

5. TVAR, ROZMĚRY A HMOTNOST ZEMĚ

5.1 HISTORICKÉ URČOVÁNÍ TVARU A ROZMĚRŮ ZEMĚ

- „důkazy“ kulatosti Země – Aristoteles (348-322 př. n. l.)
- Eratosthenés z Kyrény (3 st. př. n. l.) – úhlová metoda měření (39 650 km – 53 150 km)

Obr. 12.1/242

- měření Arabů r. 828 - 1° z. š. (111,722 – 113,330 km)
- novodobá stupňová měření v Evropě – r. 1525 J. Fernel na pařížském poledníku (111,286 km)
- **metoda triangulace** – W. Snellius (1591-1626):
„vzdálenost dvou bodů se neměří přímo, ale pomocí sítě myšlených trojúhelníků“
trigonometrické body – trigonometrická síť

Obr. 12.2/244

- r. 1669 další měření na pařížském poledníku – „zploštění Země v polárních oblastech“ (Newton – Cassiniové)
měření v Peru 1735-1743 (110,6 km), měření v Laponsku 1736-1737 (111,5 km)
- r. 1792 – pařížský poledník protažený do Barcelony – délková jednotka metr (v Rakousku-Uhersku od roku 1876)
- gravimetrická měření

5.2 DRUŽICOVÁ GEODÉZIE

- řeší problémy a úlohy základní geodézie z pozemských měření poloh těles v blízkém kosmickém prostoru
- pozorování družice: topocentrický průvodič, geocentrický průvodič

Obr. 12.3/245

- měření dopplerovského posunu vysílaného signálu z družice
- a) ze znalosti vysílané a přijímané frekvence a rychlosti šíření signálu – úhlová rychlost družice
- b) při znalosti okamžitých prvků dráhy družice – geocentrické souřadnice polohy družice
- **pohyb družice** je popsán pohybovými rovnicemi (diferenciální rovnice 2. řádu)
- dráhové elementy:
- a) a - hlavní poloosa dráhové elipsy
- b) e – výstřednost dráhy
- c) Ω – délka výstupného uzlu
- d) ω – argument perigea
- e) i – sklon dráhy družice k rovníku (geostacionární x s polární dráhou)
- f) T – čas průchodu družice perigeem

Obr. 3.3/50

- změny dráhových elementů: gravitační poruchy (rozložení hmot, přitažlivost S a M), brždění v atmosféře, tlakový vliv slunečního záření
- dva **základní přístupy družicové geodézie**:

a) geometrický

z přímého pozorování družice z pozemních stanic se určují souřadnice neznámého bodu družicová navigace
jednotný geodetický systém pro celou zemi (sítě nultého až druhého řádu)

b) dynamický

ze znalosti parametrů dráhy družice se určují konstanty (parametry) gravitačního pole Země
ideální keplerovská dráha – homogenní koule bez atmosféry a působení třetího tělesa
nepravidelnosti v rozložení hmoty a tvaru – poruchy v keplerovské dráze
gravitační potenciál tělesa závisí na vzdálenosti od středu tělesa, zeměpisné šířce a délce
gravitační potenciál se vyjadřuje v podobě rozvoje do řady sférických (kulových) funkcí

Vzorec 12.4 na str. 248

dynamické (Stokesovy) konstanty neboli **harmonické koeficienty**: charakterizují dynamické vlastnosti tělesa (tj. byly by číselně určeny, kdyby bylo známo rozložení veškeré hmoty v tělese) a jeho vnější gravitační pole:

- zonální: $m = 0$ (definují strukturu gravitačního pole v závislosti na zeměpisné šířce)
 - tesseralní: $m \neq 0$ (zeměpisná šířka a délka současně)
 - sektorové: $n = m$ (zeměpisná šířka a délka současně)
 - gravitační potenciál rotačního elipsoidu: $C_{2,0} \neq 0$ (pólové zploštění), ostatní rovny nule
 - gravitační potenciál trojosého elipsoidu: $C_{2,0} \neq 0, C_{2,2} \neq 0$ (rovníkové zploštění), ostatní rovny nule
- model gravitačního pole Země

Obr. 12.6/249

5.3 Způsoby aproximace tvaru Země

- horizontální členitost – pevniny (Země 29,2 %, SP 39 %, JP 19 %) a oceány
- vertikální členitost – pevniny 875 m (Ču-mu-lang-ma 8848 m), oceány –3704 m (Mariánský příkop –11 034 m)
- neustálé změny povrchu – slapy, eroze atd. → idealizace tvaru Země

