

Magnetometria

- na Prif UK v rámci magisterského študijného programu „Aplikovaná a environmentálna geofyzika“ sú v prípade magnetometrie **2 nosné predmety**:

Magnetické metódy (1), 1. roč., LS, povinný predmet, 3/1
základné metodické poznatky (spracovanie, interpretácia)

Magnetické metódy (2), 2. roč, ZS, PV predmet, 3/0
interpretácia + aplikačné oblasti

plus niekoľko ďalších výberových predmetov...

Magnetické metódy (1)

- hodnotenie predmetu (4 kredity):
 - vypracovanie cvičení* (15 %)
 - priebežné písomky (3 sa semester) (25 %)
 - ústna skúška (60 %)

*vypracované cvičenia je potrebné odovzdať do 2 týždňov od dátumu (a hodiny) zadania

e-mailová adresa: roman.pasteka@uniba.sk

(každý deň omeškania znižuje hodnotenie vypracovaného cvičenia o jeden stupeň)

program prednášok

- úvod, repetitórium doterajších poznatkov
- zemské magnetické pole (ZMP)
- variácie ZMP
- definícia a výpočet poľa ΔT , mapa ΔT pre SR
- priama úloha pre jednoduché telesá
- modelovanie účinkov zložitejších telies
- Poissonov teorém
- teória obrátenej úlohy
- interpretačné metódy
- transformácie potenciálových polí
- doplnujúce témy (aplikácie)

program cvičení

- príklad určenia normálneho magnetického poľa
- modelovanie poľa ΔT pre guľu (Potent)
- modelovanie poľa ΔT pre dosku (Potent)
- kvalitatívna interpretácia vybranej anomálie z poľa ΔT pre SR
- metóda polovičnej šírky (na vybranej anomálii z poľa ΔT pre SR)
- modelovanie vybranej anomálie z poľa ΔT pre SR (Potent)
- metóda Wernerovej dekonvolúcie na synt. a reálnych dátach
- vybraná metóda transformácie poľa ΔT

(prípadné zmeny sú vyhradené...)

Magnetometria – úvod

- historický vývoj
- základné pojmy a veličiny
- prístroje (stručné repetitórium)
- poznámky k prvotnému spracovaniu

Magnetometria – úvod

- magnetometria: zo starogréckeho *magnés lithos* (magnetit) + *metrein* (merať)
- historický vývoj (1/3):
 - pojem “magnet” pravdepodobne pochádza z diela starého rímskeho autora Plínia (*Natural history*), ktorý popisuje príbeh pastiera *Magnesa*, ktorý si všimol, že železné špičky na nohách oviec sa “lepia” sa určitý druh horniny (silne obohatenej o magnetit),
 - na tento druh interakcie upozorňoval Tháles (624–546 p.K)
 - kompas sa používal už v starovekej Číne,
 - prvá zmienka o kompase v Európe pochádza zo 4. stor.

Magnetometria – úvod

historický vývoj (2/3):

- William Gilbert: prvé úvahy o Zemi ako o slabom magnete,
- Carl Friedrich Gauss: prvý matematický opis ZMP
- Hans Christian Oersted: prvý si všimol vzťah medzi el. a mg. poľom
- André M. Ampère a Michael Faraday: dôležité pokusy a zákony
- mnohí mnohí ďalší...



William Gilbert
(1540-1603)



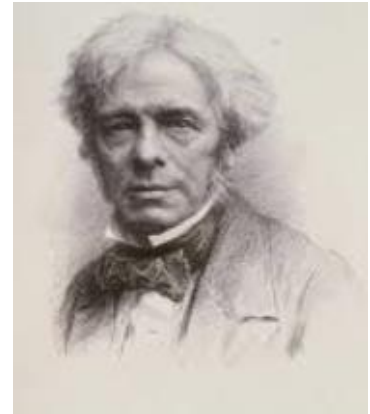
Carl F. Gauss
(1777-1855)



Hans Ch. Oersted
(1777-1851)



Andre M. Ampere
(1775-1836)



Michael Faraday
(1791-1869)

Magnetometria – úvod

historický vývoj (3/3):

- viacerí geofyzici od 50.-60. rokov 20. storočia sa pokúšali o využitie magnetometrov (pôvodne vyvinutých na vojenské účely) v geologickom a archeologickom prieskume
- mená ako Martin Aitken, John Stanley, a mnohí ďalší...



Magnetometria – úvod

- historický vývoj
- základné pojmy a veličiny
- prístroje (stručné repetitórium)
- poznámky k prvotnému spracovaniu

Magnetometria – základné pojmy

magnetické pole – 2 dôležité vektorové veličiny:

magnetická intenzita $\mathbf{H}$, [$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$]

magnetická indukcia $\mathbf{B}$, [$\text{T} = \text{kg}\cdot\text{s}^{-2}\cdot\text{A}^{-1}$]

medzi nimi platí
vzťah $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$

Alternative names for B and H

B	
name	used by
magnetic flux density	electrical engineers
<u>magnetic induction</u>	electrical engineers
magnetic field	physicists
H	
name	used by
<u>magnetic field intensity</u>	electrical engineers
magnetic field strength	electrical engineers
auxiliary magnetic field	physicists
magnetizing field	physicists

Magnetometria – základné pojmy

Magnetické vlastnosti látok – 2 dôležité skalárne veličiny:

magnetická permeabilita μ , [$\text{H} \cdot \text{m}^{-1} = \text{N} \cdot \text{A}^{-2}$]

magnetická susceptibilita κ , [m^3]

(v praxi sa ale používa tzv. magn. objemová susceptibilita κ_v bezrozmerné číslo, používa sa jednotka [SI unit]).

Existuje aj tzv. relatívna magnetická permeabilita μ_r (bezrozmerné číslo):

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \Rightarrow \mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

μ_0 – permeabilita vákua ($4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$)

Vzťah medzi relat. permeabilitou a objemovou susceptibilitou:

$$\mu_r = 1 + \kappa_v .$$

Magnetometria – základné pojmy

staré vs nové fyzikálne jednotky:

Table 1.1: Conversion between SI and cgs units.

