

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta
Ústav petrologie a strukturní geologie

Studijní program: Geologie
Studijní obor: Praktická geobiologie



Jana Zajícová

**Vulkanismus Velkých magmatických provincií v historii
Země a jeho možné dopady na globální ekosystém**

Volcanism of Large Igneous Provinces in Earth's history; possible impacts on
global ecosystem.

Bakalářská práce

Vedoucí závěrečné práce: doc. RNDr. František Holub, CSc.

Praha 2013

Poděkování:

Děkuji svému školiteli doc. RNDr. Františku Holubovi, CSc. za odborné rady a trpělivost.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze,

Podpis

Obsah

Abstrakt.....	v
Abstract.....	vi
Klíčová slova.....	vii
Key words.....	vii
1. Úvod.....	1
2. Definice a charakteristika velkých magmatických provincií.....	2
2.1 Rozšíření velkých magmatických provincií na zemském povrchu.....	3
2.2 Složení magmat tvořících velké magmatické provincie.....	6
Bazaltické provincie.....	6
Felsické provincie.....	7
3. Přehled vybraných velkých magmatických provincií.....	7
3.1 Sibiřské trapy.....	7
3.2 Dekkanské trapy.....	8
3.3 Provincie Paraná-Etendeka.....	10
3.4 Provincie Columbia River.....	10
4. Vlivy vulkanismu na biosféru prostřednictvím změn v atmosféře a hydrosféře.....	11
4.1 Základní charakteristika zemské atmosféry.....	11
4.2 Dopady vulkanických emisí na atmosféru.....	12
Síra v atmosféře.....	13
Oxid uhličitý v atmosféře.....	14
Vulkanický popel v atmosféře.....	15
4.3 Dopady vulkanických emisí na hydrosféru.....	15
5. Hromadná vymírání (extinkce) během fanerozoika.....	16

6. Diskuse: Postavení velkých magmatických provincií mezi ostatními možnými příčinami extinkcí	19
7. Závěr	24
8. Použitá literatura:.....	25

Abstrakt

Velké magmatické provincie (LIPs) jsou ohromné akumulace magmatických hornin, často vznikajících v neobvykle krátkém čase a jsou charakteristické extrémně vysokou produktivitou magmatu. Nejvýznamnějšími jsou kontinentální záplavové bazalty, neboli trapy, které pokrývají rozsáhlé plochy na zemském povrchu a mohou a nemusí být spojeny s riftingem a kontinentálním rozpadem. Dále byly objeveny také velké magmatické akumulace v oceánském prostředí a někteří autoři do kategorie LIPs zařazují ještě další typy objemných magmatických komplexů.

S vystupujícím magmatem je uvolňováno velké množství plynů, nejčastěji oxidy uhlíku, síry a dusíku. Tyto plyny mají větší, nebo menší dopad na životní prostředí a s tím i na organismy. Formování magmatických provincií se v minulosti několikrát opakovalo. Nejvíce známé jsou Dekanské trapy v Indii a za největší magmatickou provincii jsou považovány sibiřské trapy. Oceánské prostředí reprezentuje například plató Ontong Java v západní části Tichého oceánu. Existuje souvislost mezi stářím velkých magmatických provincií a masovými extinkcemi. Jako příklad lze uvést největší známé vymírání na konci permu, které se přibližně časově shoduje s formováním sibiřských trapů (přibližně před 250 Ma), nebo rozsáhlý úbytek druhů na přelomu křída/trias, jež se časově kryje s vytvářením se Dekkanských trapů v Indii (cca před 65 Ma). Proto jsou velké magmatické provincie považovány za jednu z nejdůležitějších příčin masových extinkcí. Nicméně ne všechny extinkce je možné dát do souvislostí s LIPs, takže musíme uvažovat ještě další možné příčiny, například impakty velkých bolidů. Neopomenutelné jsou případy, kdy se načasování LIPs shoduje s impakty.

Abstract

Large igneous provinces (LIPs) are huge accumulations of magmatic rocks originated during unusually short time and characterized by extremely high magma productivity. Among them, namely the continental flood basalts (traps) cover very extensive areas and may or may not be associated to rifting and breakup of continents. However, also highly voluminous oceanic plateaus were recognized and some authors count to LIPs even some other types of huge magmatic complexes.

A large amount of gases is released with escaping magma, usually oxides of carbon, sulfur and nitrogen. These gases more or less have impact on the environment and thus also influence organisms.

The formation of magmatic provinces repeated many times in the past. The best known are continental Deccan Traps in India and the most voluminous Siberian Traps. Oceanic LIPs are represented, e.g., by the Ontong Java Plateau in the west Pacific Ocean.

There is a link in dating the emergence of large igneous provinces and mass extinctions. As an example, the largest known extinction at the end of Permian, which was broadly contemporaneous with the formation of the Siberian traps (approximately 250 Ma ago), or extensive loss of species on the boundary of Cretaceous / Tertiary, which coincides with the formation of the Dekkan in India (before about 65 Ma). Therefore, Large Igneous Provinces are among the most important causes of mass extinction periods. However, some extinctions do not correspond to any contemporaneous LIP and other causes, namely large bolide impacts, should be supposed. Very interesting and peculiar are those cases in which the LIPs and impacts were contemporaneous.

Klíčová slova

vulkanismus, bazalt, velké magmatické provincie, datování, vulkanický popel, vulkanické plyny, atmosféra, hromadné vymírání druhů

Key words

volcanic activity, basalt, large igneous provinces, dating, volcanic ash, volcanic gas, atmosphere, mass extinction

1. Úvod

Cílem této práce je shrnutí a posouzení problematiky vzájemných vztahů mezi magmatismem velkých magmatických provincií (Large Igneous Provinces - LIPs) a významnými obdobími masového vymírání organismů. Protože s tématem masového vymírání a jeho možných příčin souvisí enormní množství literatury, bylo nutné vybrat si jen omezený počet pramenů a tento subjektivní výběr nemůže postihovat celé spektrum existujících názorů.

Velké magmatické provincie jsou známé především pro jejich objemné výlevy lávy, pokrývající velká území a vzniklá za poměrně krátký čas. Rozsáhlostí výlevů je významně ovlivňován přítomný ekosystém, buď úplným vymizením druhů, žijících na daném místě, nebo postupná adaptace, vyplývající z možností daných průběhem výlevu.

Efúze takové velikosti, pokrývají ohromnou plochu, ze které sopečné plyny unikají do ovzduší. Tím, že je na povrch vylito velké množství lávy, je samozřejmé, že se stejně tak uvolní i plyny, které ji doprovází, a to v mnohonásobně větší míře, než při běžných vulkanických explozích. Dopad na atmosféru je tedy očekávatelný.

Po výbuchu sopky Eyjafjallajökull na Islandu v roce 2010 (Obr. 1), byla omezena letecká doprava na několik dní. Spad sopečného popela byl hlášen na celé severní polokouli a infiltrací částic do ovzduší, které zde slouží jako kondenzační jádra pro srážení se vodní páry, byla ovlivněna oblačnost zvýšeným množstvím srážek.

Také je nezanedbatelná doba trvání výlevu. V případě zmíněné islandské sopky hlavní fáze erupce trvala jen několik dní. Islandská erupce Laki v letech 1783-1784 trvala zhruba rok a půl a znamenala národní katastrofu s důsledkem hladomoru a značného snížení počtu obyvatel. Proti dílčím periodám velmi intenzivní efúzivní aktivity v rámci kontinentálních platóbazaltů však i tato erupce byla velmi malá. Je tedy zcela zřejmé, že tak rozsáhlé a objemné efúze, z nichž jsou složeny velké magmatické provincie, musely mít dopady na tehdejší atmosféru a biosféru v měřítku nesrovnatelně větším.



Obrázek 1: Erupce islandské sopky Eyjafjallajökull v roce 2010

(<http://multimedia.ihned.cz/fotogalerie-stars/c1-42625570-islandska-sopka-chrli-oblaka-dymu-letadla-stoji-nadrazni-pokladny-jsou-v-oblezeni>, 2013)

2. Definice a charakteristika velkých magmatických provincií

Jako velké magmatické provincie (Large Igneous Provinces, LIPs, Coffin a Eldholm 1992) se označují obrovské akumulace magmatických hornin, mající enormní objemy a plošné rozšíření, a vzniklé při tom během geologicky krátkého času, obvykle jen několik milionů let. Většinou se jedná o soubory mnohonásobně se opakujících lávových proudů a příkrovů, které rozlohou mohou přesahovat 0,1 milionů km², objem magmatu bývá nad 0,1 milionů km³ a maximální doba aktivity je 50 Ma. Nepočítají se k nim produkty magmatické aktivity, spojené s „běžným“ riftingem oceánského dna nebo se subdukcí a vznikem magmatického oblouku.

LIPs jsou tvořeny převážně záplavovými bazalty (flood basalts), ale jejich součástí mohou být i intruzivní horniny. Velké magmatické provincie se mohou vyskytovat na pasivních okrajích kontinentálních desek, na kontinentech, uvnitř oceánských pánví a jen

výjimečně v anomálním segmentu středooceánských hřbetů, podmořských hřbetů a horstev, a jako oceánské pánve vyplněné plató bazalty. Do této kategorie se řadí i velké kontinentální dajkové roje, silly, mafické až ultramafické intruzivní provincie, SiO₂-bohaté LIPs a tholeiit-komatiitické asociace (Bryan, Ernst, 2007).

V některých případech jsou velké magmatické provincie časově a prostorově spjaté s riftingem a rozpadem kontinentů, jako je tomu v případě severoatlantické vulkanické provincie nebo provincie Paraná-Etendeka. V jiných případech však souvislosti s rozpadem kontinentů nejsou zřejmé nebo neexistují, jako je tomu v případě sibiřských trapů, nebo u bazaltické provincie Columbia River.

