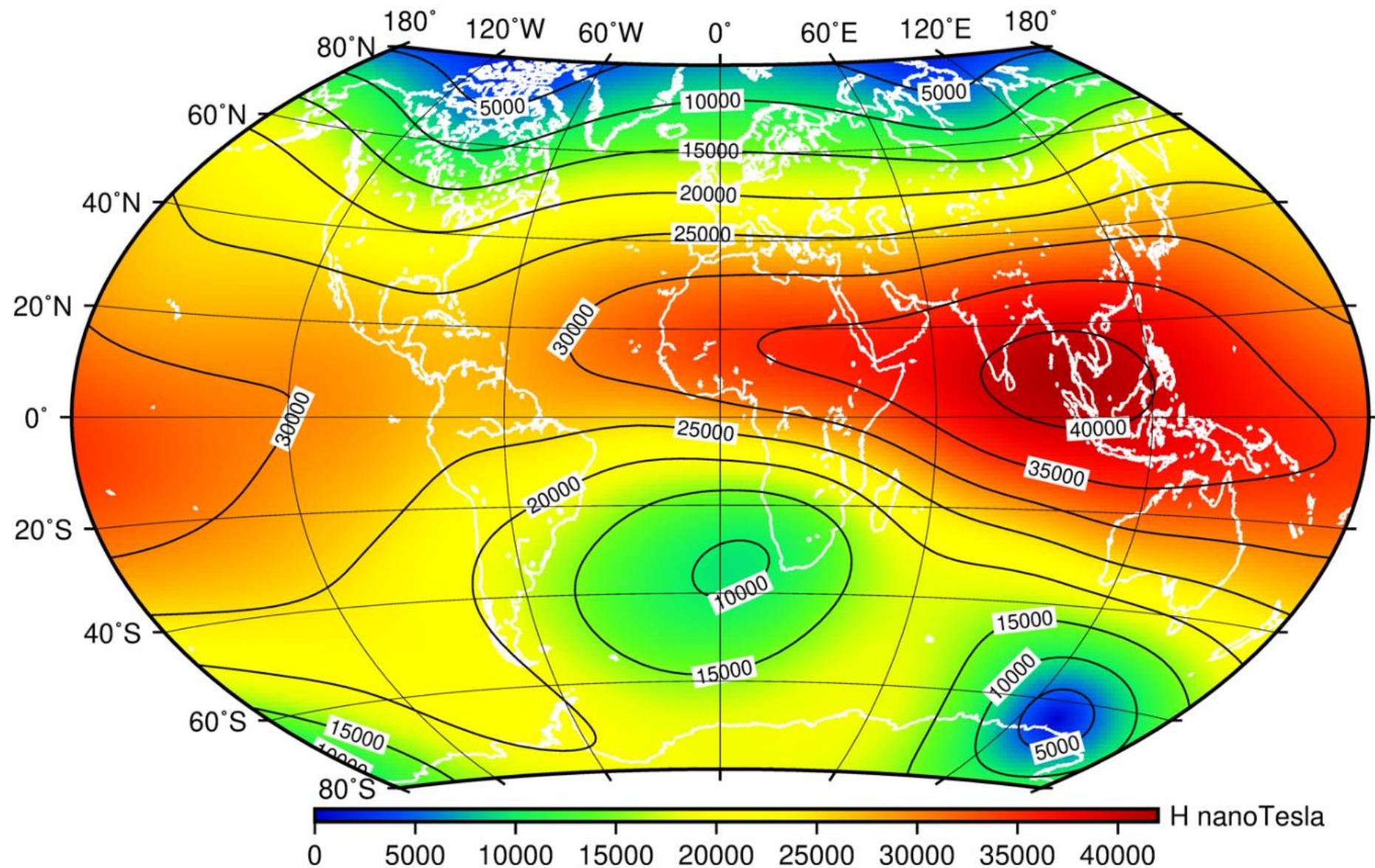
svetová mapa, izolínie deklinácie = tzv. izogóny (pre epochu 2020.0),
zdroj: British Geological Survey

zložky ZMP - inklinácia



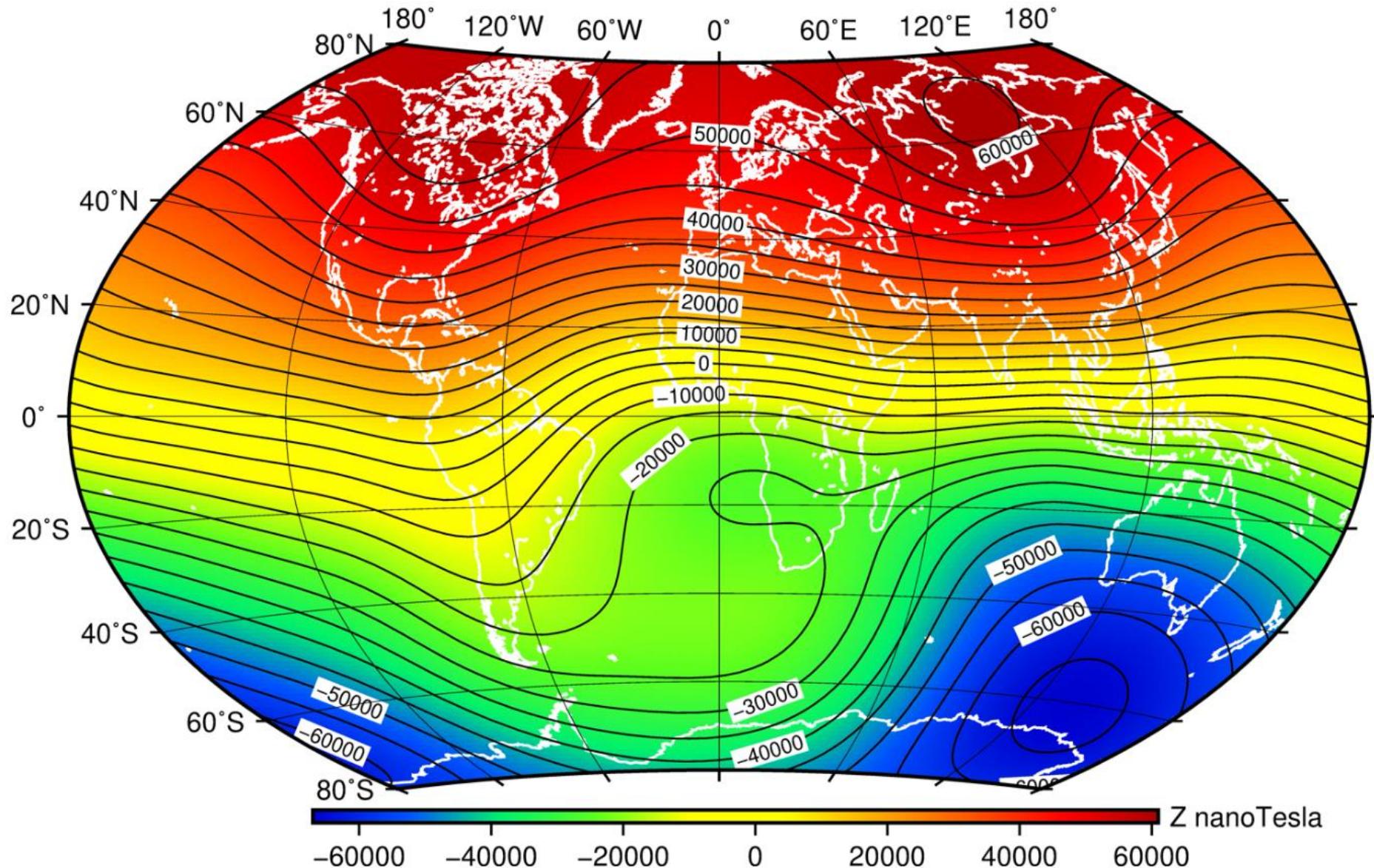
svetová mapa, izolínie inklinácie = tzv. izokliny (pre epochu 2020.0),
zdroj: British Geological Survey

