

Země – planeta sopek. Proč někde vznikají sopky a co ovlivňuje jejich chování?

**Sopečná aktivita je nedílnou součástí fungování naší planety. Vznik sopek je však podmíněn tvorbou magmatu a jeho výstupem k zemskému povrchu, k čemuž dochází zejména podél rozhraní litosférických desek. Různá geotektonická prostředí jsou spojena s rozlišnými procesy tvorby magmatu, což se projevuje i na jeho složení. Rozmanitost ve složení, zejména obsahu sopečných plynů, pak má za následek odlišné chování sopek při erupci. Čím více plynu, k tím explozivnější erupci dochází. Zatímco slabé erupce s malým obsahem plynu vyvrhují „cákance“ lávy jen na okraj kráteru, obří a plynem bohaté erupce vymrští ohromná mračna sopečného popela vysoko do atmosféry a následně zasypou popelem rozsáhlá území. Velké erupce bývají navíc spojené s tvorbou pyroklastických proudů, které jsou na rozdíl od relativně pomalu tekoucích láv smrtelně nebezpečné. Ani vyhasnutí sopky neznamená konec nebezpečí, ze sva-
hů se mohou uvolňovat lahary – ničivé proudy bahna a kamení. Morfologicky výrazné hory se zvukovými a kouřovými projevy, schopné dávat suroviny a energii, ale také v krátkém okamžiku zničit vše živé, od nepaměti poutaly pozornost lidí, kteří je často spojovali se sídly svých božstev. Sopky jsou tak součástí našich životů i našich legend.**

Jako vulkanismus označujeme procesy související s výstupem magmatu na zemský povrch. Ale co to je magma a kde se bere? Jako magma označujeme horninovou taveninu. Má nejčastěji silikátové složení, ale existují i taveniny karbonátové, sulfidické nebo fosfátové. Mnoho lidí si zemské těleso představuje jako pevnou skořápku, pod jejímž povrchem všude proudí žhavé magma. Litosférické desky pak podle této představy plavou po oceánu roztavené horninové hmoty jako kry. Ve skutečnosti je však zemský plášť, tvořící podloží zemské kůry, v pevném stavu. Horniny zemského pláště se pomalu plasticky deformují a „tečou“ díky obrovským tlakům, podobně jako asfalt. Směrem do hloubky Země sice stoupá teplota, díky které by se horniny mohly

tavit, narůstá však také tlak, který teplotu tavení zvyšuje.

Aby se v zemském plášti začalo tvořit magma, musí se narušit rovnováha mezi teplotou a tlakem, která udržuje zemský plášť v pevném skupenství. Může například dojít k prohřátí, třeba při výstupu jiného magmatu z větších hloubek, které předá teplo svému okolí. Mnohem významnější je však vliv sníženého tlaku (obr. 1). Velmi pomalý pohyb plášťových hmot vynáší prohřáté horniny z větších hloubek a pokles tlaku způsobuje tavení. A to buď podél dlouhých zón, nazývaných středooceánské hřbety, kde se tvoří nová oceánská kůra a rozpínají se oceány, nebo nad bodovými výstupy – plášťovými chocholy, kde se vytvoří horká skvrna. Jedna taková