5.3.1 Země jako geoid

- tíhová síla – výslednice gravitační a odstředivé síly

Obr. 8.1/149

- tvar Země určen hodnotou vnějšího tíhového potenciálu na povrchu naší planety (rozdělení hmot, úhlová rychlost rotace) – geoid
- **geoid**: těleso, omezené vzhledem k atmosféře střední klidnou hladinou oceánů a moří, probíhající myšleně i pod kontinenty
- geoid: ekvipotenciální plocha, přiléhající ke střední klidné hladině oceánů a moří
- plocha geoidu v každém bodě kolmá na směr tíhové síly
- oceánská část geoidu – družicová altimetrie
- **sféroid** – Země tvořená homogenní tvárnou hmotou → tvar pravidelného rotačního tělesa zploštělého na pólech

5.3.2 Země jako rotační elipsoid

- **rotační elipsoid** – těleso vzniklé rotací elipsy kolem vedlejší osy
 - **zemský elipsoid** – umístění geoidu do elipsoidu (ztotožnění os a rovin rovníku)
 - **referenční elipsoid** – rotační elipsoid, který se celý nebo jenom jeho část dobře přimyká ke geoidu: numerická výstřednost e^2 , zploštění $i = (a-b)/a$, hlavní poloosa a , vedlejší poloosa b
 - hlavní referenční elipsoidy:
 - a) Besselův elipsoid (1841) – Jednotná trigonometrická síť katastrální
 - b) Hayfordův elipsoid (1909) – doporučen jako mezinárodní
 - c) Krasovského elipsoid (1936) – souřadnicový systém 1952, S-42
 - d) Světové geodetické systémy (WGS) – z družicových pozorování
- WGS 1984: $a = 6\,378\,136,0 \pm 1$ m
 $b = 6\,356\,752,0$
 $i = 1 : 298,257$

5.3.3 Země jako trojosý elipsoid

- rovníkové zploštění i_R , pólové zploštění i_P

5.3.4 Země jako koule

- stanovení poloměru referenční koule:
 - a) průměr tří os rotačního elipsoidu: $r = 1/3 (a + a + b)$ [6 371 118 m]
 - b) povrch referenční koule = povrch referenčního elipsoidu [6 371 116 m]
 - c) objem referenční koule = objem referenčního elipsoidu [6 371 110 m]

5.3.5 Porovnání geoidu s elipsoidy

- průběh plochy geoidu a elipsoidu (deviace tížnic)

Obr. 12.8a/255

- tvarová odlišnost severní a jižní polokoule

Obr. 12.9ab/256

5.4 DŮSLEDKY TVARU ZEMĚ

5.4.1 Zonální rozdělení úhrnů slunečního záření na zemském povrchu

5.4.2 Přímá viditelnost předmětů na zemském povrchu

Obr. 12.10/258

- geodetická deprese obzoru α
- pozorovaná geodetická deprese obzoru δ
- vzdálenost přímé viditelnosti
- $\delta^2 = \alpha^2 + \Delta n$
- $\Delta n = 0,227 \Delta \rho$

- **typy pozorovaného obzoru** – hustota vzduchu ρ a index lomu n :

- hustota klesá s výškou: rozšířený a zdvižený $\delta < \alpha$
- hustota se s výškou nemění: obzor neovlivněný refrakcí $\delta = \alpha$
- hustota roste s výškou: snížený a zúžený $\delta > \alpha$

- **zrcadlení** (fata morgána):

- pokles hustoty s výškou (polární oblasti) - **horní zrcadlení**

Obr. 12.11a/259

- vzestup hustoty s výškou (stepní a pouštní oblasti) – **dolní zrcadlení**

Obr. 12.11b/259

5.4.3 Stanovení vzdáleností na Zemi

viz kap. 2.3.3.1

5.4.4 Šířka geocentrická a astronomická

Obr. 12.14/263

- šířka geocentrická** ψ – úhel, který svírá spojnice středu a daného bodu na povrchu tělesa s rovinou rovníku
- $\text{tg } \psi = (1 - e^2) \text{tg } \varphi$
- vzdálenosti 1° z. š. na Krasovského elipsoidu:
 $\Delta\varphi(0, 1) = 110,576 \text{ km}$
 $\Delta\varphi(44, 45) = 111,124 \text{ km}$
 $\Delta\varphi(89, 90) = 111,695 \text{ km}$

Obr. 12.15/264

- šířka astronomická** φ' = výška světového pólu nad obzorem
 $\varphi = \varphi'$ - deviace tížnic