zložky ZMP – veľkosť zložky H



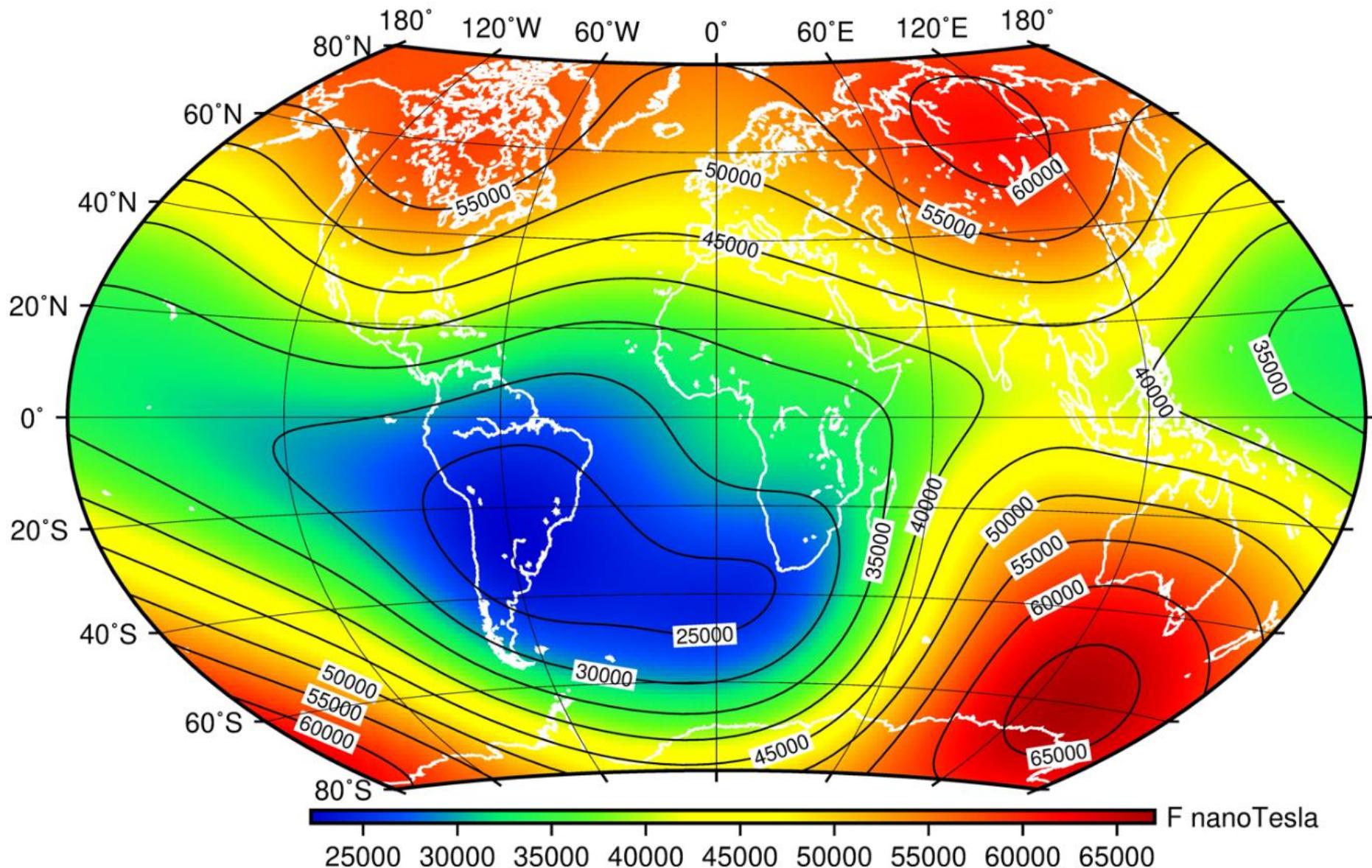
svetová mapa, izodynamy hodnôt zložky H (pre epochu 2020.0),
zdroj: British Geological Survey

zložky ZMP – veľkosť zložky Z



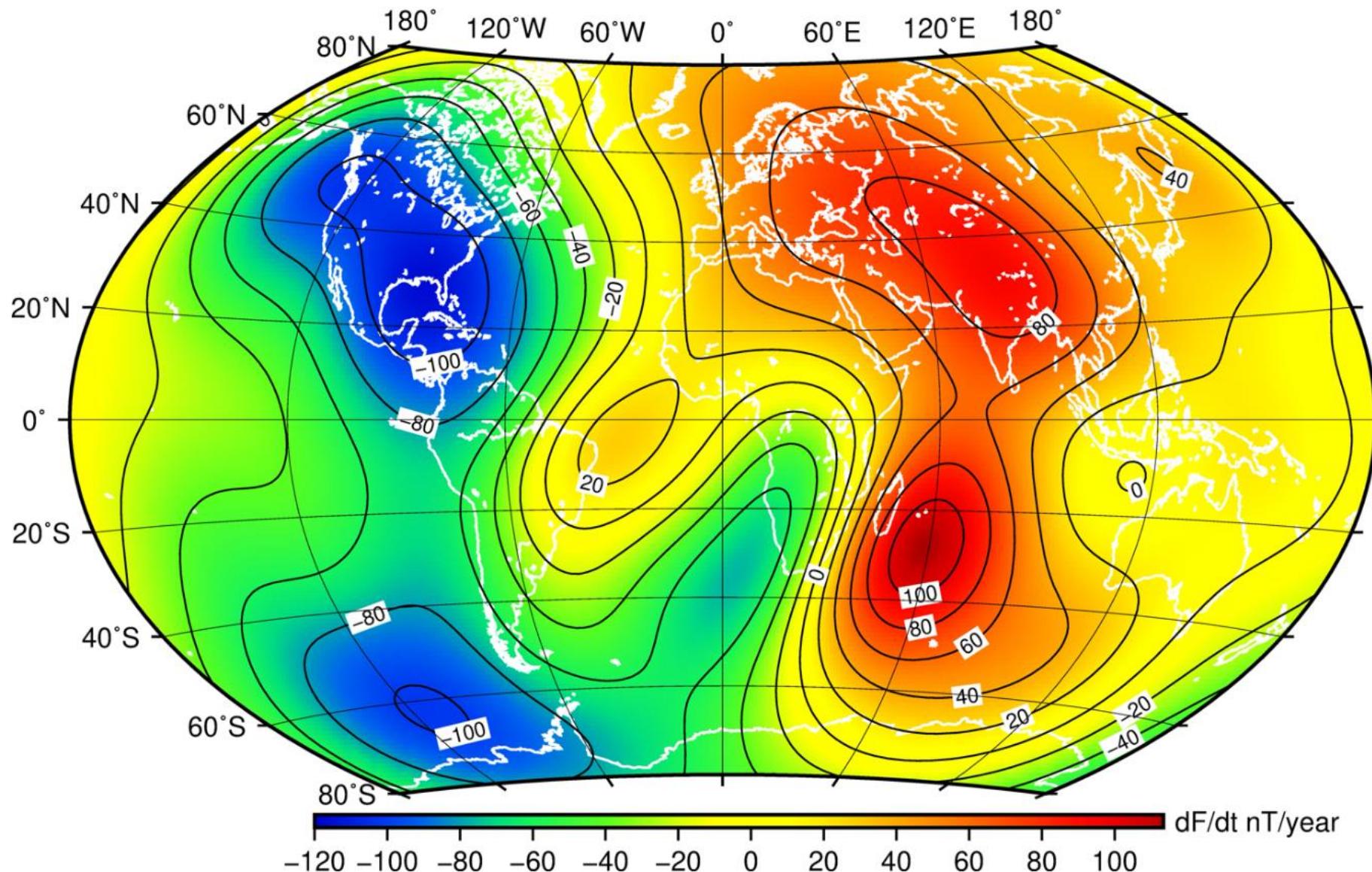
svetová mapa, izodynamy hodnôt zložky Z (pre epochu 2020.0),
zdroj: British Geological Survey