Parameter	SI unit	cgs unit	Conversion
Magnetic moment (m)	Am^2	emu	$1 \text{ A m}^2 = 10^3 \text{ emu}$
Magnetization (M)	Am^{-1}	emu cm^{-3}	$1 \text{ Am}^{-1} = 10^{-3} \text{ emu cm}^{-3}$
Magnetic Field (H)	Am^{-1}	Oersted (oe)	$1 \text{ Am}^{-1} = 4\pi \times 10^{-3} \text{ oe}$
Magnetic Induction (B)	T	Gauss (G)	$1 \text{ T} = 10^4 \text{ G}$
Permeability of free space (μ_0)	Hm^{-1}	1	$4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1} = 1$
Susceptibility (χ) total ($\frac{\mathbf{m}}{\mathbf{H}}$)	m^3	emu oe^{-1}	$1 \text{ m}^3 = \frac{10^6}{4\pi} \text{ emu oe}^{-1}$
by volume ($\frac{\mathbf{M}}{\mathbf{H}}$)	-	$\text{emu cm}^{-3} \text{ oe}^{-1}$	$1 \text{ S.I.} = \frac{1}{4\pi} \text{ emu cm}^{-3} \text{ oe}^{-1}$
by mass ($\frac{\mathbf{m}}{m} \cdot \frac{1}{\mathbf{H}}$)	$\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$	$\text{emu g}^{-1} \text{ oe}^{-1}$	$1 \text{ m}^3 \text{kg}^{-1} = \frac{10^3}{4\pi} \text{ emu g}^{-1} \text{ oe}^{-1}$
$1 \text{ H} = \text{kg m}^2 \text{A}^{-2} \text{s}^{-2}, 1 \text{ emu} = 1 \text{ G cm}^3, B = \mu_o(H + M), 1 \text{ T} = \text{kg A}^{-1} \text{s}^{-2}$			

Magnetometria – základné pojmy

Druhy látok podľa schopnosti zmagnetizovať sa:

Podľa hodnoty rel. permeability μ_r delíme látky na:

diamagnetické ($\mu_r < 1$), zoslabujú magn. pole (napr. voda, organické látky, ale aj niektoré kovy: Cu, Ag, Au, Hg, Bi,)

paramagnetické ($\mu_r > 1$), zosilňujú magn. pole (napr. Al, Mn, Cr, Pt)

feromagnetické ($\mu_r \gg 1$) výrazne zosilňujú magn. pole (4 kovy: Fe, Ni, Co, Gd).

Diamagnetické látky sú z magnetického poľa vypudzované, paramagnetické a feromagnetické sú naopak do magnetického poľa vťahované.

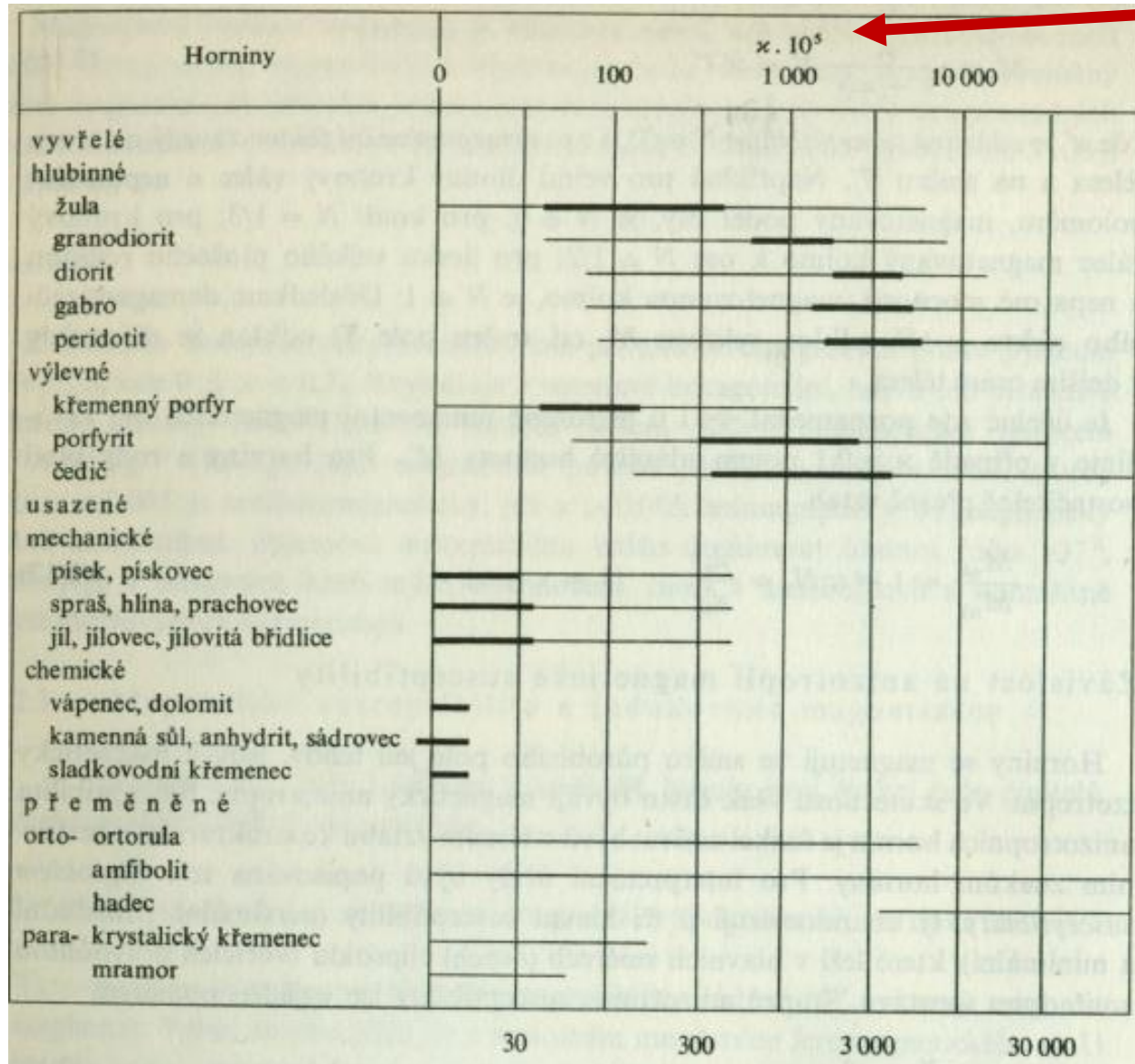
Feromagnetické látky si dokážu “zapamätať” magnetické pole – cez tzv. remanentnú magnetizáciu (paramagnetické nie).

$$\mu_r = 1 + \kappa_v$$

Magnetometria – základné pojmy

objemová magnetická susceptibilita hornín

10^5 (dôležité)



V hlavnej
miere závisí
od
koncentrácie
magnetických
minerálov,
najmä oxidov

najvyššie
hodnoty:
magmatické,
najnižšie:
sedimentárne

Magnetometria – základné pojmy

Curieho teplota:

Pri zohriatí feromagnetickej látky na určitú teplotu (**Curieho teplota** – napr. pre železo asi 770°C) sa látka zmení na paramagnetickú.

