

Vážení čtenáři, podtitul tohoto čísla Živy by mohl znít „Na hranici živého a neživého“. Po předchozích monotematických číslech o vodě, ohni a větru jsme, v souladu již se starořeckou představou živlů, elementů tvořících přírodu, tentokrát vsadili na geologické procesy, jejich projevy, vliv a interakci horninového prostředí se živou přírodou. Jsou základní hybnou silou Země, přímo

ovlivňují veškerou biosféru, a to pozitivně i negativně. Možná si někteří z vás ještě před otevřením Živy položí otázku, proč se věnujeme převážně geologii a co může mít společného třeba desková tektonika nebo vulkanismus se vznikem a existencí života. Odpovědi se skrývají hned v několika článcích, stejně jako celá řada zajímavostí, např. jak ze živého vzniká kámen a naopak, jak hornina nebo půda podléhá biologické

činnosti, zda mohou žít organismy nejen v půdě, ale i v horninách, a mnoho dalšího. Pokusíme se nastínit, jak důležité je studovat živou i neživou složku prostředí k pochopení vzniku, vývoje i současnosti života na Zemi. A zazní také otázky k existenci života mimo naši planetu. Nastíněná témata navíc zpestřují historická ohlédnutí za geologickými fenomény, mýty a některými osobnostmi. Bez pohledu na Zemi jako na dynamickou a v čase se měnící planetu bychom jen stěží mohli chápat současné procesy a třeba i predikovat budoucnost. Přejeme vám příjemné čtení.

Martin Košťák a redakce

Jiří Žák

Země, zatím ještě „živá“ planeta

Na slavné fotografii pořízené v r. 1990 vesmírnou sondou Voyager 1 z neuvěřitelné vzdálenosti 6 miliard kilometrů vypadá naše planeta Země jako malá bleděmodrá tečka (v anglickém originále pale blue dot), zcela ztracená v obrovském vesmírném prostoru (obr. 1). Slavný americký astronom Carl Sagan, který navrhl pořízení této fotografie ještě předtím, než sonda zmizí v hlubinách vesmíru, asi netušil, že se tak podaří vystihnout i současnou geologickou fázi vývoje Země: ukazuje totiž Zemi jako velmi specifický objekt oproti ostatním tělesům Sluneční soustavy a okolní vesmírné hmotě. Planetu, která bývá často označována jako „živá“, neboť má na povrchu podmínky velmi příhodné pro rozvoj života, tedy optimální rozpětí teplot, dostatečné množství vody a kyslíkem bohatou atmosféru. Termín živá planeta však můžeme chápat i jako obraz geologických procesů, které sice probíhají uvnitř Země, ale do značné míry určují, jak bude vypadat zemský povrch.

Planetární tělesa v naší Sluneční soustavě prodělala po svém vzniku ze solární nebuly (sluneční mlhoviny) různý vývoj v závislosti na své velikosti, složení, teplotě a vzdálenosti od Slunce jakožto vnějšího zdroje tepla. Díky optimální kombinaci všech těchto podmínek je tak Země v současné době jako jediná opravdu živá. Ostatní planety měly tu „smůlu“, že jsou příliš blízko Slunci, nebo naopak příliš daleko. A nejen to. Země se totiž právě nachází v jakémsi ideálním období „středního věku“, kdy jsou její procesy, včetně těch povrchových, řízeny režimem deskové tektoniky, tedy pohyby litosférických desek. To vše vyvolává zásadní otázky, nejen v jakém režimu fungovala Země v období před deskovou tektonikou, ale i jak by mohl její vývoj vypadat v geologické budoucnosti, až se „motor“ deskové tektoniky zastaví. Moderní geologie umí i na takové obtížné otázky najít poměrně uspokojivé odpovědi. Pojďme se tedy podívat na vývoj Země v dlouhých časových měřítkách.

