

**Stavebná fakulta STU v Bratislave**

Ing. Miloš Vaľko

Autoreferát dizertačnej práce

**Interpretácia variácie geometrických  
a fyzikálnych parametrov Zeme**

na získanie akademického titulu philosophiae doctor

v doktorandskom študijnom programe: Geodézia a kartografia

Bratislava 2008

Dizertačná práca bola vypracovaná v dennej forme doktorandského štúdia na Katedre geodetických základov Stavebnej fakulty STU v Bratislave.

**Predkladateľ:** Ing. Miloš Vaľko  
Katedra geodetických základov SvF STU v Bratislave  
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

**Školiteľ:** Doc. Ing. Marcel Mojzeš, PhD.  
Katedra geodetických základov SvF STU v Bratislave  
Radlinského 11, 813 68 Bratislava

**Oponenti:** Prof. Ing. Jan Kostecký, DrSc.  
Katedra vyšší geodezie ČVUT v Praze, Fakulta stavební,  
Thákurova 7, 166 29 Praha 6, Česká republika

Doc. RNDr. Sebastián Ševčík, Csc.  
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky Univerzity Komenského  
Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie  
Mlynská dolina, 842 48 Bratislava 4

RNDr. Ladislav Brimich, CSc.  
Geofyzikálny ústav Slovenskej akadémie vied  
Dúbravská cesta 9, 845 28 Bratislava

Autoreferát bol rozoslaný: .....  
Obhajoba dizertačnej práce sa koná .....o .....h.  
na Katedre geodetických základov SvF STU v Bratislave, Radlinského 11.

Prof. Ing. Alojz Kopáčik, PhD.  
dekan Stavebnej fakulty STU

# Obsah

Úvod	1
Súčasný stav riešenia problematiky	3
<b>1 Ciele dizertačnej práce</b>	<b>4</b>
<b>2 Model základných fyzikálnych parametrov vnútra Zeme</b>	<b>4</b>
2.1 Hustota . . . . .	4
2.2 Gravitačný potenciál . . . . .	6
2.3 Gravitačné zrýchlenie . . . . .	7
2.4 Hydrostatický tlak . . . . .	7
<b>3 Pohyb geocentra</b>	<b>8</b>
<b>4 Lokálne geodynamické vplyvy</b>	<b>10</b>
4.1 Podpovrchový bodový tepelný žiarič . . . . .	10
4.2 Atmosférické zaťaženie . . . . .	14
<b>5 Prínos pre vedu a prax</b>	<b>16</b>
Záver	17
Zoznam publikovaných prác	18
Literatúra	19
Summary	22

# Úvod

Súčasnú predstavu geovedcov o tvare a štruktúre Zeme sa výrazne odlišujú voči starším predstavám. Keďže teleso Zeme sa nedá označiť za teleso dokonale tuhé a teda nedeformovateľné, ale teleso s viskóznou-elastickými vlastnosťami okolo ktorého navyše obieha Mesiac, ktorého gravitačný vplyv na Zem nie je zanedbateľný, rotačná os Zeme nie je totožná s osou najväčšieho t.j. póloveho momentu zotrvačnosti a taktiež ľadová pokrývka ako aj výška hladín oceánov nie je stála, musí teda na základe týchto skutočností dochádzať k zmenám ako geofyzikálnych polí, tak aj k zmene geometrických a fyzikálnych parametrov Zeme, t.j. k vzniku geodynamických procesov. Zo širokého spektra týchto javov formujúcich tvar Zeme sa z dôvodu nižšej presnosti meracej techniky pozornosť v minulosti venovala najmä javom, ktoré majú dlhodobý charakter a z nich najmä tým javom, ktoré majú lineárny časový priebeh alebo tým javom, ktorých periódy sú veľmi dlhé. Záujem o tieto javy sa samozrejme obmedzuje na javy, ktoré je možné spoľahlivo kvantifikovať buď priamym alebo sprostredkujúcim meraním javu. Súčasná vysoká presnosť meracej techniky umožňuje merať a modelovať aj krátkoperiodické javy (Ide najmä o javy (Burša, 1994):

1. Zmenšovanie druhého Stokesovho zonálneho parametra a z neho plynúce
  - sekulárne zmeny geopotenciálu a jeho zmeny
  - dlhodobé deformácie ekvipotenciálnych plôch
  - zmenšovanie sploštenia zemského telesa
  - zmenšovanie najväčšieho momentu zotrvačnosti telesa
  - relatívne zväčšovanie uhlovej rýchlosti rotácie Zeme
  - relatívne zväčšovanie rovníkových momentov zotrvačnosti Zeme
  - zmenšovanie kinetickej energie Zeme
  - sekulárne zväčšovanie Chandlerovej periódy
2. zmenšovanie uhlovej rýchlosti rotácie Zeme vplyvom slapového trenia a z neho plynúce
  - sekulárne zmeny geopotenciálu
  - zmenšovanie najväčšieho hlavného momentu zotrvačnosti Zeme
  - zmenšovanie momentu hybnosti (točivosti) Zeme
  - zmenšovanie kinetickej energie Zeme
3. sekulárny pohyb pólu a z neho plynúce
  - sekulárne zmeny geopotenciálu a jeho derivácii
  - dlhodobé deformácie ekvipotenciálnych plôch

Matematický model určenia okamžitej geocentrickej polohy s uvažovaním geodynamických javov je založený na rovnici (McCarthy, 2004)

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{X}_R(t) + \sum_i \Delta \mathbf{X}_i(t) - \mathbf{O}_g(t),$$

kde

- $\mathbf{X}(t)$  je skutočná poloha bodu v čase  $t$ ,
- $\mathbf{X}_R(t)$  je modelovaná geocentrická poloha bodu v čase  $t$ ,
- $\Delta \mathbf{X}_i(t)$  predstavuje vplyv  $i$ -tého geodynamického javu v čase  $t$ ,
- $\mathbf{O}_g(t)$  je poloha geocentra v čase  $t$ .

Pod geodynamickými javmi sa tu rozumie súhrn všetkých javov, ktoré vplyvajú na polohu bodu. Ide najmä o javy, ktoré majú skôr globálny charakter ako je napr. vplyv priameho a nepriameho slapovového účinku, vplyv variácie uhlovej rýchlosti rotácie Zeme, pohyb a deformácia litosférických platní, ale prejavia sa tu aj javy so skôr lokálnym charakterom, kam môžeme radiť vplyv teplotných polí pôsobiacich zvnútra alebo zvonka Zeme alebo atmosférické, resp. hydrosférické zaťaženie.

Ďalším významným javom, ktorý je v súčasnosti modelovaný je pohyb geocentra. Tento jav je dôsledkom všetkých javov, ktoré deformujú tvar Zeme alebo javov, ktoré spôsobujú redistribúciu hmoty (variácia hydrosférických a atmosférických mäs). Poloha geocentra je pre geodéziu veľmi významným problémom, pretože ide o začiatok geocentrického súradnicového systému.

Modelovaná poloha bodu v čase  $t$  sa určí pomocou vzťahu

$$\mathbf{X}_R(t) = \mathbf{X}_0 + \dot{\mathbf{X}}(t - t_0),$$

kde

- $\mathbf{X}_0$  predstavuje súradnice daného bodu v epoche  $t_0$ ,
- $\dot{\mathbf{X}}$  predstavuje lineárnu rýchlosť bodu,
- $t_0$  epocha, ku ktorej sú vzťahované referenčné súradnice.

Rýchlosť bodu  $\dot{\mathbf{X}}$  môže byť odhadnutá z viacročnej observácie polohy na danej stanici ako trend časového radu, alebo pomocou modelu pohybu litosférických platní. Nevýhodou použitia modelu pohybu litosférických platní je skutočnosť, že dá sa nimi modelovať len horizontálna zložka pohybu.