Keď teplota poklesne, látka sa znova stane feromagnetickou a obnoví sa doménové usporiadanie.

Mineral	Composition	T_c (°C)
Magnetite	Fe_3O_4	580
Maghemite	$\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$	645
Hematite	$\alpha\text{Fe}_2\text{O}_3$	675
Pyrrhotite	Fe_7S_8	270–320
Greigite	Fe_3S_4	≥ 350
Goethite	αFeOOH	120

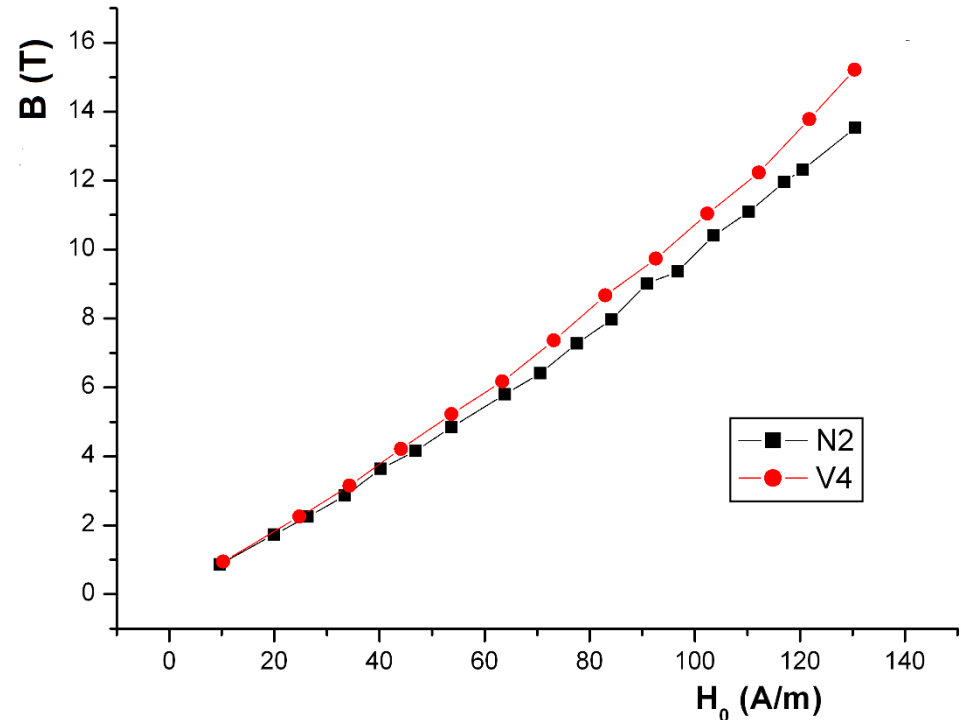
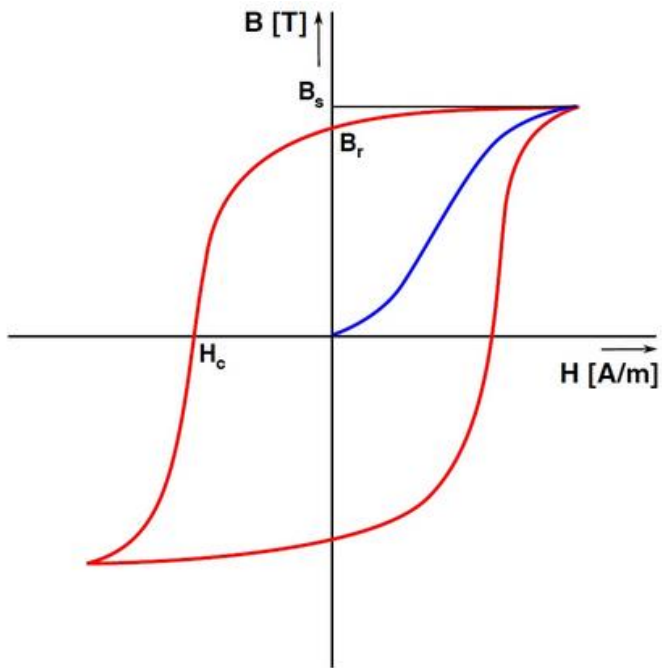
magnetické minerály

Magnetometria – základné pojmy

Magnetická hysterézia:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

Slovo Hysteresis je odvodené z gréčtiny (slovo hysterein) a znamená zaostávať. Inými slovami, keď je magnetický materiál magnetizovaný najprv v jednom smere a potom v opačnom smere, zistilo sa, že hustota toku B zaostáva za aplikovanou magnetizačnou silou H .



reálne údaje (ocel')

Magnetometria – úvod

- historický vývoj
- základné pojmy a veličiny
- prístroje (stručné repetitórium)
- poznámky k prvotnému spracovaniu

Magnetometria – prístroje

Prístroje v magnetometrii - **magnetometre**.

Existujú rôzne rozdelenia:

- skalárne (merajú veľkosť $\mathbf{T}$), vektorové (trojzložkové),
- meranie na jednej úrovni alebo rozdielu $\mathbf{T}$ na dvoch úrovniach (tzv. gradientové magnetometre),
- spôsob merania – “**stop and go**” alebo “**walking mode**” (samostatná kategória sú letecké magnetometre),
- rôzne fyzikálne princípy (magnetické váhy, fluxgate, protónový, céziový, SQUID).

Magnetometria – prístroje

Najviac používané magnetometre v praxi:

- protónový, fluxgate, céziový.



Protónový magnetometer:

Merací čas sú rádovo sekundy, príp. zlomky sekundy (patrí medzi pomalšie prístroje).

Vnútoraná presnosť je na úrovni 0.1 nT, vonkajšia niekoľko nT.

Využíva sa najmä pri geologických aplikáciách.



Magnetometer s ferosondou (fluxgate):

Často používané v archeológii v tzv. gradientovom prevedení (pole je merané v 2 úrovniach) a v multi-senzorovom usporiadaní. Výsledné pole označujeme potom ako dZ.



Presnejšie a najmä rýchlejšie ako protónové magnetometre.

