



KRUH Z OHNĚ: Krátery velké jako hory explodují kolem vnějšího okraje aktivního supervulkánu a dusí okolní krajinu pod mračny popela a horkých plynů.

Tajemství

SUPERVULKÁNŮ

**Mikroskopické krystalky z vulkanického popela
odhalují překvapivé informace
o nejničivějších erupcích na světě.**

Ilya N. Bindeman



Ve skrytu hluboko pod povrchem Kalifornie a Wyomingu podřimují dva obrovské vulkány o téměř nepředstavitelně zuřivé síle. Pokud by se probudily, během několika hodin by zasypaly celý západ Spojených států mnohacentimetrovou vrstvou popela. Za poslední dva milióny let to oba dohromady udělaly už nejméně čtyřikrát. A podobné supervulkány doutnají také pod Indonésií a Novým Zélandem.

Erupce takového supervulkánu je svou ničivou silou srovnatelná s pádem malého asteroidu, ale v průběhu pozemské historie nastala desetkrát častěji, což z ní dělá jednu z nejhorších přírodních katastrof, které by lidstvo mohly potkat. Kromě okamžité destrukce způsobené proudy žhavých mračen by probuzený supervulkán vychrtil do zemské atmosféry tolik plynů, že by to na celá léta vážně narušilo globální klima.

Netřeba proto zdůrazňovat, že se vědci už dlouho snaží pochopit příčinu erupce takových gigantů, jak by se daly předpovídat a na co by se lidstvo asi mělo připravit, pokud by už taková situace nastala. Nejnovější analýzy mikroskopických krystalků, nacházejících uvnitř usazenin vulkanického popela pocházejících ze starých erupcí, již nabízí některé odpovědi. Toto porozumění, spolu s vylepšením technologií pro monitorování potenciálně nebezpečných míst, poskytuje nyní vědcům více sebedůvěry, že dokážou zpozorovat varovné signály dlouho před vlastní explozí. Zároveň však probíhající výzkumy také naznačují, že emise ze supervulkánu by mohly spustit tak nebezpečné chemické reakce v atmosféře, že by život v následujících měsících po erupci byl ještě více ohrožen, než se původně předpokládalo.

Téměř všichni vulkanologové se shodují v tom, že lidé, kteří dnes žijí na Zemi, s největší pravděpodobností aktivní supervulkán za svého života ještě nezažijí. Tak katastrofální erupce nastávají pouze jednou za několik set tisíc let. Avšak jen samotný rozsah a globální dopad takových událostí přitahuje pozornost vědců už od padesátých let.

Počáteční úžas

JEDNÍM Z PRVNÍCH OBJEVŮ geologů byla obrovská kruhovitá údolí o průměru 30 až 60 kilometrů a hloubce několika kilometrů, která se nápadně podobala mísovitým kalderám nacházejícím se na vrcholech mnoha známých sopek. Kaldera obvykle vznikne, když se krb z roztavené horniny (neboli magmatu) pod sopouchem sopky vyprázdní, takže horniny nad ním se zhroutí. Když si tyto první badatelé povšimli, že kalderovitá údolí se nacházejí v blízkosti jedněch z největších akumulací vulkanických hornin na světě uložených během jediné vulkanické události, uvědomili si, že stojí před zbytky vulkánů snad stokrát nebo dokonce tisíckrát větších, než je proslulá Hora Svaté Heleny ve státě Washington. Z extrémních rozměrů kalder a odhadnutého objemu vyvrženého materiálu odvodili, že magmatické krby le-

žící pod těmito obry musí mít obdobně monstrózní rozměry.

Protože silná kontinentální kůra a tepelné zdroje potřebné k vytvoření tak mohutných magmatických krbů se vyskytují jen vzácně, stejně vzácné jsou i vlastní supervulkány. Objem nejméně 750 krychlových kilometrů magmatu explodoval celý najednou za poslední dva milióny let pouze ve čtyřech oblastech, kterými byly Yellowstoneký národní park ve Wyomingu, Long Valley v Kalifornii, Toba na Sumatře a Taupo na Novém Zélandu. Stále však pokračuje hledání obdobně velkých erupcí i na dalších místech se silnou kontinentální kůrou, například v západních regionech Jižní Ameriky nebo na ruském Dálném Východě.

