
ÚVOD

Geologie, stejně jako ostatní přírodovědní disciplíny, prochází v posledních desetiletích bouřlivým vývojem. Geologové po dvě století pečlivě shromažďovali veškeré poznatky o geologické stavbě kontinentů. Jejich výzkumy však měly převážně popisný charakter a byly zaměřeny na geologické objekty nalézající se na zemském povrchu. Pro současnou geologii je typická mimořádná šíře výzkumů, úzká návaznost na chemii a fyziku, aplikace metod matematické statistiky. Rozvoj moderní přístrojové techniky laboratorní i terénní umožnil nahromadění značného množství podkladů, zejména geofyzikálních a geochemických. Kolem Země krouží družice — fyzikální laboratoře nepřetržitě registrující fyzikální pole Země a snímající její povrch. Fyzikálními metodami byla zkoumána stavba Měsíce, z jeho povrchu byly odebrány vzorky hornin, byly vyslány sondy k dalším nebeským tělesům.

V posledních desetiletích geologové zahájili intenzivní výzkum dna oceánů, tvořících dvě třetiny zemského povrchu. Získané poznatky byly překvapující a byly shrnuty do hypotézy o rozšiřování a zanikání mořského dna. Ve světle nových geologických výzkumů se planeta Země jeví jako unikátní objekt se složitým vývojem probíhajícím v období 4 500 miliónů let a pokračujícím i v současné době.

Moderní geolog již nevystačí s převážně popisným přístupem ke studiu geologických jevů. Musí se naučit chápat jejich fyzikálně chemickou podstatu, což mu umožní zařadit vedle přístupu popisného i přístup analytický. Jedním z hlavních cílů této knihy je přispět k rozvoji fyzikálního myšlení zejména posluchačů geologie a tak jim usnadnit studium složitých fyzikálně chemických procesů utvářejících v minulosti i současnosti planetu Zemi.

Velké úkoly jsou v současné době kladeny před aplikovanou geologii při zajišťování surovinových a energetických zdrojů. Za uplynulých 30 let bylo vytěženo více surovin než za celou předchozí historii lidstva, těžba surovin stále roste podle exponenciálního zákona. Ani tento růst však nestačí krýt rostoucí spotřebu energetických a ostatních surovin; proto hovoříme o energetické a surovinové krizi. Významné úkoly zajišťuje aplikovaná geologie i ve stavebnictví, při inženýrskogeologické přípravě staveb všech druhů, např. jaderných elektráren a dálnic, a při zajišťování zásob vody pro průmysl a pro obyvatelstvo.

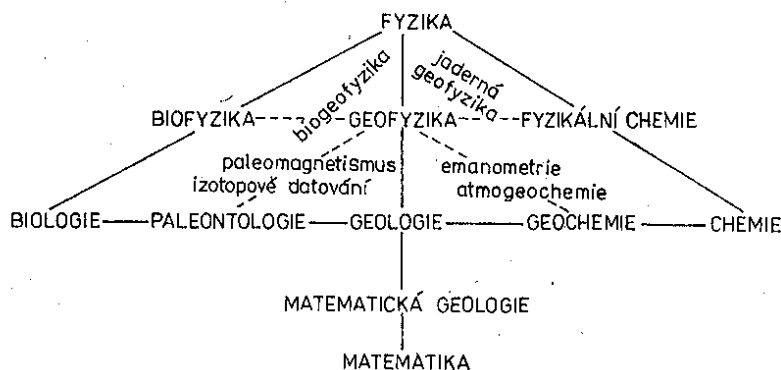
Rostoucí úkoly může aplikovaná geologie řešit pouze při maximálním využití možností geofyzikálních metod. Metody užití geofyziky byly v posledních letech pronikavě modernizovány a zdokonaleny. Došlo k podstatnému zvýšení přesnosti geofyzikálních aparatur, k jejich miniaturizaci a ke zjednodušení obsluhy. Rozvoj výpočetní techniky umožnil automatizaci zpracování naměřených dat a interpretačních postupů. Tím podstatně stouply možnosti geofyzikálních metod zejména při vyhledávání skrytých hluboko uložených ložisek užitečných nerostů, při podrobném zkoumání základových poměrů pro velké stavby a při řešení celé řady dalších problémů.