Cieľom súčasnej geodézie je realizácia a udržiavanie globálneho geodetického referenčného systému s rádovo milimetrovou presnosťou. Splnenie tejto prísnej požiadavky na presnosť si vyžaduje modelovanie veľkej množiny geodynamických javov, ktorých pochopením a správnou aplikáciou je možné takýto systém realizovať. To si vyžaduje neustále zvyšovať presnosť meracej techniky, obohacovať teóriu o nové teórie založené na rozsiahlych poznatkoch z matematiky, fyziky a iných vedných odborov a aplikovať ich pre riešenie uvedených problémov.

## Súčasný stav riešenia problematiky

Variáciou polohy referenčných bodov ako aj modelovaním hlavných geodynamických javov sa vo svete v súčasnosti venuje značná pozornosť. Medzinárodnou službou, ktorá dbá o referenčné systémy je Medzinárodná služba pre rotáciu Zeme a referenčné systémy (IERS – International Earth Rotation and Reference System Service). Jej hlavnou úlohou by mala byť definícia štandardov pre referenčné systémy ako aj modelov a procedúr, ktoré by mali byť na to použité. Táto služba vydáva dokumenty, ktoré hovoria, aké štandardy by sa mali využívať pre realizáciu referenčných systémov. Ako podklad pre vytvorenie prehľadu súčasného stavu problematiky je v súčasnosti platný dokument služby IERS, a to Konvencie služby IERS z roku 2003 (IERS Convention (2003)) a výročná správa služby IERS za rok 2006 (IERS Annual Report 2006).

Podľa uvedených dokumentov sa v danej problematike modelujú nasledujúce parametre:

- Slapy pevnej Zeme. Jedná sa o detailný popis metódy ako z výsledkov meraní odstrániť slapy pevnej Zeme. Teória sa neobmedzuje len na slapy 2. stupňa, ale zaoberá sa aj slapmi 3. stupňa. Uváženie slapového potenciálu do 3. stupňa je súčasnosti v geodetickej komunite prijaté ako komplexný popis gravitačného účinku kozmických telies. Teória je založená na nominálnych hodnotách pre Loveho čísla.
- Oceánske slapy. Problematika oceánskych slapov je spracovaná podľa Farrellovej teórie. Praktický výpočet variácie polohy bodu je založený na harmonickom rozvoji, kde sa pre modelovanie okamžitej polohy bodu používa 11 hlavných slapových vln  $M_2$ ,  $S_2$ ,  $N_2$ ,  $K_2$ ,  $K_1$ ,  $O_1$ ,  $P_1$ ,  $Q_1$ ,  $M_f$ ,  $M_m$  a  $S_{sa}$  s poldennou, dennou a dlhoperiodickou periódou.
- Pohyb pólu. Je vykonaný komplexný popis pohybu pólu, je ukázaná sekulárna zložka v pohybe pólu. Pre štandardné hodnoty Loveho čísel sú uvedené vzťahy pre zmenu polohy bodu na zemskom povrchu, ktorá je spôsobená pohybom pólu.
- Atmosférické zaťaženie. Sú ukázané praktické hodnoty v zmene polohy referenčného bodu, aké môže variácia atmosférických hmôt v závislosti od aktuálneho rozloženia anomálnej hmoty atmosféry spôsobiť. Je odvodený empirický vzťah pre výpočet deformácie zemského povrchu atmosférickým zaťažením. Teória je založená na Greenových funkciách pre Guttenberg – Bullenov A model.

Možno konštatovať, že súčasný stav pri riešení problému je v mnohých oblastiach detailne rozpracovaný a poskytuje skutočne reálne hodnoty o príslušných geodynamických javoch.

# 1 Ciele dizertačnej práce

Uvedená dizertačná práca si kladie za cieľ:

1. Prehľad a popis v súčasnosti modelovaných geodynamických javov,
2. Modelovanie geodynamických javov pomocou Greenových funkcií a Loveho zaťažovacích čísel,
3. Využitie poznatkov z mechaniky kontinua pre modelovanie geodynamických javov,
4. Modelovanie a odhad veľkosti nemodelovaných geodynamických javov,
5. Odhad vplyvu geodynamických javov na merané fyzikálne a geometrické parametre.

## 2 Model základných fyzikálnych parametrov vnútra Zeme

Základom pre tvorbu tohto modelu je model PREM (Preliminary Reference Earth Model). Tento model má udané každých 100 km základné parametre, ako sú hustota, gravitačné zrýchlenie, hydrostatický tlak, elastickopružné parametre, rýchlosti pozdĺžnych a priečných vln a iné pre popis vnútra Zeme dôležité parametre a veličiny. Predpokladom pri tvorbe modelu PREM bola vrstvová izotropia prostredia, teda predpoklad, že mechanicko-elastické parametre sa menia len so sprievodičom. Na základe týchto podkladov bol vytvorený počítačový program EARTH, ktorý slúži na výpočet základných fyzikálnych parametrov vo vnútri Zeme pri ďalšom modelovaní. Jedná sa o nasledujúce parametre: hustota, gravitačné zrýchlenie, gravitačný potenciál a hydrostatický tlak.

### 2.1 Hustota

Pre výpočet hustoty vo vnútri Zeme si vytvoríme Fourierove koeficienty  $\alpha$ ,  $\beta$  do vhodného stupňa. Ako vstupné údaje pre výpočet budú slúžiť spojité parciálne funkcie vytvorené medzi jednotlivými hranicami vrstiev alebo diskontinuitami, ktoré vzniknú vyvorením kubických funkcií v tvare

$$\rho_i(r) = a_i + b_i r + c_i r^2 + d_i r^3, \quad (r_{min})_i \leq r \leq (r_{max})_i, \quad (1)$$

kde  $i = 1, \dots, 10$  predstavuje príslušnú vrstvu. Dostávame tak 10 funkcií. Hodnoty koeficientov pre zostavenie týchto funkcií sú uvedené v tab. 1

**Tab. 1** Hodnoty koeficientov kubického polynómu pre jednotlivé vrstvy

Vrstva	$r_{min}$ (km)	$r_{max}$ (km)	$a_i$ ( $kg.m^{-3}$ )	$b_i$ ( $kg.m^{-4}$ )	$c_i$ ( $kg.m^{-5}$ )	$d_i$ ( $kg.m^{-6}$ )
1	0	1221.5	13088.5	0.000022	$-2.178 \times 10^{-4}$	$4.8 \times 10^{-11}$
2	1221.5	3480	12581.3	-0.198023	$-8.992 \times 10^{-5}$	$-2.1 \times 10^{-8}$
3	3480	3630	7411.72	-0.55925	$8.333 \times 10^{-6}$	0
4	3630	5701	0	4.194	$-9.872 \times 10^{-4}$	$6.8 \times 10^{-8}$
5	5701	6151	0	4.51101	$-9.680 \times 10^{-4}$	$5.3 \times 10^{-8}$
6	6151	6291	2730.72	0.0959469	$1.02041 \times 10^{-6}$	0
7	6291	6346.6	2690.17	0.108813	0	0
8	6346.6	6368	0.500	1056.65	-0.330012	$2.6 \times 10^{-5}$
9	6368	6371	1020	0	0	0
10	6371	6372	$-7.689 \times 10^7$	12068.5	0	0

Hodnoty jednotlivých koeficientov  $\alpha_m, \beta_m$  Fourierovho rozvoja sa vypočítajú zo vzťahov

$$\alpha_0 = \frac{1}{6372} \sum_{i=1}^{10} \int_{r_{i,min}}^{r_{i,max}} (a_i + b_i r + c_i r^2 + d_i r^3) dr,$$

$$\beta_0 = 0,$$

$$\alpha_m = \frac{2}{6372} \sum_{i=1}^{10} \int_{r_{i,min}}^{r_{i,max}} (a_i + b_i r + c_i r^2 + d_i r^3) \cos \frac{2\pi m r}{6372} dr, \quad (2)$$