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)

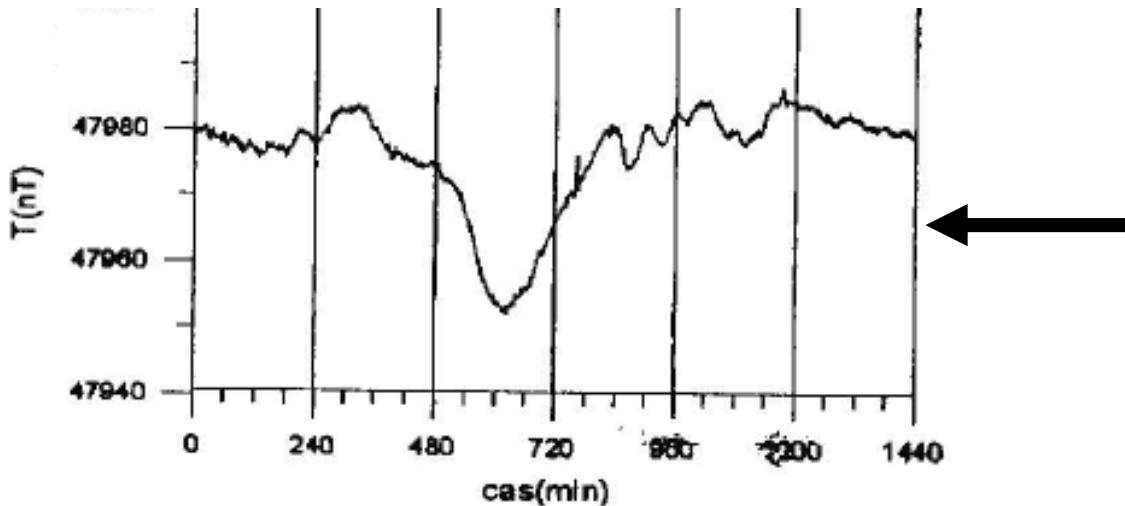
variácie geomagnetického poľa – časové zmeny:

dlhhodobé:

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

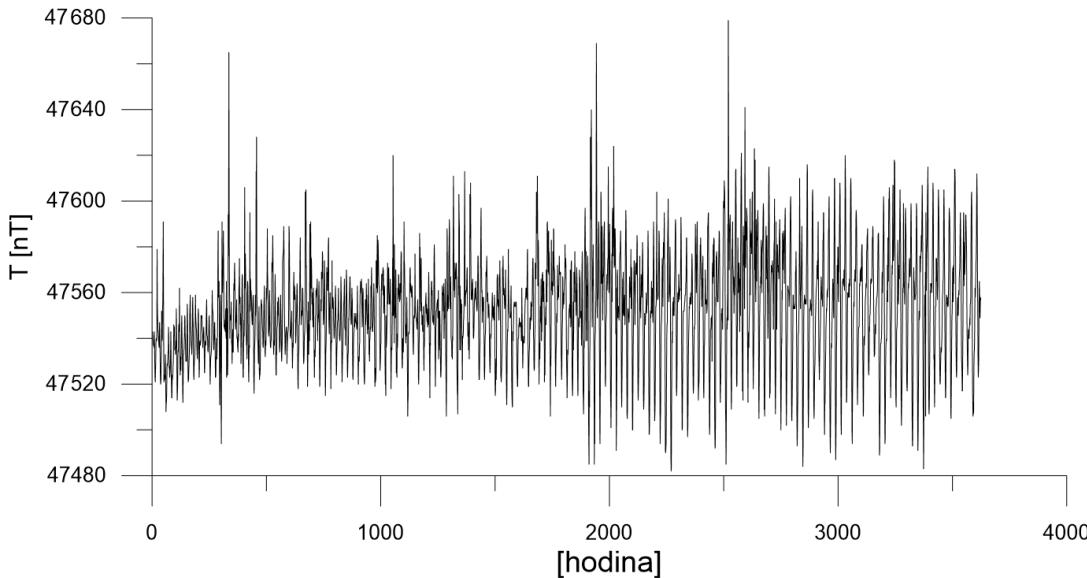
krátkodobé:

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).

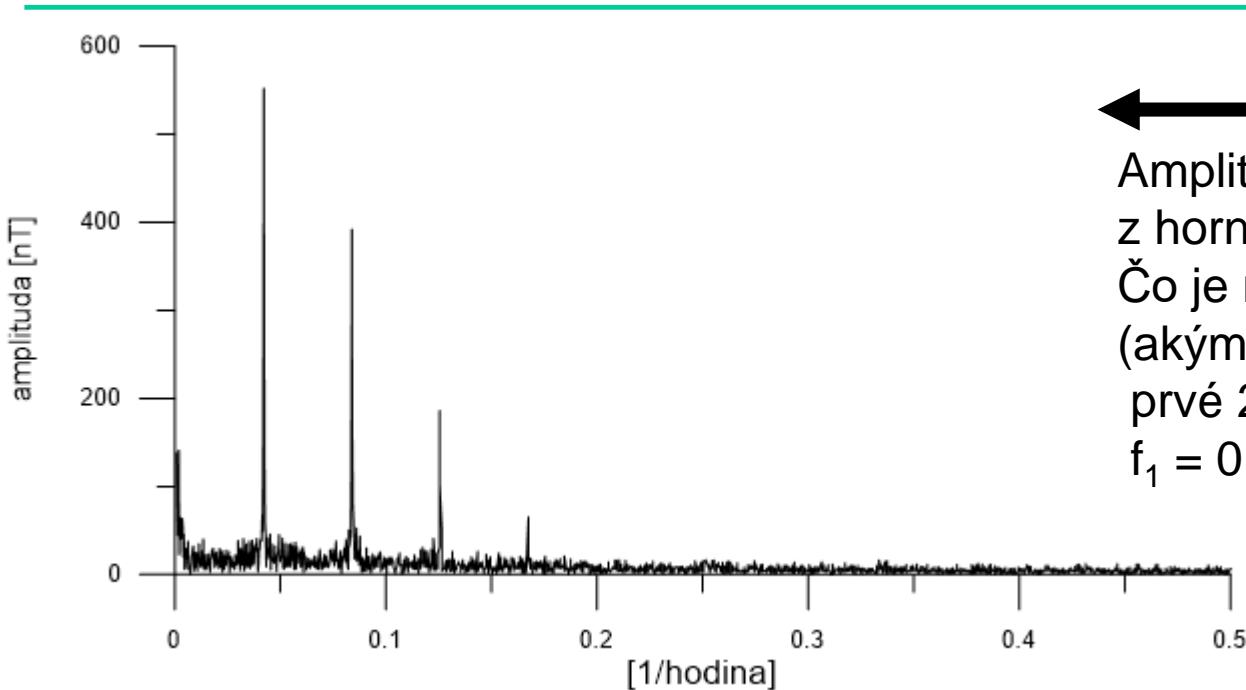


Typický záznam
z variačného magnetometra
(na poludnie dochádza
k poklesu veľkosti poľa T)