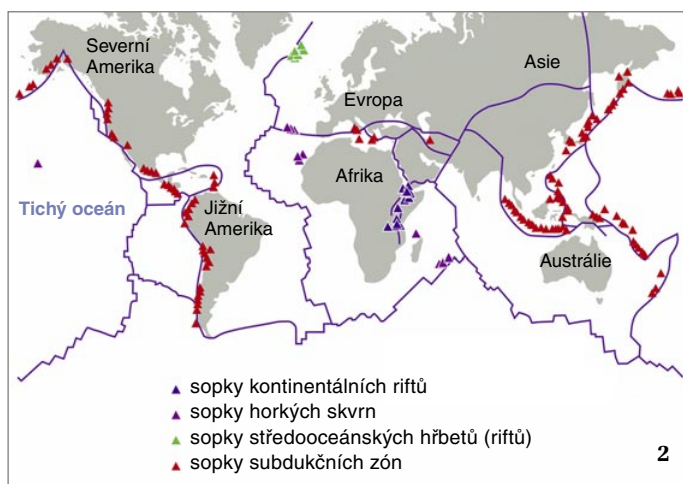
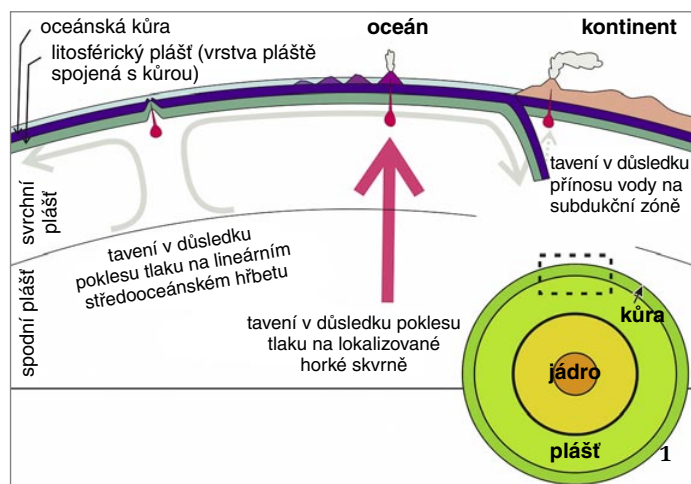
skvrna stojí například za vznikem Havajského souostroví.

Teplota tavení plášťových hornin může být také snížena přínosem vody. Ta se do hlubin pláště dostává podél subdukčních zón, kde dochází k zasouvání oceánské desky pod jinou oceánskou, nebo kontinentální litosférickou desku. Oceánská deska je tvořena bazaltovými lávami, které za miliony let na mořském dně nasáklý vodou vázanou v některých minerálech. Voda se uvolňuje až za vysokých tlaků a teplot v úrovni zemského pláště a umožňuje tavení okolního pláště. Tento proces je co do počtu sopek, ale i počtu erupcí a rizika pro lidskou společnost nejvýznamnějším procesem tvorby magmatu živícího sopky.

Různé procesy vzniku magmatu jsou vázány na různá geotektonická prostředí a to ovlivňuje jejich distribuci po celé planetě. Na mapě rozložení litosférických desek (obr. 2) jistě zaujme, že většina sopek vzniká podél jejich rozhraní. Podél subdukčních zón, kde se zasouvá jedna litosférická deska pod druhou, je vůbec největší koncentrace sopek, které jsou navíc díky vysokému obsahu sopečných plynů velmi explozivní. V pacifickém ohňovém kruhu, který sleduje subdukční zóny podél západního pobřeží obou Amerik přes Aljašku, Kamčatku, Japonsko, Filipíny až na Nový Zéland, se vyskytují zejména strmé stratovulkány, například Fuji v Japonsku (obr. 3).

Největší produkci magmatu sice pozorujeme podél středooceánských hřbetů, ale tyto erupce se odehrávají hluboko pod hladinou oceánu. Jedinou výjimkou je Island, kde se Středoatlantický hřbet (oceánský rift) dostává nad hladinu. Vulkány v tomto prostředí mají nejčastěji charakter puklinových erupcí (obr. 4). Ve východní Africe dochází k odtrhávání litosférických desek uvnitř kontinentu, výsledkem je Velká příkopová propadlina – kontinentální rift s řadou aktivních sopek (obr. 5). Pokračující rozpínání riftu, doprovázené sopečnou aktivitou již v Džibuti a severní Etiopii, vytváří zárodek nové oceánské kůry a jednoho dne zde dojde pravděpodobně k odtržení části kontinentu a vzniku nového oceánu.