Spojení „malá bleděmodrá tečka“, současná Země při pohledu z okraje Sluneční soustavy, vlastně velmi výstižně popisuje termální stav planety, a to nejen chladný

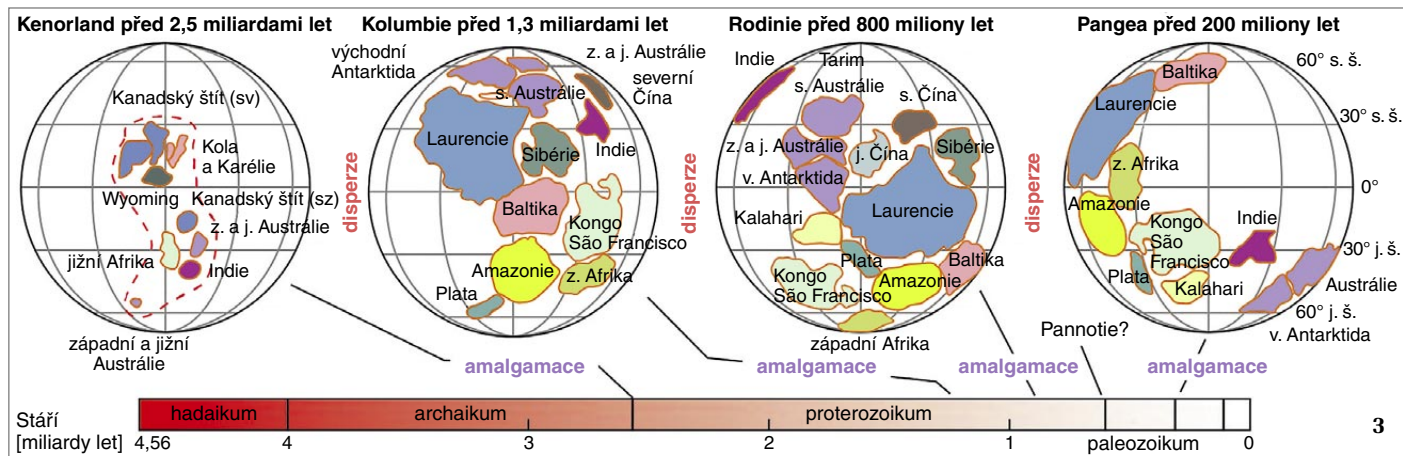
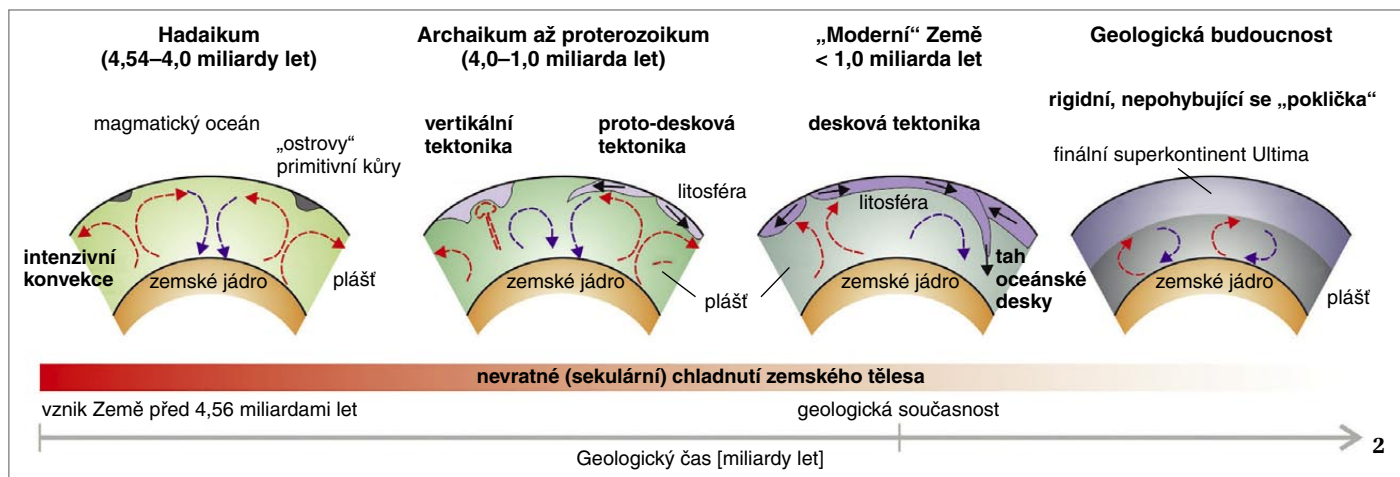
zemský povrch s vhodnými teplotně-tlakovými podmínkami pro přítomnost vody v kapalném skupenství, ale i chladnou a pevnou vnější vrstvu Země, litosféru, tvořenou zemskou kůrou a nejsvrchnější částí zemského pláště. Litosféru mají i jiné silikátové planety s pevným povrchem, ale Země, jako dosud jediná známá planeta, má litosféru rozdělenou na řadu samostatných bloků (litosférických desek), které se vůči sobě významně pohybují v horizontálním směru (obr. 2). Příčina tohoto pohybu spočívá ve výměně tepla a hmoty mezi zemským nitrem a povrchem Země, kdy horká hmota z hlubokého zemského pláště stoupá díky své nižší hustotě k povrchu (např. v místě středooceánských hřbetů nebo tzv. horkých skvrn uprostřed desek) a zde se ochlazuje, zatímco chladná litosféra, tvořící oceánské dno dále od středooceánského hřbetu, se zanořuje v místě hlubokomořských příkopů v subdukčních zónách zpět do pláště (procesem označovaným jako subdukce) a může dokonce klepat až k vnějšímu okraji zemského jádra. Projevy a důsledky pohybů litosférických desek jsou na zemském povrchu zcela nepřehlédnutelné, jen z těch nejefektivnějších