"Céziový" magnetometer: (Cs-vapour magnetometer)

Merací čas sú rádovo desatiny až tisíciny sekundy (patrí medzi najrýchlejšie prístroje).

Vnútrotná presnosť je na úrovni 0.01 nT, vonkajšia ± 1 nT.
Pozor – má tzv. mŕtvy uhol pri meraní (kedy nemeria správne).
Využíva sa najmä pri UXO, geol. a archeol. aplikáciách.



Niekedy sa používajú aj v gradientových usporiadaniach.

spôsohy zberu magnetometrických údajov:

- povrchové
- letecké
- satelitné



rôzne systémy magnetometrov – zo sveta (ručne nesené)

spôsohy zberu magnetometrických údajov:

- povrchové
- letecké
- satelitné



rôzne systémy magnetometrov – na vozíkoch (tlačené/t’ahané)

spôsoby zberu magnetometrických údajov:

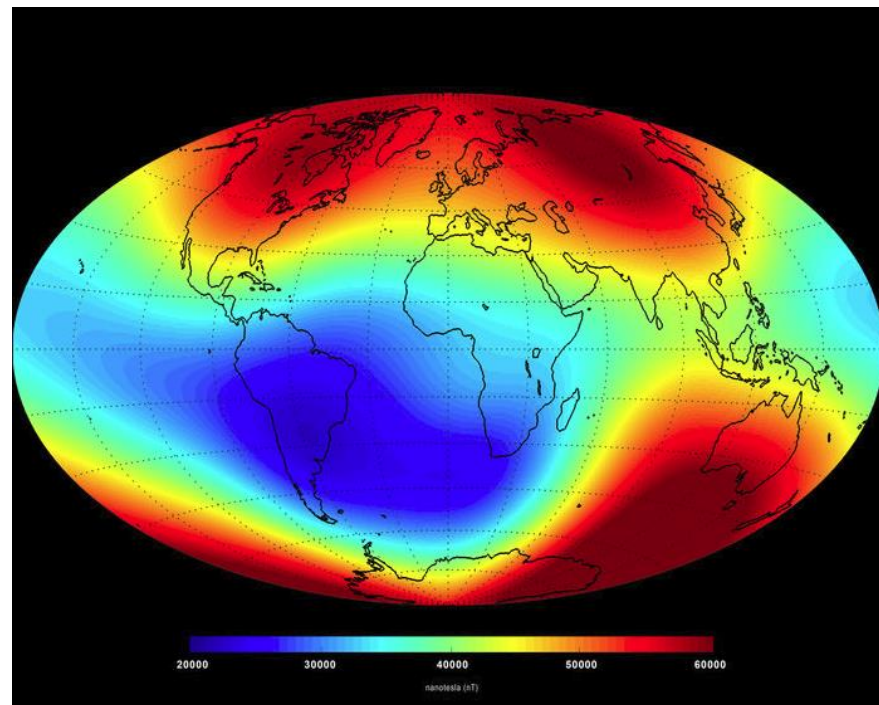
- povrchové
- letecké
- satelitné



lietadlá, helikoptéry, drony, AUV, ...
(AUV = Autonomous Unmanned Vehicle)

spôsoby zberu magnetometrických údajov:

- povrchové
- letecké
- satelitné



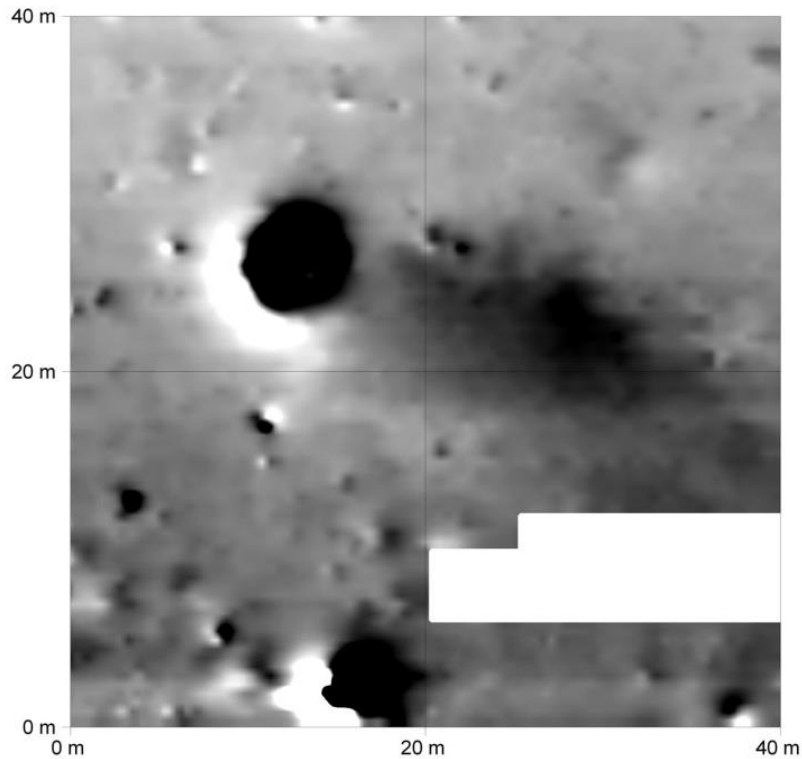
system 3 satelitov: **SWARM (ESA)**

okrem samotného magnetického poľa sú merané aj jeho vyššie gradienty

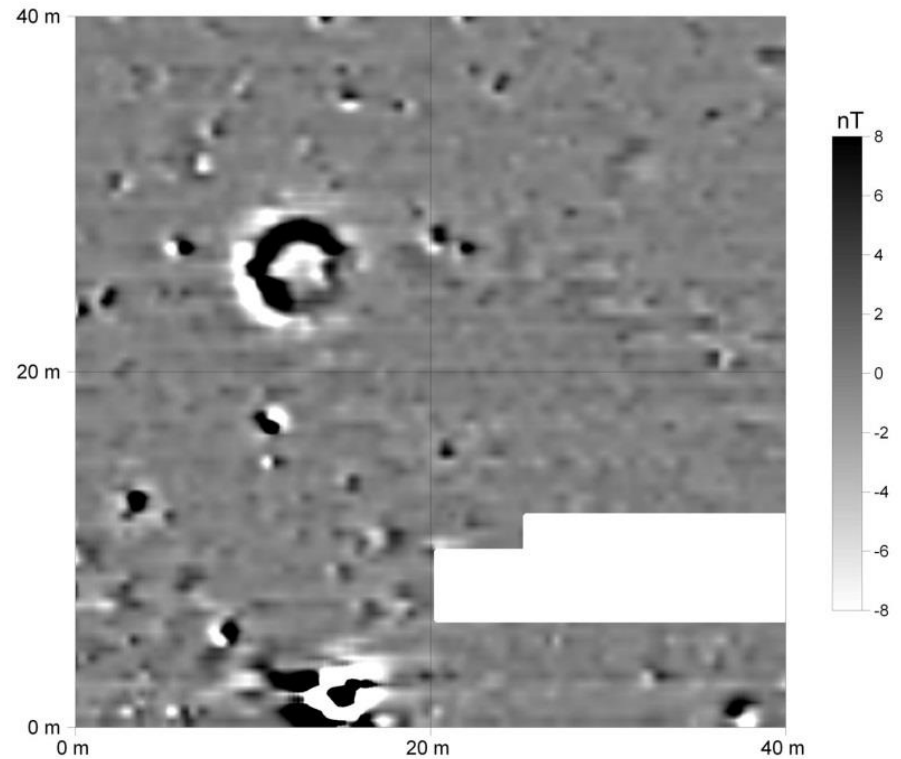
<https://earth.esa.int/eogateway/missions/swarm>

rozdiel v poliach ΔT a dZ

(klasická magnetometria a vertikálna gradiometria)



pole ΔT



pole dZ

Magnetometria - zber dát v teréne

Meria sa buď v nejakom zvolenom lokálnom systéme (pásma, značky) alebo v globálnych súradniciach (GPS).

Pri meraní vo walking mode sa poloha registruje:

1. stláčaním gombíku na ráme prístroja pri prechode ponad značky,
2. na základe dĺžky odvinutej bavlnenej nite alebo podľa počtu otáčok pomocného kolesa prístroja (tzv. odometer)
3. pomocou technológie GPS

Chyby v určení polohy – prvé 2 technológie: úroveň $\pm\text{dm}$, GPS: $\pm\text{cm}$).



odometer
(optické snímanie
dĺžky odvinutej nite)

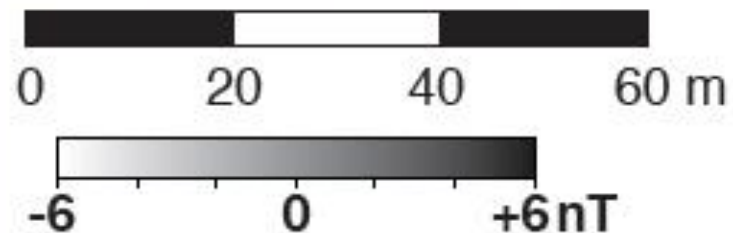


GPS antenna
(snímanie polohy
v reálnom čase
s korekciami
polohy cez GSM
sieť – služba
SKPOS)

čomu sa vyvarovať pri zbere dát v teréne:

rušivým zdrojom:

**klúče
vo vaku**



Magnetometria – úvod

- historický vývoj
- základné pojmy a veličiny
- prístroje (stručné repetitórium)
- poznámky k prvotnému spracovaniu

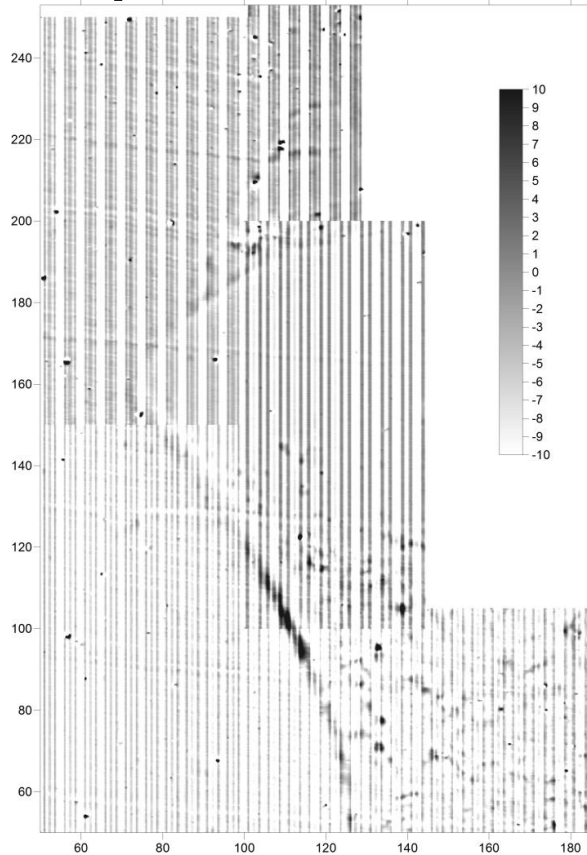
Magnetometria - poznámky ku QC a prvotnému spracovaniu

- opravy o variácie geomagnetického poľa
(variačný magnetometer alebo observatórium alebo filtre)
- odpočítanie tzv. normálneho poľa: výpočet poľa ΔT
(štatistické metódy alebo globálne modely magn.
poľa – napr. IGRF alebo WMM)
- zavedenie špeciálnych opráv na hodnotové posuny
medzi senzormi a iné deformácie zmeraného poľa
(tzv. heading error, herringbone error, atď.)
- interpolácia do máp poľa ΔT a vizualizácia
(farebné alebo ČB tieňované mapy)
- pozn.: niektorí autori zavádzajú aj magnetické terénne
korekcie (nie je to však bežné)

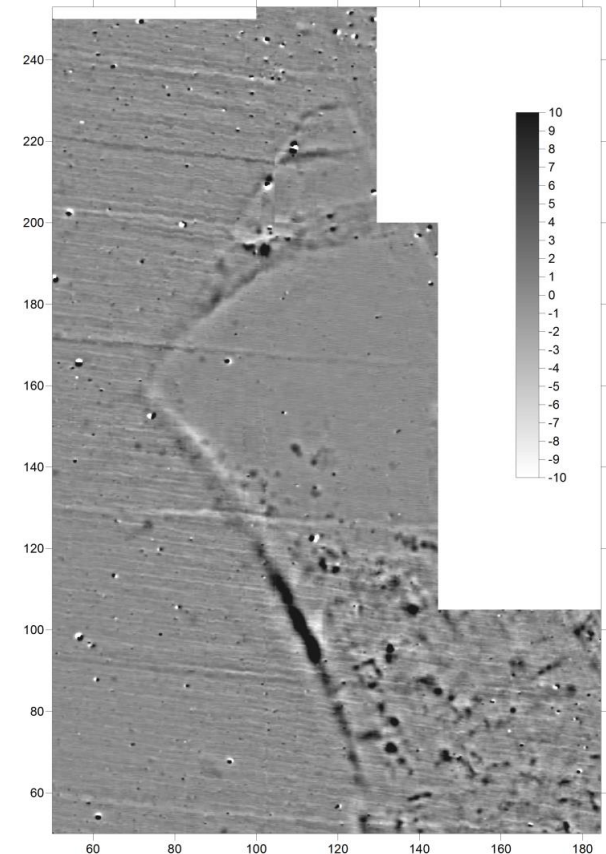
Hodnotové posuny medzi senzormi (tzv. heading error):