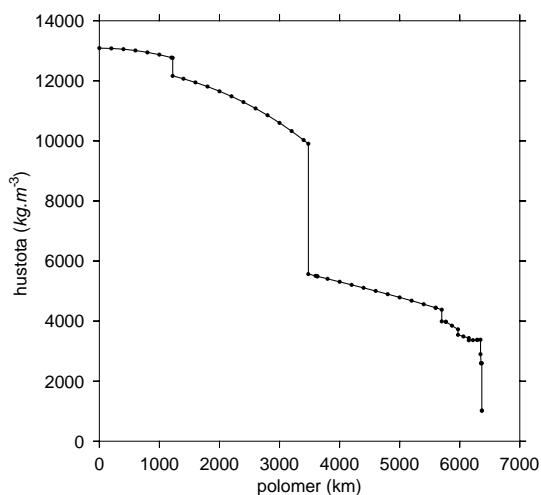
$$\beta_m = \frac{2}{6372} \sum_{i=1}^{10} \int_{r_{i,min}}^{r_{i,max}} (a_i + b_i r + c_i r^2 + d_i r^3) \sin \frac{2\pi m r}{6372} dr.$$

Hodnotu hustoty v ľubovoľnom bode vo vnútri Zeme je potom možné vypočítať zo vzťahu

$$\varrho(r) = \alpha_0 + \sum_{m=0}^{m_{max}} \left( \alpha_m \cos \frac{2\pi m r}{6372} + \beta_m \sin \frac{2\pi m r}{6372} \right), \quad 0 \leq r \leq R. \quad (3)$$

Priebeh hustoty vo vnútri Zeme je znázornený na obr. 1.





Obr. 1 Hustota vo vnútri modelu EARTH

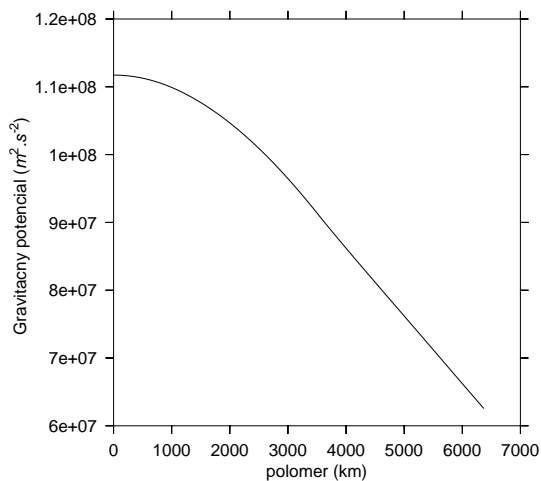
## 2.2 Gravitačný potenciál

Gravitačný potenciál bodu nachádzajúceho sa vo vnútri sféry sa vypočíta ako súčet gravitačného potenciálu od stredu telesa po daný polomer

$$V_{g1}(r) = \frac{4\pi G}{r} \int_0^r \rho(r') r'^2 dr' \quad (4)$$

a gravitačného potenciálu zvyšku sféry (obr. 2)

$$V_{g2}(r) = 4\pi G \int_r^R r' \rho(r') dr'. \quad (5)$$



Obr. 2 Gravitačný potenciál vo vnútri modelu EARTH

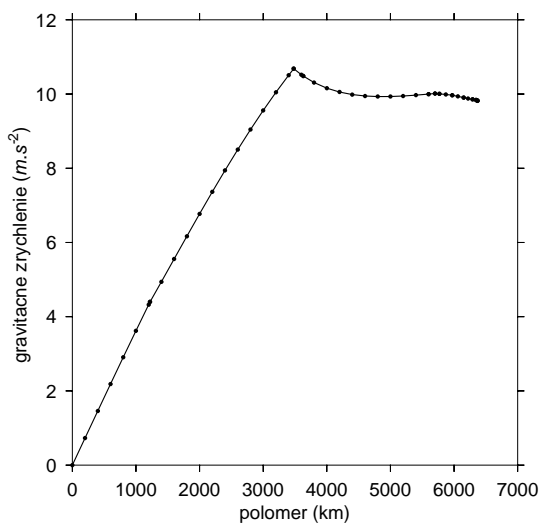
## 2.3 Gravitačné zrýchlenie

Vzťah medzi gravitačným potenciálom a gravitačným zrýchlením v radiálne symetrickom telese je nasledujúci

$$g_g(r) = -\frac{dV_g(r)}{dr}. \quad (6)$$

Teda gravitačné zrýchlenie v bode vo vnútri Zeme bude

$$g_g(r) = -\frac{\partial}{\partial r} \left[ \frac{4\pi G}{r} \left( \int_0^r r'^2 \varrho(r') dr' + r \int_r^R r' \varrho(r') dr' \right) \right]. \quad (7)$$



Obr. 3 Gravitačné zrýchlenie vo vnútri modelu EARTH

## 2.4 Hydrostatický tlak

Hydrostatický tlak vo vnútri sférického telesa popisuje rovnica hydrostatickej rovnováhy, t.j. rovnica

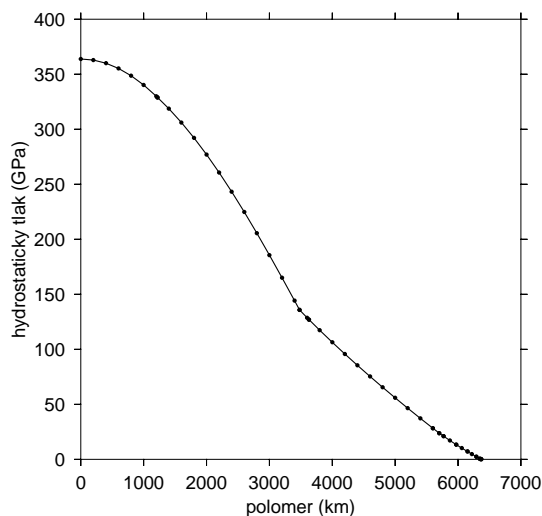
$$\frac{dp(r)}{dr} = -g_g(r)\varrho(r). \quad (8)$$

Integráciou dostaneme

$$p(r) = -\int_0^r g(r')\varrho(r')dr' + C, \quad (9)$$

kde  $C$  je integračná konštanta. Ak pre povrch sféry položíme podmienku nulového hydrostatického tlaku, dostaneme (Pick a kol., 1973)

$$p(r) = \int_r^R g(r')\varrho(r')dr'. \quad (10)$$



Obr. 4 Hydrostatický tlak vo vnútri modelu EARTH

### 3 Pohyb geocentra

Zemský povrch možno označiť za dynamickú plochu, ktorá neustále podlieha časovým zmenám. Tieto zmeny spôsobujú zmenu v distribúcii hmoty v Zemi, čo má priamy dôsledok v zmene jej fyzikálneho stredu, t.j. ťažiska Zeme.

Pri štúdiu pohybu geocentra zistíme, že poloha geocentra je závislá na prijatom začiatku referenčného systému. Najbežnejšie používanými začiatkami referenčných systémov sú:

- CM - ťažisko celej Zeme<sup>1</sup>
- CE - ťažisko Zeme bez hydrosféry a atmosféry<sup>2</sup>
- CF - ťažisko geometrickej plochy pevnej Zeme<sup>3</sup>

Vyjadrime si polohu geocentra v systéme  $\mathbf{X}_{CF}^{CM}$ . Keďže pohyb geocentra je periodický pohyb, poloha geocentra je definovaná nasledovne (Elosegui, 2005)

$$\mathbf{X}_{CF}^{CM}(t) = A \cos\{2\pi\nu(t - t_0) - \phi\} \quad (11)$$

kde

- $A$  je amplitúda pohybu (mm)
- $\nu$  je ročná frekvencia (1/365.25 dňa)
- $t$  je aktuálny deň v roku
- $t_0$  predstavuje referenčný deň (1. január)
- $\phi$  je fázové posunutie (stupne)

<sup>1</sup>z angl. the center of mass of the whole Earth

<sup>2</sup>z angl. the center of mass of the Solid Earth without mass load

<sup>3</sup>z angl. the center of figure of the outer surface of the Solid Earth

Poznámka: V uvedených vzťahoch dolný index značí rámeček, v ktorom sú uvedené údaje a horný index hovorí o rámeči, ktorý chceme popísať.

