Základy aplikovanej geofyziky 1

gravimetria

magnetometria

geoelektrika

seizmika

karotáž

rádiometria

seizmológia

GRAVIMETRIA

Meranie, vyhodnocovanie a interpretácia tiažových meraní

(„gravis“ – ťažký, „metrein“ - merať)

- **merané pole: tiažové zrýchlenie g**

- **študovaný fyzikálny parameter hornín: hustota**

GRAVIMETRIA

Obsah prednášky:

- ujasnene si základných pojmov
- trošku z histórie
- jednotky v gravimetrii
- meranie tiažového zrýchlenia (prístroje)
- hustoty (minerálov a hornín)
- spracovanie meraní (úplné Bouguerove anomálie)
- interpretácia
- príklady využitia gravimetrie

UJASNENIE SI ZÁKLADNÝCH POJMOV

hodnota g (tiažového zrýchlenia) je ... ?

konštantná?

a) pre telesá s rozdielnou hmotnosťou v tom istom bode?

b) pre telesá s rozdielnou hmotnosťou v rôznych bodoch?

anomálie tiažového poľa Zeme (zo satelitných meraní)

UJASNENIE SI ZÁKLADNÝCH POJMOV

Newtonov gravitačný zákon:

$$|F| = G\frac{m_1 m_2}{r^2} = G\frac{mM}{r^2}$$

z Newtonovho zákona sily vyplýva pre zrýchlenie **g**:

$$|F| = mg \quad \Rightarrow \quad |g| = \frac{F}{m} \quad \Rightarrow \quad \boxed{|g| = G\frac{M}{r^2}} \; [m \cdot s^{-2}]$$

Veľkosť **g** nie je závislá o malého m.

Uvedená skutočnosť je dosť dôležitá...

UJASNENIE SI ZÁKLADNÝCH POJMOV

existuje vlastne rozdiel medzi gravitačným a tiažovým zrýchlením? (alebo ide o synonymum?)

gravitačné - „čistá príťažlivosť“ Zeme

tiažové (merané) – výsledok vektorového súčtu gravitačného a odstredivého zrýchlenia Zeme

Pomer odstredivého a gravitačného zrýchlenia Zeme je veľmi malý ≈ 0.005
(na póle je g cca 9.83 $m \cdot s^{-2}$, na rovníku cca 9.78 $m \cdot s^{-2}$)

UJASNENIE SI ZÁKLADNÝCH POJMOV

ex … *m*
a
(d

g
Z
ti
v
o

Po
je
(na póle je g cca 9.83 m·s^{-2}, na rovníku cca 9.78 m·s^{-2})

GRAVIMETRIA

trošku z histórie ...

Galileo Galilei

(1564 - 1642)

Isaac Newton

(1643 - 1727)

:IN VYSVETĽUJE GALILEIHO 57

ıdelí nijakú rýchlosť, len

stane pri ňom bez
:ento jav si vysvetľuje
vačnosti, podľa ktorého
vonkajšie sily, si
chlosť" (tu
meň bez toho,

pu relativity je
naké ako hľadisko
vysvetľuje, čo
pri A), tvrdiac, že
ní k zemi
ie, prečo kameň
naopak), si
ho zákon, podľa
hľadu na
n

y sú

sti som mal

ıej relativity a jej
sebe Einstein
rmuláciu
šak bolo treba
ıo povedať, že
chápali jej
ıodobne

Pierre Simon Laplace

(1749 – 1827)

Pierre Bouguer

(1698 – 1758)

GRAVIMETRIA

úplne prvé prístroje... kyvadlové

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

Meraná veličina v gravimetrii

Merané **g** je vektor, avšak pracujeme so skalárom g.

používané jednotky v gravimetrii

systém SI: $m \cdot s^{-2}$

používané sú násobky:

$1\ \mu m \cdot s^{-2} = 10^{-6}\ m \cdot s^{-2}$

v anglosaskej literatúre:

$1\ Gal = 10^{-2}\ m \cdot s^{-2}$

$1\ mGal = 10\ \mu m \cdot s^{-2}$

$1\ mGal = 10^{-5}\ m \cdot s^{-2}$

$1\ \mu Gal = 0.001\ mGal$

predstava o presnosti dnešných gravimetrických meraní

$g = 9.82345678\ m/s^2$

úroveň mGal

úroveň μGal

súčasné prístroje merajú s presnosťou

0.01 do 0.001 mGal = 10 do 1 μGal

dutiny

oblasť mikrogravimetrie

meranie v gravimetrii

prístroje na meranie tiažového zrýchlenia sa nazývajú gravimetre

absolútne gravimetre

merajú priamo g
laboratórne,
vyššia presnosť:
0.001 mGal,
voľný pád,
pomalšie (hodiny)

relatívne gravimetre

merajú iba rozdiel Δg
terénne,
nižšia presnosť:
0.01-0.005 mGal,
pružinový systém
rýchlejšie (minúty)

Scintrex CG-5

relatívny (pružinový) gravimeterr

meranie –
manuálne

1 – torzné vlákno
2 – astazujúca (zvýrazňujúca) pružina
3 – rozsahová pružina
4 – meracia pružina
5 - vahadlo

relatívny (pružinový) gravimeterr

meranie – automatické (tzv. Autograv systém)

novší systém

relatívny (pružinový) gravimeterr

meranie – automatické (tzv. Autograv systém)

relatívny (pružinový) gravimeterr

súčasné moderné (state of the art) relatívne gravimetre:

LaCoste and Romberg (LC&R), modely G a D

Scintrex CG-3 a CG-3M

Scintrex CG-5

ZLS-Burris (skratka pre Zero Length Spring)

Staršie typy – meraná veličina je počet otáčok skrutky meracej pružiny (prevod na [mGal] pomocou tzv. konštanty prístroja [mGal]/dielik).
Novšie typy – meraná veličina je elektrické napätie, ktoré je opäť prevedené na [mGal] pomocou vnútornej konštanty prístroja ([mGal]/mV).

relatívny (pružinový) gravimeterr

najnovšie relatívne gravimetre:

Scintrex CG-6
(na obr. spolu s CG-5)

LG-1 GALILEO
(česká firma GF Instruments)

Meranie a základné spracovanie dát v gravimetrii:

Zahŕňa v sebe:

- samotné meranie s prístrojom (gravimeter)
- opravu o chod prístroja (drift)
- prepočet na absolútnu hodnotu (pri relat. meraniach)
- výpočet chyby merania
- výpočet tzv. Bouguerových anomálií

meranie v gravimetrii

musí sa odstraňovať <u>tzv. chod prístroja (drift)</u>

spôsobený: otrasmi, zmenami teploty a tlaku,
slapovými účinkami Slnka a Mesiaca
(moderné gravimetre ich vedia zrátať)

meranie v gravimetrii

výsledkom meraní a opravy o chod je hodnota relatívneho tiažového zrýchlenia Δg, ktoré sa prepočítava na jeho absolútnu hodnotu g,

K tomu je potrebné takúto hodnotu g poznať aspoň v jednom bode (meranie s absol. grav. alebo sa využijú body štátnej siete)

Body Štátnej Polohovej Siete (ŠPS) u nás spravuje Geodetický a Kartografický Ústav Bratislava (GKÚ).

meranie v gravimetrii

Starší systém – tzv. Štátna Gravimetrická Sieť (ŠGS), taktiež pod správou GKÚ.

Základný materiálový parameter v gravimetrii je hustota,

študujeme prejavy hustotných nehomogenít v nameranom (anomálnom) poli g

jednotky (systém SI): $kg \cdot m^{-3}$

používané sú násobky:

$$1\ g \cdot cm^{-3} = 1\ kg \cdot dm^{-3} = 1\ Mg \cdot m^{-3} =$$

$$= 1000\ kg \cdot m^{-3}$$

Rozpätie hustôt minerálov:

od 0.98 (ľad) po 22.59 g·cm^{-3} (čisté Osmium)

(príklad: olovo: 11.34 g·cm^{-3} , zlato: 19.32 g·cm^{-3})