časové zmeny ZMP (variácie)



Príklad záznamu zložky T
z observatória
(Kobezl 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?
 $f_1 = 0.0417 \text{ 1/h}$, $f_2 = 0.0834 \text{ 1/h}$)

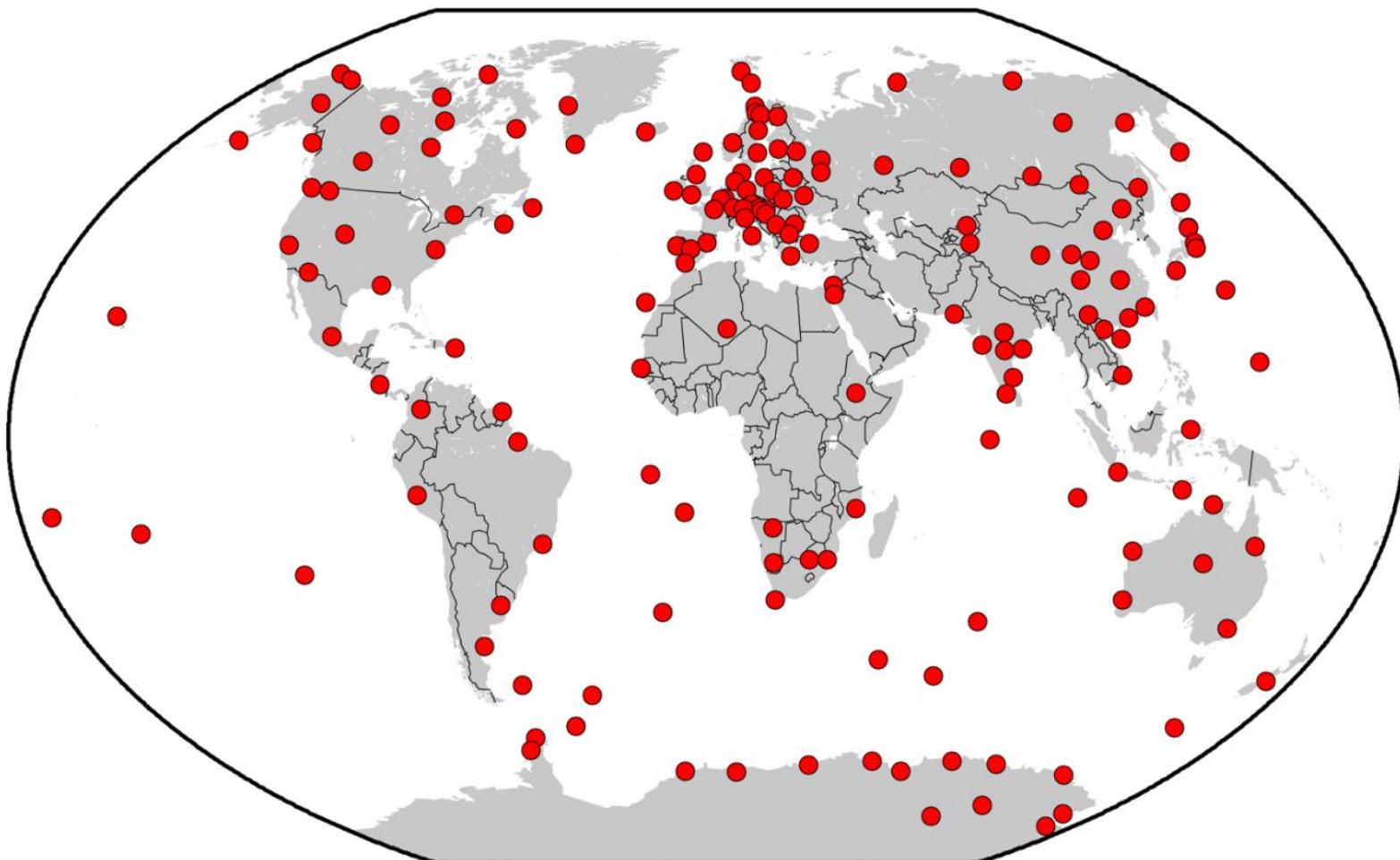
časové zmeny ZMP (variácie)

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).

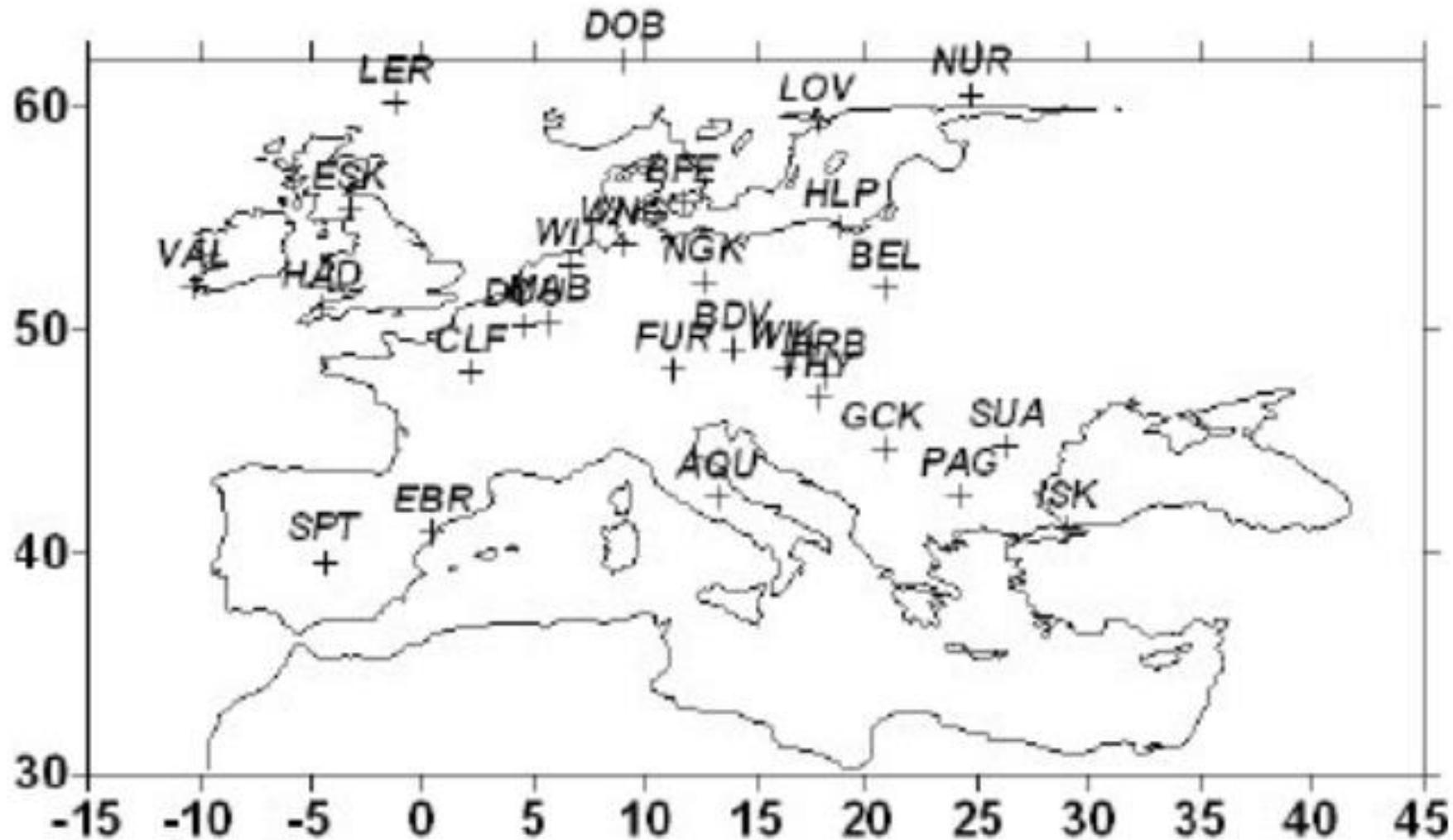


meranie ZMP - observatóriá



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!