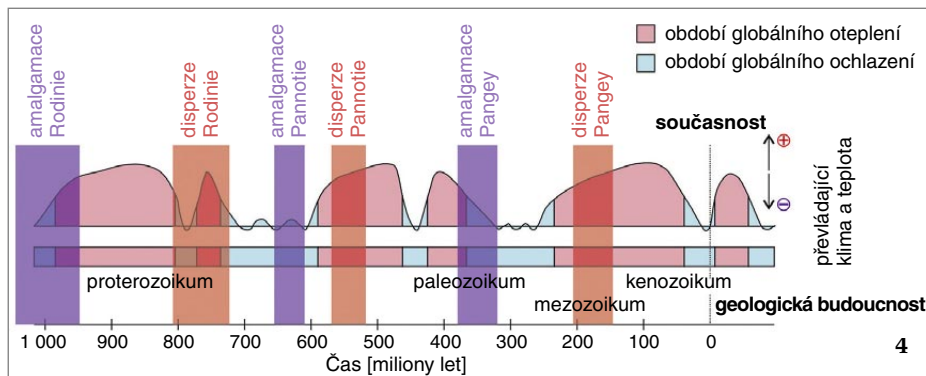
by sem patřily např. sopečné erupce, zemětřesení a pokles, nebo naopak výzdvih a zbrzdění (zvrásnění) zemského povrchu. Hluboké prolákliny jako třeba Údolí smrti a Mrtvé moře, nebo naopak velká pásemná pohoří (orogény) jako Alpy a Himálaj jsou všechny dílem těchto pohybů. V prvním případě vzniklé extrémním natahováním a ztenčením litosféry, které může dokonce vést až k rozpadu kontinentů a vytvoření nového oceánu mezi nimi, nebo v tom druhém díky uzavírání oceánů mezi přibližujícími se kontinenty (i celé oceány mohou zmizet v zemském plášti) a jejich následnou kolizí. Litosférické desky tak svými pohyby neustále ovlivňují naše životy, ať již negativně v podobě přírodních katastrof, nebo pozitivně třeba vznikem ložisek nerostných surovin, která pak můžeme těžit.