Ontong Java a Kerguelenské plató jsou dvě objemově největší známé oceánské provincie, tvořené bazaltickým magmatismem. Jejich vznik však pravděpodobně nesouvisí s kontinentálním rozpadem.

Vulkanicky pasivní okraje kontinentů byly identifikovány na mnoha kontinentálních rozhraních, a na rozdíl od předchozích typů, souvisí s rozpadem a oddělením kontinentů. Ne vždy ale jsou doprovázeny kontinentálními výlevy záplavových bazaltů (CFB = Continental Flood Basalt). Výplně oceánských pánví a podmořská horstva také nemusí být výhradně spojená s kontinentálním rozpadem, ale v mnohých případech vykazují časové i prostorové spojení s výlevy bazaltických láv na kontinentech, popřípadě v oceánech (Coffin, Eldholm, 1992).

Ve vertikálním profilu těles je patrné, že jsou tvořena překrývajícími se lávovými příkrovy a z toho lze usuzovat, že výstup magmatu byl pulzačního charakteru. Jednotlivé magmatické pulzy se vyznačují relativně krátkou dobou trvání (1–5 Ma), během nichž je velká část celkového objemu magmatu (až 75%), vylita na povrch (Bryan, Ernst, 2007).

2.1 Rozšíření velkých magmatických provincií na zemském povrchu

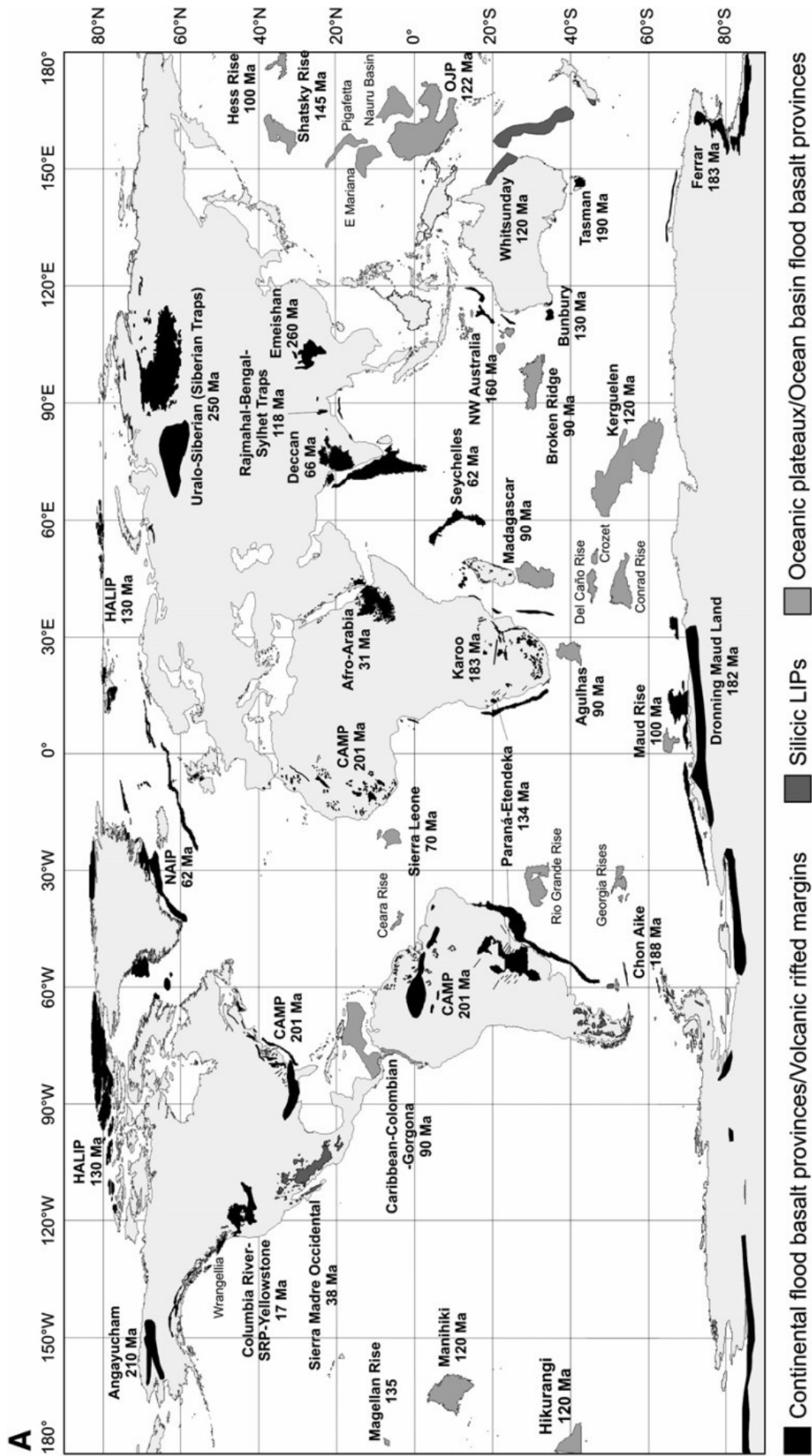
Mnohé velké magmatické provincie se vyskytují v kontinentálních oblastech jako komplexy platóbazaltů (s nimiž geneticky souvisejí i rozsáhlé žilné roje jako přívodní dráhy magmat. Některým těmto komplexům se tradičně říká trapy (např. dekkanské, sibiřské) podle schodovitého reliéfu erozních řezů těmito komplexy (ze švédštiny, traps = schody). V oceánech jsou jejich ekvivalentem oceánská plató, kde je kůra podstatně zesílená proti

normálním mocnostem a kubatury "nadbytečných" bazaltů a jejich intruzivních ekvivalentů jsou enormní (např. plató Ontong Java).

Na dnešním zemském povrchu zaujímají převážně bazaltické LIPs značné plochy (Obr. 2). V případě oceánských je nutné uvažovat limitované stáří oceánského dna ve srovnání s kontinenty; Bazaltová oceánská plató se však dají obtížně subdukovat a proto mohou být zbytky starších komplexů zachyceny v akrečních klínech.

Sheth (2007) navrhl terminologii a zkratky pro označování jednotlivých typů velkých magmatických provincií. Poukazuje na to, že samotný termín „velká magmatická provincie“ je velmi široce aplikovatelný, jelikož se na Zemi vyskytuje mnoho rozsáhlých útvarů, vzniklých právě magmatickou činností, a to jak intrusivních, tak extrusivních. Také podotýká, že původní chápání velkých magmatických provincií bylo primárně aplikováno na území bazaltického charakteru. Avšak mezi velké magmatické provincie by se daly geneticky zařadit i více či méně felsické typy, tedy ryolity, ryolitické ignimbrity, rozsáhlé granitické až granodioritické batolity a velké zvrstvené intruze.

V této práci je však důraz kladen převážně na komplexy kontinentálních záplavových bazaltů, které jsou v přehledné mapě na obr. 2 vyznačeny nejvýrazněji.



Obrázek 2: Rozšíření velkých magmatických provincií (LIPs) na dnešním zemském povrchu. Převzato z práce Bryan a Ernst, (2008). Zkratka OJP na pravém okraji mapy označuje oceánské plató Ontong Java. Další důležité zkratky: NAIP - North Atlantic Igneous Province, CAMP - Central Atlantic Magmatic Province

2.2 Složení magmat tvořících velké magmatické provincie

Podle obsahu SiO_2 a mafických složek se dají LIPs rozdělit na (převážně) mafické a felsické. Mezi mafické (převážně bazaltické) se řadí například Dekkanské trappy a plošina Columbia River, jež jsou tvořeny záplavovými kontinentálními bazalty.

V menší míře se uplatňuje magmatismus ryolitového a případně i andezitického charakteru, který je doprovázen významnější explozivní činností, než u bazaltického magmatu, a velkými objemy uloženin vulkanoklastického materiálu. Felsické LIPs jsou reprezentovány například plošinou Whitsunday na východu Austrálie ze spodní křídly, Sierra Madre Occidental v západním Mexiku, či provincií Malani v severozápadní Indii (Sheth, 2007).

Kontinentální LIPs mohou být proti oceánským obohaceny o SiO_2 , Al_2O_3 , alkálie a litofilní stopové prvky včetně lehkých prvků skupiny vzácných zemin (LREE).

Bazaltické provincie

Provincie tvořené bazaltickými lávami zahrnují pikrobazalty, bazalty a bazaltické andezity tholeiitického charakteru, alkalické variety se vyskytují spíše okrajově a jen v některých komplexech. Tholeiitické bazalty poměrně často přecházejí do bazaltických andezitů ($\text{SiO}_2 > 52$ hmot. %), které většina autorů rovněž zahrnuje mezi bazalty. V menší míře mohou být v LIPs převážně bazaltického složení zastoupeny i porce felsických (nejčastěji ryolitových) magmat.

Mezi bazaltické LIPs kontinentálního typu patří například Dekkanská plošina v Indii, provincie Columbia River na západě Severní Ameriky, Madagaskar, sibiřské trapy v Rusku, provincie Emeishan v Číně, Karoo v jižní Africe, Paraná-Etendeka v jižní Americe a na jihozápadě Afriky, či Severatlantická provincie třetihorního stáří. Oceánské ekvivalenty v podobě výplň pánví, či platóbazaltů jsou například provincie Ontong Java v Tichém oceánu, Island, nebo plošina Kerguelen v jižní části Indického oceánu a mnoho dalších (Sheth, 2007).

Dále také existují provincie s přibližně stejným poměrem ryolitických a bazaltických láv, jako například třetihorní provincie Snake River v USA, nebo paleoproterozoická provincie Dongargarh v Indii (Sensarma a kol., 2004, podle Sheth, 2007).