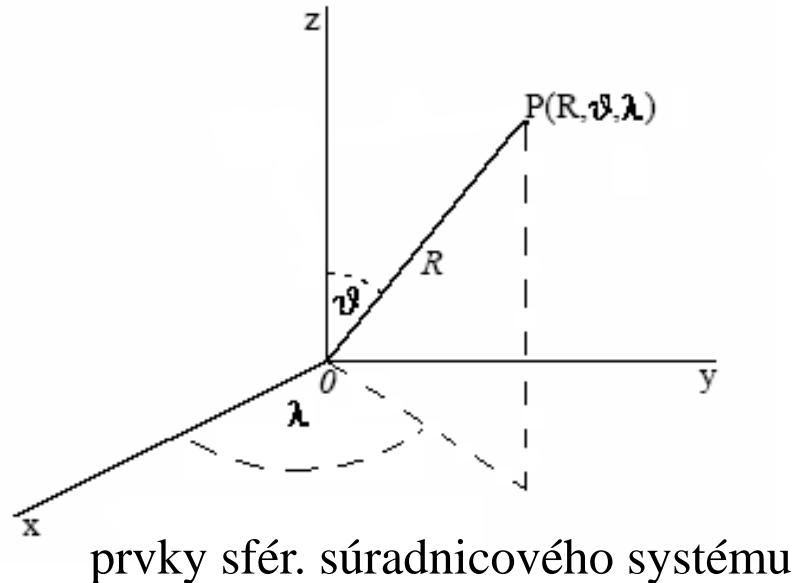
matematický model ZMP

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 approximácii),

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

P_n^m – tzv. pridružené Legendreove polynómy

matematický model ZMP

Riešene Laplaceovej rovnice vo sférických súradniach.

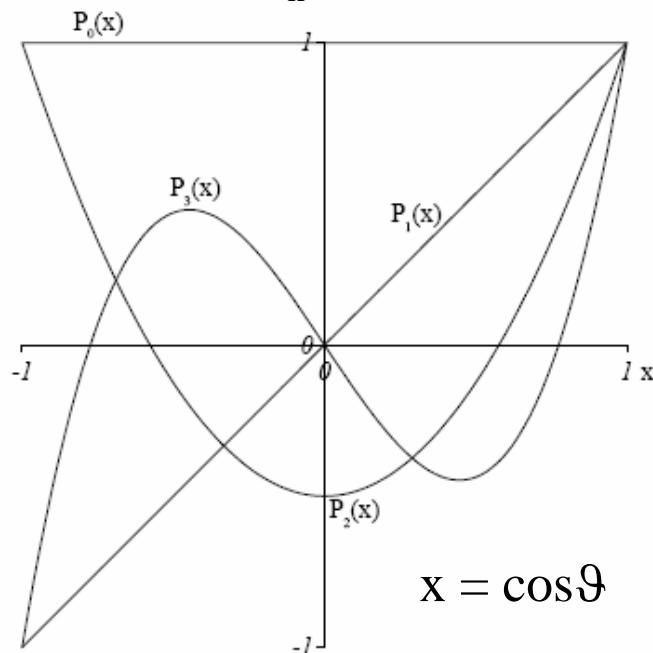
$$U(R, \vartheta, \lambda) = \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{a}{R} \right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (A_{nm} \cos m\lambda + B_{nm} \sin m\lambda) P_n^m(\cos \vartheta)$$

kde:

tzv. sférické funkcie (spherical harmonics)

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

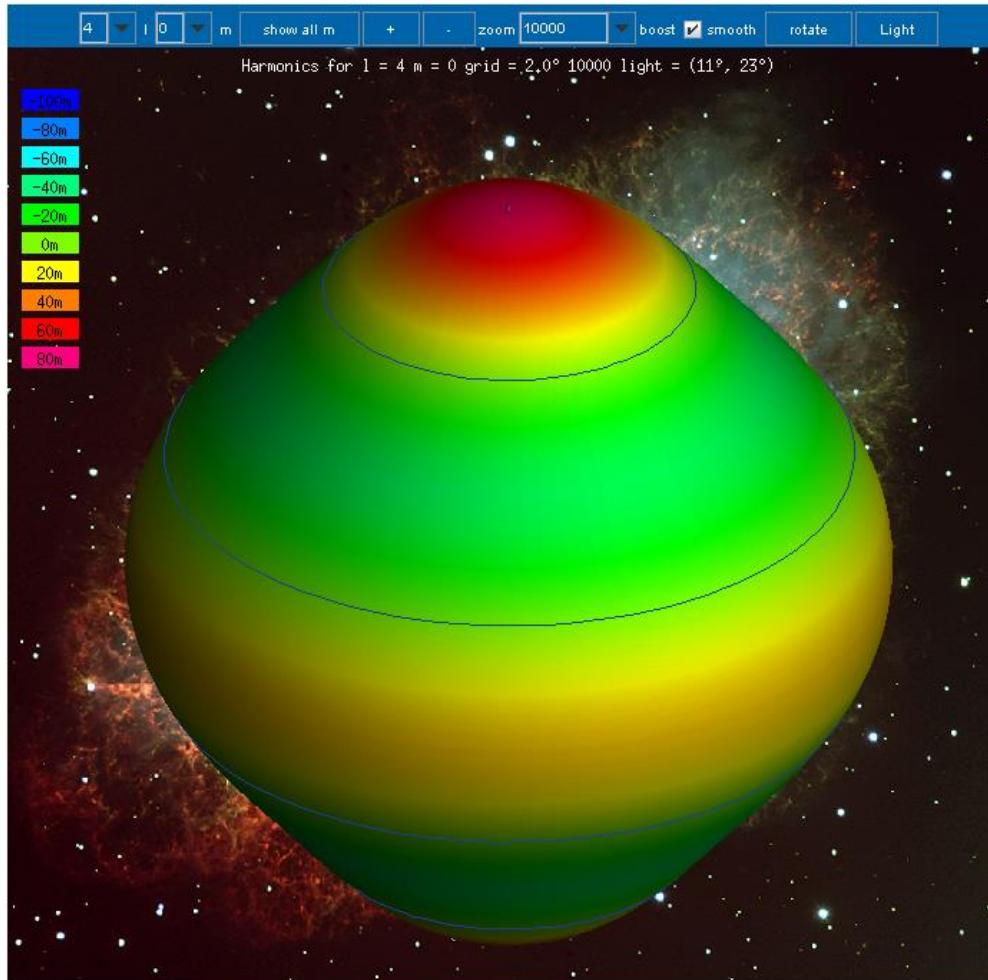
A_{nm}, B_{nm} – koef. tzv. sférických funkcií, P_n^m – tzv. pridružené Legendreove polynómy



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)



