



Složení atmosféry a podnebí v dávné minulosti Země: jak souvisí s pohyby litosférických desek? (diskuse)

Composition of atmosphere and the climate in ancient past of the Earth: what is the relation with movement of lithospheric plates? (a discussion)

Václav Procházka⁽¹⁾

Abstract: It has been documented in last decades that mean temperatures of the Earth's surface have been comparable with the actual ones throughout the most of geological history. During time of much lower solar luminosity this was possible only thanks to the much stronger greenhouse effect. That means, however, that temperatures were temporally as well as spatially much more homogenous. It is probably the main reason, why during the most of Precambrian such movements in lithosphere, which would be comparable with the present plate tectonics, did not exist, as they are caused mainly by unequal heating of the surface (according to recent findings – Kalenda & Neumann 2011, 2012). Thus the elevated tectonomagmatic activity during cold periods in the beginning of Proterozoic and in the upper Proterozoic was not the cause, but a consequence of changed atmosphere composition and weakened greenhouse effect.

Key words: paleoatmosphere, temperature variations, plate tectonics, ratcheting mechanism.

Abstrakt: V posledních desetiletích bylo doloženo, že průměrné teploty zemského povrchu byly po většinu geologické historie srovnatelné s dnešními, což bylo v době, kdy sluneční aktivita byla výrazně slabší, možné jen díky mnohem silnějšímu skleníkovému efektu. To ovšem znamená, že teploty byly časově i prostorově mnohem vyrovnanější. Jde zřejmě o hlavní důvod, proč po většinu prekambria neexistovaly pohyby litosféry srovnatelné s dnešní deskovou tektonikou, které jsou podle nedávných zjištění způsobeny hlavně nerovnoměrným ohřevem povrchu. Zvýšená tectonomagmatická aktivita v chladných obdobích na počátku proterozoika a ve svrchním proterozoiku tak nebyla příčinou, ale následkem změn složení atmosféry a oslabení skleníkového efektu.

Klíčová slova: paleoatmosféra, teplotní variace, desková tektonika, západkový mechanismus.

Úvod

Výzkum přírodního prostředí v geologické minulosti je zákonitým příspěvkem geologických věd k diskusím o současných ekologických otázkách. I když se často jednalo o podmínky mnohem extrémnější než kdykoliv za dobu existence člověka, některé reakce biosféry i neživé přírody na změny podmínek mohou být stále podobné.

Rekonstruovat teploty povrchu Země před stovkami miliónů nebo dokonce miliardami let není jednoduché. Zvláště to platí pro období zaujímající většinu geologické historie – prekambrium,

1) Česká geologie, Pštrossova 16, 11000 Praha 1, e-mail: vprochaska@seznam.cz

kdy byla malá biodiverzita a navíc šlo převážně o mikroorganismy. Výzkumy prekambriických uloženin, které jsou základem všech kontinentů, však již přinesly pozoruhodné množství poznatků. Důležité jsou hlavně velké formace co nejméně přeměněných sedimentů, jaké se nacházejí zejména v Austrálii, jižní Africe a dalších oblastech odkrytých starých štítů.

Tento článek v první části shrnuje podle literatury základní obrysy vývoje klimatu, jak vyplývají z geologického záznamu a z výpočtů sluneční aktivity, a postupnou oxidaci atmosféry, doloženou zejména geochemicky. Dále je diskutován vztah těchto jevů k vývoji tektonické aktivity Země, která mohla být ovlivněna podnebím mnohem více, než se většinou předpokládá.

„Paradox slabého Slunce“ a skleníkové plyny

Před 3,8 miliardami let dosahoval zářivý výkon Slunce jen asi 3/4 dnešní hodnoty. Hranici 80 % dnešní úrovně překročil asi před 2,8 miliardami let a 85 % před 2 miliardami let (Gough 1981). Při takto nízké sluneční aktivitě by dnešní množství skleníkových plynů v atmosféře nezabránilo poklesu teploty na celé planetě pod bod mrazu. Podle záznamu v horninách však po většinu prahor i starohor existoval kapalný oceán bez významné ledové pokrývky a stejně tak na pevninách jsou stopy po činnosti ledovců jen z určitých období.