Tato kniha je určena především posluchačům prvních ročníků geologic-

kých oborů: geochemie, základní a ložisková geologie, inženýrská geologie a hydrogeologie, užitá geofyzika. Jejím úkolem je seznámit čtenáře s principy metod užitých geofyziky a s jejich možnostmi při řešení konkrétních geologických problémů. Kniha je napsána tak, aby k jejímu studiu postačily znalosti středoškolské fyziky a matematiky. Může tedy posloužit nejen studentům geologie, ale i zájemcům ze široké geologické praxe.

Geofyzika je vědní disciplína nalézající se na rozhraní mezi geologií a fyzikou (tab. 1). Je založena na studiu různých fyzikálních polí existujících v zemském tělese a jeho okolí. Tato pole mohou být přirozená nebo umělá, globální, regionální či lokální, mohou být měřena přístroji umístěnými na zemském povrchu, ve vrtu či báňském díle, v letadle, na družici, na hladině oceánu. Studium hlubinné stavby zemského tělesa se zabývá fyzika Země, k řešení konkrétních úkolů geologické praxe přispívá *užitá geofyzika*.

Tabulka 1. Postavení geofyziky v přírodních vědách



Geofyzikální metody se vyvíjely postupně v závislosti na pokroku fyziky a na konkrétních potřebách geologie. Hlavním úkolem geologie vždy bylo vyhledávat nerostné suroviny pro potřeby průmyslu a zemědělství (ložisková geologie); později vyvstal naléhavý úkol zajišťovat dostatečné zásoby vody pro obyvatelstvo a průmysl (hydrogeologie), dále zkoumat geologické poměry v místech zakládání velkých staveb (inženýrská geologie). V poslední době, kdy byla zjištěna těsná spojitost mezi hlubinnou stavbou zemského tělesa a rozmístěním ložisek nerostných surovin, jsou organizovány rozsáhlé geologické výzkumy, jejichž úkolem je zkoumat hlubinnou stavbu Země.

Jednou ze základních metod geologického výzkumu je *geologické mapování*, jehož výsledkem jsou geologické mapy zobrazující přípovrchovou geologickou stavbu. Výrazný pokrok zaznamenala geologie na počátku minulého století po vzniku *paleontologie* (obor na rozhraní geologie a biologie), která podle zkamenělin vyhynulých organismů určuje stáří jednotlivých souvrství a studuje podmínky života v různých etapách vývoje naší planety. Tak mohla vzniknout *geologie historická a stratigrafická*. Pro studium hornin (*petrologii*) mělo v polovině 19. století velký význam zavedení mikroskopie horninových výbrusů (průsvitných destiček),

tj. studium hornin v procházejícím světle umožňující určit jejich mineralogické složení. Pro pokrok geologie byl důležitý i rozvoj moderních metod analytické chemie, zejména radiochemie, dále studium horninových vzorků za vysokých tlaků a teplot umožňující studovat genezi jednotlivých horninových typů.

Klasické geologické mapování je velmi úspěšné v terénech, kde jsou mapované horniny uloženy bezprostředně na zemském povrchu nebo pod tenkou vrstvou neznepevrčených hornin. Jsou-li však překryty mocnější vrstvou mladších usazených hornin, mohou být přímo zjištěny pouze pomocí nákladných vrtů. Některé typy hornin však lze úspěšně sledovat nepřímými geofyzikálními metodami. Zvláště výhodné je *letecké geofyzikální mapování*, které za příznivých geologických podmínek poskytne ve velmi krátkém čase důležité údaje o geologické stavbě zkoumaného území, ve výjimečných případech i o rozmístění ložisek užitečných nerostů.