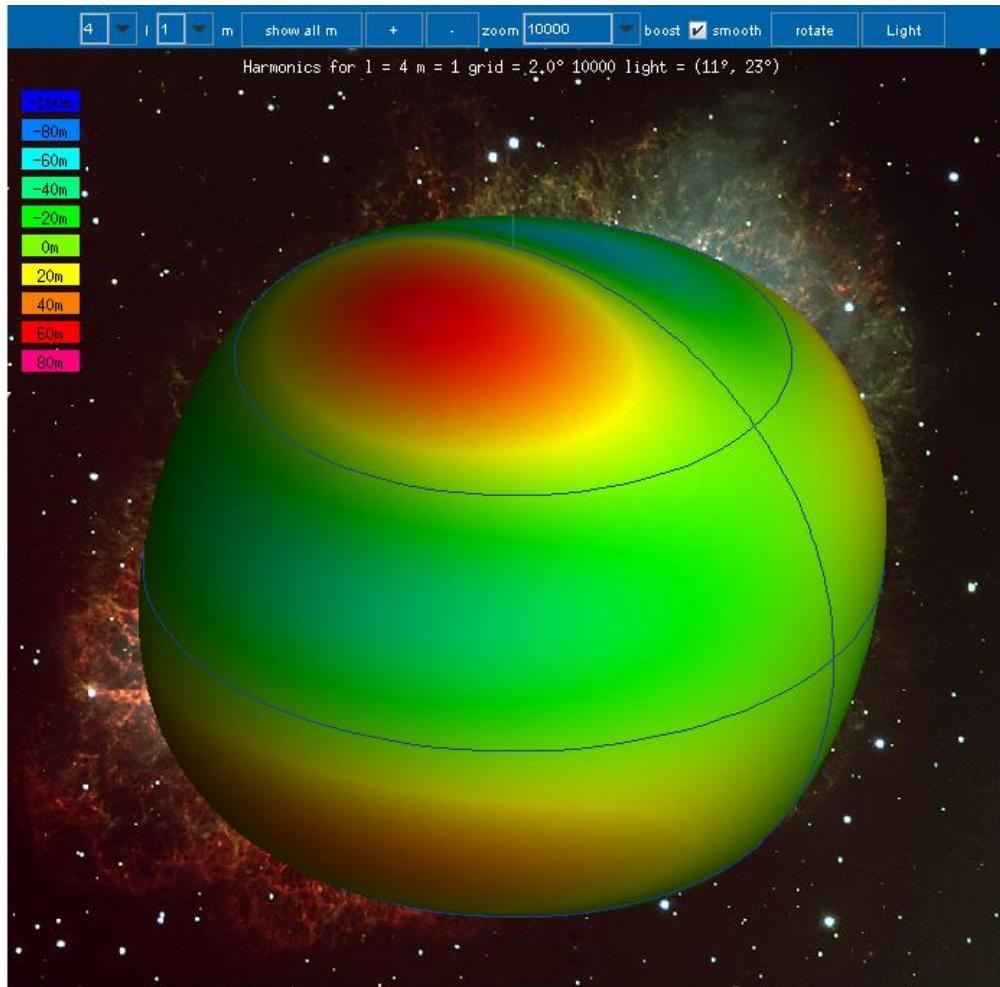
$$\begin{aligned} n &= 4 \\ m &= 0 \end{aligned}$$

tzv. zonálne
sféricke 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)



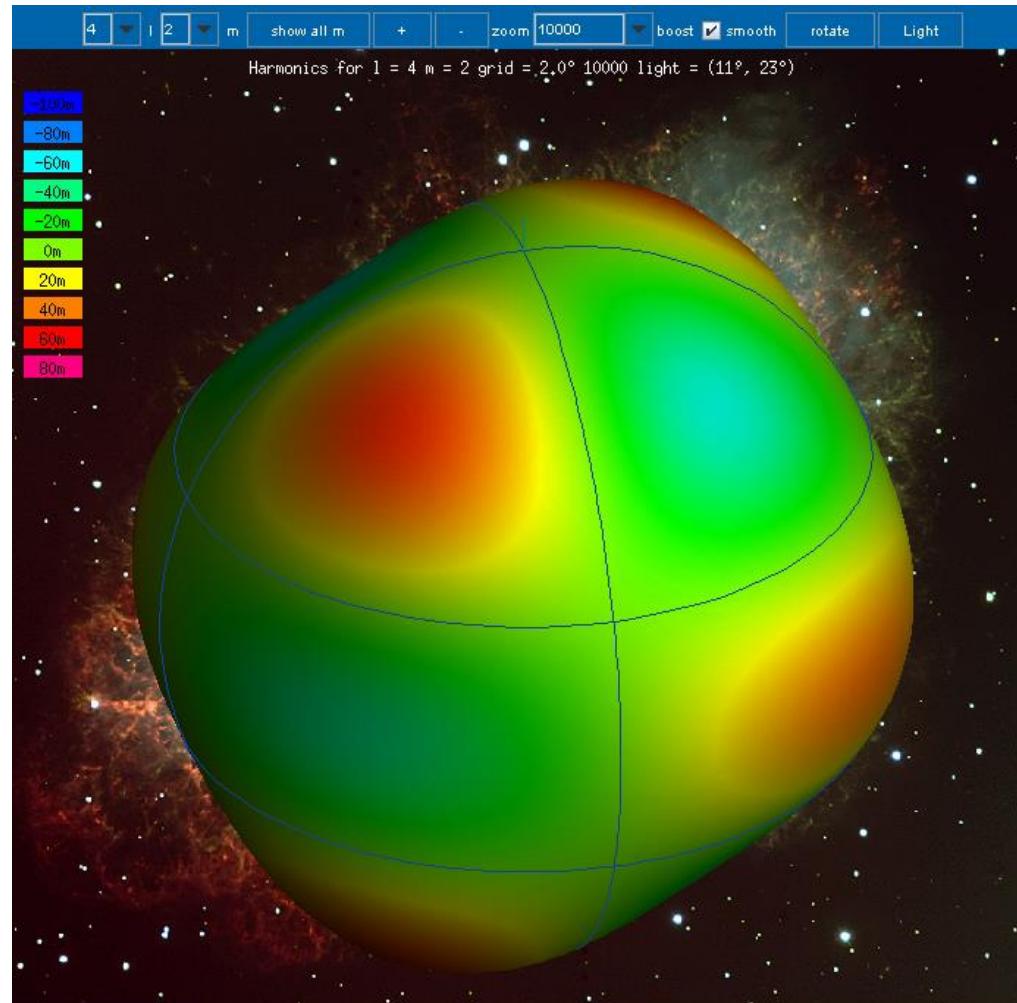
$$n = 4$$

$$m = 1$$

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)

