

Ing. Karel H a n z a, CSc., VÚHU

Elektromagnetické metody v geofyzikálním průzkumu

Nejvýraznějším projevem rozvoje moderního průmyslu v minulých dvaceti letech a zejména pak v současné době, je nárůst spotřeby nerostných surovin a z toho vyplývající intenzivní vyhledávání jejich ložisek. Rozvoj lomového dobývání má za následek, že se přechází do dolových polí přerubaných hlubinnou těžbou, objevují se složité morfologické struktury a zvyšuje mocnost nadloží. Prostorovým studiem geologických struktur svrchní části zemské kůry, kde jsou uloženy veškeré, současnou technikou těžené suroviny, se zabývá užitá geofyzika. Při geofyzikálních měřeních - geofyzikálním průzkumu - se využívá vzájemně rozdílných fyzikálních vlastností jednotlivých hornin a nerostů, jako např. objemové hmotnosti, elektrického odporu, permeability, elasticity, radioaktivity atd. Takto, geofyzikálními přístroji proměřovaná pole, mohou být buď přirozená /pole geomagnetické, tíhové, geotermické apod./, nebo uměle vyvolaná /umělé zdroje pružného vlnění, radioaktivní záření, elektromagnetické pole atd./.

Mezi nejnovější metody geofyzikálního průzkumu patří elektromagnetické metody, které využívají uměle vytvořeného elektromagnetického pole. Podle zkoumaného fyzikálního pole - elektromagnetického pole - patří elektromagnetické metody do skupiny geoelektrických metod /viz tabulka 2 "Přehled geofyzikálních metod"/. Tyto metody byly sice používány /ve velmi jednoduchých formách/ již od dvacátých let, avšak teprve prudký rozvoj elektroniky v posledních letech způsobil, že elektromagnetické metody jsou v tak velké míře používány pro geofyzikální průzkum po celém světě.

Elektromagnetické metody geofyzikálního průzkumu využívají závislosti rozložení časově proměnného elektromagnetického pole na vlastnostech prostředí, kterým se toto pole šíří. Nedostatečně rozpracovaná teorie elektromagnetického pole, nedokonalá přístrojová základna a velký počet parametrů,

ovlivňujících chování elektromagnetického pole, byly dlouhou dobu omezujícími faktory pro aplikaci a interpretaci elektromagnetických metod. Proto při prvních aplikacích bylo měřeno jen elektrické pole a jen z uzemněných zdrojů /konduktivně zavedené pole uzemněných zdrojů/. Teprve teoretický rozbor elektromagnetických polí ve složitých podmínkách spolu s rozsáhlým modelovým měřením umožnil jednoznačné členění lokálních anomálií a dosažení vyšší klasifikační schopnosti elektromagnetických metod oproti běžným stejnosměrným metodám.

Převážná většina moderních metod dnes využívá induktivně zavedených elektromagnetických polí. Z technických důvodů se však registruje převážně magnetická složka vybuzeného pole. Induktivní zavedení a měření magnetické složky elektromagnetického pole je základní předností elektromagnetických metod oproti stejnosměrným metodám. Je tak možné měřit nejen v prostředích o vysokých měrných odporech, kde uzemnění zdrojů činí potíže, ale provádět i aéroelektromagnetický průzkum. V současné době patří geoelektrické metody mezi nejvíce uplatňované metody v užité geofyzice, přičemž elektromagnetické metody patří mezi nejekonomičtější.

Zdroje elektromagnetického pole

Elektromagnetické pole, které je měřeno v geofyzikálním průzkumu, využívá zásadně tři typů zdrojů:

- a/ zdroje vybudované speciálně pro daný geofyzikální průzkum
- b/ zdroje vybudované pro jiné účely /radionavigační stanice/
- c/ přirozené elektromagnetické pole Země /magnetotelurické pole Země/.

V podmínkách SHD přirozené elektromagnetické pole Země pro velké rušení nelze uplatnit.