Na několika místech naší planety nevystupují horké hmoty z hlubších partií zemského pláště podél lineárních švů (riftů), na kterých se rodí nová kůra, ale v plošně omezených chocholech, nad nimiž se vytvářejí horké skvrny. Jak se litosférická deska přes takový chochol přesouvá, mění se pozice zdroje magmatu vůči desce. Jed-





- 1 Schematický náčrt tvorby magmatu v různých geotektonických prostředích
- 2 Distribuce aktivních vulkánů vystupujících nad mořskou hladinu na Zemi vzhledem k jejich geotektonické pozici. Jsou také zobrazeny hranice hlavních litosférických desek.
- 3 Bazaltový stratovulkán Fuji v Japonsku je sice posledních 300 let klidný, kdysi však šlo o jednu z nejaktivnějších sopek.
- 4 Řetězec drobných pyroklastických kuželů puklinové erupce Laki na Islandu

notlivé vulkány tak přicházejí o zdroj magmatu a rodí se nové. Výsledkem jsou řetězce vyhaslých vulkánů uprostřed oceánu, zakončené jedním nebo dvěma vulkanicky aktivními ostrovy, jako u Havajských ostrovů. Horké skvrně za svou existenci vděčí i Kanárské ostrovy (obr. 6). Kalderový komplex Yellowstone v Severní Americe je pak příkladem vulkanismu horké skvrny v kontinentálním prostředí.

Magma se dere k povrchu

Magma, ať už se vytvoří v kterémkoli geotektonickém prostředí, je lehčí než okolní horniny, a proto stoupá vzhůru. O tom, jak se bude magma chovat na zemském povrchu, rozhoduje jeho složení, zejména obsah křemíku a rozpuštěných sopečných plynů – vodní páry, oxidu uhelnatého (CO), oxidu uhličitého (CO₂), fluoru (F), chlóru (Cl), síry (S) a oxidů síry. Obsah křemíku ovlivňuje viskozitu magmatu. Čím více křemíku magma obsahuje, tím má vyšší viskozitu, tedy hůře teče. V takovém případě má tendenci tvořit bochníky (vytlačené kupy, dómy), spíše než se rozlévat do stran v podobě dlouhých lávových proudů s nízkou viskozitou. Možná ještě důležitější je ale obsah sopečných plynů. Pokud jich magma obsahuje málo, dojde pouze k vyhlížení lávy. Láva je magma, které se vylíje na zemský povrch. Láva sice ohrožuje infrastrukturu a nemovitosti, ale naštěstí se v naprosté většině případů pohybuje jen rychlostí, před kterou lze utéct nebo ujet, a zdaleka tak nepředstavuje ten nejnebezpečnější vulkanický jev. V lávových proudech se mohou tvořit rozsáhlé lávové tunely, které vzniknou, když tekutý střed lávy pokračuje v tečení, zatímco okraje již ztuhly do pevné kůry (obr. na 2. str. obálky).

Pokud však magma obsahuje významné množství rozpuštěných plynů, jeho chování se dramaticky mění. Při výstupu vzhůru se snižuje tlak, tím se snižuje rozpustnost plynu v kapalině (magmatu). Plyn začíná tvořit bublinky, které narůstají a vzniká jich stále víc (obr. 7). Ve chvíli, kdy objem plynových bublin přesáhne 70–75 %, se magma roztrhne na menší části (proběhne frag-

mentace), které expandující žhavé plyny ženou vzhůru ze sopečného jícnu (obr. 8). Čím více plynů a čím větší viskozita magmatu, k tím intenzivnějšímu rozdrobení dojde. Při silně explozivních erupcích, kdy je materiál rozdroben na jemný popel, žene erupční mračno vzhůru ještě nízká hustota směsi sopečných plynů a popela oproti okolnímu studenému vzduchu. V momentě,