Ak by sme chceli popísať pohyb geocentra v systéme  $\mathbf{X}_{CM}^{CF}$ , môžeme to urobiť pomocou rovnice

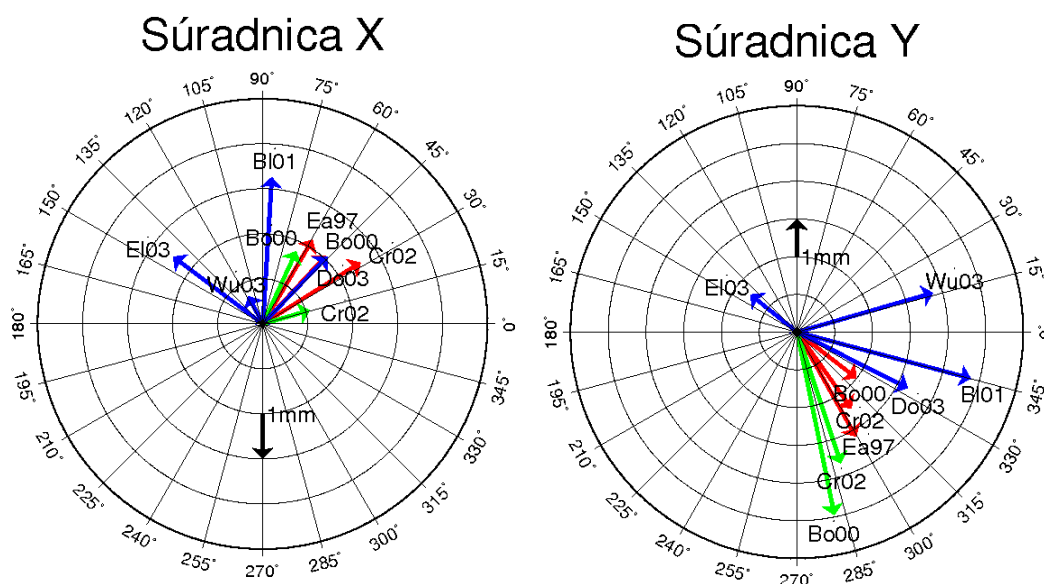
$$\mathbf{X}_{CM}^{CF}(t) = A \sin\{2\pi\nu(t - t_0) + \phi\} \quad (12)$$

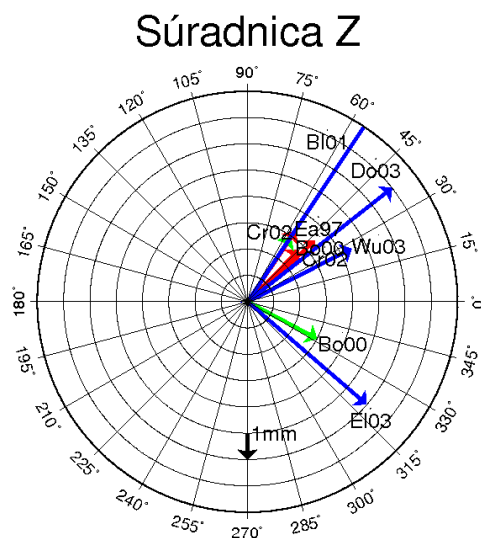
s rovnakým významom použitých symbolov ako v predchádzajúcom prípade.

Štúdiom a analýzou pohybu geocentra sa venuje viacero odborníkov. Na tento účel sa môže využiť širšie spektrum priestorových techník ako sú napr. GPS, DORIS, SLR a iné. V tab. 2 je uvedený stručný prehľad odhadov ročných amplitúd a fáz pre pohyb geocentra a na obr. 5a, 5b a 5c ich grafické znázornenie.

**Tab. 2** Porovnanie odhadov amplitúd a fáz pre jednotlivé modely pohybu geocentra

Model	Technika	X		Y		Z	
		A (mm)	$\phi$ (°)	A (mm)	$\phi$ (°)	A (mm)	$\phi$ (°)
Ea97	SLR	2.2	59	3.2	299	2.8	45
Ch99	SLR	2.2	59	3.2	299	2.8	45
Bo00	SLR	2.1 ± 0.5	47	2.0 ± 0.5	322	3.5 ± 1.5	42
Cr02	SLR	2.6 ± 0.5	32 ± 7	2.5 ± 0.1	305 ± 4	3.3 ± 1.0	35 ± 10
Bo00	DORIS	1.8	65	5.0	281	3.0	332
Cr02	DORIS	1.1 ± 1.7	16 ± 4	3.7 ± 0.2	288 ± 3	3.0 ± 1.0	56 ± 7
Bl01	GPS	3.3 ± 0.3	86 ± 3	4.8 ± 0.3	345 ± 3	11.0 ± 0.2	56 ± 1
Wu03	GPS	0.7 ± 1.5	117 ± 11	3.8 ± 1.2	16 ± 20	4.5 ± 1.0	27 ± 13
Do03	GPS	2.1 ± 0.3	46 ± 7	3.3 ± 0.3	333 ± 6	7.1 ± 0.3	38 ± 3
El05	GPS	2.5 ± 0.2	143 ± 5	1.6 ± 0.2	141 ± 7	6.0 ± 0.2	319 ± 0





Obr. 5 Ročné amplitúdy v smere jednotlivých osí

## 4 Lokálne geodynamické vplyvy

Okrem geodynamických procesov, ktoré majú vplyv na variáciu zemského povrchu v globálnom zmysle, na zemský povrch vplývajú aj geodynamické procesy, ktoré pôsobia len na určitej obmedzenej oblasti. Môže sa jednať napríklad o vplyv anomálneho teplotného poľa pochádzajúceho buď z vnútra Zeme alebo z povrchu Zeme resp. jeho blízkeho okolia alebo o anomálne atmosférické, resp. hydrosférické zaťaženie.

### 4.1 Podpovrchový bodový tepelný žiarič

Majme bodový tepelný zdroj s výkonom  $w$  nachádzajúci sa v hĺbke  $\zeta$ . Tento tepelný zdroj nech vznikne v čase  $t_0$ . Priestorové rozloženie teploty  $T$  v priestore a čase popisuje nasledujúca diferenciálna rovnica (Brimich, 1998)

$$\lambda_T \nabla^2 T + w \delta(x) \delta(y) \delta(z - \zeta) H(t) = c_P \rho \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (13)$$

- kde
- $\lambda_T$  je koeficient tepelnej vodivosti
  - $w$  je výkon tepelného žiariča
  - $\delta(\cdot)$  je Diracova funkcia pre príslušnú súradnicu
  - $H(t)$  je Heavisideova kroková funkcia pre čas  $t$
  - $c_P$  je špecifické teplo pod konštantným tlakom
  - $\rho$  je hustota kontinua
  - $\zeta$  je hĺbka tepelného žiariča

Diracova funkcia pre súradnicu  $\xi$  je definovaná nasledovne

$$\delta(\xi) = \begin{cases} 0 & : \xi \neq 0 \\ 1 & : \xi = 0 \end{cases}$$

Heavisideova kroková funkcia je definovaná nasledovne (Hunter, 2001)

$$H(t_0) = \begin{cases} 0 & : t < t_0 \\ 1 & : t \geq t_0 \end{cases}$$

Pre uvedenú diferenciálnu rovnicu zvolíme takéto okrajové podmienky

$$\begin{aligned} T(x, y, z) \Big|_{z=0} &= 0, \\ \tau_{i3}(x, y, z) \Big|_{z=0} &= 0, \quad i = 1, 2, 3. \end{aligned} \quad (14)$$