- a/ Nejrozšířenějším typem pole v geoelektrickém průzkumu je pole umělé, které se vytváří speciálně pro účely geofyzikálního průzkumu a tím umožňuje volit optimální hodnotu frekvence a orientaci pole. Elektromagnetické pole do země zavá-

Rozdělení elektromagnetických metod

Klasifikace					metoda
elektromagnetické metody	profilování	harmonické pole	nízkofrekvenční	velké zdroje (nepohyblivé)	neuzemněné smyčky a dlouhého kabelu TURAM
				malé zdroje (pohyblivé)	dipólové elektromagne- tické profilování SLINGRAM
			vysokofrekvenční	pasivní	metoda velmi dlouhých vln (VDV)
				aktivní	metoda radiovlnového prozařování a radio- lokační metoda
		přechodové pole			metoda přechodových jevů
	sondování	umělé elektromagnetické pole			frekvenční sondování
		přirozené elektromag. pole Země, tj. magnetotelurické	měří se E		metoda telurických proudů
			měří se E a H		magnetotelurické sondování
		přechodové pole			sondování metodou přechodových jevů

díme buď uzemněnými póly zdrojů /vodivě/, nebo indukcí /např. uzavřenou smyčkou/ z neuzemněného zdroje.

Konduktivní zavedení předpokládá vodivý styk zdrojového systému se zemí přes uzemňovací elektrody. Tato metoda zavedení je obdobná jako u metod stejnosměrných odporových. Hlavní výhodou je zesílení elektrické složky elektromagnetického pole v zemi, a tím větší rozlišitelnosti hornin s rozdílným měrným odporem. Užívá se při sledování odporových změn hornin s malými rozdíly měrného odporu /u elektromagnetického sondování/. Konduktivní zdrojové systémy jsou: uzemněný horizontální elektrický dipól a uzemněný kabel. Nevýhodou konduktivního zavedení je vlastní uzemnění.

Induktivně zavedené pole je pole zdrojů bez vodivého styku se zemí. Protože v nevodivých a středně vodivých prostředích /horninách/ převládá magnetické pole, nazýváme zdroje induktivního zavedení magnetickými zdroji. Takovými představiteli zdrojů jsou smyčky různých tvarů a rozměrů, napájené buď střídavým proudem, nebo skokovým průběhem proudu. Vlastnosti smyčky jsou určeny zejména její plochou. Tvar smyčky není rozhodující. Zvláštní skupinu tvoří polootevřené smyčky s uzemněnými konci, pro zvýšení elektrické složky v zemi, a tím výraznější indikaci anomálie.

b/ Pole radionavigačních stanic je využíváno u tak zvané metody velmi dlouhých vln. Využívá se elektromagnetických polí vojenských radionavigačních vysílačů pracujících v pásmu 15 až 25 kHz. V dostatečné vzdálenosti od vysílače pak lze pole aproximovat rovinnou elektromagnetickou vlnou a směrem šíření energie svisle do země. Z tohoto předpokladu pak vyplývá jednoduchý teoretický model a poměrně jednoduché měření a vyhodnocování.

Měření magnetické složky

Magnetické pole lze velmi dobře popsat elipsou polarizace. Magnetické pole v jednom bodě /a pro jednu frekvenci/ je obecně dáno sedmi parametry /tři složky primárního pole H_p , tři složky sekundárního pole H_s a fázové zpoždění φ_s /, nebo

parametry elipsy polarizace /velká a malá poloosa elipsy a, b a úhly orientace elipsy γ a δ /.

$$\operatorname{tg} \gamma = \operatorname{Re} \frac{H_{sz}}{H_{po}}$$

$$b/a = \operatorname{Im} \frac{H_{sz}}{H_{po}}$$

kde H_{sz} je vertikální složka sekundárního pole

H_{po} je amplituda primárního pole

γ je úhel sklonu velké poloosy elipsy polarizace

b/a je poměr obou poloos

δ je azimut elipsy

V praxi se však měří jedna, či dvě, nejvíce však tři veličiny, a to takové, které dávají nejvíce informací a které umíme měřit. Měření příslušných parametrů pole se provádí buď v jednom, nebo ve dvou bodech.