kdy se hustoty obou směsí (erupční sloupec versus okolní vzduch) vyrovnají, začne se eruptční mráčno rozprostírat horizontálně do podoby deštníku. Na základě obsahu plynů, a tedy objemu vyvrhovaných útržků magmatu, rozlišujeme několik základních typů explozivních erupcí. Při erupci havajského typu malé množství plynu vystřeluje ze sopečného jícnu velké „cákance“ lávy, dopadající jen na okraj kráteru. O něco větší obsah plynu vede k erupci strombolského typu. Při této erupci jsou vyvrhovány útržky sopečných strusek do relativně malé výšky a malé vzdálenosti od kráteru. Ještě větší podíl plynu u pliniovských erupcí rozdrobí magma na drobné střípky, které jsou následně v podobě ohromného eruptčního mráčna vyvrženy vysoko do atmosféry a ve formě sopečného popela zasypou rozsáhlé území. K explozivité pak může přispět ještě vnější plyn, většinou vodní pára, která se vytvoří zahřátím vody např. při erupci v mělkém moři, nebo za přítomnosti vody v kráteru. Zvláštním druhem jsou maarové erupce. Vystupující magma se střetne ještě pod povrchem s horninovým prostředím nasyceným vodou. Okamžitá změna skupenství vody na páru se projeví mohutnou podpovrchovou explozí (obr. 7), která roztrhá okolní horniny a vytvoří nálevkovitý kráter – maar (blíže na str. 213–215 této Živy). Maar je pak často zaplněn vodou (obr. 9). Staroněmecké slovo maar pro malé kruhové jezírko dalo tomuto typu sopky jméno.

Když na velikosti záleží

Ve zkratce jsme si představili základní faktory ovlivňující chování sopek při erupci. K tomu všemu ještě přispívá velikost magmatického krbu, resp. objem magmatu, jež může být v danou chvíli vyvrženo na povrch. Každá erupce je proto trochu jiná, ale základním parametrem, který veřejnost zajímá, je velikost explozivní erupce. Byla proto definována logaritmická škála velikostí explozivních erupcí – Volcanic Explosivity Index (VEI), s hodnotou 0 pro neexplozivní erupce s objemem do 10^4 m^3 a hodnotou 8 pro erupce o objemu 10^{12} m^3 . Např. obří erupce Pinatubo v r. 1991 s 10 km^3 (10^{10} m^3) vyvrženého materiálu tak odpovídá