Tento tzv. paradox mladého (slabého) Slunce má řešení v mnohem silnějším skleníkovém efektu. Jako vysvětlení se přímo nabízel oxid uhličitý, který způsobuje extrémní skleníkový efekt na Venuši. Parciální tlak CO_2 na Zemi podle některých autorů (Walker 1985) původně dosahoval až několika atmosfér a byly publikovány i názory o extrémní teplotě archaického oceánu (Karhu & Epstein 1986). Existují však pádné geochemické důkazy proti velmi vysokým teplotám i vysokému tlaku CO_2 v atmosféře. Především nic nenasvědčuje tomu, že by chemické zvětrávání hornin na povrchu bylo výrazně intenzivnější (Condie et al. 2001). Horká a díky CO_2 i kyselá voda by přitom musela rozpouštět většinu hornin mnohem rychleji.

Později byla rozvinuta teorie předpokládající podstatný, možná dominantní význam methanu jako skleníkového plynu po většinu prahor a možná i starohor. Možnou kombinací je řádově 0,1 % methanu a 0,X % CO_2 v atmosféře (Pavlov 2000) – vztaženo na současný tlak. A právě tlak představuje komplikaci. Geochemická data totiž dávají informaci hlavně o parciálním tlaku plynu, zatímco pro skleníkový efekt je podstatné celkové množství plynu nad určitou plochou. Pokud byl tedy celkový tlak vzduchu menší – což je pravděpodobné, protože v něm chyběl kyslík a zřejmě i dusík bylo méně – mohlo se množství plynu, jaké by v dnešní atmosféře představovalo až desítky procent, projevovat podstatně nižším parciálním tlakem, než by tomu bylo v současnosti.

Možnost nižšího tlaku vnáší do hry další skleníkový plyn – vodní páru. Její množství v atmosféře závisí hlavně na teplotě, což ovšem platí při daném tlaku. Pokud byl celkový tlak nižší, i množství vody v ovzduší bylo větší (při stejném parciálním tlaku vodní páry). Ta se stejně jako nyní projevovala nejen jako skleníkový plyn, ale i mohutnou oblačností – obojí přispívalo k časově i prostorově vyrovnanějším teplotám.

Vývoj prekambriické atmosféry a podnebí v čase

Z hlavních složek původní atmosféry zmizel do kosmického prostoru hlavně vodík a hélium. Brzy po vzniku Země však došlo i ke ztrátě těžších plynů. Svědčí o tom zejména nízký obsah vzácných plynů a dusíku. Zatímco ve Sluneční soustavě celkově naprosto převažuje ^{36}Ar nad ^{40}Ar (Anders & Grevesse 1989), v zemském ovzduší je výrazná dominance ^{40}Ar , který vzniká rozpadem draslíku ^{40}K . Podobná je situace u izotopů xenonu. Takto doloženou katastrofickou ztrátu většiny atmosféry

zřejmě způsobila srážka s velkou planetkou. V úvahu však přichází také sluneční vítr, který byl krátce po formování planet mnohem silnější.

Po této události tedy mohlo nastat období s nízkým tlakem atmosféry, v době vzniku oceánu (před více než 4 miliardami let – Kasting & Ono 2006 a odkazy tamtéž) se však v atmosféře ustálilo značné množství vodní páry. Vulkanismus také rychle dodával oxid uhličitý i dusík. Zpětný tok látek do pláště, srovnatelný s dnešní subdukcí, nemusel vůbec existovat. Velmi málo je zatím pro období prekambria prozkoumán další důležitý faktor – katastrofické dopady kosmických těles (lze však předpokládat, že největší impakty byly aspoň před vznikem deskové tektoniky významným spouštěčem vulkanické činnosti). Zatímco průměrná teplota povrchu mohla být srovnatelná se současnou, teplotní variace byly mnohem menší, vlivem skleníkového efektu i oblačnosti. V moři zřejmě dosáhla produkce methanu baktériemi díky anoxickému prostředí mnohem větší intenzity než v současnosti (Pavlov et al. 2000).

