

III. Geochemická dynamika pláště

Zúrodňování vyčerpaných polí

PETR JAKEŠ

Na začátku století při studiu jednoho z ničivých zemětřesení ve Skopje objevil Andrija Mohorovičić nehluboko pod povrchem Země (zhruba 35 km) rozhraní – nespojitost v rychlosti šíření seizmických vln. Od této hranice směrem dolů se seizmické vlny zpravidla šíří rychleji než nad ní. Část Země pod Mohorovičićovou diskontinuitou se nazývá plášť, nad touto hranicí je to kůra.

Kůra přirůstá, plášť pracuje

Z čeho je složena kůra, lze odvodit z pozorování hornin na povrchu Země. Plášť a jádro jsou přímému pozorování nepřístupné, a proto se o jejich složení vedou diskuse. Analogie mezi železnými meteority

SLOVNÍČEK

akrece – narůstání hmotnosti tělesa gravitačním přitahováním okolní hmoty

eklogit – označuje se tak hornina čedičového, bazaltického složení, jejíž mineralogické složení odpovídající velkým hloubkám je granát – pyroxen; neobsahuje žádnou, a to ani chemicky vázanou vodu; podle některých autorů jsou eklogity v plášti hojné; Anderson definuje a pojmenovává charakteristickou horninu pláště jako „piclogite“ proto, aby zdůraznil přítomnost pyrolitu (tedy ultramafické horniny podobné peridotitu) a eklogitu

eutektická směs – směs dvou látek, které se vzájemně nemísí a nevytvářejí při krystalizaci sloučeninu

kimberlity – vyvřelá hornina obsahující malé množství SiO_2 , vysoké množství MgO a často i diamanty

litofilní prvky – skupina prvků tvořících horninotvorné nerosty (např. O, Si, Zr, Fe, F, Cl, Al, Li aj.)

mafické minerály – minerály železa a hořčíku

peridotit – horninový typ charakteristický pro plášť; liší se podle toho, zda se vyskytuje v malých nebo větších hloubkách; peridotit s plagioklasem anebo s amfibolem je charakteristický pro nejsvrchnější části pláště, zatímco peridotit se spinelem a pyroxeny je charakteristický pro hlubší části svrchního pláště, v nejhlubších částech pláště pak se vyskytuje peridotit granátický

ultrabazické horniny – vyvřelé horniny obsahující méně než 44 % SiO_2

ultramafické horniny – vyvřelé horniny složené takřka výhradně z tmavých minerálů (např. olivínu, pyroxenu, biotitu, dunitu aj.)

refraktorní prvky – zbytkové prvky, viz dále

siderofilní prvky – kovové prvky s minimálními atomovými objemy (Fe, Co, Ni, kovy skupiny platiny aj.); Goldschmidt dokonce rozdělil prvky, podle chování v meteoritech, na siderofilní s afinitou k železu, chalkofilní s afinitou k síře a litofilní, tedy takové, které se koncentrují do kůry a křemičitanových minerálů; podle chování prvků v kondenzaci z plynu o složení sluneční mlhoviny lze chemické prvky anebo jednoduché komponenty rozdělit na refraktorní (např. Ca, Al, Ti, Zr anebo platinové kovy), běžné silikátové nerefraktorní a netěkavé elementy (např. Si, Mg) a prvky těkavé (např. O, S, In, Se)

a jádrem Země byla zřejmá již dávno (viz rámeček na s. 84), vážná diskuse o složení pláště však začala až po druhé světové válce. Nejednodušším řešením mělo být ověření Mohorovičićovy diskontinuity vrtem, ale raně poválečné nadšení pro vědu a zbožná přání geologů předběhly technický vývoj. Velkolepý program navrtat Mohorovičićovu diskontinuitu (Projekt Mohole) neuspěl. Následoval mezinárodní program „Svrchní plášť“, který dospěl k závěru téměř triviálnímu: procesy odehrávající se v plášti se odrážejí v zemské kůře. O něco později se již všeobecně přijímalo, že kůra vzniká na úkor pláště. Celý tento rezervoár se často označuje jako silikátová část Země. Nitro Země se dosud diferencuje a kontinentální kůra přirůstá. Je to zřejmé z geologických map, na kterých jsou jádra kontinentů obklopena mladšími útvary, i z toho, že eroze by při intenzitě, kterou známe z geologického záznamu posledních 600 milionů let, snesla do moří veškerou hmotu kontinentů za pouhých 1,6 miliardy let.