Felsické provincie

Do této kategorie patří i intrusivní granitické batolity, vyzdvižené tektonicky na povrch, popřípadě odkryty erozí. Felsické, SiO₂-bohaté ("silicic") LIPs jsou tvořeny převážně produkty ryolitového vulkanismu, většinou vulkanoklastického původu s velkými objemy ryolitových ignimbritů. Mohou pokrývat rozsáhlá území o rozloze >0,1 milionů km² a představovat celkové objemy magmatu >0,25 milionů km³. Jen někdy mohou zahrnovat diferencované členy mírně alkalického složení (Sheth, 2007).

Felsické, popřípadě acidní magmatické provincie jsou většinou přímo spojeny s bazaltickými LIPs. Avšak na rozdíl od nich jsou méně objemné, vytváří se až v pozdější fázi vulkanické aktivity, protože výstup magmatu je zpomalen kvůli vyšší viskozitě. Jejich rozloha je menší než u bazaltických ekvivalentů a většinou jsou zastupovány intruzivními prvky, které byly později vypreparovány z okolní horniny (většinou sedimentárního charakteru), procesem eroze. Nejčastěji se tyto vulkanicko-plutonické provincie vyskytují jako lineárně protáhlé hřbety, táhnoucí se podél vulkanicky aktivních riftových okrajů, nebo jako oslabené rifty. Vznikají sekundárním přetavením korového materiálu, které je často vyvolané lokálním zvýšením teploty v kůře v důsledku advekčního přínosu tepla mafickým magmatem. Významným zdrojem felsických magmat mohou být vodou bohaté mafické až intermediální metamorfity - amfibolity (Bryan et al. 2002).

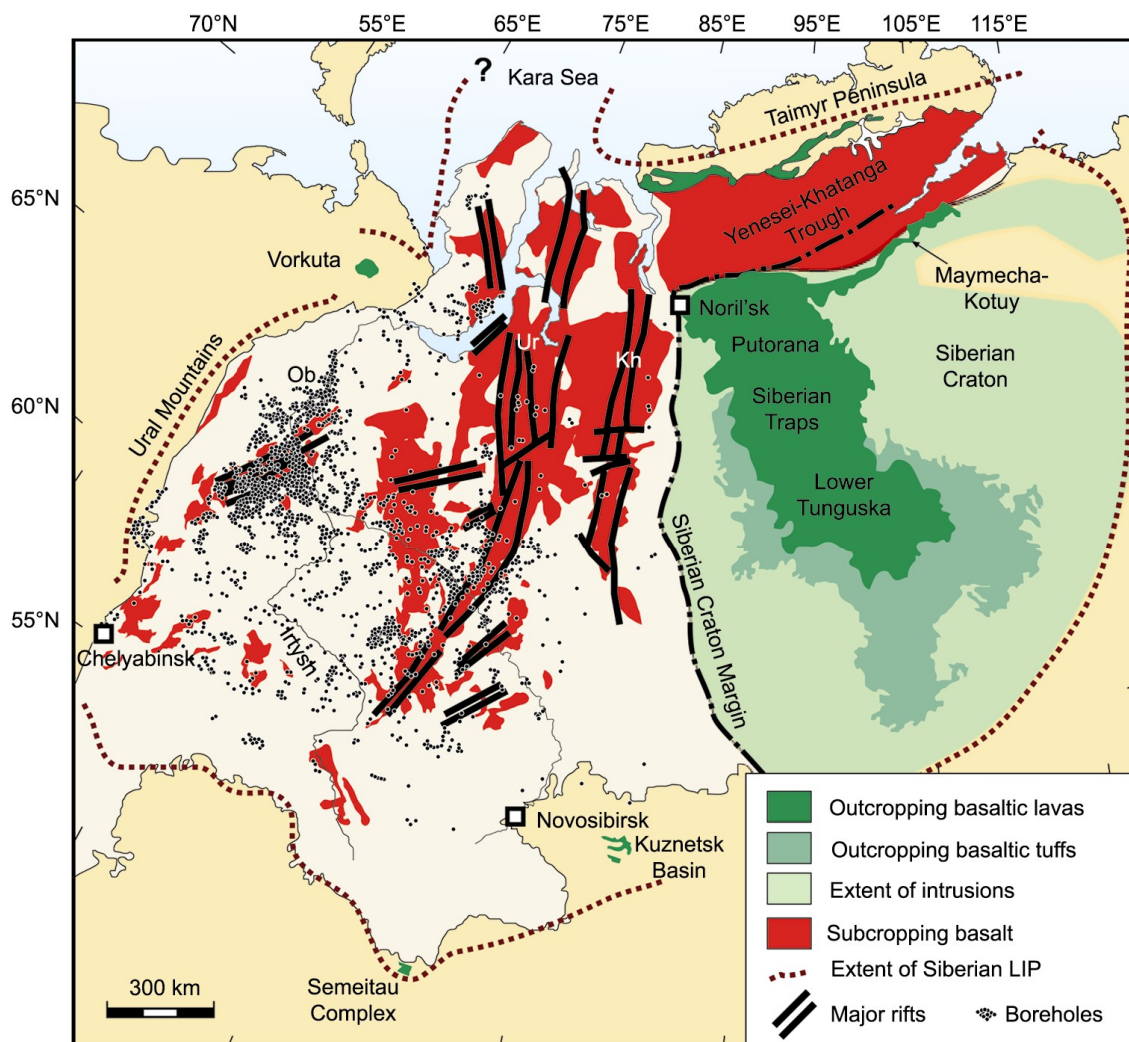
3. Přehled vybraných velkých magmatických provincií

3.1 Sibiřské trapy

Tato oblast představuje největší kontinentální magmatickou provincii na Zemi. Zaujímá více než $1,5 \times 10^6$ km² a během času byla rozdělena do menších fragmentů (Rampino, Stothers, 1988). Přesto je však odkryta necelá její polovina, Převažující západní část je pohřbena pod mladšími sedimenty (obr. 7). Vznik je datován do doby před cca 250 Ma. Největší část výchozu sibiřských CFB se nachází na sibiřském kratonu. Dominantním typem horniny jsou bazalty, ale nachází se zde hojně i bazaltické vulkanoklastické uloženiny a mělké intruze, tvořené převážně ložními žilami známými hlavně z okrajových částí provincie (Reichov, Saunders, 2009).

S formováním sibiřských trapů je spojováno největší z masových vymírání v historii Země, na konci permu. Při tuhnutí magmatu unikalo velké množství oxidu uhličitého a to

zapříčinilo zvýšení skleníkového efektu a prudké oteplení celkového klimatu. Poněvadž byly velkou mírou zasaženy i organismy v mořském prostředí, uvažuje se, že tento mechanismus měl za následek ještě změnu oceánského chemismu a v atmosféře ztenčení ozonové vrstvy.



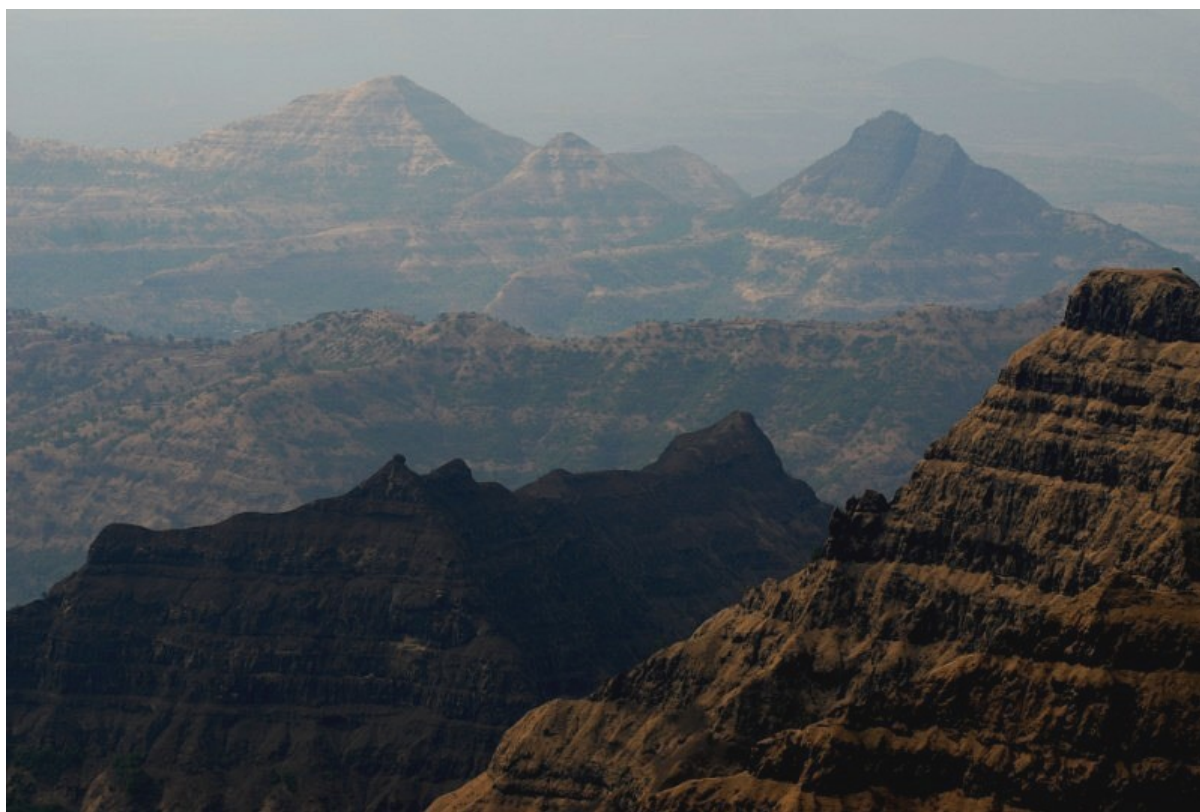
Obrázek 3: Mapa sibiřských trapů včetně rozšíření intruzivních členů a skrytých částí, prokázaných pod mladšími sedimenty v početných vrtech. Převzato z práce Saunders (2009)

3.2 Dekkanské trapy

Dekkanská magmatická province vznikala v období konce křídy, asi před 66 Ma, kdy se Indický kontinent pohyboval na sever, pravděpodobně přes horkou skvrnu v Tichém oceánu, a později kolidoval s Laurusií, za vzniku Himalájského pohoří. Pokrývá území o rozloze přibližně 500 000 km², ale v minulosti pravděpodobně pokrývala území podstatně větší. Je

tvořená pahoehoe lávovými proudy. Samotné výlevy probíhaly ve více fázích, přičemž existuje teorie, která předpokládá zvýšení vulkanické aktivity v důsledku meteorického impaktu. Magma vytékalo v jednotlivých pulzech relativně rychle, mezi jednotlivými velkými erupcemi jsou periody klidu i několika desítek tisíc let (Rampino, Stothers, 1988). Nejintenzivnější vulkanická činnost probíhala před cca $66,9 \pm 0,2$ Ma, to znamená necelé 2 Ma před hranicí křída/terciér (K/T). Celkový objem vylité lávy činí asi $1,5 \times 10^6$ km³ (Pande, 2002).