Měření v jednom bodě rozdělujeme na měření: a/ úhlů, b/ parametrů elipsy polarizace, c/ intenzit - amplitud - totálního vektoru či pravoúhlých složek, d/ fází.

Měření na dvou bodech rozdělujeme na měření: a/ vertikální složky H_z ve dvou různých bodech, b/ horizontální složky H_x ve dvou různých bodech, c/ obecné složky H_γ ve dvou různých bodech.

Pro měření magnetické složky se zpravidla používá indukční metoda buď se dvěma měřicími cívkami a relativním srovnáním indukovaných napětí, nebo s jedinou cívkou a kompenzací pomocí referenčního signálu.

Aparatury a metody měření elektromagnetických polí

Metoda:	Sledovaný parametr:	Využití v inž. geologii
TURAM	$\text{poměr } H_{z_1}/H_{z_2}$ $\text{fázový rozdíl (rad)}$ $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$	- vyhledávání a mapování zvodnělých tektonických linií
SLINGRAM	$\text{Re}H_z, \text{Im}H_z$ $\text{reálná a imaginární část vertikální složky magnetického pole}$ $(\%)$	- vyhledávání a mapování zvodnělých tektonických poruch - zjišťování kontaktů hornin
VDV	$\text{Re}H_z, \text{Im}H_z$ $\text{reálná a imaginární část vertikální složky magnetického pole}$ $(\%)$ $\rho_{\text{VDV}} (\Omega \cdot \text{m})$ $\Delta\varphi \text{ (rad)}$	- vyhledávání a mapování tektonických poruch - lokalizace vodičových horninových poloh - mapování kontaktů hornin

TURAM. Metoda dlouhého kabelu a metoda smyčky jsou metody, které pracují se stabilními, uměle vyvolanými zdroji elektromagnetického pole. Jako zdrojové systémy jsou užity neuzemněné smyčky, dlouhý kabel, rám či cívka malých rozměrů.

Dlouhé kabely bývají nejčastěji orientovány jako přímé, někdy jako uzemněné polosmyčky. Měřené profily jsou orientovány kolmo na směr kabelu. Anomálie v blízkosti kabelu jsou vlivem vysoké intenzity primárního pole potlačeny, a proto zde měření neprovádíme. Metoda dlouhého kabelu je vhodná pro předběžný průzkum velkých oblastí.

Smyčky mají tvar zpravidla blízký čtverci. Rozměr smyčky bývá 100 až 2000 m a určuje hloubkový dosah průzkumu. Profily se vedou vně i uvnitř kolmo či paralelně k její delší straně. V případě, že známe přibližný geologický směr, je třeba orientovat profily kolmo na tento směr. Vzdálenost profilů se volí desítky až stovky metrů. Při mapování větších ploch je nutné, aby se plochy jednotlivých smyček překrývaly. V přímé blízkosti smyčky neměříme.

Metoda turam našla velké uplatnění po druhé světové válce zejména v rudním průzkumu, kde lze využít jejího většího hloubkového dosahu. Pro běžný a mapovací průzkum je však zdlouhavá a je nahrazována dipólovými metodami slingram.