Paleontologie poskytuje velmi spolehlivé údaje o stáří jednotlivých geologických útvarů. Úspěšná však může být pouze tenkrát, jsou-li ve zkoumaném útvaru nalezeny zkameněliny vyhynulých organismů. V opačném případě mohou informace o stáří hornin poskytnout *izotopové metody datování*, jejichž princip je založen na využití zákona o rozpadu radioaktivních prvků. V některých případech můžeme stáří hornin určit *paleomagnetickými metodami*, které analyzují „magnetický záznam“ obsažený ve vzorku horniny od doby jejího vzniku.

Moderní petrologické metody jsou schopny precizně charakterizovat jednotlivé horninové vzorky. V geologické praxi se však často setkáváme s nutností charakterizovat rozsáhlý horninový komplex, např. při geologickém vyhodnocování vrtů. Jedná-li se o mělké vrty, je na zemský povrch dopravováno vrtné jádro, takže geolog má k dispozici vzorky hornin v souvislém sloupci podél celého vrtu. Z vrtného jádra pak vybírá vzorky na petrografické určení, na chemické analýzy, ke studiu fyzikálně mechanických vlastností atp. Užitá geofyzika má k dispozici tzv. *karotážní metody*, které mohou přímo ve vrtu souvisle zaznamenat řadu pro geologa důležitých parametrů, jako je např. hustota hornin, magnetická susceptibilita, vlhkost, pórovitost, obsah sledovaných chemických prvků a další parametry. Význam karotážních metod je prvořadý u hlubokých vrtů, zejména při vyhledávání ložisek ropy a plynu, kdy se vrtá bezjádrové a kdy převážná část geologických informací se zjišťuje karotážním měřením.

Metod užitých geofyziky je celá řada (tab. 2); jejich počátky můžeme nalézt v dávné minulosti, některé se vyvíjely po celá staletí zprvu nezávisle na geologii. O užití geofyziky jako samostatném geologickém oboru však můžeme hovořit teprve od počátku dvacátého století. Zvláště prudký rozvoj zaznamenala v posledních desetiletích v souvislosti s rozvojem moderní přístrojové a výpočetní techniky.

Nejstarší geofyzikální metodou je *seismologie*, která zkoumá pole seismických (elastických) vln vznikajících při zemětřesení. Primitivní zařízení zjišťující intenzitu zemětřesení existovalo ve staré Číně již 2 000 let před naším letopočtem. Systematický výzkum zemětřesení však byl zahájen přibližně v polovině minulého století, kdy byly budovány první seismologické stanice. V současné době existuje mezinárodní seismologická služba, do níž jsou zapojeny stovky seismologických observatoří. Analýzou seismických záznamů (seismogramů) mohou geofyzikové přesně určit polohu center, v nichž zemětřesení vznikají (hypocentrum — skutečná poloha, epicentrum — průmět na zemský povrch). Každodenně je zaznamenána řada zemětřesení; jejich epicentra jsou na zemské kouli rozložena v souvislých pásech, v nichž v současné době dochází k tektonickým procesům. Analýzou seismogramů byly také určeny tzv. *geosféry* rozdělující zemskou kůru podle rychlosti šíření seismických vln na zemskou kůru, plášť a jádro.

Tabulka 2. Přehled geofyzikálních metod, symboly a jednotky

Metody	Hlavní měřené a sledované veličiny	Jednotky
gravimetrické	tíhové zrychlení hustota	metr za sekundu na druhou ($m\ s^{-2}$) kilogram na krychlový metr ($kg\ m^{-3}$)
magnetometrické	intenzita magnetického pole magnetická indukce magnetická objemová susceptibilita magnetizace	ampér na metr ($A\ m^{-1}$) tesla (T) ampér na metr ($A\ m^{-1}$)
geoelektrické	napětí elektrický proud měrný odpor měrná vodivost polarizovatelnost intenzita magnetického pole	volt (V) ampér (A) ohm metr ($\Omega\ m$) siemens na metr ($S\ m^{-1}$) procenta (%) ampér na metr ($A\ m^{-1}$)
radiometrické	aktivita měrná aktivita koncentrace radioaktivních prvků v látce v hornině v plynu	becquerel (Bq) becquerel na kilogram ($Bq\ kg^{-1}$) becquerel na metr krychlový ($Bq\ m^{-3}$), becquerel na kilogram ($Bq\ kg^{-1}$) procenta (%) becquerel na liter ($Bq\ l^{-1}$)
seismické	rychlost šíření elastických vln modul pružnosti v tahu (Youngův) Poissonovo číslo	metr za sekundu ($m\ s^{-1}$) pascal (Pa) —
geotermické	teplota geotermický gradient měrná tepelná vodivost hustota tepelného toku	Celsiův stupeň ($^{\circ}C$) Celsiův stupeň na metr ($^{\circ}C\ m^{-1}$) watt na metr a kelvin ($W\ m^{-1}\ K^{-1}$) watt na metr čtverečný ($W\ m^{-2}$)