Spôsobené skutočnosťou, že na rôzne senzory môžu pôsobiť rôzne konštantné vplyvy – napr. operátor alebo elektronika na ráme prístroja.

pôvodné dáta

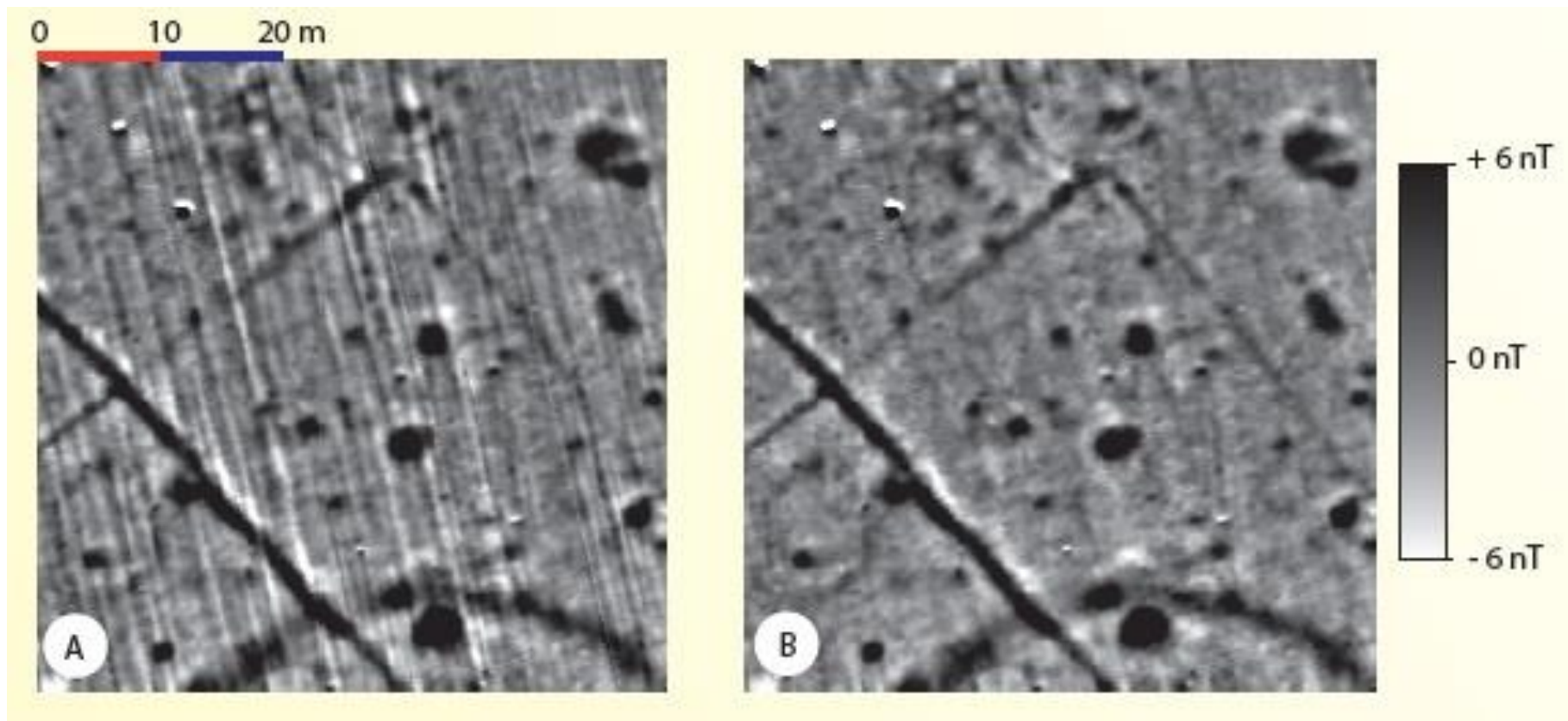


filtrované dáta



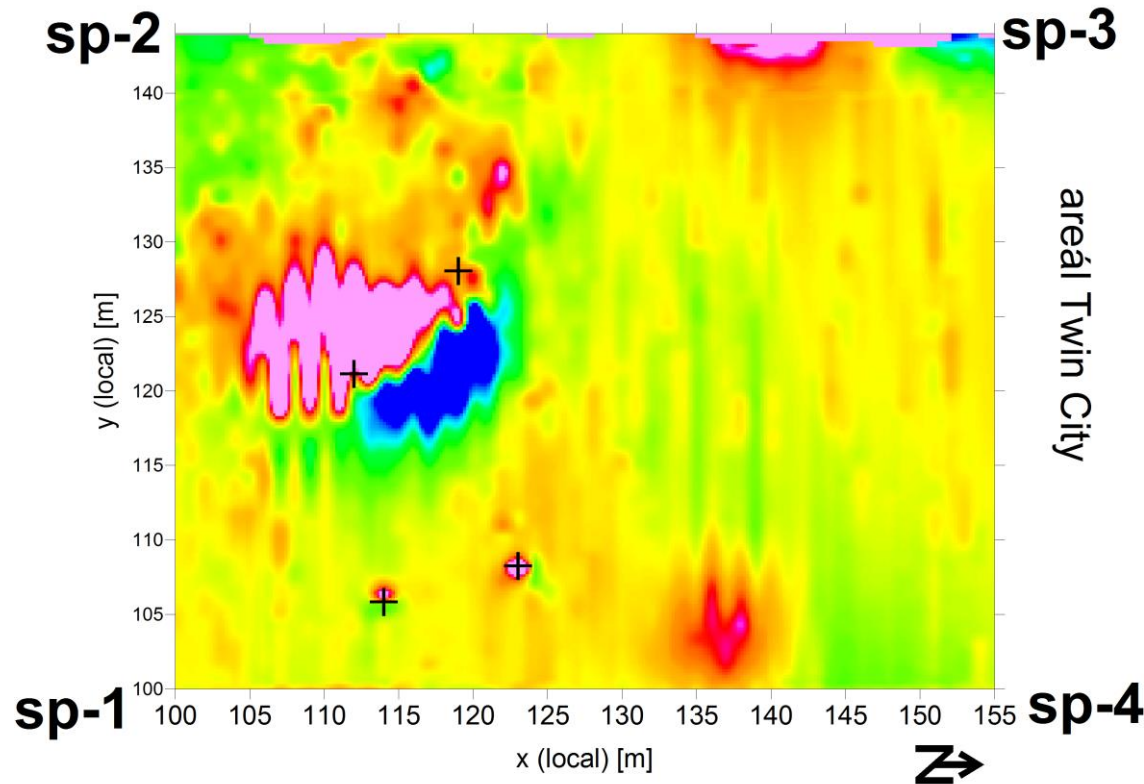
Dobré skúsenosti sú s tzv. mediánovými filtrami (každý profil zvlášť je filtrovaný posuvným mediánovým filtrom) alebo postupom, ktorý sa nazýva ako tzv. mikroleveling.