Jak je tedy možné, že po 4,6 miliardy let geologické historie Země plášť ještě „pracuje“? Vznikají sopky, pohybuje se oceánská kůra, vrásní se pohoří. To všechno je práce, ke které je třeba energie. Přitom je zřejmé, že se vyčerpává zásoba tepla, které vzniklo při akreci, že i obsah radioaktivních prvků zákonitě klesá. Některé prvky, např. draslík, uran, thorium anebo rubidium, jsou koncentrovány v kůře. Studium izotopických poměrů v horninách kůry a pláště, např. izotopů neodymu, naznačuje přinejmenším třicetiprocentní přepracování pláště, zřejmě však bude ještě vyšší. Zkušenost napovídá, že jednou přetavený materiál, ochuzený o lehce tavitelnou složku, se podruhé taví jen obtížně. Jak je tedy možné, že Země dosud pracuje, že je dynamická?

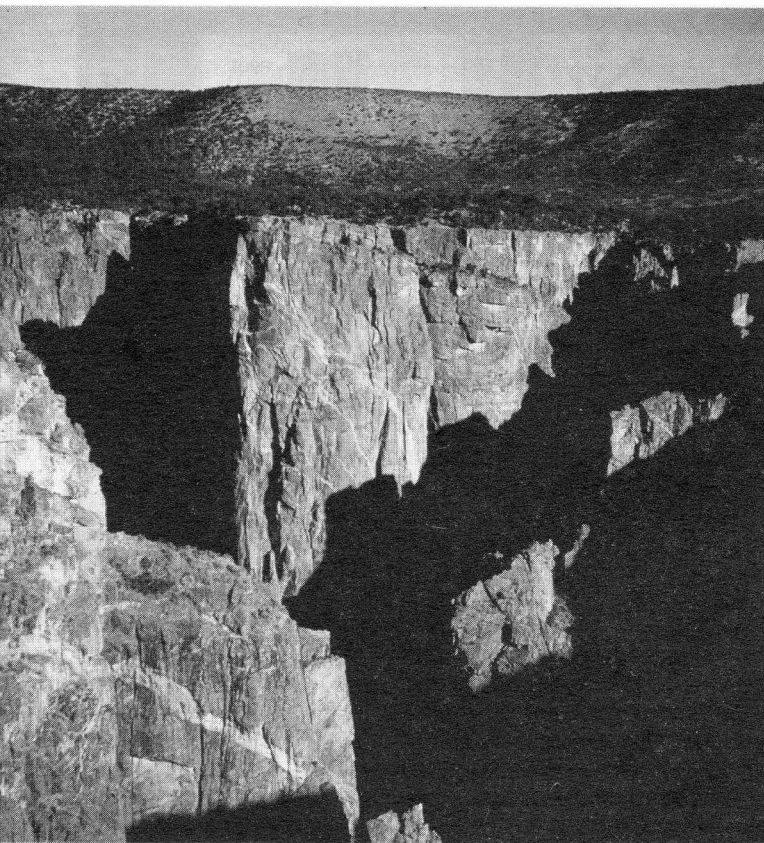
Na tomto místě čtenář očekává, že vyloučíme vliv jiných energetických zdrojů, než Země samotné. Uvidíme později, že interakce mezi kůrou a pláštěm, a zejména interakce složek v kůře, energeticky poháněné Sluncem, dynamiku pláště ovlivňují.

Hranice mezi jednotlivými slupkami Země představují buď fázová rozhraní (mají stejné chemické složení, mění se složení mineralogické) – anebo změny chemické. Guttenbergova nespojitost v hloubce 2 900 km, tedy hranice mezi pláštěm a jádrem, je zcela evidentně příkladem hranice chemické: už od třicátých let, od dob Goldschmidových, bylo jádro Země na základě analogie s meteority pokládáno za slitinu železa a niklu.

Z čeho Země vznikla

Také diskuse o povaze Mohorovičićovy nespojitosti se opírala o studium meteoritů, avšak měla širší kontext, protože se týkala nejen celkového složení Země, ale i způsobu, jak a z čeho Země vznikla. Primitivní (nediferencované) meteority (chondrity) sloužily jako jeden z modelů zdrojů Země. Druhým modelem byly meteority diferencované (achondrity), které jsou čedičové. Jestliže jsou zdrojem pro vznik Země achondrity, pak je celá Země čedičová a Mohorovičićova diskontinuita představuje pouze změnu fázovou. Nad Mohorovičićovou diskontinuitou i pod ní je chemicky stejný materiál, který se liší jen mineralogicky (pod diskontinuitou by byly hustší minerály, např. pyroxen a granát, nad diskontinuitou minerály lehčí, olivín, pyroxen, živce).