Riešením rovnice (13) v cylindrických súradniciach pre vyjadrenie priestorovej distribúcie teploty je funkcia

$$T(r, z) = A \left( \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right), \quad (15)$$

kde význam použitých symbolov je nasledujúci

$$\begin{aligned} A &= \frac{w}{4\pi\lambda_T}, \\ R_1 &= \sqrt{r^2 + (z - \zeta)^2}, \\ R_2 &= \sqrt{r^2 + (z + \zeta)^2}. \end{aligned}$$

Pre posunutia a zložky tenzora napätia po splnení všetkých okrajových podmienok dostávame výrazy

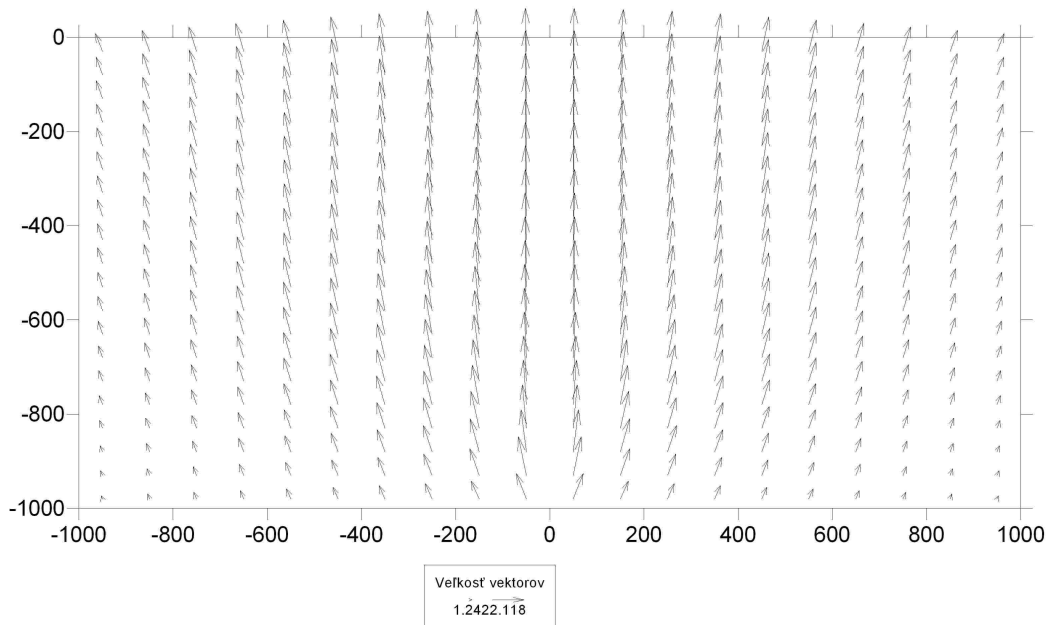
$$\begin{aligned} \tau_{rr}(r, z) &= -2\mu A \left\{ \frac{1}{R_1} \left( 1 + \frac{r^2}{R_1^2} \right) - \frac{1}{R_2} \left( 1 + \frac{r^2}{R_2^2} \right) - \right. \\ &\quad \left. - \frac{2\zeta}{R_2^3} \left( 4z + 2\zeta - 3z \frac{(z - \zeta)^2}{R_2^2} \right) + 2(1 - \nu) \frac{\zeta}{r^2} \left( \frac{z + \zeta}{R_2} - 1 \right) \right\}, \\ \tau_{\varphi\varphi}(r, z) &= -2\mu A \left\{ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} - 2\zeta \left( \frac{1}{R_2^3} ((2\nu - 1)z + 2\nu\zeta) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - 2(1 - \nu) \frac{1}{r^2} \left( \frac{z + \zeta}{R_2} - 1 \right) \right) \right\}, \\ \tau_{zz}(r, z) &= -2\mu A \left\{ \frac{1}{R_1} \left( 2 - \frac{r^2}{R_1^2} \right) - \frac{1}{R_2} \left( 2 - \frac{r^2 + 2z\zeta}{R_2^2} + 6z\zeta \frac{(z + \zeta)^2}{R_2^4} \right) \right\}, \\ \tau_{rz}(r, z) &= -2\mu Ar \left\{ \frac{z - \zeta}{R_1^3} - \frac{z + \zeta}{R_2^3} - \frac{6z\zeta(z + \zeta)}{R_2^5} \right\}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$u_r(r, z) = Ar \left\{ \frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} - \frac{2z\zeta}{R_2^3} + \frac{4\zeta(1-\nu)}{R_2(R_2 + \zeta + z)} \right\},$$

$$u_z(r, z) = A \left\{ \frac{z - \zeta}{R_1} - \frac{z + \zeta}{R_2} - \frac{2\zeta(1-2\nu)}{R_2} - \frac{2z\zeta(z + \zeta)}{R_2^3} \right\}.$$

Pri numerickom experimente boli zvolené nasledujúce hodnoty parametrov:

$\zeta = 1000m$	hĺbka tepelného žiariča
$w = 3 \times 10^7 W$	výkon tepelného žiariča
$\lambda = 7.05 \times 10^{10} Pa$	Lamého elastická konštanta
$\mu = 6.075 \times 10^{10} Pa$	Lamého elastická konštanta
$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} = 0.26857$	Poissonovo číslo
$\lambda_T = 3W.m^{-1}.K^{-1}$	koefficient vedenia tepla
$\alpha_T = 10^{-6} K^{-1}$	koefficient tepelnej rozťažnosti



**Obr. 6** Vektorové znázornenie posunov

Vplyv teplotného poľa generovaného podpovrchovým bodovým tepelným žiaričom na merané geodetické veličiny môžeme rozdeliť do dvoch základných skupín:

- Vplyv na merané geometrické parametre
- Vplyv na merané fyzikálne parametre

### Geometrické parametre

Pod parametrami geometrického charakteru možno chápať nasledujúce veličiny

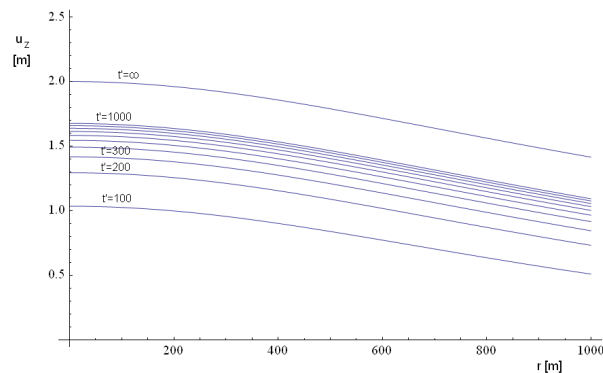
1. Zmena výšky / zmena meraného prevýšenia
2. Zmena horizontálnej dĺžky / zmena priestorovej dĺžky
3. Zmena horizontálneho uhlu / zmena vertikálneho uhlu

### Parametre fyzikálneho typu

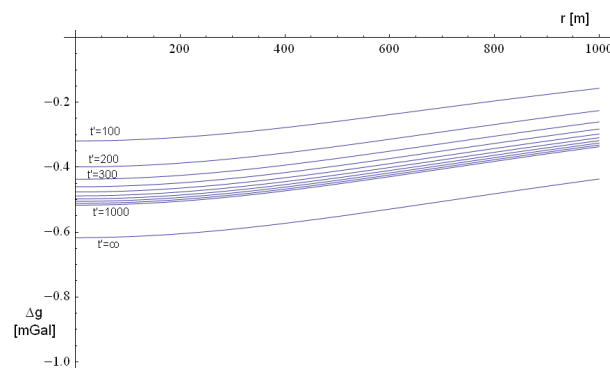
Pod parametrami fyzikálneho charakteru možno chápať nasledujúce veličiny

1. Zmena tepelného toku
2. Zmena hustoty podzemných vrstiev
3. Zmena tiažového zrýchlenia
4. Zmena zložiek zvislicovej odchýlky
5. Zmena výšky kvázigeoidu

Na obr. 7 je graficky znázornený časový vývoj výšky referenčného bodu a na obr. 8 je graficky znázornený časový vývoj tiažového zrýchlenia (časovou jednotkou pre časový vývoj je hodnota  $10^{10}$  s).