Ze seismologie se ve dvacátých letech našeho století vyvinula *průzkumná seismika*. Zdroji elastických vln jsou v průzkumné seismice výbuchy trhavin nebo vibrátory. Seismické paprsky se na hranicích prostředí s různými elastickými vlastnostmi odrážejí (reflexní seismika) a lámou (refrakční seismika), na zemském povrchu jsou registrovány a podrobně analyzovány. Jestliže známe rychlost šíření seismických vln v horninách a čas, který seismický paprsek potřeboval k uběhnutí dráhy od bodu výbuchu (či od vibrátoru) ke geologickému rozhraní v zemském nitru a zpět na zemský povrch, získáme poměrně přesné informace o geometrických tvarech a hloubkách geologických rozhraní, tj. údaje, které musíme znát např. při vyhledávání ložisek ropy. Průzkumná seismika se uplatňuje i při vyhledávání ložisek uhlí a dalších surovin, v inženýrské geologii a hydrogeologii. Čím větší hloubky zkoumáme, tím je průzkumná seismika nákladnější. Je však nesrovnatelně levnější než hluboké vrty (na ložiskách ropy hloubka vrtů běžně dosahuje 5 km), které proto musí být lokalizovány až podle výsledků seismických měření. V průzkumné seismice jsou plně využity možnosti moderní elektroniky a výpočetní techniky; podklady získané v terénu pojezdovými laboratořemi se zpracovávají ve výpočetních centrech na výkonných počítačích.

Další poměrně stará geofyzikální metoda je *magnetometrie*. Její geologická aplikace je založena na schopnosti hornin magnetizovat se v magnetickém poli Země. Magnetická stříška, základ kompasu, byla známa již kolem roku 2600 před naším letopočtem v Číně. V Evropě byl primitivní magnetický kompas znám koncem 12. století našeho letopočtu. Kolumbus používal kompas k navigaci při svých objevných mořeplavbách. V roce 1492, kdy objevil Ameriku, zjistil při plavbě západním směrem existenci *magnetické deklinace* (úhel mezi geografickým a magnetickým poledníkem). Od roku 1640 používali Švédové kompas k vyhledávání ložisek železa tvořených převážně magnetitem. O magnetometrii jako o průzkumné geofyzikální metodě však můžeme hovořit teprve od počátku tohoto století, kdy A. Schmidt zkonstruoval magnetické polní váhy. Na sklonku třicátých let A. Logačev vyvinul a zavedl do praxe přístroj na měření magnetického pole Země z letadla. V současné době má magnetometrie k dispozici moderní, přesné a snadno ovladatelné aparatury, jimiž lze měřit na zemském povrchu, z letadel, družic, na lodích, ve vrtech i v podzemí.

Podle rozložení magnetického pole lze mapovat geologická souvrství tvořená horninami se zvýšenou magnetizací a vyhledávat ložiska užitečných nerostů obsahující magnetické minerály.

Magnetometrie významně přispívá i ke studiu vnitřní stavby Země. Tak například sama existence zemského magnetického pole svědčí o tom, že v jádru Země musí docházet k nepřetržitému pohybu hmot s vysokou vodivostí. Vzhledem k vysokým teplotám uvnitř Země nemůže být zemské těleso namagnetizováno, za zdroj zemského magnetického pole je považováno přirozené dynamo s vlastním buzením. Magnetometrie také dokumentuje vývoj dna ve světových oceánech, lokalizuje středooceánské rifty, v nichž dochází k rozšiřování mořského dna a ke vzniku nové zemské kůry.