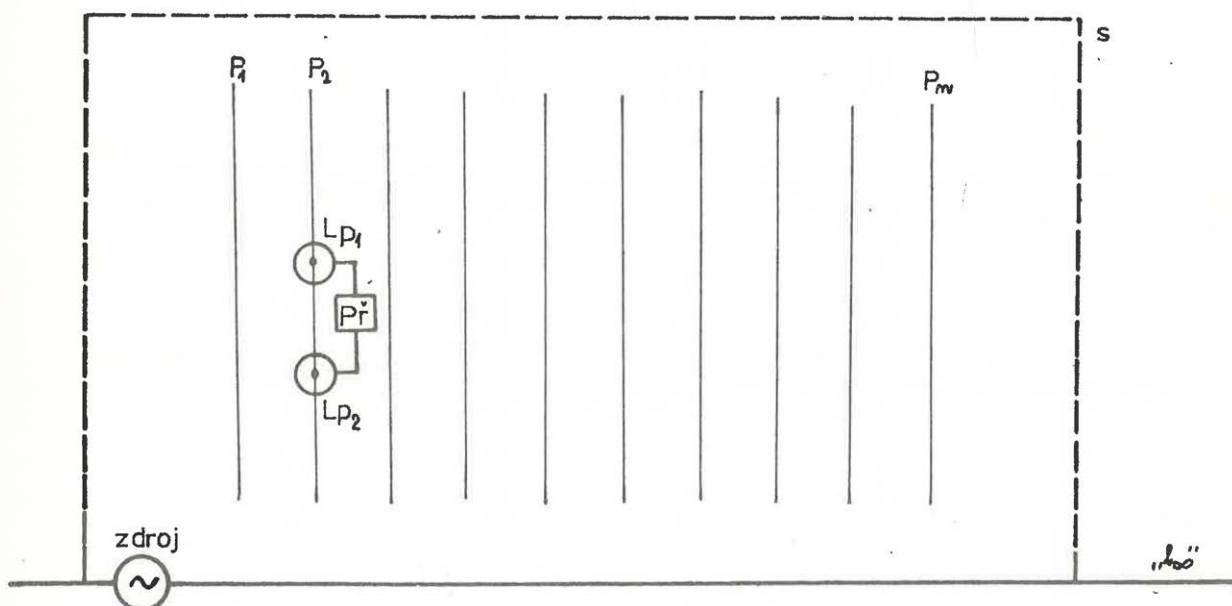


Schéma měření metodou TURAM

Pole je generováno buď dlouhým kabelem, nebo smyčkou. Měří se komplexní poměr signálů indukovaných ve dvou vzdálených cívkách s vertikální osou. Je tedy měřen poměr vertikálních složek magnetického pole ve dvou bodech profilu. Obě cívky jsou měřicí a jsou vzájemně spojeny kabelem. Vzdálenost měřicích cívek bývá kolem 20 m. Zpravidla se měří na dvou či více frekvencích v rozsahu 100 až 800 Hz /220 Hz a 660 Hz/. Metody se využívá při elektromagnetickém profilování.

SLINGRAM. Dipólové elektromagnetické profilování /DEMP/ patří mezi aktivní elektromagnetické metody. Zdrojem primárního pole je magnetický dipól realizovaný cívkou malých rozměrů. Typickým představitelem DEMF je metoda slingram. Je to dipólová metoda s vertikálním, případně horizontálním magnetickým dipólem jako zdrojem. Měří se reálná a imaginární část vertikální, resp. horizontální složky magnetického pole.

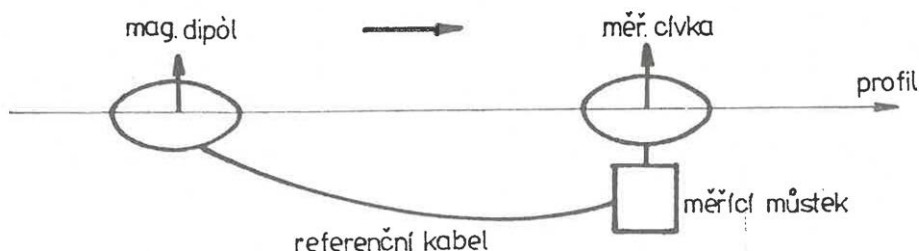


Schéma uspořádání u metody SLINGRAM

Také zde se používá jedné či dvou frekvencí v pásmu 400 Hz až 4 kHz. Vzdálenost dipólů bývá v rozmezí 20 až 150 m. Bod zápisu se volí uprostřed obou cívek. Vzdálenost cívek je určen i hloubkový dosah. K chybám měření dochází zejména nedodržením vzájemné polohy cívek /vzdálenost, sklon terénu/.