V polovině sedmdesátých let zkoumání minulých vulkanických události objasnilo několik způsobů, jak se magmatický krb může vytvořit a stát se nebezpečným. Pod povrchem Yellowstone se Severoamerická tektonická deska pohybuje přes „chochol“ z horkého viskózního materiálu, který vystupuje vzhůru konvekčním prouděním ze zemského pláště. (Plášť je 2900 kilometrů silná vnitřní vrstva mezi roztaveným zemským jádrem a relativně tenkou zemskou kůrou). Tato takzvaná „horká skvrna“ funguje jako gigantický Bunsenův hořák, který dokázal roztavit dostatek materiálu z nadložní kůry, aby to stačilo na katastrofické erupce za posledních 16 miliónů let. V Tobě na Sumatře je příčina vzniku magmatického krbu odlišná. Oblast leží nad takzvanou „subdukční zónou“, což je místo, kde jedna tektonická deska zajíždí pod druhou. Konvergence desek způsobuje rozsáhlé zahřívání hornin, hlavně díky částečnému tavení pláště nad klesající deskou..

Bez ohledu na to, jaký je zdroj tepla, tak jak se postupem času stále více a více mag-

ZÁKLADNÍ POJMY

- Nejnovější analýzy drobných krystalků uvnitř uloženin vulkanického popela z prehistorických erupcí vyvrátily naše staré domněnky o chování supervulkánů - a odhalily nové překvapivé informace o následcích jejich erupcí.
- Vývoj uvnitř magmatického krbu, který napájí supervulkán, může velmi ovlivnit podobu budoucí erupce.
- „Vulkanická zima“, která by zavládla na naší planetě po takové supererupci, by pravděpodobně trvala kratší dobu, než jsme se původně domnívali, ale jiné chemické reakce v pozemské atmosféře by byly pro život mnohem nebezpečnější

VELKÝ, VĚTŠÍ, NEJVĚTŠÍ

Supervulkány (oranžové a modré body) rozsévají popel na mnohem větších plochách, než i ty největší exempláře toho, co si většina lidí představuje pod pojmem sopka (žluté

a fialové body), protože tato skutečná vulkanická monstra, napájená mohutnými magmatickými krby, vyvrhují řádově mnohem více materiálu.

Hora Svaté Heleny: Erupce v roce 1980 vyvrhla < 0,5 krychlového kilometru hornin.

Národní park Crater Lake: Erupce Mount Nazamy před 7600 lety vyvrhla 50 krychlových kilometrů hornin.

Long Valley: Erupce u místa známého jako Bishop Tuff před 760 000 lety vyvrhla 750 krychlových kilometrů hornin.

Yellowstonký národní park: Erupce u Lava Creek před 640 000 lety vyvrhla 1 000 krychlových kilometrů hornin.

matu hromadí pod obrovskou masou nadložních hornin, tlak uvnitř magmatického krbu tím vzrůstá. Jakmile silně stlačené magma dostatečně nadzdvihne nadložní kůru, až se v ní vytvoří vertikální trhliny zasahující k zemskému povrchu, začne supererupce. Stále novými a novými trhlinami magma proniká ven, až nakonec vznikne na povrchu gigantický ohnivý kruh z explozivních kráterů. Jakmile se jednotlivé krátery mezi sebou propojí, mohutný horninový válec uprostřed už nemá co podpírat a tato „klenba“ se propadne do zbývajících magmatu, a to buď vcelku jako jeden obrovitý píšť nebo ve formě jednotlivých roztržitých bloků hornin – jako střecha domu, u kterého byly najednou odstraněny všechny zdi. Pád takového obrovského objemu hornin do magmatického krbu způsobí, že další láva a plyny prudce vyrazí po obvodu prstence na zemský povrch (viz *stadia 2 a 3 na obrázcích v rámečku*).

Stopy erupcí

ZÁHADY VŠAK STÁLE ZŮSTÁVAJÍ. Vědci si brzy uvědomili důležitou věc: totiž že ne každý velký magmatický krb nutně vždy skončí katastrofickou erupcí. Například takový Yellowstone je domovem dokonce tří z nejmladších supervulkánových kalder na světě, které se vytvořily postupně před 2,1 milióny, 1,3 milióny a 640 tisíci lety a leží téměř jedna na druhé. V přestávkách mezi erupcemi však magmatický krb uvolňoval na povrch téměř podobné objemy lávy, ale pomalu a klidně. Proč magma supervulká-

nu někdy vyrazí na povrch v explozi a jindy vytéká pomalu, je stále nejasné.