Desková tektonika

Současná „živá“ Země je tedy ve své podstatě planetární tepelný stroj, jenž pohybem litosférických desek neustále ztrácí vnitřní teplo, které má jednak od doby svého vzniku (reziduální teplo) a jednak díky rozpadu radioaktivních prvků uvnitř zemského tělesa. Objev tohoto principu, který vešel ve známost jako teorie globální deskové tektoniky, a jeho široké přijetí vědeckou komunitou od 60. let 20. století způsobily v geologii vědeckou revoluci, podobně jako ji způsobila Darwinova evoluční teorie v biologii nebo Einsteinova teorie relativity



- 1 Pohled na Zemi z okraje Sluneční soustavy pořízený americkou vesmírnou sondou Voyager 1. Wikimedia Commons, v souladu s podmínkami použití
- 2 Schematické znázornění vývoje tektonických režimů planety Země v čase během jejího postupného chladnutí. Volně upraveno podle: R. J. Stern (2008)
- 3 Paleogeografické rekonstrukce superkontinentů v čase. Volně upraveno podle: R. N. Mitchell a kol. (2021)
- 4 Vztah cyklu superkontinentů a vývoje globálního klimatu. Upraveno podle: R. D. Nance (2022). Všechny orig. J. Žák



ve fyzice a kosmologii. Hlavně ale vedly k nebyvalému rozmachu geologie v několika následných dekádách, a tím i nashromáždění obrovského množství dat o složení, vnitřní stavbě a vývoji planety Země v čase. Desková tektonika se dostala do školních učebnic jako všeobecně přijímané paradigma a důležitá součást lidského poznání neživé, ale i živé přírody kolem nás a zejména pod našima nohama.

Ačkoli základní mechanismy, příčiny a důsledky pohybu litosférických desek jsou „klasickou“ teorií deskové tektoniky uspokojivě vysvětleny, celá řada původních konceptů musela být pod tlakem nových poznatků výrazně pozměněna, nebo dokonce úplně opuštěna. Jedním z takových konceptů byla i představa jednoduché plášťové konvekce předpokládající existenci konvekčních buněk, tedy uzavřených okruhů, v nichž cirkuluje plášťová hmota pod litosférickými deskami – nad horkou, vzestupnou částí konvekční buňky se litosférické desky pohybují směrem od sebe (divergentní pohyb), kdežto nad chladnou,

sestupnou částí směrem k sobě (konvergentní pohyb). Ve své době představovala konvekce v zemském plášti velmi elegantní vysvětlení pohybu litosférických desek nad ní a tak i přetrvává na obrázcích v řadě učebnic geologie dodnes. S představou plášťové konvekce, jakožto jakéhosi vnitřního zemského motoru pohybu litosférických desek, úzce souvisí i Wilsonův cyklus, nazvaný podle svého objevitele, kanadského geologa J. Tuzo Wilsona. Již v r. 1966 postuloval hypotézu cyklického, v čase poměrně pravidelného vývoje divergentních a konvergentních pohybů kontinentů a oceánů na Zemi. Wilsonův cyklus začíná rozpadem kontinentu a pokračuje vznikem a rozpínáním nového oceánu až do fáze, kdy se tento divergentní pohyb zvrátí a přejde do deskové konvergence. Při ní se oceán začne naopak zmenšovat, až zcela zanikne subdukcí v plášti, a následnou kolizí se opět spojí okraje rozpadlého kontinentu. Vše se pak navrátí do původního stavu a za několik desítek až stovek milionů let se může znovu opakovat.