VDV metoda je v geofyzikální praxi aplikována teprve v posledních letech. Vychází ze zjištění, že šíření radiových vln je ovlivněno geologickou stavbou vrchní části zemské kůry, vzláště jejími geoelektrickými podmínkami.

Přítomnost vodivého tělesa pod povrchem vyvolává změnu /anomálii/ ve tvaru elektromagnetického pole, kterou vysvětlujeme existencí sekundárního pole H_s . Na vznik tohoto pole mají vliv jak vířivé proudy /indukované ve vodivých tělesech/, tak i proudy, koncentrované do vodiče z okolí. Oba jevy mají maximální efekt tehdy, když vodič /směr vodiče/ je kolmý na vektor magnetické intenzity H_p primárního pole. Tedy: směr k vysílači má být pokud možno kolmý na geofyzikální profil, což znamená, že podle požadovaného směru geofyzikálního profilu musíme volit vysílač.

Pro měření reálné a imaginární složky magnetického sekun-

dárního pole slouží scustava dvou ortogonálních cívek, které jsou pevně spojeny s vlastním měřicím přístrojem. /Pozn. R je referenční cívka a S je signální cívka/. Měří se na profilech vzájemně rovnoběžných. Měření je velmi jednoduché a v případě potřeby je zvládne i jeden operátor. Krok se volí 10 m i méně.

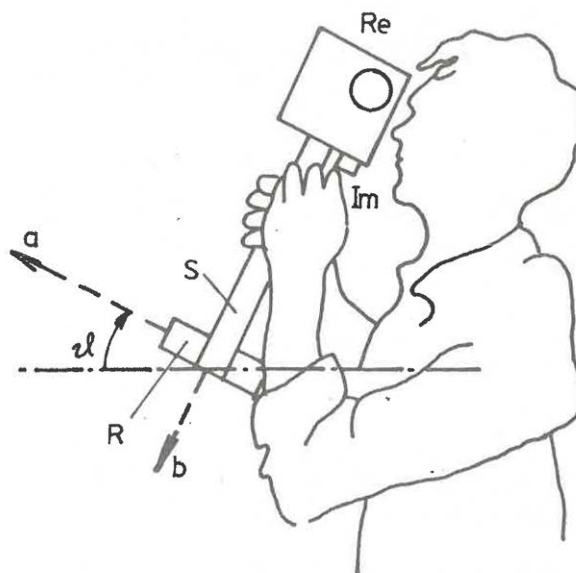
Kromě magnetické složky lze pomocí přístavku /vyráběného v n.p. Geofyzika Brno pod názvem ERA/ měřit i horizontální složku elektrického pole E_{sx} . To při současné registraci magnetické složky H_{sz} umožňuje provádět odporové profilování. Po úpravě obecného vztahu pro impedanci Z

$$|Z| = \frac{E_{sx}}{H_{sz}} \quad \begin{array}{l} \text{obdržíme vztah pro výpočet} \\ \text{zdánlivého měrného odporu} \end{array}$$

$$\rho_z = \frac{1}{\omega \mu} |Z|^2$$

Na rozdíl od magnetické složky vykazuje elektrická složka anomálie i nad nevodivými tělesy, čímž je uvedena metoda vhodná i pro lokalizaci dutin, pevných poloh apod. V této modifikaci metody VDV je však nutno počítat s kontaktním snížením složky elektrického pole, tj. počítat se zabodáváním elektrod.

Metoda VDV patří mezi nejefektivnější metody. Podobně jako ostatní elektromagnetické metody je i VDV metoda nepříznivě ovlivněna reliérem terénu. Pro výpočet topoeffektu reliéfu terénu jsou k dispozici opravěné nomogramy.



Aparatura EDA pro metodu VDV

RADAR metoda je zatím nejnovější geofyzikální metodou, která svým principem spadá do oblasti elektromagnetických metod. Teorie a princip geofyzikálního přístroje však mají mnohem méně společného s klasickým radiolokátorem, než napovídá název. S ohledem na nepatrnou vzdálenost antény od terénu /nutnost přenosu maximálního výkonu do zkoumaného terénu/, nelze použít poměrně jednoduchého vyhodnocení časového rozdílu mezi vysílaným a přijímaným impulzem ani frekvenční modulaci vysílaného signálu /trvalé vysílání obrovského výkonu/.