**Obr. 7** Časový vývoj zmeny výšky bodu



**Obr. 8** Časový vývoj zmeny tiažového zrýchlenia



## 4.2 Atmosférické zaťaženie

Kedže Zem nie je dokonale tuhým telesom, musí tvarovo podliehať všetkým externe pôsobiacim silám. Špecifikáciou tejto sily je to, že obsahuje len normálovú zložku. To znamená, že môžeme očakávať buď vertikálnu deformáciu zemského povrchu alebo všeobecnú deformáciu, ale s výrazne dominantnou vertikálnou zložkou.

Modelovanie je založené na analytickom zaťažení homogénneho izotropného polpriestoru vertikálnym zaťažením konštantným radiálnym zaťažením prstencového typu, t.j. zaťaženia charakterizovaného svojou veľkosťou a hodnotami vnútorného a vonkajšieho polomeru v tvare

- Pre  $0 \leq r \leq R_1$

$$v_z(r) = \frac{4(1-\mu^2)}{\pi E} p \left[ R_2 \mathbf{E} \left( \frac{r}{R_2}, \frac{\pi}{2} \right) - R_1 \mathbf{E} \left( \frac{r}{R_1}, \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad (17)$$

- Pre  $R_1 \leq r \leq R_2$

$$v_z(r) = \frac{4(1-\mu^2)}{\pi E} p \left[ R_2 \mathbf{E} \left( \frac{r}{R_2}, \frac{\pi}{2} \right) - r \mathbf{E} \left( \frac{R_1}{r}, \frac{\pi}{2} \right) + r \left( 1 - \frac{R_1^2}{r^2} \right) \mathbf{K} \left( \frac{R_1}{r}, \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad (18)$$

- Pre  $r \geq R_2$

$$v_z(r) = \frac{4(1-\mu^2)}{\pi E} pr \left[ \mathbf{E} \left( \frac{R_2}{r}, \frac{\pi}{2} \right) - \left( 1 - \frac{R_2^2}{r^2} \right) \mathbf{K} \left( \frac{R_2}{r}, \frac{\pi}{2} \right) - \mathbf{E} \left( \frac{R_1}{r}, \frac{\pi}{2} \right) + \left( 1 - \frac{R_1^2}{r^2} \right) \mathbf{K} \left( \frac{R_1}{r}, \frac{\pi}{2} \right) \right], \quad (19)$$

kde

- $R_1$  je vnútorný polomer prstenca (m)
  - $R_2$  je vonkajší polomer prstenca (m)
  - $p$  je hodnota atmosférického zaťaženia (MPa)
  - $E$  je hodnota Youngovho modulu pružnosti pre polpriestor (MPa)
  - $\mu$  je Poissonovo číslo pre polpriestor
  - $\mathbf{E} \left( k, \frac{\pi}{2} \right)$  je plný druhý eliptický integrál
  - $\mathbf{K} \left( k, \frac{\pi}{2} \right)$  je plný prvý eliptický integrál
- Eliptické integrály sú definované nasledovne

$$\mathbf{K}(k, \varphi) = \int_0^{\varphi} \frac{d\psi}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi}}, \quad (20)$$

$$\mathbf{E}(k, \varphi) = \int_0^\varphi \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \psi} \, d\psi, \quad (21)$$

Ďalší postup spočíval v zostavení rovníc pre nekonečné množstvo takýchto prstencov a následnom zmenšovaní ich hrúbky, čím sa dospelo k rovnici

$$v_z(r) = \frac{4(1 - \mu^2)}{\pi E} \left[ \frac{2}{r^2} \int_0^r x p(x) \mathbf{K} \left( \frac{x}{r}, \frac{\pi}{2} \right) dx + \int_r^{r_{max}} p(x) \mathbf{E} \left( \frac{r}{x}, \frac{\pi}{2} \right) dx \right]. \quad (22)$$

Pri numerickom prístupe k problému je výhodné uvedené analytické riešenie upraviť na tvar

$$v_z(r) = \frac{4(1 - \mu^2)}{\pi E} \left[ \sum_{n=k+1}^{n_{max}-1} R_n \mathbf{E} \left( \frac{r}{R_n}, \frac{\pi}{2} \right) (\bar{p}_n - \bar{p}_{n+1}) + \sum_{n=1}^k (\bar{p}_n - \bar{p}_{n+1}) r \left[ \mathbf{E} \left( \frac{R_n}{r}, \frac{\pi}{2} \right) - \left( 1 - \frac{R_n^2}{r^2} \right) \mathbf{K} \left( \frac{R_n}{r}, \frac{\pi}{2} \right) \right] \right] \quad (23)$$

kde

- $R_n$  je vnútorný polomer n-tého prstenca,
- $k$  je číslo hraničného prstenca,
- $\bar{p}$  je stredná hodnota tlaku na príslušnom prstenci,
- $n_{max}$  je celkový počet prstencov.

Pre numerický príklad si zvolíme nasledujúce parametre

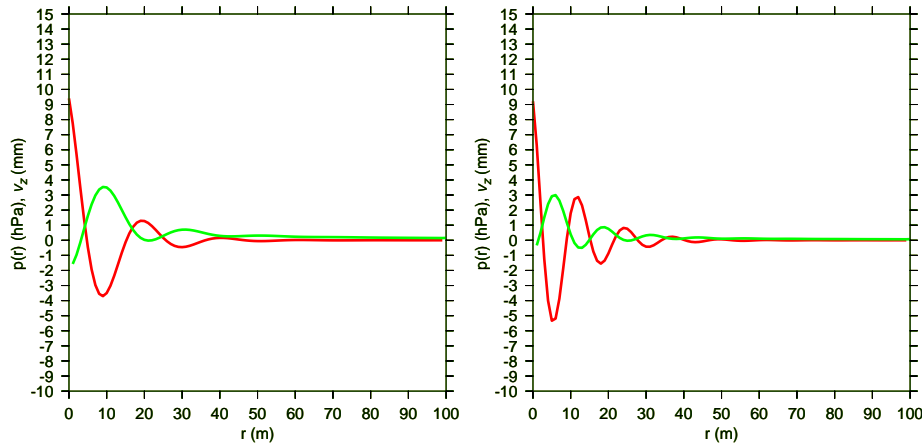
$E = 100$  MPa - Youngov modul pružnosti

$\mu = 0.3$  - Poissonovo číslo

Ďalej si zadefinujeme distribúciu zaťaženia v tvare

$$p_{anom}(r) = A e^{-\lambda_1 r} \cos(\lambda_2 r)$$

Pre parametre  $A = 1000$  Pa,  $\lambda_1 = 0.1$  a  $\lambda_2 = 0.3$  dostaneme (obr. 9 vľavo), Pre parametre  $A = 1000$  Pa,  $\lambda_1 = 0.1$  a  $\lambda_2 = 0.5$  dostaneme (obr. 9 vpravo)

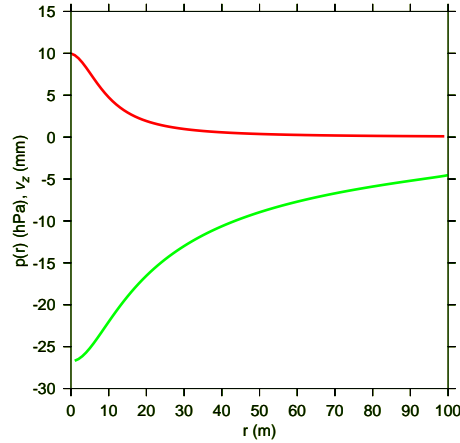


**Obr. 9** Deformácia polpriestoru zvolenými zaťažovacími funkciami

Ak si zvolíme zaťažovaciu funkciu v tvare

$$p_{anom}(r) = \frac{A}{1 + kr^2}$$

(t.j. ak chceme jednostranne orientovaný tlak) s parametrami  $A = 1000 \text{ Pa}$ ,  $k = 0.01$ , dostaneme (obr. 10)



**Obr. 10** Deformácia polpriestoru jednostranne pôsobiacou zaťažovacou funkciou

Uvedené numerické príklady sa snažia demonštrovať odozvu zemského povrchu na vertikálne zaťaženie. Prvé dve zaťažovacie funkcie sú chápané ako atmosférické anomálie a posledná, tretia zaťažovacia funkcia môže byť napríklad zaťaženie vodnou hmotou, keďže takéto zaťaženie nemôže byť záporné.