Cyklus superkontinentů

I přes nespornou eleganci se tyto modely v nedávné době ukázaly jako příliš zjednodušující, planeta Země je oproti původním předpokladům mnohem složitější „organismus“. V současnosti máme k dispozici stovky tisíc údajů o stáří vyvřelých hornin z celého světa, a to díky analytickým metodám, které umožňují určit stáří krystalizace magmatu pomocí radioaktivních izotopů někdy až s neuvěřitelnou přesností. Statistické analýzy těchto velkých souborů dat, spolu s dalšími geologickými informacemi, jako je např. korelace podobných hornin stejného stáří nyní se nacházejících na různých kontinentech nebo paleomagnetismus, odhalily jakési rytmy nebo pulzy v geologické historii Země, kdy se zhruba každých 500–600 milionů let (téměř) všechna kontinentální hmota na zemském povrchu spojila do jednoho velkého celku – superkontinentu (obr. 3 a 4). Všeobecně známý je superkontinent Pangea, který vznikl na konci prvohor (před asi 400–300 miliony let) a jehož existenci odhalil německý geofyzik

a meteorolog Alfréd Wegener již v r. 1912, tedy dávno před formulací teorie deskové tektoniky. Dnešní znalosti nejen potvrdily, že se Wegener nemýlil, ale ukazují i na vznik dalších superkontinentů, ukrytých ještě hlouběji v geologické minulosti a samozřejmě dnes už také neexistujících: hypotetická Pannotie před 540–600 miliony let, Rodinie před zhruba 750 miliony až 1,3 miliardami let a Kolumbie před 1,8–2,1 miliardami let. Vedou se velké vědecké diskuze, zdali dokonce nemohly existovat superkontinenty i v raných fázích vývoje Země, označované tajemnými názvy jako Kenorland (před 2,5–2,7 miliardami let) a Vaalbara (před 2,8–3,6 miliardami let). Je zřejmé, že čím dále se pohybujeme proti proudu geologického času, tím jsou rekonstrukce jednotlivých superkontinentů obtížnější, neboť starší horniny mají vždy komplikovanější historii, byly vícekrát přeměněny, často přemístěny mladšími deskově-tektonickými pohyby tisíce kilometrů daleko od místa svého vzniku a začleněny do mladších geologických cyklů. Geologové tak často musejí pracovat s útržkovitým geologickým záznamem a s více variantami jejich původního paleogeografického uspořádání.

I tak má ale odhalení existence superkontinentů dalekosáhlé důsledky pro pochopení fungování naší „živé“ planety. Ukazuje, že se v geologické historii Země střídaly fáze deskové konvergence, tedy přibližování kontinentálních bloků, uzavírání oceánů mezi nimi a spojení do jednoho superkontinentu (amalgamace), s fázemi deskové divergence, tedy rozpadem superkontinentů na menší části, jejich oddalováním (disperzi) a otevíráním i rozšiřováním nových oceánů (obr. 3). Zatímco amalgamace je spojena se vznikem hlubokomořských příkopů a subdukčních zón (mizí v nich oceánská litosféra), pásemných pohoří a žulovým magmatismem (to se pak projevuje jako statistická maxima ve stáří hornin), disperze je spojena se vznikem pasivních kontinentálních okrajů (šelfů) a středo-oceánských hřbetů (místa rozšiřování mořského dna a tvorby nové oceánské kůry).

Střídání fází kontinentální amalgamace a disperze, cyklus superkontinentů, také ukazuje na komplikovanou a v čase se měnící vzájemnou interakci litosférických desek a zemského pláště, odlišnou od jednoduchého modelu konvekčních buněk pohybujících nadložní litosférou. Fáze amalgamace superkontinentů byly pravděpodobně řízeny tahem oceánských desek, které se zanořovaly hluboko do pláště, globálně tedy musel převažovat pohyb chladných hmot směrem k zemskému jádru (režim top-down). Po vytvoření superkontinentu naopak začal převažovat opačný pohyb hmot v zemském plášti, charakterizovaný vzestupným prouděním horké hmoty v podobě tzv. plášťových chocholů dokonce až z hranice jádra a pláště v hloubce kolem 2 900 km pod povrchem (režim bottom-up). Důležitou roli muselo rovněž hrát nahromadění tepla pod nově vzniklým superkontinentem, neboť po svém vzniku fungovaly superkontinenty jako jakési tepelné izolanty a pod nimi nahromaděné teplo unikající ze zemského nitra a s tím spojená magmatická aktivita pak výrazně přispěla k jejich rozpadu.