V horninách starých 2,7 až 2,9 miliardy let se objevují první pravděpodobné, i když ještě nejisté známky činnosti ledovců (Young et al. 1998). Možným vysvětlením je buď vznik organické mlhy z methanu ve vysoké atmosféře a následně vysoké albedo (Kasting a Ono, 2006 a odkazy tamtéž), nebo omezení mikrobiální produkce methanu, probíhající v redukčním prostředí, vlivem kyslíku.

První geochemické indicie nárůstu obsahu kyslíku v moři spadají do stejné doby. Železo, mangan a cer se v mořské i dešťové vodě více rozpouštějí v méně oxidovaném stavu, naopak molybden a uran jsou rozpustnější v oxidovanější formě. Před 2,9 až 2,7 miliardami let dochází k oxidaci molybdenu (Siebert et al. 2005) a lokálně i ceru (Khan et al. 1996), a především vznikají první páskované železné rudy bez vazby na vulkanismus, a sedimentární ložiska manganu. Dvojmocné železo a mangan byly v malé hloubce v oblastech s intenzivní fotosyntézou oxidovány a srážely se za vzniku mohutných akumulací. Množství volného kyslíku v oceánu i v atmosféře však mimo kyslíkové „oázy“ v moři zůstávalo zřejmě zanedbatelné.

Před asi 2,45 miliardami let se O_2 rozšířil v mělké vodě i v atmosféře (viz Reddy & Evans 2009 a odkazy tamtéž, Holland 2006, Roy 2006). Vznikají největší ložiska páskovaných železných rud, manganu, cer je běžně oxidován a na povrchu přestávají být stabilní pyrit a uraninit, dříve se vyskytující jako valouny ve slepencích. Změna chování izotopů síry zřejmě svědčí o zeslabení UV záření, tedy vzniku ozónové vrstvy. To vše ale bylo možné při parciálním tlaku kyslíku ještě nesrovnatelně nižším než dnes. Podle práce Holland (2006) teprve asi před 1,8 miliardami let parciální tlak O_2 v ovzduší dosáhl 0,02 až 0,04 bar.

V období zhruba před 2,4 až 2,2 miliardami let došlo k několika zaledněním, zřejmě mnohem rozsáhlejším než v pleistocenních ledových dobách (Reddy & Evans 2009 a odkazy tamtéž; Kasting & Ono 2006). Souvislost se změnami v atmosféře je nepochybná. Příkladím se k názoru, že zeslabení skleníkového efektu způsobila hlavně oxidace methanu (Kasting & Ono 2006). Za opětovné oteplení byl nejvíce odpovědný oxid uhličitý, protože při rozsáhlém zalednění klesla téměř na nulu jeho spotřeba jak při zvětrávání silikátových hornin na pevnině, tak i v oceánu, takže se díky vulkanismu mohl rychle hromadit v ovzduší (Walker et al. 1981).

V době ochlazení na konci prahor (archaika) i počátku starohor (proterozoika) dočasně zesílila tektonická aktivita (možná šlo o vůbec první pohyby připomínající dnešní deskovou tektoniku) i magmatismus.

Po ústupu ledovců následovalo více než miliardu let trvající poměrně klidné období. Předpokládá se, že oceán byl stabilně rozvrstven a ve větší hloubce anoxický, což vysvětluje vznik mocných sedimentárních ložisek sulfidů (Canfield 1998). Lze si těžko představit, že by v takovém období fungovala desková tektonika – aspoň srovnatelná s pozdějším přeskupováním pevnin a oceánů, které se jen za posledních 600 miliónů let podílelo na mnoha zvratech v provzdušnění mořských vod.