## 5 Prínos pre vedu a prax

Hlavným cieľom predkladanej dizertačnej práce je prehľad najvýznamnejších a v najväčšej miere pôsobiacich javov na deformáciu tvaru Zeme. Mala by poskytovať základ pre hlbšie štúdium geodynamických javov na základe kozmických metód. Tento základ by mal byť aplikovateľný nielen v globálnom merítku, ale mohol by poskytnúť cenné informácie aj pri štúdiu lokálnych geodynamických javov.

Prínos dizertačnej práce v teoretickej oblasti je nasledovný

- bol ukázaný spôsob riešenia zaťažovacích úloh s využitím Greenových elastic- kých a vizkóznoelastických funkcií
- bol vypracovaný numerický postup riešenia výpočtovo náročných úloh pre po- užitie softvéru ANSYS
- boli odvodené vzťahy vplyv teplotného poľa na merané geodetické a geofyzi- kálne parametre, ktoré doteraz neboli pri v geodetickej literatúre modelované

- boli odvodené vzťahy pre vplyv atmosférického zaťaženia na deformáciu zemského povrchu

V praktickej oblasti sa dosiahol nasledovný pokrok

- bola zmodelovaná deformácia Euroázijskej litosférickej platne pomocou softvéru ANSYS
- boli vytvorené mapy pre odhad účinku hlavných slapových vln pre oblasť Európy
- bol vytvorený počítačový program (zdrojový kód uvedený v prílohe B) na výpočet hustoty vo vnútri Zeme, hydrostatického tlaku, gravitačného potenciálu a gravitačného zrýchlenia v ľubovoľnom bode vo vnútri Zeme pre praktické účely.

V ďalšej fáze by bolo vhodné tieto poznatky rozšíriť o nové teoretické experimenty aplikáciou nových matematicko – fyzikálnych teórií a ich experimentálnym overením, resp. zovšeobecniť už vykonané experimenty na širšiu škálu problémov. Prehĺbenie teoretických poznatkov umožní štúdium iných geodynamických javov, navrhnúť teoretické a praktické riešenie nestacionárnych okrajových úloh.

## Záver

Predložená dizertačná práca poukazuje na časové variácie meraných fyzikálnych a geometrických parametrov. Samozrejme predpokladaný rozsah práce neumožňuje popísať a vysvetliť všetky geodynamické efekty. Snaha bola popísať najmä globálne časové variácie parametrov, t.j. popísať javy, ktoré pôsobia na celú Zem. Medzi takého javy patrí variácia veľkosti a smerovania vektora okamžitej uhlovej rýchlosti Zeme, slapové pôsobenie na zemský povrch buď cez primárny jav t.j. cez slapy pevnej Zeme alebo cez sekundárny efekt, čo predstavuje oceánske slapy. Ďalším veľmi dôležitým javom je pohyb litosférických platní a postglaciálny zdvih.

Okrem týchto globálnych javov na merania pôsobia javy, ktoré majú skôr lokálny charakter. Sem patria javy tepelného pôvodu, akými sú napr. sopečná činnosť, alebo sú to javy, ktoré majú zaťažovací efekt, čo je napríklad atmosférické zaťaženie, resp. zaťaženie vodnými hmotami.

Treba si však uvedomiť skutočnosť, že tieto javy sú častokrát navzájom prepojené. Ak sa napríklad dve litosféricke platne k sebe vzájomne približujú, môže dochádzať k subdukcii, kedy sa jedna platňa podsúva pod druhú, pričom vzniká veľké trenie a môžeme očakávať deformáciu povrchu litosféry jednak ohybom platne a potom ako dôsledok tepelného pôsobenia. Taktiež možno očakávať, alebo aspoň predpokladať seizmickú aktivitu na najbližšej oblasti pri styku týchto platní.

Ďalším fenoménom, na ktorý netreba zabúdať je slapové trenie, t.j. permanentné pôsobenie určitej časti slapovej sily, čo spôsobuje spomaľovanie uhlovej rýchlosti

rotácie Zeme. Uhlová rýchlosť rotácie Zeme má za dôsledok sploštenie Zeme. Teda spomaľovanie uhlovej rýchlosti rotácie Zeme sa prejaví na zmenšujúcej sa hodnote sploštenia Zeme, čo sa dá pozorovať na geopotenciálnom koeficiente  $J_{2,0}$ , ktorý je počítaný z rozdielu polárneho a rovníkových momentov zotrvačnosti Zeme.

Pochopenie a popis geodynamických javov si ovšem vyžaduje hlbšie poznatky z vedných odborov ako je matematika, fyzika, mechanika kontinua a vedieť ich správne aplikovať a získané výsledky správne interpretovať. Tieto poznatky majú pre geodéziu dosť významný dôsledok. Správne pochopené poznatky o časovej variácii polohy referenčných bodov nám umožňujú nechcené geodynamické javy z výsledkov meraní odstrániť, prípadne skúmaný geodynamický jav zmodelovať.

Pre zvyšovanie kvality geodetických informácií a pre budovanie globálnych referenčných sietí terestrických, vertikálnych a gravimetrických je modelovanie účinkov geodynamických javov priam nevyhnutné.

## Zoznam publikovaných prác

- MOJZEŠ, M., ČUNDERLÍK, R., JANÁK, J., PAPČO, J., ŠPRLÁK, M., VAĽKO, M. Porovnanie gravimetrických modelov kvázigeoidu na území Slovenska. GPS+GLONASS+Galileo: nové obzory geodézie, Bratislava, 2006.
- MOJZEŠ, M., FERKO, J., ŠPRLÁK, M., VAĽKO, M. Svetový výškový systém a jeho realizácia. GPS+GLONASS+Galileo: nové obzory geodézie, Bratislava, 2006.
- MOJZEŠ, M., CZARNECKI, K., HUSÁR, L., JANÁK, J., BOGUSZ, J., PAPČO, J., VAĽKO, M., WALLO, J. Using of deflection of vertical for testing of gravimetric quasigeoid in the mountains. Geophysical Research abstracts, Volume 8/2006. Abstracts of the contributions of the EGU General assembly. Viedeň, 2006.
- MOJZEŠ, M., JANÁK, J., PAPČO, J., ŠPRLÁK, M., VAĽKO, M. Determination of the quasigeoid by solving Neumann boundary value problem. Gravity Field of Earth: Proceeding of the 1st International Symposium of the International Gravity Field Service. Istanbul, 2007.
- VAĽKO, M., MOJZEŠ, M., JANÁK, J., PAPČO, J. Comparison of two different solutions to Molodensky's G1 term. *Studia geophysica et geodaetica* 2008 vol. 52, Praha, 2008.
- VAĽKO, M. Vplyv existencie bodového tepelného zdroja na merané geodetické veličiny. In *Juniorstav 2008*, 10. Odborná konferencia doktorského studia. Brno, 2008.