Studium složení drobných krystalků uvězněných uvnitř lávy a popela z Yellowstone však nabízí částečnou odpověď díky novému pochopení procesu, jak se magma utvářelo. V minulých desetiletích geologové přepokládali, že magma existuje milióny let v zemské kůře v podobě podzemních nádrží roztaveného horninového materiálu, a že pokaždé, když z něj část unikne na povrch, nové magma okamžitě vystoupá z větší hloubky, aby jeho zásobu doplnilo. Pokud by tato teorie byla správná, očekávali bychom však mnohem více rozsáhlých katastrofických erupcí, protože z mechanického i tepelného hlediska je nemožné udržovat taková obří magmatická tělesa v zemské kůře, aniž by bylo nutné je pravidelně vyprazdňovat.

Tyto starší představy byly hlavně založeny na takzvané „analýze celkové horniny“, kdy výzkumník získal jedinou sadu chemických údajů pro každý kus vulkanické horniny velikosti pěsti, který sebral. Takto získaná data poskytují důležité obec-

né vývojové trendy magmatu, ale nestačí pro stanovení věku vyvrženého magmatu ani hloubky, ve které se utvářelo.

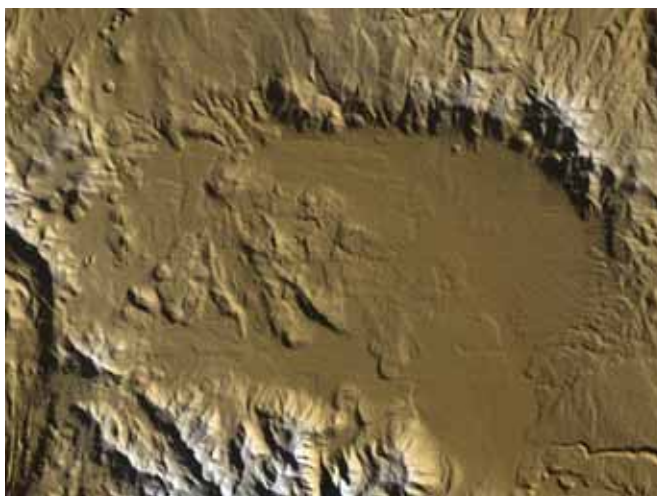
Každý kus horniny je ve skutečnosti složen z tisíců drobných krystalů, z nichž každý má svůj specifický věk, složení i historii. Takže když technologický pokrok na konci osmdesátých let umožnil analyzovat s dostatečnou přesností i jednotlivé krystaly, bylo to, jako kdybychom najednou získali schopnost číst jednotlivé kapitoly knihy, u které jsme dosud znali jen upoutávku na obálce. Badatelé například začali zjišťovat, že některé krystaly (a tedy i magma, ze kterého původně vznikly) se dostaly na povrch mnohem dříve než ostatní, a že některé krystaly vznikly hluboko pod zemí, zatímco jiné blízko zemského povrchu.

Během posledních deseti let geochemici věnovali pozornost jednomu druhu zvláště odolných vulkanických krystalů zvaných zirkony.

Protože věděli, že zirkon dokáže odolávat extrémním změnám teploty a tlaku beze změny svého chemického složení, několik

[AUTOR]

ILYA N. BINDEMAN je geochemik a odborný asistent na katedře geologie Univerzity v Oregonu. Narodil se v Moskvě a poprvé se začal zajímat o vulkanologii při studiu odlehlých sopek na Kamčatce na ruském Dálném Východě. Po dokončení doktorátu na Chicagské univerzitě v roce 1998 začal zkoumat drobné, téměř mikroskopické krystalky ve vulkanickém popelu se záměrem dozvědět se něco více o příčinách a následcích největších erupcí na světě. Pracoval na Univerzitě ve Wisconsinu-Madisonu a na Kalifornském technologickém Institutu. V srpnu 2004 nastoupil na oregonskou fakultu, kde vybudoval svou geochemickou laboratoř.