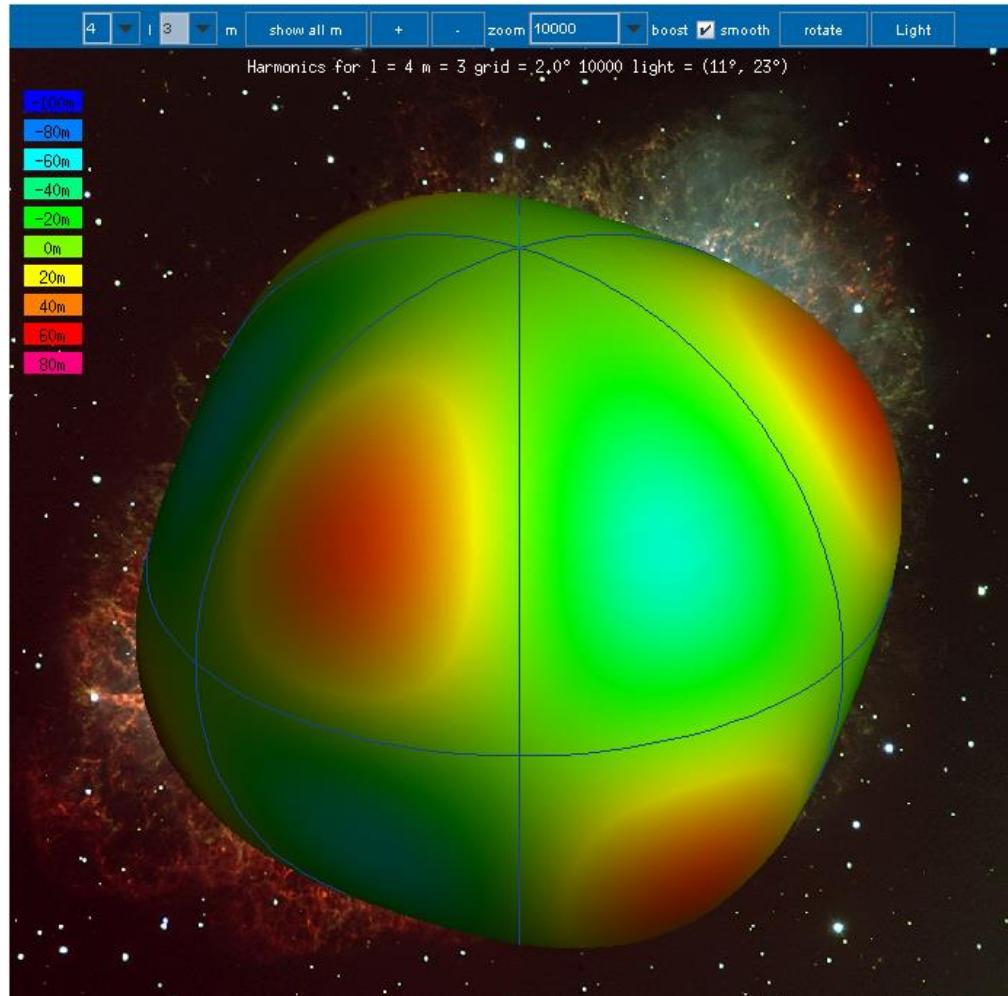


$n = 4$
 $m = 2$

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)



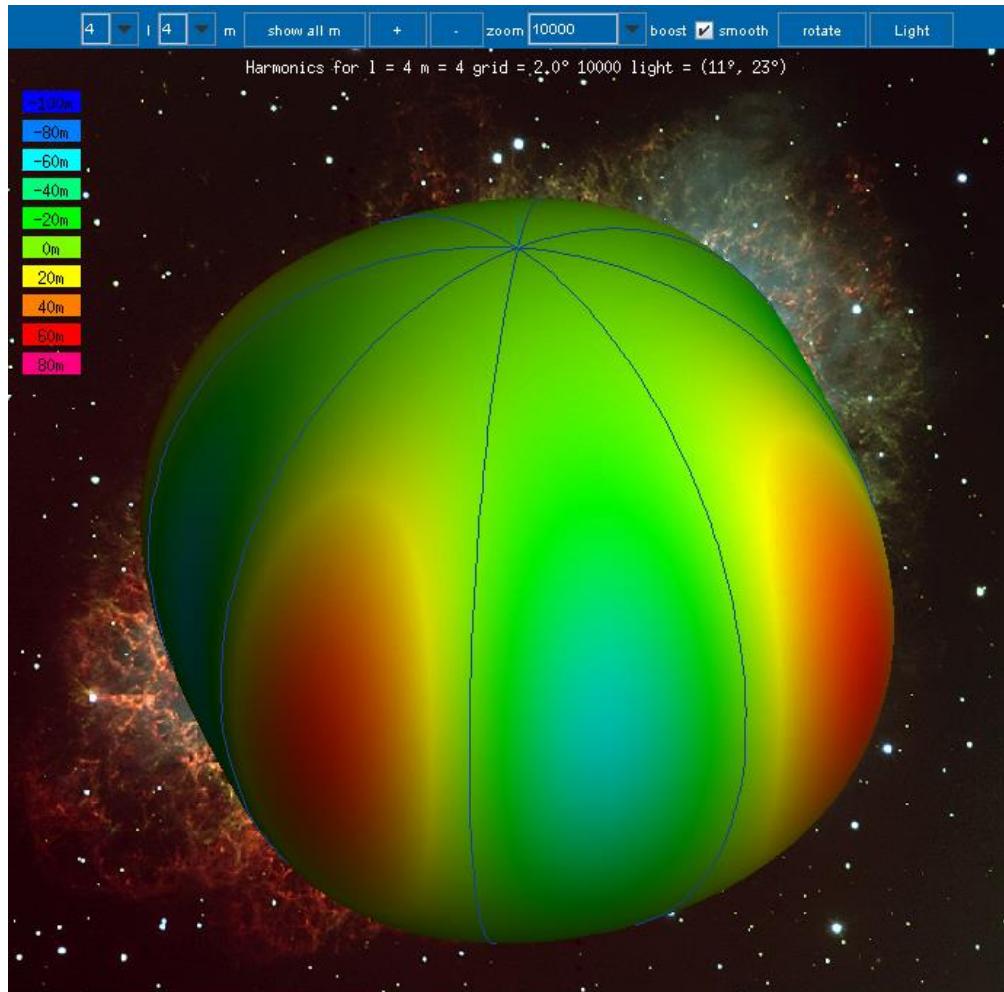
$n = 4$

$m = 3$

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)