Promovaný geolog Petr Jakeš, PhD., (*1940) studoval Přírodovědeckou fakultu UK a Australskou národní univerzitu. Na PřF UK v Praze se zabývá geochemií a geologií.



Black Canyon na řece Gunnison v americkém státě Colorado je dlouhý asi 16 km, dosahuje hloubky od 570 do 750 m, v nejužším místě jsou jeho římsy od sebe vzdáleny jen 400 m a okraje dna pouhých 12 m. Přestože celý monumentální útvar působí dojmem tektonického zlomu, literatura uvádí, že tento nejužší a nejtemnější kaňon Spojených států vytvořila řeka Gunnison. Útvar má statut národní památky (national monument) a je chráněn od roku 1933. Řeka nese jméno vojenského inženýra a objevitele Johna W. Gunnisona (1812 – 1853). K nejvýznamnějším útvarům kaňonu patří Malovaná stěna, jejíž barvu tvoří vedle výrazných žil v hornině i pestré porosty lišejníků. Snímek © Stanislav Vaněk

Jestliže jsou zdrojem Země chondrity, které ve srovnání s průměrným složením zemské kůry obsahují např. málo křemíku, hodně hořčíku a železa, pak je kůra žulového i čedičového složení. Rozdíl v rychlosti šíření seizmických vln je výsledkem změny chemického složení na Mohorovičičově diskontinuitě: pod diskontinuitou se vyskytují ultramafické horniny, nad diskontinuitou bazalty a granity. Omezení, která vyplývala z rychlosti šíření seizmických vln, vyhovovala oběma modelům (chondritovému i achondritovému), ovšem jenom pro nejsvrchnější část pláště.

Geologické důkazy, jakými jsou uzavřeniny ve vulkanických horninách, ale i experimenty, při kterých se podařilo částečným tavením ultrabazického materiálu vytvořit čediče, naznačily, že ultrabazické horniny jsou nevhodnějšími kandidáty. Existuje dokonce představa pláště jako ultramafické horniny (pyrolitu), která je schopna při částečném tavení „poskytnout“ čedič. Tím se dostalo Mohorovičičově rozhraní chemické interpretace, a podle této představy je Země chondritová.

To má však další důsledky. V chondritovém modelu je rozdělení na kůru, plášť, ale i jádro Země výsledkem procesů, které se odehrály při akreci anebo těsně po akreci Země z jednoho typu materiálu, jenž je svým složením blízký chondritům, anebo materiálu, který nalézáme v kometách či interplanetárních částicích. V případě achondritového složení je nutné „posunout“ diferenciaci primárního materiálu mimo Zemi někam do minulosti a akceptovat akreci

heterogenní, ve které Zemi tvoří již jednou přepracovaný materiál. Není obtížné si to představit, protože disk hmoty obklopující rané Slunce byl dozajista nehomogenní. Nejdříve tedy vznikalo redukované kovové jádro, a potom se na ně „nabaloval“ oxidovaný křemičitanový, navíc silně diferencovaný materiál. Je pozoruhodné, že se soudobé odhady složení svrchního pláště vzájemně mnoho neliší. Je to výsledek nejen podobných postupů, ale i jakéhosi paralelního myšlení lidí téže generace na místech vedoucích dobře vybavených geochemických laboratořích, redaktorů význačných indexovaných časopisů či členů grantových agentur.

Chondritový model

Dynamika Země se lépe vysvětluje chondritovým modelem – dochází k neustálé diferenciaci. Těžší hmoty klesají, lehčí stoupají. I takový proces musí být energeticky dotován, gravitační nerovnováhy se neustále obnovují a je pravděpodobné, že jsou poháněny tepelně. Bariéra poznávání byla prolomena přijetím konceptu dynamické nestatické Země, konvekce v plášti, a posléze deskové tektoniky. V takovém modelu je plášť tvořen materiálem, který se plasticky pohybuje, tedy proudí, a hranice mezi jádrem a pláštěm není jen hranicí chemickou. Je hranicí redukované a oxidované Země, ale je i termálním rozhraním, na němž dochází k oxidačně-redukčním reakcím. Zčásti by tedy bylo možné takovou nerovnováhou vysvětlit i dynamiku pláště. Jádro Země zřejmě pracuje z podobných příčin. Krom toho musí být v jádře Země přítomna směs železa a prvku odlehčujícího jádro. Kandidáty tohoto odlehčení jsou křemík, síra, méně pravděpodobně kyslík. Experimenty R. Boehlera ukazují, že železo a oxid železa netvoří za vysokých teplot vhodnou eutektickou taveninu.