Asi před 750 milióny let došlo k velmi rozsáhlému zalednění. Často uváděná je představa Země jako „sněhové koule“, podle níž dokonce zamrzl celý povrch (Hoffman et al. 1998). Příčinou byla zřejmě zvýšená spotřeba CO₂ (a rovněž produkce O₂ a následně další propad koncentrace CH₄) díky rozvoji mnohobuněčných řas, který předcházal vzniku prvních mnohobuněčných živočichů (tzv. ediacarské fauny).

V tomto období zřejmě teprve začala fungovat desková tektonika v dnešní podobě (viz např. Kachlík & Chlupáč 1996), což umožnilo kompenzovat a někdy i překonat vulkanický přínos CO₂ transportem uhlíku z mořského dna do pláště při subdukci. Na počátku mladších prvohor (asi před 350 mil. let) již mohlo být složení atmosféry srovnatelné s dnešním (Holland 2006).

Diskuse: vztah klimatu a složení atmosféry k deskové tektonice

Podle stávající teorie deskové tektoniky probíhají endogenní geologické procesy téměř nezávisle na exogenních (které jsou však endogenními nesporně výrazně ovlivněny). V souladu s tím byly zmíněné oxidační změny v atmosféře interpretovány jako důsledek zvýšené tektonomagmatické aktivity, například vytvořením velké plochy šelfů s intenzivním pohřbíváním uhlíku (které by vedlo k úbytku CO₂) díky rozpínání oceánského dna (Roy 2006, Reddy & Evans 2009). Časové rozlišení našich poznatků o prekambriu však zdaleka není takové, aby se dalo přímo prokázat, která ze zásadních změn (zda endogenní, či exogenní) nastala dříve. Zde bude prezentována hypotéza, že podnebí vždy významně ovlivňovalo globální tektoniku, a to tak, že větší teplotní kontrasty (v prostoru i v čase) podporují pohyby litosférických desek (Kalenda et al. 2011, 2012). Nejdříve je však na místě ohlédnutí do historie.

Od 50. let, kdy byly podány jasné důkazy o kontinentálním driftu navrženém již Wegenerem (Wegener 1912), se rozvíjí teorie zastávaná dnes velkou částí odborné veřejnosti a vysvětlující pohyb litosférických desek konvekčním prouděním v plášti, které by využívalo jako zdroj tepla hlavně radioaktivní rozpad (Holmes 1939). Dosud však nebyly vyřešeny rozpory, z nichž některé provázejí tuto teorii v podstatě od začátku (viz též Belousov 1970). Vedle četných geometrických problémů jde o nejasný vztah příčiny a následku (zóny vstupu/výstupu proudů by se musely pohybovat podobně jako unášené desky), nízký obsah radioaktivních prvků v zemském plášti a velmi pravděpodobně i v jádře, nebo výsledky seismické tomografie zpochybňující existenci vzestupného proudu pod Středoatlantským hřbetem (Anderson & Dziewonski 1984). Tyto rozpory způsobily, že se až donedávna rozvíjela teorie rozpínání Země, která popírá existenci subdukce (Rajlich 2004). Mezi další problémy v teorii konvekce (nezmiňované ani zastánci rozpínání) patří subdukce oceánského hřbetu Juan de Fuca pod severoamerický kontinent. Nicméně jiné vysvětlení pohybů desek dlouho nebylo k dispozici.

Prosazování teorie konvekčních proudů vedlo k tomu, že jí byly přizpůsobeny i některé zásadní předpoklady, zvláště představy o geochemickém vývoji zemského pláště (viz Carlson 2003). To se týká i otázky, jak dlouho desková tektonika v prekambriu vlastně fungovala. Tyto úvahy jsou však již nad rámec tohoto článku (viz též Kalenda et al. 2011).