Cyklus superkontinentů měl pro vývoj Země řadu dalekosáhlých důsledků, povšimněme si alespoň těch nejzásadnějších. Jednak jsou to pohyby mořské hladiny – při fázi amalgamace (vzniku superkontinentu) vznikají dlouhé linie nových hlubokomořských příkopů, na nichž zanikají oceánské pánve zanořující se do pláště, vytvářejí se tedy negativní tvary zemského povrchu, které pojmuje velký objem mořské vody, což vede ke globálnímu poklesu hladiny světového oceánu. Naopak při fázi rozpadu superkontinentu roste při tvorbě nových oceánských pánví souhrnná délka středo-oceánských hřbetů, tedy pozitivních tvarů reliéfu mořského dna, což vede ke globálnímu zvýšení hladiny světového oceánu. Pohyby litosférických desek a to, v jaké části superkontinentálního cyklu se Země právě nachází, tak zásadně ovlivňují úroveň hladiny světového oceánu a zaplavování pevniny na šelfech na dlouhých časových škálách.

Analýzy velkého množství geologických, geochemických a paleontologických dat pak ukázaly i příčinnou souvislost mezi cyklem superkontinentů, globálními klimatickými změnami a vývojem biosféry (obr. 4). Základní principy lze opět shrnout takto: při fázi amalgamace dochází k poklesu hladiny světového oceánu a ústupu březní čáry směrem od pevniny (regrese), což má za následek zvýšené zvětrávání obnažených kontinentálních šelfů a vázání uhlíku, a tedy i oxidu uhličitého z atmosféry v usazeninách. Vznik superkontinentů byl v geologické minulosti Země doprovázen globálním ochlazením, které následně vedlo k poklesu biodiverzity, biotickým krizím a velkým vymíráním organismů. Naopak při rozpadu superkontinentů a jejich disperzi se na zemském povrchu, kromě zvýšení hladiny světového oceánu a zaplavování šelfů (transgrese), výrazně projevuje i zvýšená sopečná činnost díky přínosu tepla z velkých hloubek. V této fázi superkontinentálního cyklu často vznikají velké magmatické provincie, kdy jsou obrovské části zemského povrchu (až v řádu milionů km²) zality čedičovou lávou, výsledkem pak je nárůst obsahu sopečných plynů v atmosféře, včetně oxidu uhličitého, teplejší klima, a následně (na dlouhých časových škálách desítek milionů let) i nárůst biodiverzity.

5 až 7 Speciální horniny archaika: silně provrásněné a metamorfované tonalitové ruly (TTG) s hojnými tmavými uzavřeninami z oblasti kanadského štítu, stáří asi 2,7 miliardy let (obr. 5), páskované železné rudy (BIF) z oblasti kanadského štítu, stáří zhruba 2,7 miliardy let (6) a komatiit s protáhlými agregáty olivínu ukazujícími na rychlé zchlazení extrémně horké lávy, Finsko, stáří přibližně 2,8 miliardy let (7). Blíže v textu. Snímky J. Žáka, není-li uvedeno jinak

Tektonika rané Země

Poznání těchto velkých rytmů ve vývoji Země přineslo zcela nový náhled nejen na deskovou tektoniku a na složité interakce mezi pohyby litosférických desek, cirkulací hmot a tepla v zemském plášti a vývojem klimatu a biosféry na zemském povrchu, ale hlavně ještě více zdůraznilo význam otázek nastíněných v úvodu. Jak vypadala a fungovala Země v období před deskovou tektonikou a před nastartováním současného superkontinentálního cyklu? A jak bude Země vypadat v geologické budoucnosti?