SPÍCÍ SUPEVULKÁNY, jako ten v Long Valley v Kalifornii (obrázek vlevo), nejsou klasické kuželové hory, jako je například Hora Svaté Heleny ve státě Washington (nahore). Jsou charakteristické nápadnými kalderami (proláklinami) na zemském povrchu, které se vytvořily, když se horninová klenba zřítla do magmatického krbu napájejícího poslední supererupci.

vědců - mezi nimi i John W. Valley z Univerzity ve Wisconsinu-Madisonu - je využívalo ke studiu rané evoluce zemské kůry (viz „A Cool Early Earth?“ John W. Valley; Scientific American, srpen 2005.) Když jsem se v roce 1998 připojil jako postgraduální student k Valleyho týmu, použili jsme yellowstonské zirkony ke sledování historie jejich matečného magmatu, což nám zase odhalilo důležité údaje o tom, jak se magma může chovat v budoucnosti.

Prvním krokem bylo změření poměru jednotlivých izotopů kyslíku v zirkonech z nejmladší yellowstonské supererupce, která před 640 000 lety dala vzniknout tufům z Lava Creek - fosilizovaným uloženinám vulkanického popela, v některých místech mocných až 400 metrů - jakož i mladším uloženinám, které byly vyvrženy během následných slabších erupcí. Když jsem dokončil předběžné analýzy, byli jsme s Valleyem oba překvapeni, že izotopové složení těchto zirkonů neodpovídá prostředí hlubokého, horkého zemského pláště, jak bychom očekávali v případě, že vyprázdněné magmatické krby jsou pokaždé znovu doplňovány z hloubi pláště. Zirkony vzniklé z plášťového magmatu by totiž v sobě nesly výraznou izotopovou značku: Jak zirkon krystalizuje z jednotlivých chemických prvků rozpuštěných v magmatu, nabírá při tom do sebe značně vysoký poměr kyslíku 18, což je těžký izotop kyslíku, který má ve svém jádru 10 neutronů namísto obvyklých osmi.

Valley i já jsme ihned pochopili, že naše magma muselo vzniknout někde blízko zemského povrchu. Zirkony, které jsme studovali, byly totiž vzhledem k plášti výrazně ochuzeny o těžký kyslík a toto ochuzení

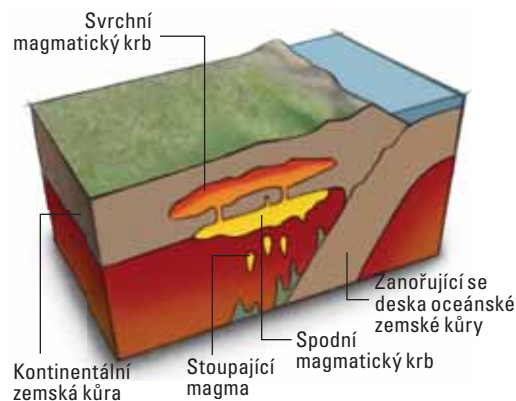
mohlo nastat jedině tehdy, když na horniny, z kterých později zirkony vykrytalizovaly, působila někdy předtím voda nebo sníh. Podezříváme z toho povrchovou horninovou klenbu předchozího magmatického krbu, která se při některé ze dvou starších supererupcí zhroutila do magmatu, roztavila se v něm, a tím položila základ nového magmatického krbu, který byl pak vyvržen při mladší katastrofické erupci Lava Creek a následujících slabších erupcích. Naše hypotéza byla posílena, když jsme zjistili, že stáří zirkonů z erupcí proběhlých po události Lava Creek je rozprostřeno po celém dvoumiliónovém období yellowstonského vulkanismu. Takto staré zirkony se mohly objevit v mladším popelu jen tehdy, pokud vznikly z původního magmatu vyvrženého při starších erupcích. Tento materiál se následně propadl do magmatického krbu a znovu se v něm roztavil, aby pomohl živit mladší erupce.