Nevýhodou této metody je malý hloubkový dosah /podle typu horniny se může pohybovat v rozmezí 4 až 12 m/ a závislost na dovozu zařízení ze západních zemí. Přestože se tato metoda jeví jako velice perspektivní, nedoznala u nás zatím uplatnění.

Využívání elektromagnetických metod v podmínkách SHD

Geofyzikálním průzkumem v SHD se kromě oddělení geofyziky VÚHU zabývá ještě celá řada externích organizací /Geofyzika Brno n.p., Geoindustria Praha, ČGÚ, ČSAV a další/, jejichž personální a přístrojové vybavení je na nesrovnatelně vyšší úrovni. Je proto třeba hodnotit využívání elektromagnetických metod pod tímto zorným úhlem a odděleně.

Oddělení geofyziky VÚHU je vybaveno aparaturou TURAM /rok výroby 1963/, kterou v současné době využívá pouze ve speciálních případech při vyhledávání zvodnělých poloh. V dřívější době byly činěny pokusy s uplatňováním aparatury při vyhledávání pevných poloh v nadloží. Zkoušky ukázaly, že aparatura je pro tento účel nevhodná.

Aparaturu SLINGRAM VÚHU zatím nevlastní, ale probíhá jednání s tuzemským výrobcem o možnosti vývoje zařízení.

Aparaturu VDV dodala na VÚHU Geofyzika Brno v roce 1982. Jak již bylo uvedeno v předchozí části, jedná se o velice produktivní metodu, která však má i některá omezení. Je využívána hlavně při upřesňování výchozových partií a tektonických poruch v předpolí lomů, neboť měření přímo v lomo-

vých provozech je vzhledem k reliéfu jednotlivých řezů a instalované technice často problematické.

S vybavením aparaturou RADAR se v nejbližší době ve VÚHU nepočítá.

Geofyzika Brno n.p. prováděla v poslední době s aparaturou IURAM /rok výroby 1979/ pouze jediné měření/v rámci výzkumného úkolu "Výzkum geofyzikálních metod....."/ v prostoru Osek - Domaslavice při upřesňování výchozových partií. Dosažené výsledky nebyly přesvědčivé a pouze potvrdily těžkopádnost metody.

Metoda SLINGRAM prováděná přístrojem typ EM 31 v prostoru Jezzerka na VČSA jednoznačně prokázala přednosti a perspektivnost metody. Měření je vysoce produktivní /srovnatelné s metodou VDV/ a rušení reliéfem terénu a lomovým provozem je omezeno. Tato metoda se jeví jako nejvhodnější pro uplatnění v SHD. Při ověřování metody VDV v předpolí lomů byly získány výsledky analogické výsledkům geofyziky VÚHU. Měření z lomových provozů byla sice slibnější, zejména s přístavkem ERA, ale konečné závěry bude možno vyslovit až po komplexnějších zkouškách.

Geoindustria Praha byla jedinou organizací, která se v podmínkách SHD zabývala metodou RADAR. Ověřování bylo prováděno zařízením SIR 7 na VČSA při vyhledávání nezavalených chodeb a na VMG pro zjišťování velmi tvrdých poloh v nadloží. V obou případech byly výsledky velmi slibné, i když s omezeným hloubkovým dosahem /max. 4 až 5 m/.

V tomto článku byly uvedeny pouze nejdůležitější elektromagnetické metody geofyzikálního průzkumu, jež však mají pro svoji perspektivnost význam zásadní. Celkový trend v uplatňování geofyzikálních metod jednoznačně ukazuje na význam geofyziky při řešení geologických problémů a při zajišťování těžby.

Závěr

Popsané elektromagnetické metody neznamenají nějakou převratnou změnu v geofyzikálním průzkumu, jsou však, i přes některé skeptické názory, dokladem progresivního a vědeckého vývoje geofyziky.