prejav orby



dá sa odstrániť pomocou špeciálnych smerových filtrov

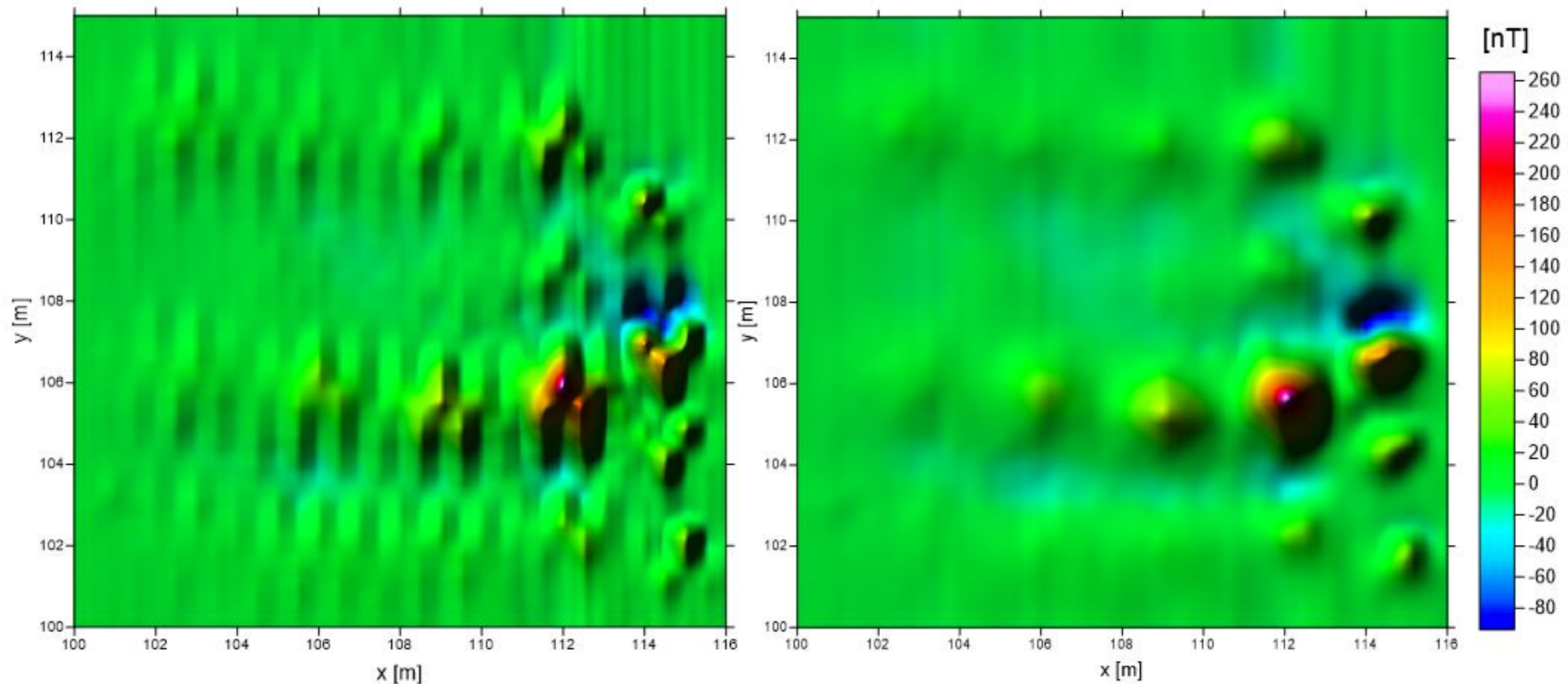
Deformácie pozdĺž profilov merania - tzv. „herringbone“ error (deformácia v tvare rybacej kosti):



Spôsobený nedostatočnou polohovou presnosťou alebo určitým prístrojovým defektom (časovým spomalením pri spracovaní veľmi vysokých hodnôt) – anomálie sú umelo “naťahované” v smere zberu dát.

Dokáže potlačiť jednoduchý nízkopriepustný (low-pass, vyhladzujúci) filter alebo umelé posunutie polôh zmeraných dát v správnom smere.