Pokud však byl plášť studován na základě produktů jeho diferenciaci, tedy vulkanických hornin, zjišťovalo se, že větší část pláště je primárně ochuzena. Svrchní plášť ve srovnání s meteority (chondrity) obsahuje malé množství těkavých látek, nejspíš proto, že vznikl v horkém stavu. Obsahuje i malé množství kovových prvků s minimálními atomovými objemy, a to zřejmě proto, že se tyto prvky staly součástí zemského jádra v době jeho vzniku. Svrchní plášť je také ochuzen o prvky tvořící horninové nerosty, které daly vznik kontinentální kůře v procesu mnohonásobné rafinace a „sbírání smetany“.

Svrchní plášť je ve srovnání s kosmickým materiálem, chondrity, v principu suchý, neobsahuje větší množství vody ani ostatních těkavých součástí. Podle jednoho názoru vznikla kůra ve velmi rychlém ději v začátcích diferenciaci Země, který se označuje (protože zároveň vznikala atmosféra) jako „big burp“ – velké říhnutí. V jiných, pravděpodobně realističtějších modelech je plášť Země zdrojem kůry a zemská kůra se na účet pláště v průběhu geologického vývoje planety periodicky tvoří. Velké litofilní a refraktorní (zbytkové) prvky představují lehký „plovoucí“ materiál, který se jen ojediněle, zato s výrazným efektem vrací zpět do pláště. Je přirozené, že těkavé složky (např. i voda) jsou koncentrovány v litosféře.

O složení spodního pláště se vedou spory. Předpokládá se principiálně stejné složení chemické, avšak jiná (vysokotlaká) mineralogie.

Nerovnováha mezi pláštěm a jádrem

Mezi pláštěm a jádrem je nerovnováha. Obsahy kovových prvků v plášti, ač ochuzeny, jsou vyšší, než kdyby kovová složka Země (jádro) a složka silikáto-

vá (plášť a kůra) dosáhly chemické rovnováhy. Distribuční koeficienty prvků nedovolují, aby silikátová Země měla tak vysoké obsahy kovových prvků. Tato nerovnováha se vysvětluje několika způsoby: Nejdříve vzniklo kovové jádro – tedy shlukl se nejdříve redukovaný materiál, a teprve posléze materiál oxidovaný – silikátový. Jiným vysvětlením může být, že teprve potom, co byla větší část Země v pevném stavu, byl na ni nalepen kometární materiál, který obsahoval siderofilní prvky a také těkavé prvky a složky (např. vodu, sloučeniny uhlíku). Tento materiál se promísil jen s nejsvrchnějšími částmi pláště, byl zdrojem vody na povrchu Země i prvků atmosféry.

Koncentrace radioaktivních prvků, které produkují teplo (uranu, thoria a draslíku), je nejvyšší v nejvyšších patrech zemské kůry. Kdyby totiž tyto prvky byly ve stejných množstvích ve spodní kůře, popřípadě i v plášti, byl by tepelný tok Země o mnoho vyšší. Soudí se, že kůra, která dosahuje necelé čtyři desítky procenta celkového objemu Země, obsahuje více než 60 procent celkového množství radioaktivních prvků (uranu, thoria a draslíku). Totéž platí i o některých litofilních prvcích (rubidiu, ceziu, bariu) a o vodě.

Znamená to, že plášť Země je z velké části ochuzen o prvky, které tvoří kůru, a že je z větší části „suchý“. Je nepravděpodobné, že takový plášť lze roztavit. Proto se mluví o plášti primitivním, který neprodělal žádnou změnu, o plášti ochuzeném a obohaceném, o plášti úrodném či neúrodném, podle toho, zda je schopen produkovat při natavení vulkanické horniny.

Zúrodnování pláště

Experimentální petrologie, geochemické argumenty i geotektonické modely Země nabízejí řešení, jak neúrodný plášť učinit úrodným (kterak plášť „přihnojit“), jak do pláště opětovně dostávat vodu a litofilní prvky. Za vyšších tlaků totiž voda i další těkavé součástky snižují teplotu počátku tavení pevného materiálu pláště a umožňují tak existenci taveniny za „realistických teplot“, tedy teplot, které existují v Zemi v místech normálního anebo jen nepatrně zvýšeného teplotního spádu (gradientu). V tomto nejjednodušším modelu by proto mělo stačit, aby se do suchého pláště dostávala voda. V těch místech, kde je voda a příznivý spád teplot, se může materiál pláště (horniny) částečně tavit.