Na to, že geofyzika má mezi vědními disciplinami i aplikacemi své oprávněné místo ukázal již před šedesáti lety univerzitní profesor dr. V. Láska : "...geofyzika se opírá o platné zákony fyziky, tudíž o základy vyztužené náležitě empirií a teorií. Až budou v geofyzice překonány překážky, jaké se vyskytují vůbec - a v počátcích ovšem nejvíce - při každé aplikaci fyzikálních věd na skutečnost, stane se geofyzika vědou téže váhy pro horníka, jako jest dnes např. důlní měřičství. Obtíže ty nespočívají však v nedokonalosti teorie, nýbrž jsou při každé nové aplikaci vědecké přirozeným zjevem. Nikdy však nebudou nástroje geofyzikální ukazovati jako kouzelný proutek vodu nebo petrolej, nýbrž vždy budou sloužiti výhradně k vykonání fyzikálních pokusů a k měřením potřebným pro matematické výpočty, z nichž teprve vyplynou pro praxi užitečné důsledky. ...Každý pokrok geofyziky jest přirozeně i pokrokem geologie."

LITERATURA

1. Hašek V., Veselý I., Woznica L.: Uplatnění povrchové geofyziky při inženýrskogeologickém průzkumu přehradních profilů. Sborník geologických věd, 1981, č. 15
2. Karouz M., Kněz J.: Geoelektrické metody průzkumu. Skriptum UK Praha, 1977
3. Láska V.: Význam geofyziky v hornictví. Báňský svět, 1924, č. 2
4. Mašín J., Válek R.: Přehled užití geofyziky pro geology. SPN Praha 1963
5. Müller K.: Základy hornické geofyziky. Skriptum VŠB Ostrava, 1981

PŘEHLED GEOPHYKÁLNÍCH METOD

Metody :	Fyzikální vlastnosti:	Měřené veličiny :	Jednotky :	Přístroje :	Použití :
gravimetrické	objemová hmotnost	1.a 2.derivace tíhového potenciálu	m/s^2 E (Eötvös)	gravimetry, torzní váhy, gradientometry	vyhledávání geologických struktur, průzkum reliéfu podloží, základní tektonika v hornictví
geomagnetické	magnetická susceptibilita, remanentní magnetizace	složky magnetického pole, Z, H, T, D, I, remanentní magnetizace, magnetická susceptibilita	A/m, T, Wb, °	magnetické váhy, teodolity, protonové magnetometry, kapametry	v rudní a nerudní prospekci, geologické mapování, v hornictví
geoelektrické	měrný odpor, polarizovatelnost, poměrná permitivita, dif.-absorpční a ox.-redukční potenciály	zdánlivý měrný odpor, přirozené proudy, intenzita elektromagn.pole, fázový posun atd.	Ω m, V, A, °	ohmmetry, kompenzátory, autokompenzátory, střídavé můstky, indukční rámy	reliéf podloží, tektonika, vyhledávání ložisek rudních a nerudných surovin, geologické mapování, geotechnika, inž.geologie, hydrogeologie, hornictví
seismické	moduly pružnosti, Poissonovo číslo, pružná vodivost, přirozené impulsy	rychlost, časové rozdíly, četnost SA impulsů	m/s, s, imp/min	seismické a seismoakustické aparatury	reliéf podloží, struktury, tektonika, geotechnika, inž.geologie, hydrogeologie, hornictví
radionuklidové	ionizující záření, emanační schopnost, koeficient emanace	expoziční příkon, koncentrace emanace, expozice	A/kg, $1/s \cdot m^3$, s^{-1}	radiometry, dozimetry, emanometry	vyhledávání ložisek radioaktivních surovin, poruchy, hornictví
geotermické	měrná tepelná vodivost	teploty, tepelný tok	$^{\circ}C, W/m^2$, K	termometry	geologické mapování, hydrogeologie, vyhledávání ložisek nerostných surovin, hornictví