- MOJZEŠ, M., VALKO, M. The combination of gravimetric quasigeoid and GPS-levelling in the presence of noise. IAG International Symposium of Gravity, Geoid & Earth Observation, Chania, Creete, 2008.
- VALKO, M. Effect of point thermal source on measured geodetic parameters. Geophysical research abstracts, volume 10, EGU-2008-A-07239, Viedeň, 2008.
- MOJZEŠ, M., VALKO, M. Determination of physical heights using Global Geopotential Model, GPS/GNSS and gravity measurements. Geophysical research abstracts, volume 10, EGU-2008-A-09545, Viedeň, 2008.
- VALKO, M. Effect of point thermal source on measured geodetic parameters. Zbiór referatów, XIV Miedzynarodowe Polsko-Czesko-Slowackie Dni Geodezji, Gdąnsk, 2008.

## Literatúra

- BACIGÁL, T.** Spektrálna analýza metódou najmenších štvorcov. Diplomová práca, STU 2003.
- BARTSCH, H. J.** Matematické vzorce, Academia Praha, 2006
- BEDNÁRIK, M., a kol.** Tidal deformation observed in Slovakia. Contr. Geoph. Geod. 32 No. 4
- BRDIČKA, M. a kol** Mechanika kontinua, Academia, Praha, 2000
- BRIMICH, L.** Tiažové pole Zeme, on-line skriptá, 2005
- BRIMICH, L. a kol.** Temporal gravity variations due to the model geodynamic event driven by a point source of heat. Contr. Geoph. Geod. 32 No.1
- BURŠA, M., KOSTELECKÝ, J.** Kosmická geodezie a kosmická geodynamika, Praha, 1994
- ELOSEGUI, P.** Compilation of published estimates of annual geocenter motion using space geodesy.
- FRANCŮ, J.** Moderní metody řešení diferenciálních rovnic, CERM Brno, 2006
- GROTEN, E.** Fundamental Parameters and Current (2004) Best Estimates of the Parameters of Common Relavance to Astronomy, Geodesy, and Geodynamics, Journal of Geodesy - Vol 78/9-12
- HEFTY, J.** Globálny polohový systém v štvorrozmernej geodézii. Bratislava, STU, 2004.

- HEFTY, J., HUSÁR, L.** Družicová geodézia, Globálny polohový systém. Bratislava, STU, 2003.
- HORSKÝ, J., NOVOTNÝ, J., ŠTEFÁNIK, M.** Mechanika ve fyzice, Academia, Praha, 2001
- HRČKA, M.** Využitie permanentných meraní GPS na výskum slapových efektov, dizertačná práca, 2006
- HŘEBÍČEK, J., a kol.** FORTRAN77 a vědeckotechnické výpočty. Academia Praha, 1989.
- HUNTER, P.** FEM/BEM Notes, Dept. of Eng. Science, The University of Auckland, New Zealand, 2001.
- JAN, J.** Číslíková filtrace, analýza a restaurace signálů. VUT Brno, 2002
- JANÁK, J.** Vplyv zmien rýchlosti rotácie Zeme na tiažové zrýchlenie. Geodetické referenčné systémy. Zborník referátov. Bratislava, 2002
- JANETKA, I.** : Karteziánske tenzory. Bratislava, STU, 2000.
- KANÓCZ, A., ŠPANIEL, M.** Metoda konečných prvků v mechanice podajných těles, ČVUT Praha, 2007
- KELLEY, D. E. a GALBRAITH, P. S.** Gri: A Language for Scientific Illustration. <http://www.linuxjournal.com/article/3743>.
- KHAN, S.-A.** Surface deformations analyzed using GPS time series, Danish National Scientific report No. 1, 2005
- KOMORNÍKOVÁ, M., MIKULA, K.** Výpočtový systém Mathematica, Slovenská technická univerzita, 1998.
- KOMPIŠ, V. a kol.** Nelineárna mechanika kontinua, vybrané state. Žilinská univerzita, 2004
- KVASNICA, J. a kol.** Mechanika, Academia Praha, 2004.
- Mc. CARTHY, D., PETIT, G.** IERS Convention (2003), Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, 2004
- MELICHER, J.** Geodetická astronómia II a základy kozmickej geodézie, SVŠT Bratislava, 1989
- MIKULA, K.** Metódy riešenia geodetických okrajových úloh, Prednášky pre doktorandské štúdium, 2005
- MOJZEŠ, M.** Geofyzika a geodynamika 1. časť, SVŠT Bratislava, 1989

- NOWACKI, W.** Thermoelasticity, Oxford, Pergamont Press, 1982.
- NYGÅRD, H. K.** Bending and Crumpling of Plates and Shells: Theory, Numerical Methods, and Applications to Litospheric Deformation, diplomová práce, University of Oslo, Norway, 2006.
- PEČ, K., MARTINEC, Z.** Odchylky hustoty od středního sféricky symetrického modelu Země, Problémy současné gravimetrie, Praha, 1985
- PICK, M. a kol.** Úvod ke studiu tíhového pole Země, Academia, Praha, 1973
- ROARK, R. J. a YOUNG, W. C.** Formulas for Stress and Strain, McGraw-Hill, New York, 1975.
- TREŠL, J., MARVANOVÁ, V.** Stresses and displacements in the lithosphere due to terrain topography, Stud. Geoph. Geod. 32 No. 4.
- TREŠL, J.** Tidal deformations of viscoelastic body, Stud. Geoph. Geod. 32 No. 1.
- TURCOTTE, D. L., SCHUBERT, G.** GEODYNAMICS, Application of Continuum Physics to Geological Problems, John Wiley & Sons, 1982
- VAĽKO, M.** Modelovanie deformácie Euroázijskej litosférickej platne. Písomná časť skúšky. 2006
- VAĽKO, M.** Vplyv bodového tepelného zdroja na merané geodetické veličiny. Juniorstav 2008. Mlok 2008.
- VANIČEK, P.** The Earth Tides, Lecture Notes, UNB Canada, 1973
- VANIČEK, P.** Earth-pole Wobble, Lecture Notes, UNB Canada, 1974
- VANIČEK, P., KRAKIWSKY, E. J.** Geodesy: The concepts. 2<sup>nd</sup> editions, Amsterdam, 1986.
- WELLS, D. E. a kol.** Least squares spectral analysis revisited. Dept. of Geodesy and Geomatics Eng. University of New Brunswick, Fredericton, 1985.
- WESSEL, P. a SMITH, W. H. F.** New, improved version of the Generic Mapping tools released, EOS Trans. AGU, 79, 579, 1998.
- WU et al.** Postglacial induced surface motion sea-levels, and geoid rates on a spherical, self-gravitating laterally heterogeneous Earth. Journal of Geodynamics 39 Nr2.



## Summary

Geodesy aims at the determination of the geometrical and physical shape of the Earth and its orientation in space. Geometrical shape is defined by parameters of reference ellipsoid and geometrical shape is defined by geometry of outer gravity field.

Geodetic reference systems can't be based on static basement in present. Precision of geodetic instruments allows monitor spatial position and velocity of each geodetic station. Position of reference station is affected by sets of geodynamical effects. Here belongs following effects: variation of actual vector of Earth rotation (his magnitude and direction), direct tidal effect of solid Earth, indirect tidal effect (ocean tides), geocenter motion, plate motion and deformation, atmosheric loading, ocean loading and effect of thermal fields. Main aim of geodynamics is describing these phenomena.

The basic aim of this PhD thesis is description of present main geodynamical effects reported in geodetic literature, estimate theirs magnitude and effects on measured geodetic parameters.

For understanding of physical parameters of Earth interior was created program EARTH written in program language FORTRAN. He contains computing of density inside Earth and derived physical parameters used for geodesy: gravitational acceleration, gravitational potential and hydrostatic pressure. Source data for creating this model was used from model PREM (Dziewonski, Anderson, 1982).

Second aim of thesis is explanation of those effects, which are not modelled in present. This is theoretical contribution to this thesis. Here were modelled two geodynamical effects: effect of point thermal source and atmospheric loading effect. Described theory contains also numerical experiments for better understanding of problem.