Geofyzikální metoda *gravimetrie* je založena na studiu zemské tíže, podle jejíchž změn na zemském povrchu určuje rozložení geologických objektů pod zemským povrchem. Gravimetrie se vyvíjela postupně od konce šestnáctého století, kdy Galileo Galilei studoval volný pád. Zjistil, že všechna tělesa, (nezávisle na hmotnosti) padají rychlostí $v = g \cdot t$ a za čas t urazí dráhu $s = (g \cdot t^2)/2$. Veličina g (přibližně rovna $9,827 \text{ ms}^{-2}$) je nejčastěji nazývána *zemské tíhové zrychlení*. O sto let později Christian Huygens určil tíhové zrychlení pomocí kyvadla a Isaac Newton formuloval zákon o vzájemné přitažlivosti těles. V polovině osmnáctého století objevil Bouguer závislost zemské tíže na rozdělení hmot pod zemským povrchem

a Clairaut matematicky vyjádřil závislost tvaru Země na zemském tíhovém zrychlení. V devatenáctém století se gravimetrií zabývali především geodeti v souvislosti s problematikou přesné triangulace a nivelace.

K uplatnění gravimetrie v geologii dochází teprve na přelomu devatenáctého a dvacátého století, kdy Sterneck vypracoval metodiku přesných kyvadlových měření tíhového zrychlení a Eotvös zkonstruoval gravitační torzní váhy. Ve dvacátých letech měřil Vening Meinesz tíhové zrychlení v oblasti oceánů v okolí ostrovních oblouků pomocí kyvadel umístěných v ponorce. Rozmach aplikace gravimetrie v geologii však začíná až v padesátých letech, kdy byly vyvinuty vysoce přesné gravimetry. Gravimetrie se uplatňuje hlavně při vyhledávání ložisek ropy a plynu, při ohraničování sedimentárních pánví, v nichž se ložiska mohou nalézat, za příznivých podmínek při lokalizaci ropných struktur. Dále se gravimetrie uplatňuje při regionálních geologických výzkumech, např. při sestavování strukturálně tektonických schémat v rudních oblastech.

Významné informace poskytuje gravimetrie i o hlubinné stavbě zemského tělesa. Tak např. z hodnoty tíhového zrychlení vyplývá, že průměrná hustota Země dosahuje $5,52 \text{ g cm}^{-3}$, což je hodnota dvakrát vyšší než hustota hornin ve svrchní části zemské kůry. Hustota v zemském jádru pak musí být ještě podstatně vyšší, předpokládá se 15 g cm^{-3} .

Velmi početná je skupina *geoelektrických metod* využívajících přirozená i umělá geoelektrická pole. Přirozená elektrická polarizace rudních těles byla známa již v první polovině minulého století. Na možnost jejího využití v rudní prospekci bylo poukázáno na sklonku minulého století. V roce 1912 vyvinul Schlumberger *geoelektrickou odporovou metodu* založenou na modifikovaném Ohmově zákoně. Odporová metoda byla několik desetiletí hlavní geoelektrickou metodou. Ve třicátých letech byly do praxe zavedeny *elektromagnetické metody* využívající umělá harmonická pole. V současné době existuje několik desítek geoelektrických metod, jimiž se měří na zemském povrchu, v podzemí, ve vrtech, z letadel a lodí. Použití geoelektrických metod je velmi rozmanité, neboť poskytují cenné údaje při vyhledávání všech typů surovin, v inženýrské geologii a hydrogeologii. Pro studium hlubinné stavby zemského tělesa je zvláště významná *magnetotelurická metoda* určující rozložení vodivosti hornin do hloubek prvních stovek kilometrů.