Aktivita vulkanismu této provincie je spojována s vymíráním na hranici K/T. Do stejného časového úseku byly zařazeny však i dva větší impaktové krátery, a to Chicxulub v Mexickém zálivu a kráter Shiva v Indii. U impaktu Shiva se předpokládá, že by mohl být spouštěčem dekkanského vulkanismu.



Obrázek 4: Panorama dekkanských trapů se subhorizontálně ležícími lávovými příkrovy (www.treknature.com/gallery/Asia/India/photo201160.htm, 2013)

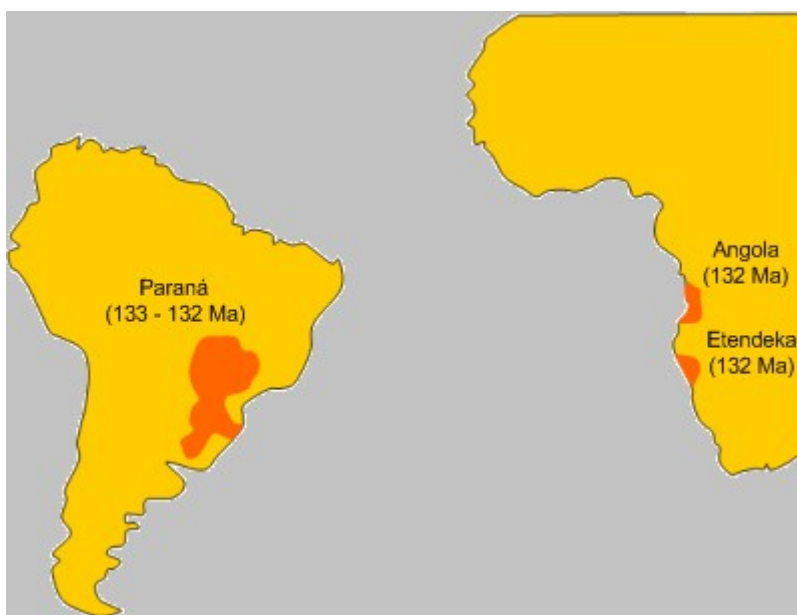
3.3 Provincie Paraná-Etendeka

Provincie Paraná-Etendeka zahrnuje původně souvislé území, v průběhu křídý rozdělované při rozevírání se Atlantického oceánu na dvě části. Západní část se nachází v Brazílii, východní v jihozápadní Africe. Rozloha těchto provincií činí dohromady přibližně 2,5 milionů km² a odhadovaný objem lávy je cca 1,5 milionů km³. Dominující složkou jsou bazalty, ale objevují se i ryolitické komponenty.

Metodou měření poměru radioizotopů ⁴⁰Ar/³⁹Ar, spolu s paleomagnetickými daty bylo zjištěno, že vulkanismus započal přibližně před 133 ± 1Ma (Renne, 1999).

Paraná, také nazývaná jako Serra Geral bazalty, zaujímá území o rozloze cca 1,2 x 10⁶ km² (původně mohla provincie dosahovat i 2 x 10⁶ km²). Provincie zaujímá část Brazílie, dále zasahuje do Paraguaye, Uruguaye a zčásti do severní Argentiny.

Etendeka se nachází na jihozápadě Afriky v Namibii (Rampino a Stothers, 1988).



Obrázek 5: Dnešní pozice provincie Paraná - Etendeka, rozdělené rozšiřováním jižního Atlantiku. (www.braziltourstravel.com/geology/parana-etendeka.htm, 2013)

3.4 Provincie Columbia River

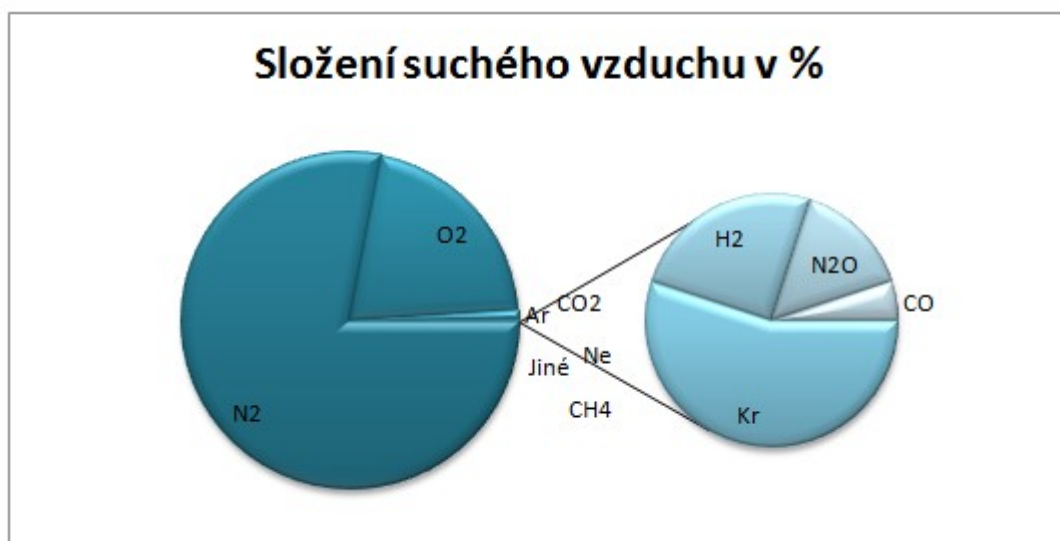
Tato provincie se nachází na severozápadě Spojených států. Se svou rozlohou, přibližně 200 000 km², je nejmenší z LIPs a je tvořena rovněž záplavovými bazalty, avšak její vznik nesouvisí s rozpadem kontinentů, ale se zaobloukovým vulkanismem. Columbia River bazalty

jsou pravděpodobně spřízněny s aktivní horkou skvrnou dnes situovanou pod Yellowstoneským národním parkem. Po korelaci výsledků datování metodou $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ s paleomagnetickými daty byl začátek vzniku této LIP upřesněn na dobu před cca 17 Ma (Rampino a Stothers, 1988).

4. Vlivy vulkanismu na biosféru prostřednictvím změn v atmosféře a hydrosféře

4.1 Základní charakteristika zemské atmosféry

Atmosférou je nazýván plynný obal Země. Má přímý kontakt s biosférou, hydrosférou i nejsvrchnější částí litosféry. Velkou měrou se tyto hypotetické vrstvy vzájemně překrývají, tudíž je zde interakce velmi významná. Atmosféra je tvořena směsicí plynů (obr. 6) a pevných částic - aerosolů, které zahrnují krystalky vody, prach, popel, krystalky solí, kapičky různých kapalin (voda, kyselina sírová, aj.), a biotickou složkou. Většina organismů se dostává do troposféry, pylová zrna, či mikroskopický aeroplankton se může dostat až do nižších vrstev stratosféry, její svrchní hranice je přibližně v 50 km nad povrchem (úroveň se mění v závislosti na zeměpisné šířce, nad rovníkem je položena nejvýše, nad póly nejnižší, stejně tak troposféra). Hustota atmosféry při rostoucí vzdálenosti od povrchu díky snižujícímu se tlaku klesá.



Obrázek 6: Procentuální složení suchého vzduchu v recentní atmosféře

Atmosféra se člení do několika vrstev podle různých kritérií. Podle koncentrace nabitých iontů v atmosféře, se dělí na neutrosféru a ionosféru, podle částicového složení na homosféru a heterosféru. Asi nejznámější je dělení podle vertikálního profilu teploty vzduchu na troposféru, stratosféru, mezosféru, termosféru a exosféru.

Dnešní atmosféra, je takzvaná sekundární, vzniklá postupným odplyňováním planety, pravděpodobně převážně při sopečné aktivitě.

Později jsou plyny doplňovány i pomocí organismů a dalších biochemických procesů.

Atmosféra hraje velmi důležitou úlohu při tepelné bilanci zemského povrchu. Díky proměnlivému albedu (dnešní hodnota je přibližně 3%), a selektivní absorpci, či odrazivosti vlnových délek elektromagnetického záření, vrací atmosféra část přicházejícího záření zpět do vesmíru. A naopak dokáže významnou část vyzařované energie samotnou Zemí (infračervené záření) pozdržet a využít.

Atmosféra je významným transportním prostředím. Pomocí proudění větru a celkového pohybu vzduchových hmot, je umožněn transport tzv. znečišťujících příměsí na velké vzdálenosti. Většinou se příměsí dostanou pouze do troposféry, v takovém případě lze po spadu určit přibližnou oblast, odkud částice pocházejí a transport je soustředěn víceméně na okolí zdrojové oblasti.

V případě některých velkých sopečných erupcí se znečišťující příměsí mohou dostat až do spodních částí stratosféry a potom jde o transport globálních rozměrů.