Abychom se pokusili odpovědět na první otázku, je třeba nejprve zrekonstruovat, jak vypadala Země těsně po svém vzniku před více než 4,5 miliardami let. Pokud by nějaká vesmírná sonda pořídila fotografii z okraje Sluneční soustavy, Země by nejspíše zachytila jako výraznou oranžovou tečku, neboť po vzniku ze solární nebuly a hustotní diferenciaci na kovové jádro a silikátový plášť byl její povrch tvořen rozžhavenou lávou – magmatickým oceánem, ze kterého se postupným chladnutím vytvořila prvotní kůra. Ta se však do dnešní doby nezachovala, byla zcela přepracována při četných dopadech kosmických těles a hlavně pozdějšími pohyby litosférických desek. Proto z nejstaršího období vývoje Země, hadaika (před asi 4,6 až 4,4 miliardami let), máme pouze velmi kusé informace, z nichž nejvýznamnější jsou nálezy zrn minerálů zirkonu staré zhruba 4,3 miliardy let v mladších sedimentech v západní Austrálii a velmi malá oblast v Kanadě tvořená rulami starými přibližně 4 miliardy let. Jisté je, že původní zemská kůra byla mafická (složená z tmavých železnato-hořečnatých minerálů, většinou olivínu a pyroxenu), měla tedy složení zhruba



odpovídající čediči, vytavenému přímo ze zemského pláště. Tektonický režim na Zemi byl v hadaiku řízen velmi intenzivní plášťovou konvekci, veškeré pohyby hmot v zemském tělese se odehrávaly převážně ve vertikálním směru, a proto se tento režim často označuje jako vertikální tektonika (viz obr. 2).

Klíčovým přelomem na konci hadaika a na počátku následujícího období, archaika (před 4 až 2,5 miliardami let), byl pokles teploty zemského povrchu a vytvoření původního oceánu, a to jednak odplyněním (degazací) a kondenzací vodní páry ze zemského pláště a jednak jejím přínosem v podobě ledu kometami. Kontinenty jsou na rozdíl od primitivní mafické kůry a dnešního oceánského dna tvořeny převážně světlými (felzickými), křemen-živcovými horninami, např. žulou, a nemohly být tedy jednoduše vytaveny přímo z mafického zemského pláště. První zárodky kontinentální kůry tak nejspíše vznikaly až navrstvením mafických láv nad vzestupnými horkými proudy v plášti, které mohutnou sopečnou činností vytvořily izolované plošiny (plató) v původním oceánu se ztlustlou a hydratovanou kůrou na bázi. Tato kůra byla sice stále ještě mafická, ale již v sobě obsahovala mořskou vodu, a tak se mohla přetavit za vzniku primitivních

typů žul, v nichž ze světlých minerálů převažovaly sodnovápenaté živce, plagioklasy, a často obsahovaly pyroxen svědčící o krystalizaci za vysokých teplot. Voda tak byla nejen základní ingrediencí pro vznik života na Zemi, ale i pro vznik prvních zárodků kontinentů. Ostrůvky této primitivní kontinentální kůry se pravděpodobně postupně zvětšovaly a vytvářely zárodky, jádra budoucích větších kontinentů.