Radionuklidové geofyzikální metody vznikly teprve ve dvacátém století po objevení radioaktivity Becquerelem (1896). Jsou založeny na měření přirozené nebo uměle vzbuzené radioaktivity. Poskytují bezprostřední informace o látkovém složení hornin. Proto jsou velmi blízké geochemii. Studium přirozené radioaktivity hornin se na počátku tohoto století zabývali Rutheford a Holmes. Poukázali na to, že při radioaktivním rozpadu nestabilních prvků dochází mj. k uvolňování tepelné energie. Radioaktivní rozpad je v současné době považován za hlavní zdroj tepelné energie v zemském tělese. Dále upozornili na možnost využití zákona rozpadu radioaktivních prvků k určování absolutního stáří hornin.

V první polovině našeho století se vyvíjely především *radiometrické metody* využívající přirozenou radioaktivitu hornin. Jejich rychlý rozvoj byl podmíněn přímým použitím při vyhledávání, průzkumu a úpravě uranových rud, základní suroviny pro získávání jaderné energie. Radiometrické metody však mají daleko širší použití: uplatňují se při geologickém mapování, řešení strukturálně tektonických problémů a při vyhledávání ložisek neradioaktivních surovin.

Od počátku padesátých let se intenzivně rozvíjejí *metody jaderné geofyziky* založené na měření uměle vzbuzené radioaktivity hornin. Pomocí těchto metod můžeme určit hustotu, pórovitost a vlhkost hornin, koncentraci některých prvků v horninách a další parametry. Tyto metody mohou do značné míry nahradit

laboratorní chemické analýzy; potřebné údaje poskytují velmi rychle např. ve formě souvislého záznamu podél vrty. Uplatňují se jako hlavní prostředek k intenzifikaci průzkumných prací, tj. k jejich podstatnému zlevnění a zrychlení.

Konečnou fází každé geologickoprůzkumné akce je ověření geologických předpokladů technickými pracemi, nejčastěji vrty. Ty mohou mít hloubku od prvních desítek metrů až po několik kilometrů. Geologické vyhodnocení vrtů je velice náročná a odpovědná činnost, často znesnadňovaná neúplným výnosem jádra. Některé hluboké vrty, zvláště na ložiskách ropy, jsou vrtány bezjádrově. V tom případě je nutné informaci o geologických útvarech zastižených vrtem získat nepřímo prostřednictvím geofyzikálních měření.

Cílem *geofyzikálního měření ve vrtech*, nazývaného též *karotáž*, je stanovení fyzikálních vlastností hornin zastižených vrtem a zjištění technického stavu vrty. Karotáž je velmi mladá geofyzikální disciplína: prvá karotážní měření se uskutečnila ve dvacátých letech na ložiskách ropy ve Francii. Po druhé světové válce se karotáž široce rozvinula, postupně začala využívat principy všech základních geofyzikálních metod, zejména geoelektriky, magnetometrie, seismiky a v posledních letech metod jaderné geofyziky. Speciální karotážní metody poskytují údaje o technickém stavu vrty, např. o jeho sklonu, směru, průměru a další.

Karotážní metody, ve srovnání s metodami povrchové geofyziky, mají tu přednost, že měřicí element přichází do bezprostředního styku s horninami, jejichž fyzikální parametry zkoumáme. Získané údaje jsou proto velmi přesné a mohou být využity k určení těch horninových (petrofyzikálních) parametrů, které nás zajímají. Například na ložiskách ropy to jsou kolektorské vlastnosti hornin (pórovitost, nasycení ropou), na rudních ložiskách vodivost rud, jejich chemické složení a další.

Údaje získané karotážním měřením jsou velmi významné pro interpretaci výsledků povrchových geofyzikálních měření. Z karotážních záznamů získáme spolehlivé údaje o fyzikálních vlastnostech všech hornin zastižených vrtem, což nám umožní jednoznačnou interpretaci geofyzikálních anomálií zjištěných povrchovým měřením.

Studium fyzikálních vlastností hornin se v posledních letech vyvinulo v samostatnou disciplínu, nejčastěji nazývanou *petrofyzika*. Fyzikálním parametrem charakterizujícím různé typy hornin a jejich vzájemným souvislostem je věnována druhá kapitola.