Změny v Atmosféře přímo souvisí se změnami hydrosféry.

4.2 Dopady vulkanických emisí na atmosféru

Vliv formování LIPs má dokazatelný vliv na životní prostředí, a to jak v lokálním, tak globálním měřítku. Spolu s ohromným objemem bazaltického magmatu, se uvolňují volatilie, nejvýznamnější jsou oxid uhličitý, oxidy síry, dusíku, chloridu a fluoru. Klíčovým faktorem pro distribuci těchto plynů je, zda jsou erupce subaerické, či podmořské.

Ze sopečných erupcí jsou nejběžnějšími uvolňovanými plyny H_2O , CO_2 , SO_2 , různé oxidy dusíku (NO_x) a další. Globální dopad z těchto plynů má především SO_2 a CO_2 , sloučeniny NO_x ovlivňují spíše regionální ekosystémy (Self et al., 2005). Zatím nedostatečně zhodnocená je možná role metanu.

Plyny unikající z bazaltických kontinentálních výlevů mohly mít minimálně dvojnásobný dopad na životní prostředí. Zaprvé atmosférické ochlazování a zadruhé atmosférické oteplování.

První případ, tedy globální ochlazování, je způsobován aerosoly kyseliny sírové (H_2SO_4), které se v atmosféře vytváří díky molekulám oxidu uhličitého (SO_2), unikajícím právě ze sopečné aktivity. Molekuly SO_2 reagují s vodní parou za vzniku H_2SO_4 . Tyto aerosoly jsou poté rozptýleny v atmosféře a slouží zde jako kondenzační jádra, kolem kterých se shlukují molekuly vody. Tímto mechanismem se vytváří kyselé deště, které mají ničivý dopad na biosféru a urychlují i zvětvávání hornin. Molekuly H_2SO_4 obklopené vodními mikrokapičkami absorbují solární záření a tím ochlazují okolní vzduch, současně se jejich kumulací vytváří oblaky a zvyšuje se tak albedo Země. Nastává ochlazení atmosféry (Rampino, Self, 2000; podle Self, Thordarson, Widdowson, 2005).

Naopak globální oteplování nastává při zvýšeném stavu CO_2 v atmosféře. Oxid uhličitý funguje v atmosféře jako skleníkový plyn, to znamená, že dokáže odrážet jak přicházející sluneční záření, tak rovněž i infračervené záření, které je emitováno zemským povrchem. Ve výsledku se tedy v atmosféře hromadí teplo.

Tato zjištění by mohla svádět k domněnce, že by se teplota vzduchu měla opačným působením obou plynů vyrovnávat a nemělo by docházet k výrazným změnám teploty atmosféry. Avšak molekuly H_2SO_4 mají ve vzdušném sloupci krátké trvání, protože spolu s kondenzovanou vodní parou vypadávají v podobě srážek. Naopak molekuly CO_2 se v atmosféře hromadí.

Síra v atmosféře

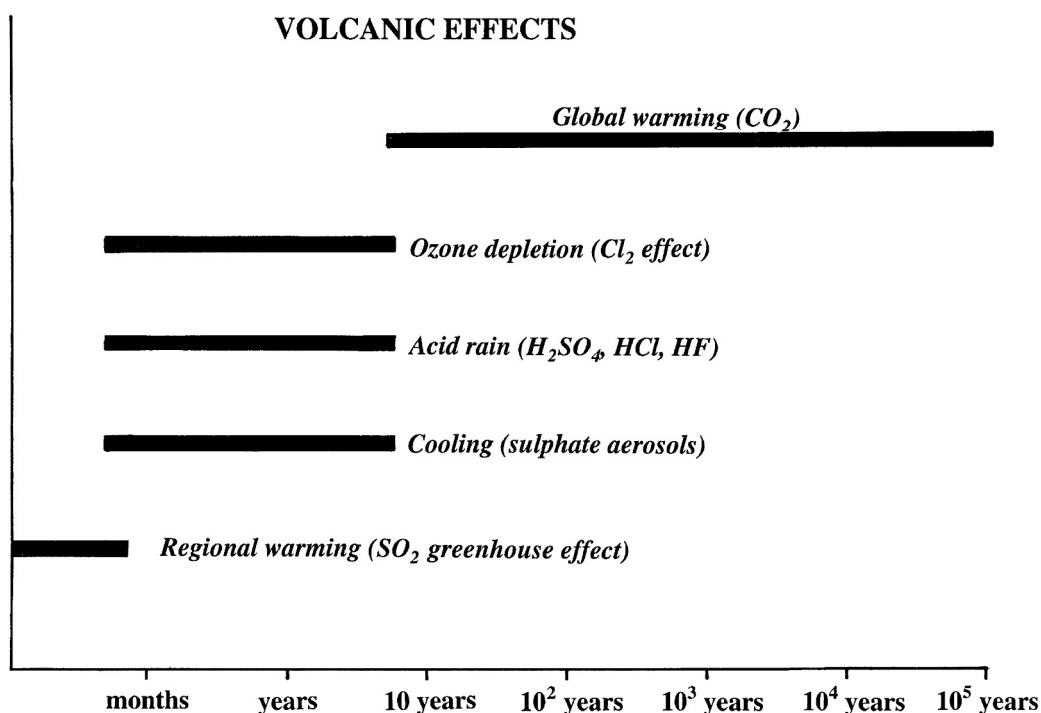
Síra se dostává do atmosféry ze sopečných erupcí nejčastěji ve formě oxidu siřičitého. Tato sloučenina, pokud je v dostatečné koncentraci a v malých výškách atmosféry, může působit jako skleníkový plyn. Po reakci s vodní parou se mění na aerosoly kyseliny sírové nebo sulfátů a může se šířit ve stratosféře, přičemž způsobuje mírné ochlazování výše popsaným procesem.

Koncentrace síry ve výchozích magmatech LIPs se dají obtížně odhadovat, ale je pravděpodobné, že byly podobné jako v dnešních bazaltických lávách např. na Islandu. Studium inkluzí ve fenokrystech a skle bazaltů ukázalo, že přibližně 75 % těkavých sirných sloučenin se uvolňuje ještě před samotným výlevem lávy na povrch.

Sloučeniny síry, unikající z normálních vulkanických erupcí, mají v troposféře krátkou trvanlivost, přibližně jeden týden, než jsou vymyty v podobě kyselých dešťů. Ve stratosféře vytrvávají plyny delší dobu, až kolem dvou let. Toto platí pro průměrné sopečné erupce. Při vytváření LIPs trval únik déle, tudíž lze očekávat i delší působení v atmosféře a zároveň i výraznější ovlivnění biosféry (Self et al., 2005).

Oxid uhličitý v atmosféře

Oxid uhličitý působí jako „skleníkový plyn“ a proto zvýšení obsahu CO_2 v atmosféře vede ke zvyšování globální teploty (Keller et al., 2012). Někteří autoři – např. Wignall (2001) - předpokládají značný význam tohoto efektu velkých vulkanických událostí (obr. 7).



Obr. 7. Srovnání významu dílčích komponent vulkanických plynů, uvolněných při velkých vulkanických událostech, na atmosféru a prostředí, s uvedením předpokládané délky efektu. Z práce Wignall (2001).

Podle jiných autorů mají ale normální subalkalické bazaltické taveniny, odpovídající složení běžných bazaltů velkých magmatických provincií, obsahy oxidu uhličitého značně nízké. Celkový objem CO_2 uvolněného z mohutných lávových výlevů bazaltů je sice veliký,

ale představuje jen velmi malý zlomek procenta vzhledem k množství CO₂ v atmosferickém rezervoáru. Proto i když byl únik plynů při erupcích LIPs byl mnohem větší, než u jiných přirozených procesů v historii Země, efekt zvýšení obsahu CO₂ v porovnání s recentním antropogenním spalováním fosilních paliv téměř zanedbatelný (Self et al., 2005).

Vulkanický popel v atmosféře

Pohyb prachových částic ve vzdušném sloupci závisí na několika faktorech. Jedním je velikost klastů, která se v případě popelových zrn pohybuje ve velikostech menších než 0,02 nm. Dalším neméně důležitým faktorem je unášecí síla větru. Simulace ukazují, že konvekční proudění sopečného popela je chaotické a částice se mohou dostat z volné atmosféry až do meziplanetárního prostoru.

Samotné ukládání částic popela je koncentrické okolo vulkanického centra a popelová vrstva nalezená v sedimentárním záznamu je významným indikátorem pro paleontologickou rekonstrukci.

4.3 Dopady vulkanických emisí na hydrosféru

Pojem hydrosféra zahrnuje veškerou vodu na Zemi – povrchovou, podzemní a atmosférickou. Jelikož veškeré organismy mají původ v oceánském prostředí, tak i v této kapitole bude brán důraz právě na toto prostředí. Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, LIPs se mimo prostředí kontinentů vytvářely v oceánech rovněž.

Úhyn organismů v oceánech, či ve vodním prostředí obecně, je méně častý, než na kontinentech. Nejdůležitějšími kritérii jsou vedle teploty vody obsah živin a hlavně množství rozpuštěného kyslíku. V historii Země jsou zaznamenány události oceánské anoxie, které se vytvářely podél kontinentálních okrajů, nebo v prostoru otevřeného oceánu. Tyto události se obvykle časově shodují s vytvářením LIPs na kontinentech, geochemickými změnami a velkým vymíráním v mořích.

Redox-reakce v oceánech byly studovány u dvou největších masových extinkcí - největší na konci permu a druhé na přelomu triasu a jury (Bjerrum et al., 2013).