Kdy přesně došlo k přechodu od tohoto vertikálního tektonického režimu k dnešní deskové tektonice s chladnou litosférou a subdukci oceánských desek, je mezi geology předmětem intenzivní vědecké debaty a současné odhady se liší v řádu miliard let. Podle některých to bylo již před asi 4,3 miliardami let s předpokladem, že nejstarší zirkony musely vznikat v sopkách nad subdukčními zónami, podle jiných ale až před zhruba 800 miliony let, což je stáří nejstarších známých modrých břidlic z oblasti Aksu v Číně, tedy hornin vznikajících výhradně zanořováním chladných oceánských desek do zemského pláště (subdukci). Přechod mezi vertikální a deskovou tektonikou byl nejspíše postupný a odrážel celkové, sekulární chladnutí zemského tělesa. Pravděpodobně již na konci archaika, před asi 2,8–2,5 miliardami let fungovala jakási proto-desková tektonika,

kdy se jádra budoucích kontinentů (kratony) spojovala do větších celků (superkratonů), což již vyžaduje velké horizontální pohyby, kolize a zřejmě i subdukce horké oceánské litosféry mezi těmito kontinentálními bloky. Ta dále přinášela vodu a vodou bohaté sedimenty obohacené o litofilní prvky obsažené hlavně ve světlých felzických minerálech do pláště a tím urychlovala vznik žulových magmat a další kontinentální růst. O tom, že popsané přechodné období v historii Země bylo opravdu velmi speciální, máme důkazy v podobě hornin, které se v pozdějším geologickém záznamu již nevyskytují (nebo jen velmi vzácně). Jde třeba právě o primitivní granitoidy, souhrnně označované zkratkou TTG (Tonality-Trondhjemity-Granodiority, obr. 5), páskované železné rudy (BIF, Banded Iron Formations, obr. 6), které vznikaly cyklickým srážením oxidů železa v tehdejších oceánech, nebo rozsáhlé výlevy láv komatiitů (podle řeky Komati v jižní Africe, obr. 7), vysocehořecnatých hornin vytavených z pláště za velmi vysokých teplot.

Země v geologické budoucnosti

Odpověď na druhou otázku – jak bude Země vypadat v geologické budoucnosti – je ještě obtížnější, protože budoucnost nelze z principu předpovědět. Geologové však na základě znalosti vývoje Země od vzniku po současnost mohou provést alespoň jakýsi kvalifikovaný odhad pro její geologickou budoucnost. Pro blízkou budoucnost existují různé varianty pohybu kontinentů. Jestliže se nyní nacházíme zhruba v polovině superkontinentálního cyklu (300 milionů let od vzniku Pangey), lze předpokládat, že i za nějakých 300 milionů let vznikne další superkontinent, v jednom z modelů označovaný jako Amasia (spojení Ameriky a Asie). Kdyby dále pokračovalo sekulární chladnutí Země, litosféra by vychladla natolik, že vytvoří vnější, pevnou a nehybnou vrstvu, finální superkontinent Ultimu, podobně jako je tomu třeba na Venuši, a desková tektonika by se tak zcela zastavila. Je však pravděpodobné, že do tohoto stadia se Země ani nedostane, neboť bude více a více ohřívána a nakonec i za asi 7 miliard let zcela pohlčena zvětšujícím se Sluncem.

Pokud bychom si tedy z výše uvedených poznatků moderní geologie chtěli udělat nějaký závěr, Země je zatím stále ještě velmi živá planeta, ale z pohledu geologického, nebo spíše vesmírného, času bohužel již ne na moc dlouho. Abychom ale uklidnili všechny bojovníky za záchranu planety, o budoucnost Země se není nutné nijak obávat: tato malá bleďmodrá tečka bude spořádaně zrecyklována a stane se opět součástí koloběhu hmoty ve vesmíru. Otázku, jestli v té době už bude lidstvo zcela vyhynulé, nebo se bude snažit kolonizovat jiné planety a křížovat vesmírem jako kapitán Kirk na lodi Enterprise, pak můžeme přenechat futurologům a příznivcům žánru sci-fi.

Výzkum na téma vzniku superkontinentů v archaiku byl podpořen projektem Grantové agentury ČR (25-16420S).

Použitá literatura je uvedena na webové stránce Živa.