Rozpätie hustôt hornín:

od 1.65 (hlina) po 3.35 g·cm^{-3} (eklogit)

(granit: 2.65 g·cm^{-3}, vápenec: 2.70 g·cm^{-3}, fylit: 2.75 g·cm^{-3})

Priemerná hustota vrchnej časti zemskej kôry na základe gravimetrie je približne 2.67 g·cm^{-3}.

magmatické horniny

- nárast hustoty s bázicitou, okrem toho efuzívne sú vždy ľahšie ako plutonické

metamorfované horniny

- závisí od typu metamorfózy

sedimentárne horniny

- dôležitý je nárast hustoty s hĺbkou + kompakcia horniny (súvisí s vekom)

Obr. 3. Závislosť prirodzených hustôt na hĺbke panví. Vysvetlivky: 1 - viedenská panva, 2 - dunajská panva, 3 - Východoslovenská nížina (Šefara et al., 1987)

nepriame metódy určovania hustôt – zo seizmológie

rýchlosť **hustota**

kvízové otázky:

Ako sa volá diskontinuita medzi plášťom a vonkajším jadrom?

A medzi vnútorným a vonkajším jadrom?

nepriame metódy určovania hustôt – zo seizmológie

rýchlosť hustota

Ako sa volá diskontinuita medzi plášťom a vonkajším jadrom? Gutenberg-Wiechert

A medzi vnútorným a vonkajším jadrom? Lehmann-Bullen

základy gravimetrie – spracovanie údajov

v aplikovanej gravimetrii (na geologické účely) sa však nevyhodnocuje priamo merané tiažové zrýchlenie g,
ale sa počítajú tzv.

ÚPLNÉ BOUGUEROVE ANOMÁLIE (ÚBA)

merané tiaživé zrýchlenie g v sebe zahŕňa okrem vplyvu geológie aj iné vplyvy:

- **vplyv zemepisnej šírky** (odstredivého zrýchlenia)
  vzorec pre tzv. normálne tiažové zrýchlenie:
  $g_n = 978049(1 + 0.0052884\sin^2\varphi)$ [mGal]
  (približne to znamená zmenu 0.01 mGal na 10 m vzdialenosť v S-J smere)

- vplyv **nadmorskej výšky** (pokles g s rastúcou výškou)
  tzv. vertikálny gradient = -0.3086h [mGal]
  (cca 0.01 mGal na 3 cm vo vertikálnom smere)

- **vplyv reliéfu**: blízke kopce znižujú merané g (aj budovy a ich múry), doliny tak isto…

spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA)

Úplné Bouguerove anomálie (ÚBA)

$$ÚBA = \Delta g = g_{mer} - g_{teor}$$

spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA)

od tiažového účinku celej (reálnej) Zeme...

spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA)

... sa odpočíta tiažový účinok teoretickej Zeme...

spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA)

účinok teoretickej Zeme sa skladá z účinku referenčného elipsoidu a ...

spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA)

účinok teoretickej Zeme sa skladá z účinku referenčného elipsoidu a sférickej dosky...

spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA)

účinok teoretickej Zeme sa skladá z účinku referen. elipsoidu a sférickej dosky a topografie

spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA)

- matematické vyjadrenie

$$\Delta g_B = UBA = g - g_n + 0.3086h - 0.0419h\rho - B + T$$

g – meraná tiaž (opravená o chod a prepočítaná na absolútnu hodnotu)

g_n – normálne pole (účinok elipsoidu)

h – nadmorská výška bodu merania

ρ – tzv. korekčná (redukčná) hustota (často 2.67 $g.cm^{-3}$)

0.3086h – korekcia "vo voľnom vzduchu" (tzv. Fayeova)

$0.0419h\rho$ – Bouguerova korekcia (účinok rovinnej dosky)

B – Bullardov člen („ohýba" rovinnú dosku)

T – terénne korekcie (do vzdialenosti 166.7 km od bodu)

spracovanie v gravimetrii (tvorba ÚBA)