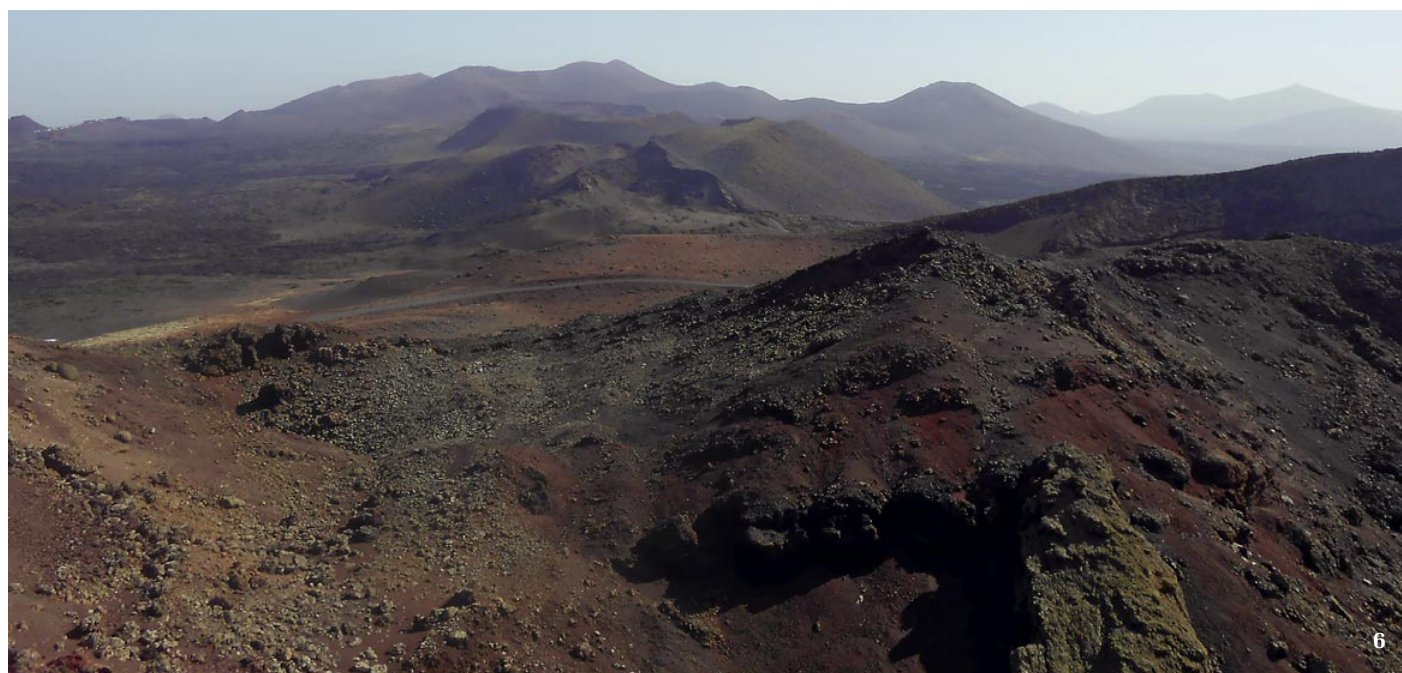


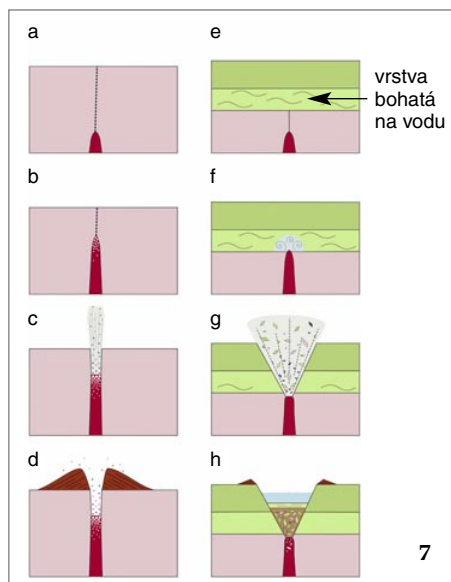
dá hodnotě VEI = 6. U opravdu obrovských erupcí s hodnotou VEI = 8, kdy je vyvrženo více než $1\,000 \text{ km}^3$ materiálu, již jde o supererupce. Supererupce kaldery Toba před 77 tisíci let urychlila nástup glaciálu (doby ledové). K nejmladší supererupci došlo před 26 500 let v kaldeře Taupo na Novém Zélandu. A patrně k vůbec největší sopečné erupci na Zemi, která vyvrhla 12 km^3 magmatu, došlo před 466 miliony let v provincii Nový Brunšvik v Kanadě. Pokud sopka během aktivity zaznamenala nějakou supererupci, označujeme ji jako supervulkán.

Popel vyvržený při velkých erupcích se však nemusí jen klidně snášet na zem jako teplý a špinavý sníh, eruptční sloupec může svou vlastní vahou zkolabovat a vytvoří pyroklastický proud – lavinu žhavého popela a plynů, která se po úbočí sopky žene rychlostí až prvních stovek kilometrů v hodině a před níž není úniku. Rozsáhlé pyroklastické proudy produkovala při erupci v r. 1991 sopka Pinatubo. Erupce sopky St. Helens v r. 1980, spuštěná kolapsem svahu vulkánu, také produkovala pyroklastický proud. V r. 1995 zničily pyroklastické proudy sopky Soufrière Hills celé Plymouth – hlavní město ostrova Montserrat v Karibiku.