Anoxie se ve stratigrafickém záznamu projevuje výskytem černých břidlic, které indikují nízkou hladinu kyslíku, popřípadě jeho absenci, při oceánských dnech. Na umístění černých břidlic je také vázán výskyt ropných ložisek, vznikajících úhynem organismů, právě

následkem anoxie. Existují shody v korelaci výskytu černých břidlic s formováním provincií, například na přelomu cenoman/turon (přibližně před 93,5 Ma), popřípadě na konci jury (před cca 200 Ma). Zvyšování anoxie v oceánech mohlo být způsobeno vyklenutím oceánské litosféry, v důsledku stoupajícího plášťového chocholu, což mohlo narušit transport studených okysličených polárních vod do nižších zeměpisných šířek.

Za dalšího možného činitele, způsobujícího oceánskou anoxii, je považován únik hydrotermálních fluid, vázaných na magmatismus. To může způsobit oteplení oceánu, přičemž rozpuštěný kyslík je uvolněn a okysličená studená voda zůstává ve větších hloubkách, kde organismy nejsou tolik rozšířeny. Další efekt spočívá v odebrání kyslíku při oxidaci zvýšených obsahů kovů v hydrotermách.

Velmi významným efektem extrémně intenzivní vulkanické činnosti může být přímé okyselení vodního prostředí a také snos zvětralého materiálu z kontinentů, protože kyselé deště mají za následek růst intenzity chemického zvětrávání.

5. Hromadná vymírání (extinkce) během fanerozoika

První známky života na Zemi jsou známy z doby přibližně před 3,5 miliardami let, v podobě stromatolitů a fosilních útvarů. Další rozvoj života vedl k růstu biodiverzity, ale prodělal také význačné zvraty, které jsou od začátku kambria do recentu, tzn. v průběhu fanerozoika, zaznamenány ve změnách četnosti a druhové rozmanitosti různých fosilií.

Vývoj života a růst biodiverzity byl během fanerozoika několikrát velmi významně narušen obdobími tzv. hromadného vymírání (mass extinction), které kontrastují s běžnými změnami tvořícími „pozadí“. Během těchto etap došlo z geologického hlediska náhlému (i když nikoli okamžitému) vymizení velkého počtu druhů, ale zcela zanikly i některé vyšší taxony (rody, někdy i čeledi). K tomuto tématu existuje velké množství literárních pramenů, z nichž pro dokumentaci těchto jevů stačí vybrat jen několik

Fosilní záznam biodiverzity a jejích změn v geologickém čase nemůže být úplný a každá kvantifikace může být zatížena řadou chyb, zejména u extinkcí méně významných (viz např. Jablonski 1991; Bambach 2006). Velké a náhlé poklesy biodiverzity jsou ale dokumentovány ze sedimentárních komplexů na různých kontinentech a pracemi mnoha badatelů; přitom natolik vybočují z běžných variací, že je nelze zpochybnit.

Jablonski (1991) uvádí přehled devíti významných extinkcí, při nichž došlo vždy k vymizení nejméně 15 % rodů (Tab. 1).

Tabulka 1. Přehled významných hromadných extinkcí s uvedením časového zařazení, procentuálního úbytku rodů a druhů. Převzato z práce Jablonski (1991).

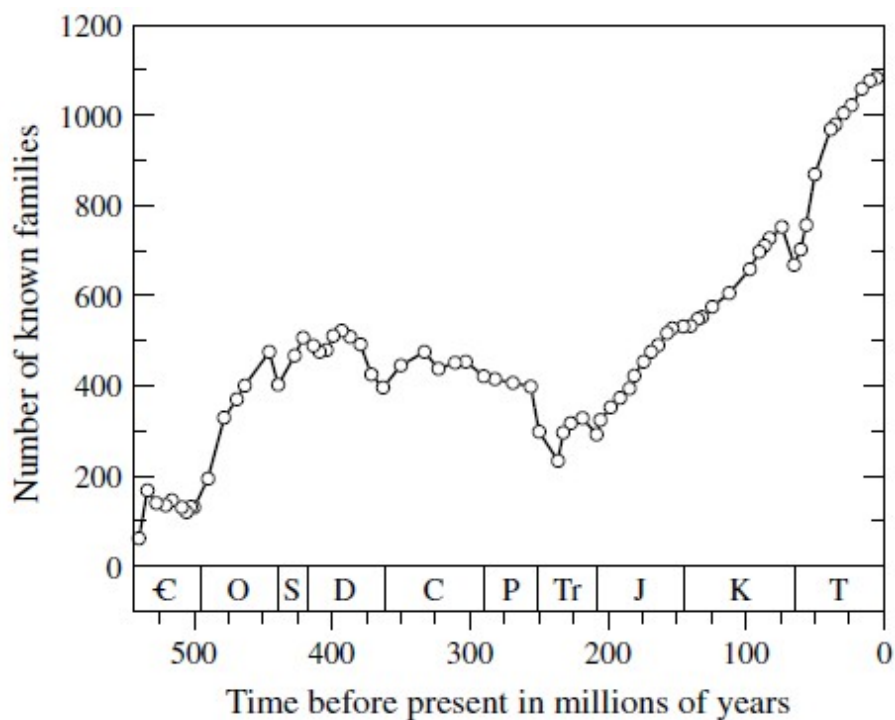
Extinction	Age ($\times 10^6$ years)	Genera (%)	Species (%)
Late Eocene (Priabonian)	35.4	15	35 \pm 8
End-Cretaceous (Maastrichtian)	65.0	47	76 \pm 5
Late Cenomanian	90.4	26	53 \pm 7
End-Jurassic (Tithonian)	145.6	21	45 \pm 7.5
Pliensbachian	187.0	26	53 \pm 7
Late Triassic (Norian)	208.0	47	76 \pm 5
Late Permian	245.0	84	96 \pm 2
Late Devonian (Frasnian)	367.0	55	82 \pm 3.5
Late Ordovician (Ashgillian)	439.0	61	85 \pm 3

Zdaleka nejvýznamnějších je pět náhlých poklesů biodiverzity, kdy došlo k vymizení více než 45 % rodů a velké většiny druhů organismů. V tabulce 2 z práce Sole a Newman (2002) je to přehledně dokumentováno.

Tabulka 2. Pět nejvýznamnějších hromadných extinkcí s procentuálním vyjádřením úbytku rodů a odhadovaného úbytku druhů. Převzato z práce Sole a Newman (2002).

Extinction	Genus loss (%) (observed)	Species loss (%) (estimated)
End Ordovician	60	85
Late Devonian	57	83
Late Permian	82	95
End Triassic	53	80
End Cretaceous	47	76

Těchto pět etap hromadného vymírání kromě dramatického úbytku druhů a rodů zahrnuje i pokles celkového známého počtu čeledí mořských organismů (obr. 8).



Obr. 8. Diagram ukazující změny v počtu čeledí mořských organismů (Sole a Newman 2002 na základě dat z práce Sepkoski 1992). Významné poklesy souhlasí s pěti etapami hromadného vymizení druhů a rodů v tabulce 2.

Všichni autoři, zabývající se posledních letech masovou extinkcí, se shodují na tom, že naprosto největší hromadné vymírání provázelo hranici mezi permem a triasem, kdy vymizelo zhruba 95 % druhů a přes 80 % rodů organismů, známých z permských uloženin (tab. 2).

Existuje předpoklad, že v recentu máme pouze 1% druhů z celkového množství, které kdy na Zemi existovaly. Tato skutečnost je těžko představitelná v porovnání s dnešní značnou druhovou diverzitou. Je tedy otázkou, co a jak způsobilo vymizení 99% druhů.

6. Diskuse: Postavení velkých magmatických provincií mezi ostatními možnými příčinami extinkcí

Magmatismus má na Zemi roli tvořivou i destruktivní. Existují teorie, které tvrdí, že bez intenzivní vulkanické činnosti by život na Zemi vůbec vzniknout nemohl (Markoš, 2007). Otázkou je, do jaké míry mohl ovlivňovat v globálním měřítku ekosystém už vyvinutý a jak jsou takové vlivy souměřitelné s jinými událostmi, které různí autoři považují za možné příčiny hromadného vymírání.

Vedle teorie o přirozeném výběru, kde působí selekční tlaky a mezidruhová rivalita, se ve velké míře uvažují fyzikální příčiny a to tyto: výrazná oscilace hladiny světového oceánu, zvýšená intenzita kosmického záření, impakty kosmických těles (bolidů, představujících planetky nebo jádra komet) a také mimořádně silná vulkanická činnost (Raup, 1991).

Nejdůležitější typy událostí, jejichž vliv mohl způsobit velká vymírání, jsou s přehledem jejich dílčích efektů na prostředí uvedeny v tabulce 3. Z ní vyplývá, že mnohé jednotlivé efekty vulkanismu velkých magmatických provincií a velkých impaktů jsou shodné, zatímco u světového poklesu hladiny oceánů (která může mít různé příčiny) je podobností mnohem méně.

Zásadní roli má v hledání příčinných souvislostí datování uvažovaných událostí a srovnání s časovým zařazením hromadného vymírání.

Časové sblížení mezi mnoha velkými komplexy kontinentálních záplavových bazaltů a etapami hromadného vymírání se ukázalo jako velmi nápadné ve třetí čtvrtině 20. století (např. Rampino a Stothers 1988). Příčinná souvislost však byla některými autory zpochybňována na základě některých časových diskrepancí – v některých případech časového sblížení se podle existujících datování zdálo, že náhlé vymírání předcházelo hlavní etapy nebo vznik celého komplexu platóbazaltů, později zařazených mezi velké magmatické provincie. Velmi populární ve vědeckých kruzích i v řadách širší veřejnosti se stalo vysvětlování hromadných extinkcí jako důsledku velkých impaktů, kde se zdála časová shoda lepší.

Tabulka 3: Předpokládané mechanismy, které mohly mít za následek masové extinkce (převzato z publikace MacLeod, 2005). Plnými kroužky jsou vyznačeny pravděpodobné projevy, otazníky značí možné, ale nejisté projevy, chybějící symbol znamená absenci příslušného efektu.