Nový pohled na deskovou tektoniku a na její vztah ke klimatu přinesla práce českých badatelů (Kalenda et al. 2011, 2012). Měření mikrodeformací novou technikou, umožňující sledovat bezprostřední reakci masívu na změny podmínek, ukázala, že pohyby litosférických desek (i menších bloků) jsou způsobeny hlavně vnějšími silami – především tzv. termoelastickou vlnou vyvolanou slunečním zářením, ale i slapovými silami a dalšími. Periodické změny slunečního ohřevu i dalších činitelů mají za následek deformace, které nejsou zcela vratné (tzv. západkový mechanismus – viz též Croll 2005) a způsobují roztahování pevnin i středooceánských hřbetů, což spolu

se západním driftem litosféry (vlivem slapových sil i termoelastické vlny) vede k pozorovaným pohybům. Teorie byla podpořena velmi úspěšnými predikcemi zemětřesení.

Pokud tedy byly denní a sezónní rozdíly teplot mnohem menší (a v archaiku možná zcela nepatrné), neexistovala ani hlavní síla způsobující deformaci litosféry. To podporuje názor, že desková tektonika na Zemi se pouze dočasně mohla rozvinout v době slabšího skleníkového efektu na konci prahor a počátku starohor, a definitivně až po úbytku skleníkových plynů před koncem prekambria (viz též Kalenda et al. 2011).

Výše shrnutá zásadní změna paradigmatu deskové tektoniky a zjištěná významná úloha sluneční energie samozřejmě vedou k rozdílným pohledům i na mnoho dalších geologických, ale i klimatologických otázek. Jejich nezávislé ověření bude v mnoha případech trvat ještě dlouho. Samotný názor o významu vnějších činitelů pro endogenní dynamiku však není zdaleka ojedinělý. V poslední době byly podány důkazy o vlivu Milankovičových cyklů na vulkanickou aktivitu v kvartéru (Zielinski et al. 1996, Kutterolf et al. 2013 aj.). Autoři těchto prací zatím uvažují spíše o takových mechanismech působení jako tlak ledu, jejichž globální účinek je sporný. Nicméně tyto výzkumy by mohly prověřit hypotézu, že tektonomagmatická aktivita je obecně nejvyšší v období vysokých teplotních kontrastů, což v geologické historii byla při rozlišení v řádu miliónů až desítek miliónů let spíše chladná období.

Poděkování.

Za připomínky děkuji Doc. Z. Kukulovi a jednomu anonymnímu recenzentovi.

Literatura

- Anders E., Grevesse N. (1989): Abundances of the elements – meteoritic and solar. – *Geochim. Cosmochim. Acta* 53/1: 197–214.
- Anderson Don D. L. & Dziewonski A. M. (1984): The Earth's interior. – In: Malone T. F. & Roederer J. G. (eds), *A new frontier and a new challenge for earth scientists: in Global Change*, no. 5: 345–353, ICSU Press.
- Belousov V. V. (1970): Against the hypothesis of ocean-floor spreading. – *Tectonophysics* 9: 489–511.
- Canfield D. E. (1998): A new model for Proterozoic ocean chemistry. – *Nature a-z index* 396: 450–453.
- Carlson R. W. (ed.) (2003): *Treatise on Geochemistry – 2. The Mantle and Core*. – Elsevier, 608 pp.
- Condie K. C., DesMarais D. J. & Abbott D. (2001): Precambrian superplumes and supercontinents: a record in black shales, carbon isotopes, and paleoclimates? – *Precambrian Res.* 106: 239–260.
- Croll J. G. A. (2005): Thermal buckling of pavement slabs. – *Jour. of Transportation* 158: 115–126.
- Gough D. O. (1981): Solar interior structure and luminosity variations. – *Sol. Phys.* 74: 21–34.
- Hoffman P. F., Kaufman A. J., Halverson G. P. & Schrag D. P. (1998): A Neoproterozoic snowball. – *Earth Sci.* 281: 1342–1346.
- Holland H. D. (2006): The oxygenation of the atmosphere and oceans. – *Phil. Trans. R. Soc. B* 361: 903–915.
- Holmes A. (1939): Radioactivity and the Earth movement. – *Trans. Geol. Soc. Glasg.* 28: 559–606.
- Kachlík V. & Chlupáč I. (1996): *Základy geologie; historická geologie*. – Skriptum UK, Karolinum, Praha.
- Kalenda P. & Neumann L. (eds) (2011): *Náklony, globální tektonika a predikce zemětřesení*. – *Česká geologie*, Praha, 245 p.
- Kalenda P. & Neumann L. (2012): *Tilts, global tectonics and earthquake prediction*. – SWB, London, 247 p.
- Karhu J. & Epstein S. (1986): The implication of the oxygen isotope records in coexisting cherts and phosphates. – *Geochim. Cosmochim. Acta* 50: 1745–1756.
- Kasting J. F. & Ono S. (2006): Paleoclimates: the first two billion years. – *Phil. Trans. R. Soc. B* 361: 917–929.