Pri niektorých aplikáciách sa používajú upravené vzťahy (verzie) ÚBA:

anomália **$NUBA = g - g_n + 0.3086h - 0.0419h\rho$**

sa nazýva ako <u>tzv. neúplná Bouguerova anomália</u>

anomália **$\Delta g_{Fay} = g - g_n + 0.3086h$**

sa nazýva ako <u>tzv. Fayeova anomália</u> alebo <u>anomália vo voľnom vzduchu</u> (odstránený vplyv výšok)

prejav hustotných nehomogenít v poli ÚBA

prejav hustotných nehomogenít v poli ÚBA

prejav hustotných nehomogenít v poli ÚBA

prejav hustotných nehomogenít v poli ÚBA

prejav hustotných nehomogenít v poli ÚBA

prejav hustotných nehomogenít v poli ÚBA

prejav hustotných nehomogenít v poli ÚBA

výsledkom je prejav anomálnych hustotných nehomogenít v zemskej kôre (až vo vrchnom plášti)

Praktické ukážky (výhod) výpočtu ÚBA:

- vymapovanie priebehu kanalizačného zberača, Bratislava, Gagarinova ul.

- hľadanie podzemných chodieb pod Veľkou terasou (Oravský zámok)

- vymapovanie rozsahu maarového telesa, Pinciná, Lučenec

kanalizačný zberač, Gagarinova ul., BA

kanalizačný zberač, Gagarinova ul., BA

nameraté relatívne tiažové zrýchlenie Δg (opravené o chod gravimetra)

kanalizačný zberač, Gagarinova ul., BA

$\Delta g_{Fay} = g + 0.3086h$

tzv. Fayeova anomália
(odstránený vplyv výšok)

kanalizačný zberač, Gagarinova ul., BA

NBA= g + 0.3086h – 0.0419hρ

výsledok:
neúplná Bouguerova anomália

Praktické ukážky (výhod) výpočtu ÚBA:

- hľadanie podzemných chodieb pod Veľkou terasou (Oravský zámok)

gravimetrický prieskum
Veľkej terasy Oravského zámku

gravimetrický prieskum Veľkej terasy Oravského zámku

cieľom prieskumu bolo nájsť možné spojovacie chodby medzi tunelom a opevnením

pohľad od prístupovej cesty na zámok

gravimetrický prieskum
Veľkej terasy Oravského zámku

merané Δg

výrazný prejav ostrej hrany za múrmi
(vzduch = chýbajúce hmoty = pokles Δg)

gravimetrický prieskum
Veľkej terasy Oravského zámku

až po aplikovaní všetkých korekcií
(aj opravy o gravit. účinok múrov)
sa v mape úplných Bouguerových
anomálií prejaví prítomnosť tunelu
a ostatných hustotných nehomogenít

Praktické ukážky (výhod) výpočtu ÚBA:

- vymapovanie rozsahu maarového telesa, Pinciná, Lučenec

súčasný maar, Nemecko

schematická výplň maarového telesa (diatomity, bentonity, alginity…)

maarová štruktúra, Pinciná pri Lučenci

nadmorské výšky

maarová štruktúra, Pinciná pri Lučenci

merané
tiažové
zrýchlenie g

maarová štruktúra, Pinciná pri Lučenci

tzv. Fayeove anomálie (odstránený hlavný vplyv výšok)

maarová štruktúra, Pinciná pri Lučenci

Úplné Bouguerove Anomálie (odstránené všetky negeologické vplyvy)

ÚBA (2.67 g.cm^{-3}) – územie Slovenska

interpretácia v gravimetrii

INTERPRETÁCIA –

kvalitatívna/kvantitatívna

kvalitatívna – opisuje kvalitatívne pole ÚBA (znížené hodnoty = znížené hustoty objektov alebo vplyv geometrie telies, zvýšené... naopak)
kvantitatívna – určuje hĺbkové, rozmenrové, tvarové a hustotné parametre študovaných geologických objektov

dôležité pojmy:

a) *priama úloha* – pri zadaných parametroch telies vypočítať ich gravitačný účinok (tzv. <u>modelovanie</u>)

b) *obrátená úloha* – opačná úloha (náročnejšia)

interpretácia v gravimetrii

mnohoznačnosť (nejednoznačnosť) interpretácie v gravimetrii – vieme vyriešiť iba pomocou doplňujúcich (nezávislých) údajov a informácií