Prediced effects of mass extinction causal mechanisms

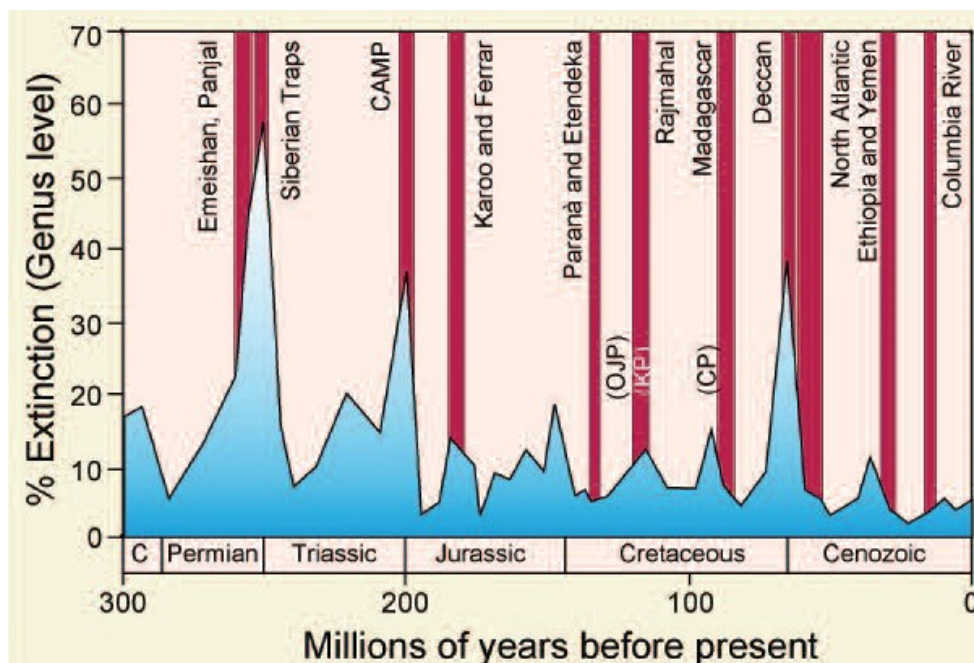
Effect	Cause		
	Large Bolide Impact	Sea-Level Fall	LIP Volcanism
Reduced light penetration	●		●
Increase atmospheric particulates	●	?	●
Inceased albedo	●	●	●
Increased cloud cover	●	?	●
Increased water vapor & CO ₂	●		●
Reduced CO ₂		●	
Ozone depletion	●		●
Increased heavy metals	●	●	●
Acid rain	●		●
Global wildfires	●		
Shock heating	●		
Reduced marine shelf area		●	

Tabulka 4: Rané časové srovnání vzniku významných LIPs s etapami hromadného vymírání (převzato z Rampino a Stothers, 1988). V současnosti jsou již některé časové údaje mnohem přesnější.

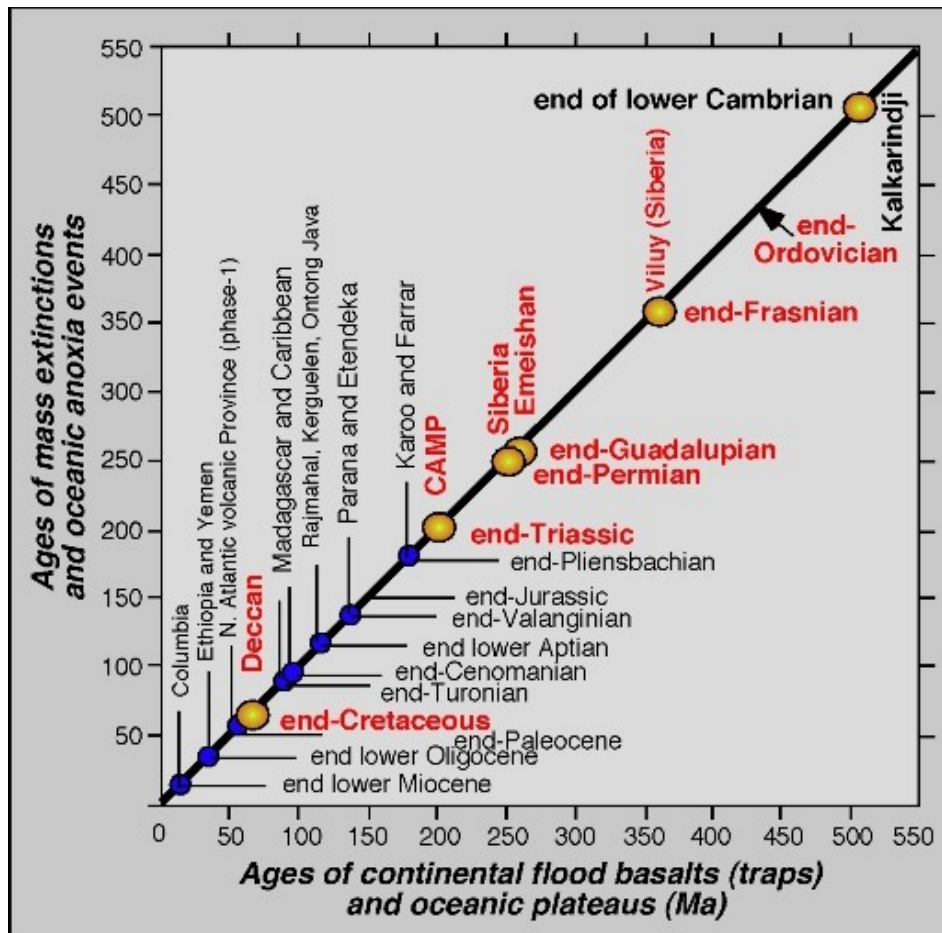
Ages of flood basalt initiations and mass extinctions.

Flood basalts		Mass extinctions	
Episode	Age (10 ⁶ years)	Stage	Age (10 ⁶ years)
Columbia River (U.S.)	17 ± 1	Lower to middle Miocene	14 ± 3
Ethiopian	35 ± 2	Upper Eocene	36 ± 2
Brito-Arctic	62 ± 3	Maastrichtian	65 ± 1
Deccan (India)	66 ± 2		
		Cenomanian	91 ± 0
Rajmahal (India)	110 ± 5	Aptian	110 ± 3
Serra Geral (S. America)	130 ± 5	Tithonian	137 ± 7
South-West African	135 ± 5		
Antarctic	170 ± 5	Bajocian	173 ± 3
South African	190 ± 5	Pliensbachian	191 ± 3
Eastern North American	200 ± 5	Rhaetian/Norian	211 ± 8
Siberian	250 ± 10	Dzulfian/Guadalupian	249 ± 4

S vývojem poznání velkých magmatických provincií, vedle kontinentálních i oceánských, vylepšenými geochronologickými metodami a rychlým růstem počtu přesnějších datování vulkanických hornin ve velkých provinciích se i s upřesňováním stáří masových extinkcí se postupně ukázalo, že časová shoda mezi některými etapami hromadného vymírání a vznikem velkých magmatických provincií je v řadě případů mnohem lepší, než se původně zdálo. Dokumentují to velmi pěkně obrázky 9 a 10, ze kterých vyplývá, že v některých případech jako u sibiřských trapů při hranicích etap hromadného vymírání není známa časově odpovídající velká magmatická provincie, která by mohla být jejich příčinou (např. na konci ordoviku a z méně výrazných extinkcí na konci jury).



Obr. 9. Srovnání časového zařazení velkých magmatických provincií a etap hromadného vymírání mezi koncem karbonu a současností podle nových výsledků datování. Převzato z článku Saunders 2005. Zkratky: CAMP – Central Atlantic Magmatic Province, OJP – Ontong-Java Plateau (oceánské plató), CP – Karibská provincie (rovněž oceánská).