I když k sopečným erupcím dochází na Zemi opravdu velmi často a v každý okamžik probíhá erupce na 10–20 sopkách, většinou jde o slabší události. Pro skutečně velké erupce se magma a energie střádají velmi dlouhou dobu. Platí tedy, že čím vyšší hodnota VEI, tím delší jsou pauzy mezi jednotlivými erupcemi. Zatímco sopky s VEI hodnotami 1–3 mohou mít erupce s četností jednou za několik let až několik desítek let, u VEI = 7–8 se již bavíme o stovkách tisíc let.

Skončením erupce však nebezpečí zcela nekončí. Strmé svahy budované nesoudržným sopečným materiálem, nitro vulkánu rozleptané horkými kyselými roztoky, kráter naplněný vodou a vrcholy přitahující oblačnost a přívalem srážek, to je kombinace vedoucí k snadnému narušení stability svahů. Voda ze srážek nebo kráterového jezera se rychle smísí s vulkanickým materiálem a výsledkem je proud bahna a kamení, který dostal v Indonésii jméno lahar. Tento název byl převzat do odborné literatury a označuje jeden z nejničivějších a nejsmrtonosnějších procesů spojených se sopečnou aktivitou. K laharům dochází poměrně často jak na aktivních vulkánech, tak na spících (spící sopka sice přímo nevy-





5 Řady drobných pyroklastických kuželů na dně Velké příkopové propadliny (kontinentálního riftu) v jižní Etiopii

6 Vulkanická krajina ostrova Lanzarote, součásti Kanárských ostrovů

7 Princip sopečných erupcí: magmatické erupce, hnané jen sopečným plynem (a–d), a maarové erupce, řízené dodatečným plynem – vodní párou (e–h)

8 Oblak sopečného popela nad vulkánem Sakurajima v Japonsku

9 Maarový kráter Shetan v Etiopii

10 Uložení současné lahary – toku bahna a kamení – na úpatí vulkánu Sakurajima. Snímky a orig.: V. Rappich



kazuje známky probíhající aktivity, ale má aktivní přínos magmatu a potenciál k jejímu obnovení) a vyhaslých vulkánech, zejména v oblastech s výskytem mohutných (např. monzunových) srážek (obr. 10). Na rozdíl od erupce, na kterou může upozornit změna tvaru sopky, zvýšený tepelný tok nebo seismická aktivita, může k uvolnění lahary dojít zcela nečekaně. Oblasti s potenciálním výskytem lahary tak vyžadují speciální preventivní opatření, např. budování kaskád zmírňujících jejich ničivý účinek.

Přestože se nám může zdát život v blízkosti aktivních sopek velmi riskantní, žijí v přímém dosahu možné erupce desítky milionů lidí. A není to vždy jen důsledek nedostatku prostoru nebo ekonomického tlaku, který by nutil nemajetné obývat nebezpečné lokality. Nejdražší pozemky hlavního města San Salvador ve středoamerickém Salvadoru se nacházejí vysoko na svahu stejnojmenné aktivní sopky. A lidé se sem ochotně stěhují za příznivějším klimatem, vysoko nad městský smog a za výhledem. Ale i v minulosti se různé civilizace držely v blízkosti sopek, které jim nabízely energii, suroviny, úrodnou půdu a výhody spočívající ve výrazné topografii. Morfologicky výrazné hory, jakými sopky jsou, navíc v případě aktivních sopek mnohdy se zvukovými a „pyrotechnickými“ jevy, lákaly pozornost lidí od nepaměti. Kam jinam umístit sídlo hromovládců než do hory, z níž dává okolním osadníkům o své přítomnosti náležitě vědět? Sopky tak vstupovaly do bájí a legend všech národů, které se v jejich blízkosti usadily, a to včetně Čechů obhospodařujících kra-



jinu dávno vyhaslých sopek. O tom již ale následující příspěvek.

Článek vychází z dlouhodobého výzkumu vulkanických systémů realizovaného v rámci Základního výzkumu (DKRVO2023-2027)

na České geologické službě ve spolupráci s českými i zahraničními univerzitami a geologickými službami.

Doporučenou literaturu najdete na webové stránce Živy.