INTERPRETÁCIA – kvalitatívna

priebeh gravitačného účinku (ÚBA)
nad zlomom (poklesom)

INTERPRETÁCIA – kvalitatívna

príklad: úplné Bouguerove anomálie z oblasti Mŕtveho mora (sedimenty mora sú ľahšie ako okolie)

INTERPRETÁCIA – kvantitatívna
tzv. metóda polovičnej šírky

jednoduchý príklad – Bouguerova anomália prejavu soľného diapíru,lokalita Lousiana príbrežná oblasť) (Nettleton, 1976)

z polovičnej šírky „odpichnutej“ anomálie je možné odhadnúť vrchný okraj soľného diapíru

INTERPRETÁCIA – kvantitatívna
tzv. hustotné modelovanie

využitie gravimetrie

- v regionálnej a štruktúrnej geológii
- v ložiskovom a ropnom prieskume
- detekcia dutín
  (inžiniersky, environmentálny prieskum, archeológia, ...)
- atď. (hustotné nehomogenity)

výsledok hustotného modelovania – profil cez Malé Karpaty a Dunajskú panvu, SR (model siaha do 70 km)

výsledok hustotného modelovania – profil cez Malé Karpaty a Dunajskú panvu, SR (model siaha až do 170 km)

výsledok hustotného modelovania – profil z Európskej platformy cez Západné Karpaty do Panónskej oblasti,

výsledok hustotného modelovania – profil zo subdukcie oceánickej platne Nasca pod juhoamerický kontinent (model siaha až do 250 km)

výsledky prieskumu karbonatitového ložiska Cataláo, Brazília

geologická mapa štruktúry

Bouguerove anomálie

výsledok 3D hustotného a suscept. modelovania

lokalita Wolfsberg, Rakúsko, 2012

priestor bývalej bane na hnedé uhlie (neogénny vek)

lokalita Wolfsberg, Rakúsko, 2012

výsledná mapa úplných Bouguerových anomálií (krok: 2 x 2 m)

lokalita Wolfsberg, Rakúsko, 2012

výsledky vrtného prieskumu (spolu s našimi hĺbkovými odhadmi – tzv. metóda Eulerovej dekonvolúcie)

lokalita Wolfsberg, Rakúsko, 2012

odkopaná dutina

Abb. 4: Freilegung des durch die geophysikalische Untersuchung festgestellten Hohlraumes (ca. 60 m³) mit einer Überlagerung von etwa 3,5 m

2016

2012

lokalita Wolfsberg, Rakúsko,

porovnanie rokov 2012 a 2016

(kontrolné merania)

ELSEVIER

Journal of Applied Geophysics 46 (2001) 249–262

JOURNAL OF APPLIED GEOPHYSICS

www.elsevier.nl/locate/jappgeo

Integration of ground-penetrating radar and microgravimetric methods to map shallow caves

Milan Beres*, Marc Luetscher, Raymond Olivier

Institut de Géophysique, Collège Propédeutique, Université de Lausanne, CP, CH-1015 Lausanne, Switzerland

Received 1

prieskum krasových útvarov

Integration of ground-penetrating radar and microgravimetric methods to map shallow caves

Milan Beres*, Marc Luetscher, Raymond Olivier

Institut de Géophysique, Collège Propédeutique, Université de Lausanne, CP, CH-1015 Lausanne, Switzerland

Received 14 March 2000; accepted 12 February 2001

radargram – migrovaný rez

prieskum krasových útvarov

Integration of ground-penetrating radar and microgravimetric methods to map shallow caves

Milan Beres*, Marc Luetscher, Raymond Olivier

Institut de Géophysique, Collège Propédeutique, Université de Lausanne, CP, CH-1015 Lausanne, Switzerland