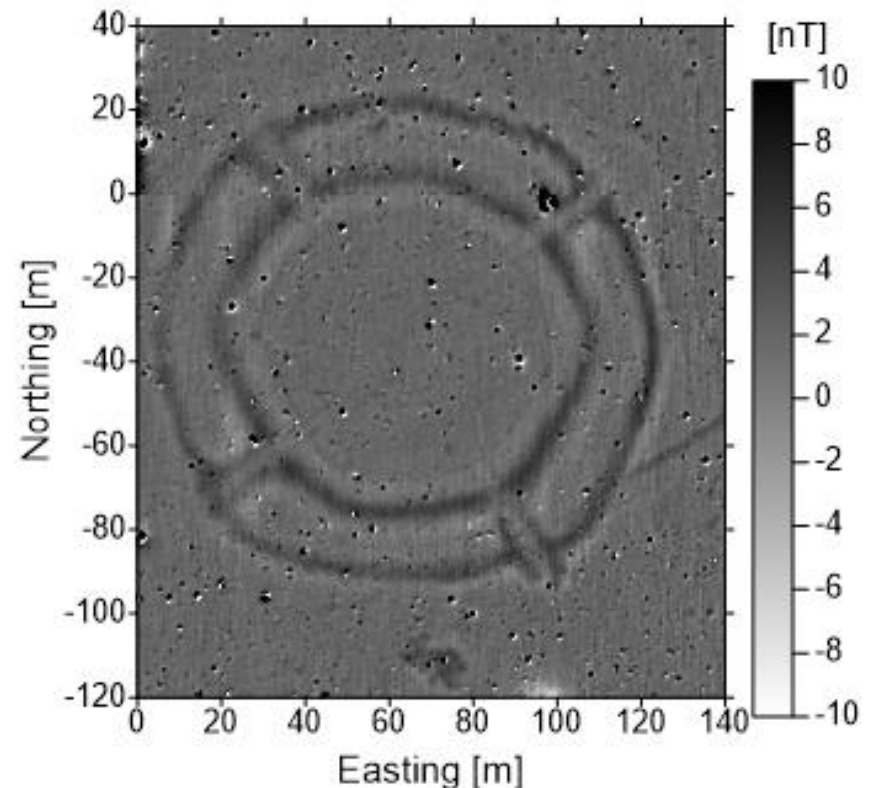
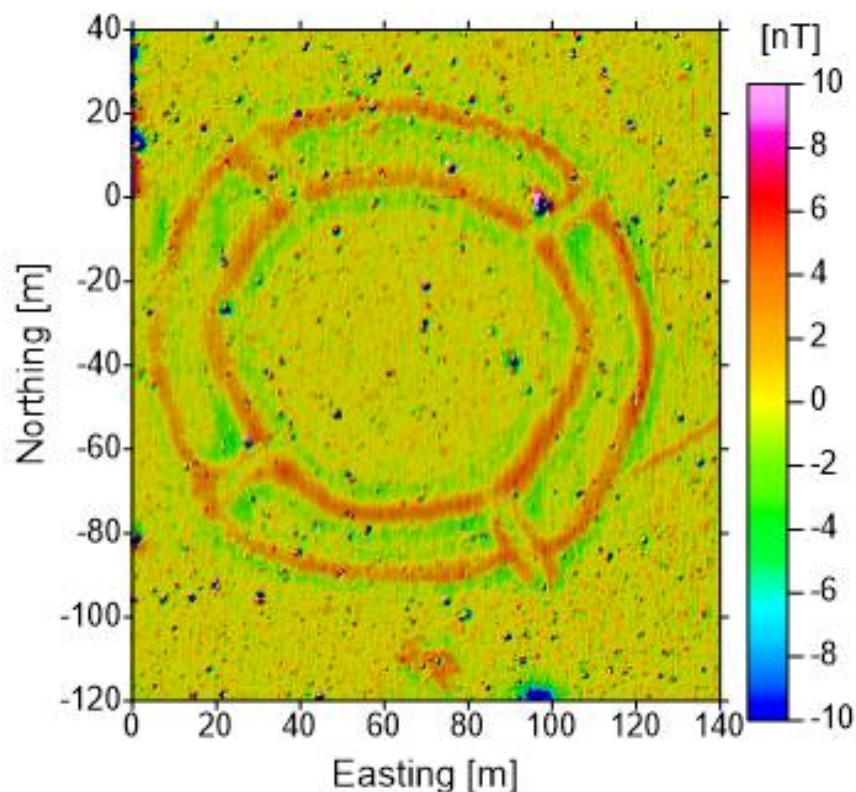
Deformácie pozdĺž profilov merania -
tzv. „herringbone“ error (deformácia v tvare rybacej kosti):



Príklad odstránenia “herringbone” chyby (posunmi v polohách dát).

Interpolácia údajov do máp (gridov) a použitie farebných škál

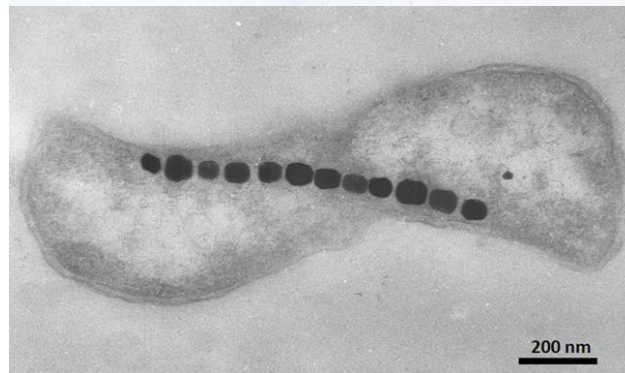
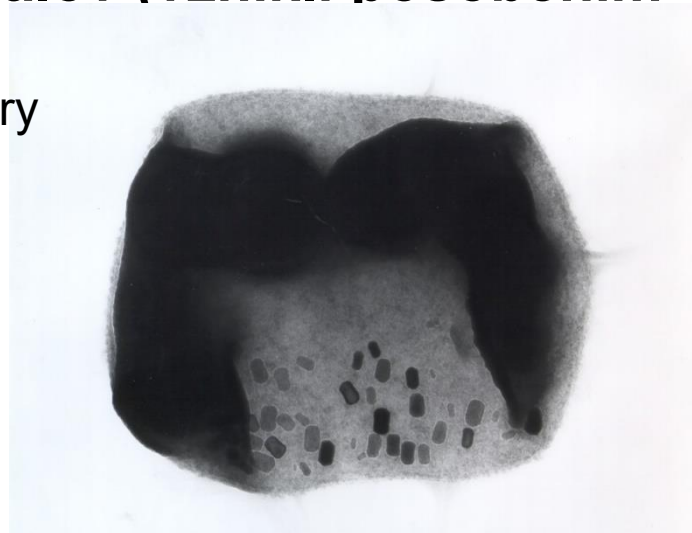
- najlepšie skúsenosti s metódami Kriging a Minimum Curvature (GS Surfer)
- pri geologických aplikáciách: farebné škály (teplé farby – maximá, studené farby – minimá)
- pri archeologických aplikáciách: ČB škály (odtiene šedej) (čierna – maximá, biela – minimá)



Poznámka na záver

bývalé priekopy a jamy sú vyplnené hlinou a humusom, ktorý má vysoký obsah magnetických minerálov (vznikli pôsobením tzv. magnetotaktických baktérií)

ilustračné zábery



Výsledok pôsobenia magnetotaktických baktérií pri spracovaní rastlinnej zelenej zložky na humus: vznik drobných nano-kryštálikov magnetitu.