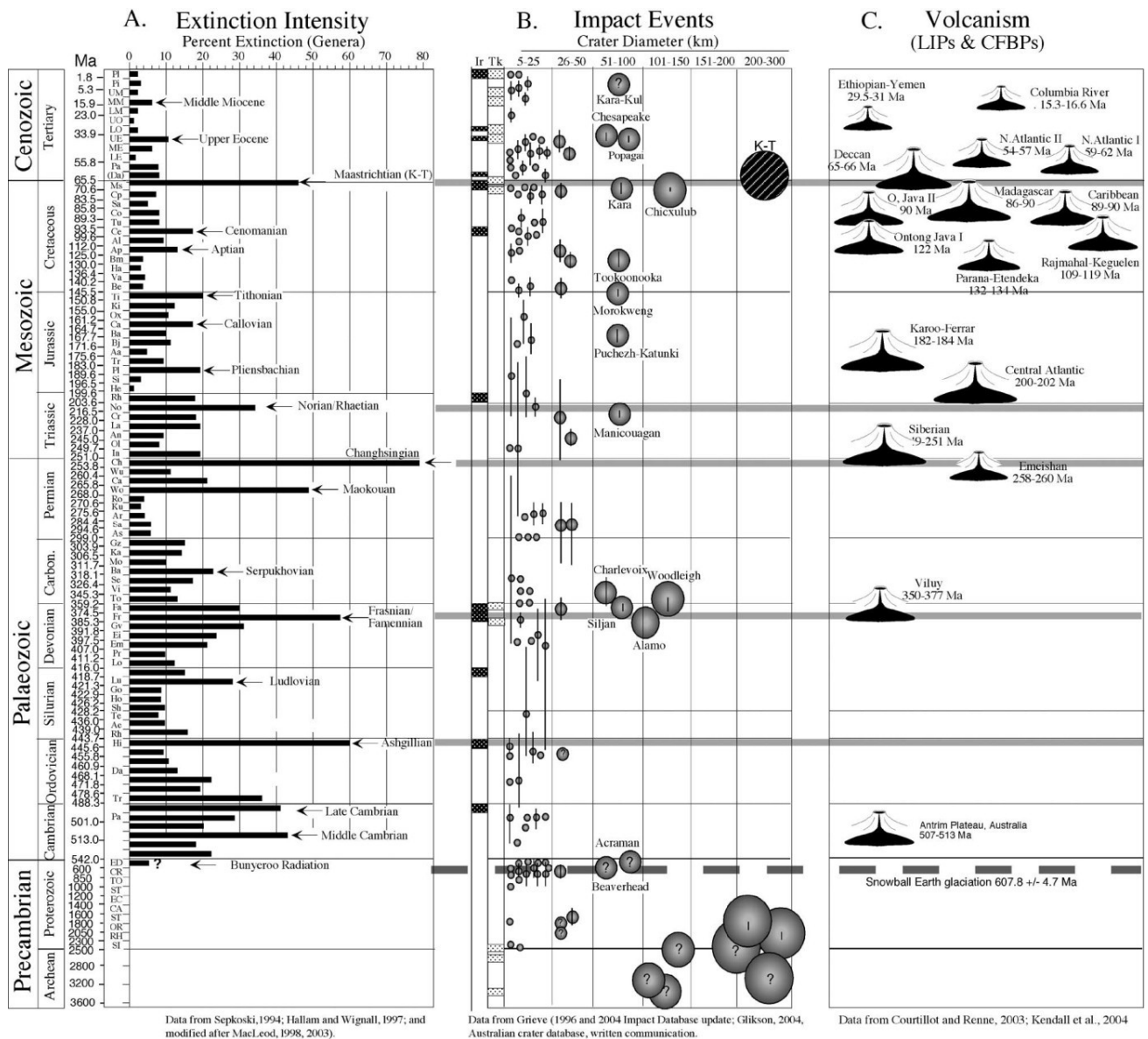


Obr. 10. Srovnání časového zařazení velkých magmatických provincií a etap hromadného vymírání během celého fanerozoika podle nových výsledků datování. Převzato z článku Keller et al. 2012. Z nejvýznamějších masových extinkcí (červeně) pouze ta na konci ordoviku nemá časově odpovídající velkou magmatickou provincii. CAMP – Central Atlantic Magmatic Province.

Komplikací v nazírání na velké magmatické provincie jako příčiny většiny etap hromadného vymírání je však známá existence impaktových kráterů, které často spadají do stejného časového intervalu jako LIPs a nebo jsou alespoň časově velmi sblížené (viz obrázek 11, např. Keller 2005 nebo Keller et al. 2012).

Proto vedle nejběžnějšího vysvětlení vzniku velkých magmatických provincií v důsledku výstupu plášťových chocholů či sloupců (mantle plumes) s obsahem snáze tavitelného recyklovaného materiálu velmi staré oceánské kůry, podle některých hypotéz vystupujících až od hranice spodního pláště a jádra (přehled viz např. Campbell 2005), vznikly i teorie odlišné. Např. Jones (2005) předpokládá, že samotný magmatismus velkých magmatických provincií mohl být vyvolán velkými impakty. Podle tohoto autora mohly být

některé bolidy dostatečně velké na to, aby svým dopadem vyvolaly vedle šokové metamorfózy až tavení korového materiálu v malých hloubkách, ještě dekompresní tání zemského pláště v hlubších oblastech pod kráterem. Přestože matematicky se takový případ dá namodelovat (Jones 2005), přímé důkazy role takového procesu při vzniku LIPs chybí.



Obrázek 11. Časové porovnání extinkcí (masová vymírání představují nejdelší silné čáry v levé části obrázku), významných datovaných impaktů (uprostřed, velikost symbolu zhruba znázorňuje relativní rozměry předpokládaného bolidu) a vulkanismu velkých magmatických provincií (vpravo, velikost symbolu odráží přibližně kubaturu magmatického materiálu). Převzato z práce Keller (2005).

7. Závěr

Z materiálu, který byl použit pro sepsání bakalářské práce, jednoznačně vyplývá, že negativní vliv vulkanismu velkých magmatických provincií na soudobý ekosystém byl nepopiratelný, i když dosud všechny jeho aspekty nejsou dostatečně známy a jsou zapotřebí další speciální studie. Hlavní závěry z dosaženého stupně poznání jsou tyto:

- 1) Časové vztahy mezi vznikem různých velkých magmatických provincií a hromadným vymíráním jsou často velmi těsné, v řadě případů je prokázána až překvapivě dokonalá časová shoda. Skvělým příkladem jsou sibiřské trapy na konci permu.
- 2) Existují však některé etapy hromadného vymírání, které nelze vztáhnout ke vzniku konkrétní LIP, stejně jako existují LIPs, jejichž vznik se v paleontologickém záznamu masových vymírání dostatečně výrazně neprojevil.
- 3) V některých případech je nápadné časové sblížení vulkanismu velkých magmatických provincií a významných impaktů, které je častější než by odpovídalo vztahům náhodným.
- 4) Přestože existují hypotézy, podle nichž mohl být magmatismus velkých magmatických provincií vyvolán impaktem, neexistuje zatím žádný případ, kdy by byl takový vztah nějak dokázán.
- 5) Masové vymírání může mít v různých dobách různé příčiny a neexistuje univerzální spouštěč tohoto procesu, který by mohl vysvětlit všechny etapy masové extinkce. Zdá se však, že nejvýraznější následky měly kombinace různých příčin, zejména kombinace vulkanismu LIPs a impaktů.

8. Použitá literatura:

- Bambach, R. K. 2006: Phanerozoic biodiversity mass extinctions. - *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34, 127–155.
- Bjerrum C. J., Canfield D. E., Frei R., Korte C., Rulf M., Stemmerik L. (2013) Ocean anoxia and large igneous provinces. - *Geophysical Research Abstracts*. 15, 1.
- Bryan S. E., Riley T. R., Jerram D. A., Leat P. T., Stephens C. J. (2002) Silicic volcanism: an undervalued component of large igneous provinces and volcanic rifted margins. In: Menzies M. A., Klemperer S. L., Ebinger C. J., Baker J. (Eds.), *Volcanic Rifted Margins*. *Geol. Soc. Am. Spec. Pap.*, 362, 99–120.
- Bryan S. E., Ernst R. E. (2007) Revised definition of Large Igneous Provinces (LIPs). - *Earth-Science Reviews*, 86, 175–202.
- Campbell I. H. (2005) Large Igneous Provinces and the mantle plume hypothesis. - *Elements*, 1, 265–269.
- Coffin M. F., Eldholm O. (1992) Volcanism and continental break-up: a global compilation of large igneous provinces. In: Storey B. C. & Alabaster T. & Pankhurst R. J. (Eds.), *Magmatism and the Causes of Continental Break-up*. *Geological Society of London Special Publication*, 68, 17–30.
- Jablonski D. (1991) Extinctions: A Paleontological Perspective. - *Science, New Series*, 253, (5021), 754–757.
- Jones A. P. (2005) Meteorite impacts as triggers to Large Igneous Provinces. - *Elements*, 1, 277–281.
- Pande K. (2002) Age and duration of the Deccan Traps, India: A review of radiometric and paleomagnetic constrains. - *Earth and Planetary Science, Indian Academy of Science*, 111, (2), 115–123.
- Keller G. (2005) Impacts, volcanism and mass extinction: random coincidence or cause and effect? - *Australian Journal of Earth Sciences*, 52, 725–757.
- Keller G. et al. (2012) Volcanism, impacts and mass extinctions. - *The Geological Society of London, Geoscientist*. 22, (10), 10–15.

- MacLeod N. (2005) Mass Extinction Causality: Statistical Assessment of Multiple-Cause Scenarios. - Department of Palaeontology, The Natural History Museum, 1–8
- Markoš A. a spol. (2007) Staré pověsti (po)zemské aneb Malá historie planety a života. - Nakladatelství Pavel Mervart.
- Raup D. M. (1995) O zániku druhů - Nakladatelství Lidové Noviny, Praha, 188 pp. (orig.: Raup D. M. 1991, Extinction: Bad Genes or Bad Luck?). Norton and Co., New York. 210 pp.)
- Rampino M. R., Stothers R. B. (1988) Flood basalt volcanism during the past 250 million years. - Science, New Series, 241, (4866), 663–668.
- Reichow M., Saunders A. (2009) The Siberian Traps and the End–Permian mass extinction: a critical review. - Chinese Science Bulletin, 54, (1), 20–37.
- Renne P. R. (1999) Introduction to special issue on tectonic and magmatic evolution of the Paraná – Etendeka Large Igneous Province and South Atlantic Margins. - Journal of Geodynamics, 28, 317–319.
- Saunders A. D. (2005) Large Igneous Provinces: Origin and Environmental Consequences. – Elements, 1, 259–263.
- Self S., Thordarson T., Widdowson M. (2005) Gas Fluxes from Flood Basalt Eruptions. - Elements, 1, 283–287.
- Sepkoski Jr. J. J. (1992) A Compendium of Fossil Marine Animal Families, Milwaukee Public Museum Contributions in Biology and Geology, 83, 2nd edition, Milwaukee Public Museum, Milwaukee, Wisconsin (*citováno podle Sole a Newman 2002*).
- Sheth H. C. (2007) ‘Large Igneous Provinces (LIPs)’: Definition, recommended terminology, and a hierarchical classification. - Earth-Science Reviews, 85, 117–124.
- Sole R. V. and Newman M. (2002) Extinctions and Biodiversity in the Fossil Record. In: Mooney H. A. and Canadell J. G. (editors), Encyclopedia of Global Environmental Change, Vol. 2, The Earth system: biological and ecological dimensions of global environmental change, pp 297–301. John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
- Stothers R. B. (1993) Flood basalts and extinction events. - Geophysical Research Letters, 20, (13), 1399–1402.
- Wignall P. B. (2001) Large igneous provinces and mass extinctions. - Earth-Science Reviews, 53, 1–33.