$$n = 4$$

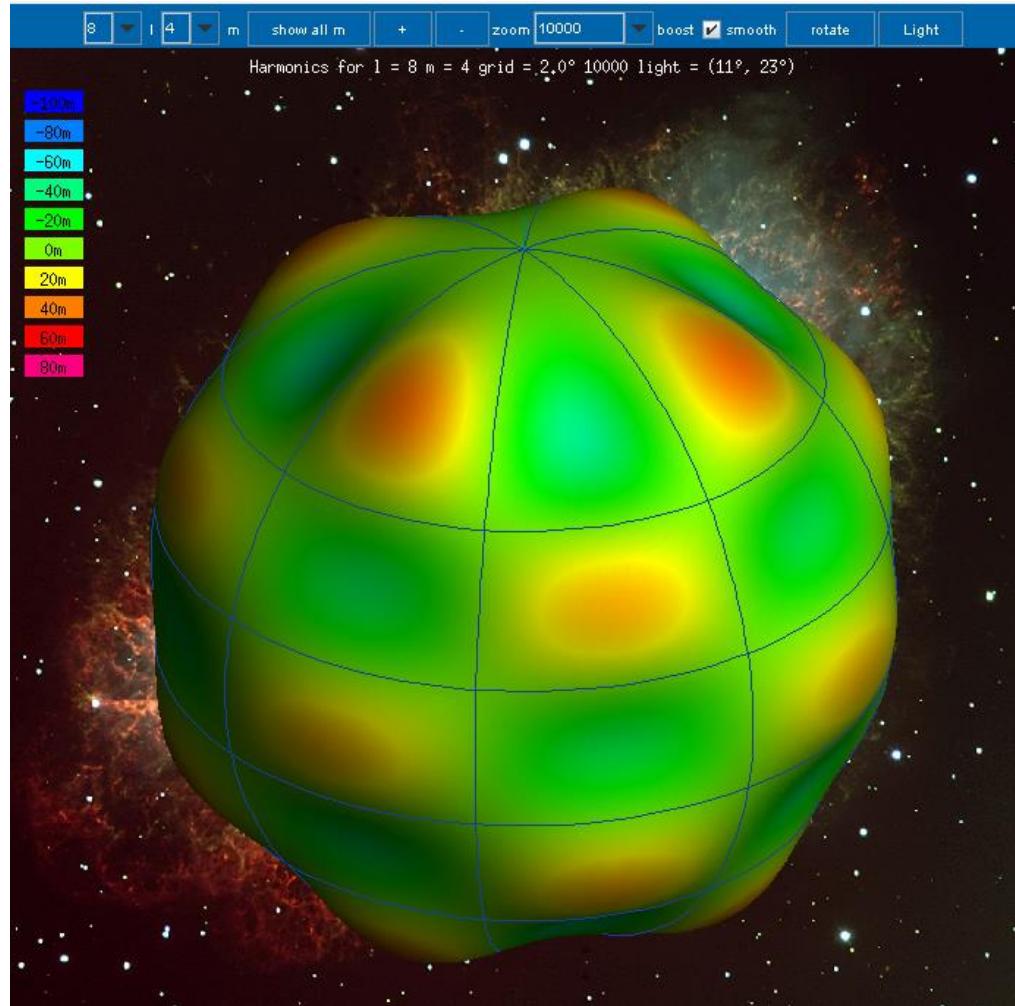
$$m = 4$$

tzv. sektorálne
sféricke 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)



$$n = 8$$

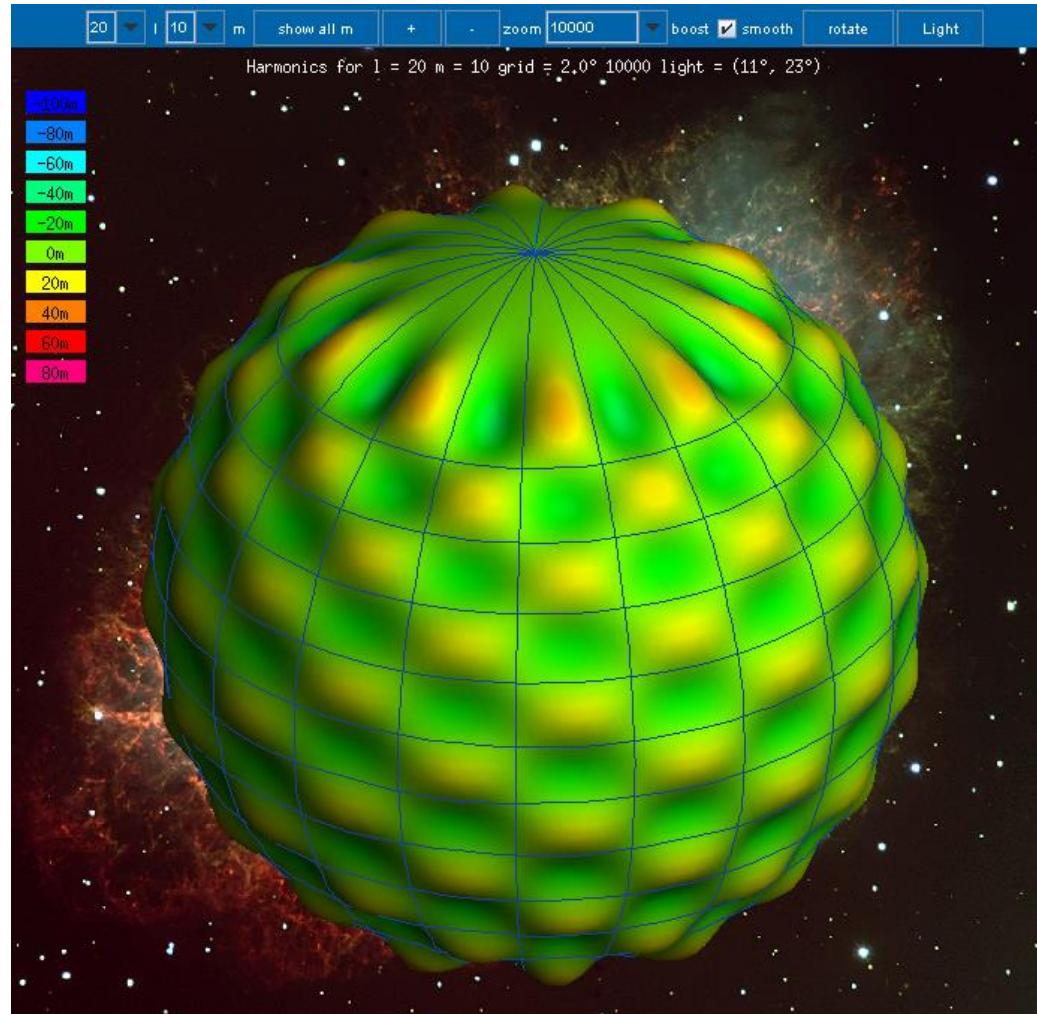
$$m = 4$$

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)



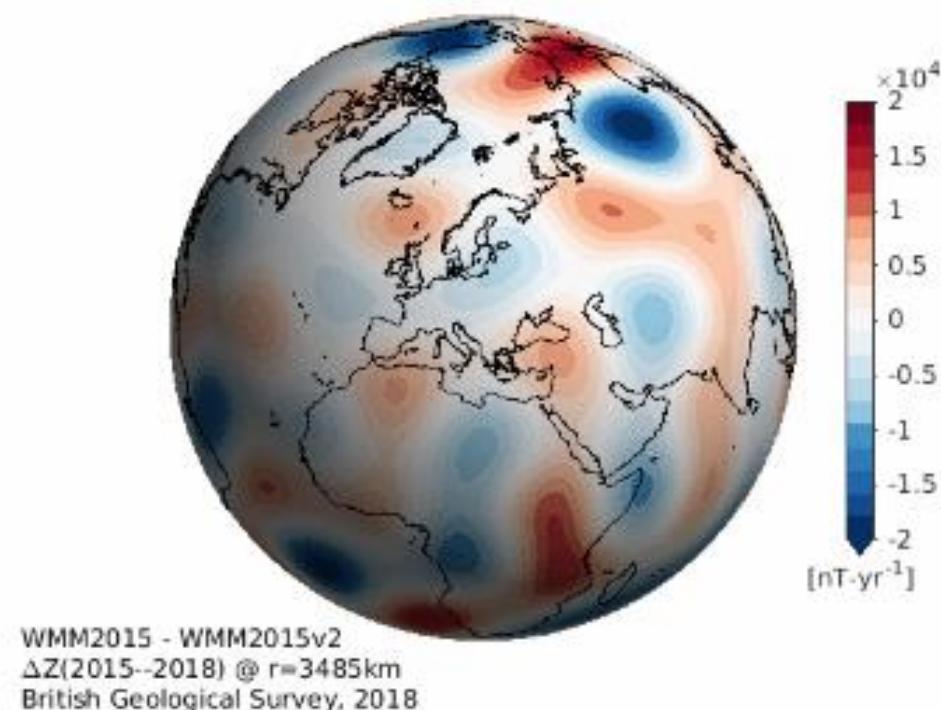
$$\begin{aligned} n &= 20 \\ m &= 10 \end{aligned}$$

tzv. tesserálne
sféricke 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

normálne magnetické pole

Pre účely kvalitatívnej a kvantitatívnej interpretácie v aplikovanej magnetometrii je dôležité na prieskumných profiloch a plochách odpočítať od hodnôt meraného poľa T určité pozadie – tzv. **normálne pole**, aby sme získali tzv. **anomálie ΔT** , ktoré vyjadrujú dipólový charakter (+ / - časti) zmeraného anomálneho magnetického poľa.

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

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, módus,...),
- využitie matematických modelov ZMP (IGRF, WMM, EMM).