Received 14 March 2000; accepted 12 February 2001

interpretácia – GPR vs. speleolog. prieskum

prieskum krasových útvarov

interpretácia – modelovanie mikrograv. anomálie

prítomnosť susednej kaverny nebola potvrdená

výsledky geofyzikálneho prieskumu Dómu Sv. Mikuláša v Trnave

Obr. 8 Mapa priebehu lokálnych neúplných Bouguerových anomálií v priestore kostola (so zavedením opráv o gravitacný úcinok múrov a odstráneným trendom), kor. hustota = 1.80 g.cm^{-3}

spojenie výsledkov mikrogravimetrie a metódy georadaru (GPR), overené videoinšpekciou

výsledky geofyzikálneho prieskumu kostola sv. Juraja v Juri

mikrogravimetria

mikrograv. + GPR (0.6 m)

Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrogravimetrický projekt

Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrograv. projekt

štruktúra pyramídy

merané priestory

veľká galéria

kráľovská komnata

samotné meranie

odhad. chyba: 2 - 10 μGal

Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrograv. projekt

tvorba Bouguerovej anomálie - odstránenie gravitačných účinkov známych štruktúr

známe dutiny

model hustotného „rozvrstvenia“ pyramídy

Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrograv. projekt

výsledky

hlavný výsledok:

zistenie dominantnej negatívnej anomálie v západnej časti prístupovej chodby do „královninej“ pohrebnej miestnosti

overenie anomálie:

3 vrty dosiahli po 2.1 m dutinu vyplnenú pieskom, (modelovaný objem dosahuje až 40 m^{-3})

Cheopsova pyramída, Egypt – francúzsky mikrograv. projekt

výsledky – možná interpretácia

Densities of the large block structure of the Cheops Pyramid.

zvyšok pieskovej rampy

GRAVIMETRIA

Zhrnutie:

- meraná veličina: tiažové zrýchlenie g
- prístroje – gravimetre (absolútne, relatívne)
- jednotky v gravimetrii – $\mu m \cdot s^{-2}$, v praxi ale mGal, μGal
- fyzikálny parameter minerálov a hornín: hustota
- spracovanie meraní (úplné Bouguerove anomálie)
- interpretácia – kvalitatívna a kvantitatívna
- príklady využitia gravimetrie (hustotné nehomogenity)

Zaujímavosť – rok 2017: objavenie novej dutiny (tzv. Big Void) v Cheopsovej pyramíde pomocou registrácie kozmického žiarenia (muóny).

Zaujímavosť – rok 2017: objavenie novej dutiny (tzv. Big Void) v Cheopsovej pyramíde pomocou registrácie kozmického žiarenia (muóny).

Bolo by možné prítomnosť tejto dutiny overiť presnými gravimetrickými meraniami na povrchu pyramídy?

modelované
4 scenáre
(výška 5 a 7 m)

Bolo by možné prítomnosť tejto dutiny overiť presnými gravimetrickými meraniami na povrchu pyramídy? – asi áno…

Hrubá izočiara približne vymedzuje plochu, na ktorej by mohla byť daná dutina „merateľná“ pomocou súčasných moderných gravimetrov.

Izostázia predpokladá kompenzáciu litostatických tlakov od horninových celkov litosféry v určitej hĺbke (astenosféra).

tzv. Airyho model a Prattov model

staršie satelitné systémy:
GRACE a CHAMP

nový systém: GOCE

SST: Satellite-to-Satellite Tracking

CHAMP

- Launched 2000.
- Single satellite.
- High-low SST.
- Polar gap ~3°.
- Instruments:
  - vector and scalar magnetometers,
  - accelerometer,
  - star cameras,
  - GPS.

GRACE

- Launched 2002.
- Two-satellites.
- High-low-SST & low-low-SST.
- Polar gap ~1°.
- Time-varying gravity field.
- Instruments:
  - accelerometer,
  - star cameras,
  - GPS.

nový systém: GOCE

štart: 17. marec 2009

koniec: 11. november 2013

výška preletu nad povrchom Zeme: 260 km