5.5 HMOTNOST ZEMĚ

5.5.1 Stanovení hmotnosti a hustoty Země

- Newtonův gravitační zákon** - dvě tělesa se přitahují silou, která je přímo úměrná součinu jejich hmotností m_1 a m_2 a nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti r jejich středů (G – gravitační konstanta)

$$F = G m_1 m_2 / r^2$$

- odvození hmotnosti Země** M_Z (m – hmotnost tělesa na povrchu Země, r_Z – jeho vzdálenost od středu Země):

$$F = G m M_Z / r_Z^2$$

$$F = m \cdot a_g$$

$$a_g = G M_Z / r_Z^2$$

$$M_Z = a_g r_Z^2 / G \quad (M_Z = 5,97 \cdot 10^{24} \text{ kg})$$

- rozložení hmotnosti: plášť (67,0 %), jádro (32,2 %), kůra (0,8 %), fyzickogeografická sféra 0,054 %
- biosféra : atmosféra : hydrosféra = 1 : 10^3 : 10^6

- odvození hustoty Země:**

$$M_Z = V_Z \rho_Z = 4/3 \pi r_Z^3 \rho_Z$$

$$\rho_Z = 3 M_Z / 4 \pi r_Z^3 \quad (5,52 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^3)$$

5.5.2 Důsledky hmotnosti Země

- stupeň „připoutanosti“ k Zemi – kosmické rychlosti:**

- potenciální energie** hmotného bodu A s hmotností m ve vzdálenosti h od zemského povrchu, když $h \ll r_Z$ je:

$$E_p = m a_g h$$

- kinetická energie** bodu A o hmotnosti m a rychlosti v

$$E_k = 1/2 m v^2$$

- zákon zachování mechanické energie**

$$E_p + E_k = \text{konst.}$$

hmotný bod A při různých výškách h_1 a h_2

$$1/2 m v_1^2 + m a_g h_1 = 1/2 m v_2^2 + m a_g h_2$$

- pohyb hmotného bodu A kolem Země po kruhové dráze ve vzdálenosti h rychlostí v_1

odstředivá síla = síla dostředivá (gravitační)

pro $h = 0$ je $v_1 = 7,91 \text{ km.s}^{-1}$ tzv. **první kosmická rychlost**

- hmotnému bodu A chceme udělit rychlost v_{II} , aby se nevrátil na Zemi

v nekonečnu je $E_k = 0$, $E_p = 0$, tedy $E_p + E_k = 0$ platí i na zemském povrchu

$v_{II} = 11,18 \text{ km.s}^{-1}$ je tzv. **druhá kosmická rychlost** (úniková rychlost po parabolické dráze z gravitačního pole Země)

- úniková rychlost pro těleso ve vzdálenosti 1 AU od Slunce** (po hyperbolické dráze)

$$v_{III} = 42,12 \text{ km.s}^{-1}$$

- **stupeň stálosti zemské atmosféry:**

a) střední kvadratická rychlost tepelného pohybu molekul

$$v_{sk} = (3kT/m)^{1/2}$$

b) únik atomu či molekuly plynu

$$v_{II} \leq v_{sk} \text{ tedy } 2GM/r \leq 3kT/m$$

c) stanovení **kritické teploty**

$T_{\infty} \geq 2GMm / 3kr$ neboli s použitím relativní molekulové hmotnosti μ

$$T_{\infty} = 5013 \mu \cdot M/M_Z \cdot r_Z/r$$

atomární vodík $\mu = 1,008$ je $T_{\infty} = 5053 \text{ K}$

d) při podmínce T_{∞} má asi 39,2 % molekul rychlost $v \geq v_{II}$ – volná dráha

e) **hladina disipace** cca v 500 km (4 % atomů vodíku a 0,45 % molekul vodíku a jisté množství hélia dosahuje únikové rychlosti), ostatní plyny dosahují únikové rychlosti jen s velmi malou pravděpodobností

f) **stabilita zemské atmosféry s převahou dusíku a kyslíku**, doba disipace vodíku (disociace vodní páry) a hélia (přirozené radioaktivní procesy) je menší než doba existence Země

Tab. 12.6/268

g) kritická teplota závislá na hmotnosti určuje **odlišné složení atmosfér planet „zemského typu“ od „obřích“ planet**

h) planetky, komety (T_{∞} je i pro plyny s $\mu > 30$ kolem 1-2 K, přičemž teplota jádra neklesne pod 2,7 K)

Tab. 12.7/268