- Khan R. M. K., Das Sharma S., Patil D. J. & Naqvi S. M. (1996): Trace, rare-earth element, and oxygen isotopic systematics for the genesis of banded iron-formations: Evidence from Kushtagi schist belt, Archaean Dharwar Craton, India. – *Geochim. Cosmochim. Acta* 60/17: 3285–3294.
- Kutterolf S., Jegen M., Mitrovica J. X., Kwasnitschka T., Freundt A. & Huybers P. J. (2013): A detection of Milankovitch frequencies in global volcanic activity. – *Geology* 41/2: 227–230.
- Pavlov A. A., Kasting J. F., Brown L. L., Rages K. A. & Freedman R. (2000): Greenhouse warming by CH₄ in the atmosphere of early Earth. – *J. Geophys. Res.* 105: 11981–11990.
- Rajlich P. (2004): *Geologie mezi rozpínáním Zeměkoule a Čechami*. – 234 p., Vlastním nákladem.
- Reddy S. M. & Evans D. A. D. (2009): Palaeoproterozoic supercontinents and global evolution: correlations from core to atmosphere. – *Geol. Soc. London Spec. Publ.* 323: 1–26.
- Roy S. (2006): Sedimentary manganese metallogenesis in response to the evolution of the Earth system. – *Earth-Science Reviews* 77: 273–305.
- Siebert C., Kramers J. D., Meisel T. H., Morel P. H. & Nägler T. H. F. (2005): PGE, Re-Os, and Mo isotope systematics in Archean and early Proterozoic sedimentary systems as proxies for redox conditions of the early Earth. – *Geochim. Cosmochim. Acta* 69/7: 1787–1801.
- Walker J. C. G. (1985): Carbon dioxide on the early Earth. – *Orig. Life* 16: 117–127.
- Walker J. C. G., Hays P. B. & Kasting J. F. (1981): A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. – *J. Geophys. Res.* 86: 9776–9782.
- Wegener A. (1912): Die Entstehung der Kontinente. – *Peterm. Mitt.* 185–195, 253–265, 305–309.
- Young G. M., von Brunn V., Gold D. J. C. & Minter W. E. L. (1998): Earth's oldest reported glaciation; physical and chemical evidence from the Archean Mozaan Group (~2.9 Ga) of South Africa. – *J. Geol.* 106: 523–538.
- Zielinski G. A., Mayewski P. A., Meeker D., Whitlow S., Twickler M. S. (1996): A 110,000-Yr Record of explosive volcanism from the GISP2 (Greenland) ice core. – *Quaternary Research* 45: 109–118.

Došlo: 27. 2. 2013

Přijato: 15. 7. 2013