Konzistentním modelem je stále zúrodnování pláště v modelu deskové tektoniky. Přijměme zatím toto tvrzení bez vysvětlování příčin. V modelu deskové tektoniky vznikají na středoocéánských hřbetech na úkor materiálu pláště čediče. Při styku horkých čedičů s vodou na dně oceánů do nich vniká voda. Oceánské dno se pohybuje směrem ke kontinentu a při ponořování oceánské desky pod jinou oceánskou desku, popřípadě pod desku kontinentální, je do části pláště zatažena voda. Ponořující se materiál prodělavá fázové změny, při kterých se voda uvolňuje do nadložního pláště, způsobuje tavení a vznikají vulkány v ostrovních obloucích či na okrajích kontinentů. Část tohoto materiálu se podél podsunutí desek dostává až do hloubek tzv. přechodné zóny, kde se rozptyluje do stran nebo, podle některých autorů, poklesává ještě hlouběji do pláště.

Takový model zjednodušuje chování pláště v průběhu geologického času. Plášť je zřejmě obohacován a zúrodnován periodicky, a to nejen v subdukčních zónách.

Z petrologie a izotopického studia uzavřením v plášťových horninách je zřejmé, že k takovým pro-

cesům dochází. Recyklovaný materiál se po milionech (i miliardách) let objevuje na zemském povrchu v podobě uzavřením v sopečných horninách, které pocházejí z hlubší části svrchního pláště v diamantonosných kimberlitech. Diamanty vyskytující se v peridotitech, které představují původní plášťový materiál, a diamanty v eklogitech, které zřejmě představují recyklovaný, v minulosti korový materiál, se izotopicky liší.

Diamanty eklogitů mají „povrchové poměry“ izotopů uhlíku, diamanty peridotitů obsahují uhlík, který povrchovým procesem neprošel. Ze studia diamantů vyplývá, že výsledkem zúrodnování není jen vulkanizmus v ostrovních obloucích, ale že mechanismus podsouvání litosférických desek zřejmě zúrodnuje celý plášť.

V plášti, který je nehomogenní (obsahuje vodu nebo těkavé či radioaktivní prvky), je snadné vytvořit hustotní i tepelné nerovnováhy, gravitační nestability. Základním mechanismem vzniku vyvrěných hornin ve svrchním plášti je snížení tlaku bez odvodu tepla pevných, popřípadě částečně natavených hornin. Snížení tlaku (např. výstup v důsledku gravitační nestability) bez výměny tepla s okolím (mechanismus velmi nepravděpodobný, pokud by se přenos tepla děl pouze vedením) může vést k částečnému tavení, které samo o sobě v menších hloubkách snižuje měrnou hmotnost pláště.

Udržuje procesy v plášti energie Slunce?

Geochemická dynamika Země (to je geofyzologie) je tedy způsobována periodickým zúrodnováním pláště. Vede k tavení nejen v důsledku přítomnosti vody, ale také proto, že byly do pláště znovu zavlečeny horninotvorné a radioaktivní prvky. Jistě lze vymyslet scénář, ve kterém je ubývání vnitřní energie Země v průběhu geologické historie kompenzováno zvyšováním množství vody potřebného k tavení hornin (mluvíme o změnách v desítnách procent anebo v procentech). Lze vymyslet i scénář vzájemných souvislostí mezi chladnoucí Zemí a kontinuální tvorbou magmatu.

Klíčem k takovým úvahám a scénářům bude voda a společně s ní i období, kdy Země měla pevnou, poměrně chladnou povrchovou kůrku (pozdní akrece). Měkké přistávání pomalu se nabalujícího materiálu chondritového složení (např. uhlíkaté chondrity mají několik procent vody i uhlík), který je označován jako pozdní kometární příspěvek, a jeho promíchání s nejsvrchnějšími vrstvami pláště řeší řadu otázek. Například přebytek siderofilních prvků v plášti, existenci vody na původně horké Zemi i přítomnost základních stavebních součástí organického života.

Na tomto místě je i důvod ke spekulaci: Je příčinou vnikání vody do oceánské dna a možného zúrodnování pláště existence vody ve třech skupenstvích (pára, voda, led) a oscilace kolem trojného bodu H_2O ?

Je-li tomu tak, není těžké si představit, že správná vzdálenost dráhy Země od Slunce a energie Slunce, která tuto rovnováhu udržuje, jsou příčinou konvekce v plášti i příčinou procesů, které ženou vnitřní dynamiku Země.

Pozn. lektora: Tato představa je fyzikálně těžko pochopitelná, protože při konvekci se odvádí teplo z nitra Země k jejímu povrchu. Motorem konvekce tedy mohou být procesy, při nichž se uvolňuje teplo na úkor vnitřní energie (viz rozpad radioaktivních prvků), nebo mechanické energie Země jako celku (pokles gravitační potenciální energie či energie rotace). □