Význam našeho objevu spočívá v tom, že vědci nyní mohou do jisté míry předpovídat, jak by se yellowstonský supervulkan (a možná i ty další) mohl chovat v budoucnu. Pokud by Yellowstone zachvátila nová série mladších, předběžných erupcí (a ty se obvykle objevují týdny až stovky let před hlavní katastrofickou událostí), mohli bychom analýzou složení izotopů kyslíku v čerstvých lávách a stáří jejich zirkonů zjistit, jaký typ magmatu nyní převládá v magmatickém krbu. Pokud by byl materiál nové erupce ochuzen o těžký kyslík 18, potom s největší pravděpodobností jde o zbytky původního stagnujícího magmatu, které má nyní spíše podobu nepohyblivé kašovitě směsi velkých krystalů než explozivní vysoce tekuté kapa-

liny. Pokud bychom však zjistili, že nová láva nese izotopovou značku čerstvého magmatu z pláště a neobsahuje staré zirkony, potom je velmi pravděpodobné, že magmatický krb byl doplněn o velké množství čerstvého magmatu z hloubky. Takové zjištění by mohlo naznačovat zahájení nového vulkanického cyklu - a tím i zvýšenou pravděpodobnost, že nově přeplněný magmatický krb nám hrozí další katastrofickou explozí.

SUPERCYKLY

Obrovské krby roztaveného magmatu napájejícího supervulkanů vznikají nad horkými skvrnami („chocholy“ z viskózního plášťového



1 Částečné tavení materiálu zemského pláště nad zanořující se oceánskou kůrou vytváří magma, které stoupá vzhůru k rozhraní s kontinentální kůrou a tam se shromažďuje. Tento spodní magmatický krb funguje jako gigantický Bunsenův hořák, jenž taví části kontinentální kůry nad sebou, která má nižší bod tání než horniny pod ní. Určitý podíl magmatu navíc stoupá vzhůru úzkými vertikálními kanálky mezi oběma krby.

ZDROJ: J. S. LACKEY College of Wooster;
ÚDAJE: U. S. GEOLOGICAL SURVEY (vlevo);
TODD CULLINGS National Park Service (vpravo)

Okamžité následky

DROBNÉ KRYSTALKY a jejich izotopové značky nám také odhalily další překvapení – dobrá i špatná – týkající se možných následků erupcí. Jedním z nejlépe prostudovaných důsledků erupce supervulkánu je Bishop Tuff – vulkanická vrstva mocná desítky až stovky metrů, vycházející na povrch jako Volcanic Tablelands ve východní Kalifornii. Tyto mohutné uloženiny představují to, co zbylo z přibližně 750 krychlových kilometrů magmatu vyvrženého při vzniku kaldery supervulkánu Long Valley asi před 760 tisíci let.

Desítky let mnozí geologové předpokládali, že něco takového jako Bishop Tuff mohlo vzniknout jen během celé série jednotlivých erupcí. Avšak pečlivé studium mikroskopických bublinek magmatu uvězněných uvnitř drobných krystalků křemene odhalilo něco jiného. Rychlost, s jakou magma opouští magmatický krb, závisí hlavně na dvou faktorech: na viskozitě neboli tekutosti magmatu a na rozdílu mezi tlaky uvnitř magmatického krbu a na zemském povrchu. Protože tlak uvnitř bublin-

ky magmatu zachycené v krystalu odpovídá tlaku uvnitř krbu, ve kterém se magma vytvářelo, bublinka funguje jako miniaturní magmatický krb.

S vědomím této závislosti studoval Alfred Anderson z Univerzity v Chicagu se svými kolegy rozměry bublinek pod mikroskopem, aby mohl odhadnout, jak dlouho trvalo magmatu, než proniklo na povrch. Na základě těchto a ještě dalších experimentů a pozorování v terénu, probíhajících od devadesátých let, si geologové dnes myslí, že Bishop Tuff – a pravděpodobně i větší na ostatních pozůstatků po supererupcích, byl vyvržen během jediné katastrofické události trvající pouhých 10 až 100 hodin.

Díky těmto objevům museli badatelé pozměnit své modely rekonstruující průběh erupcí supervulkánů. O vulkanických událostech o rozměrech té, která zasáhla Long Valley nebo Yellowstone, se nyní zpravidla předpokládá toto: namísto pomalého vytékání žhavé lávy, jaké můžeme pozorovat například na úbočích Kilauea na Havajských ostrovech, je charakteristickým rysem takovéto události nadzvuko-

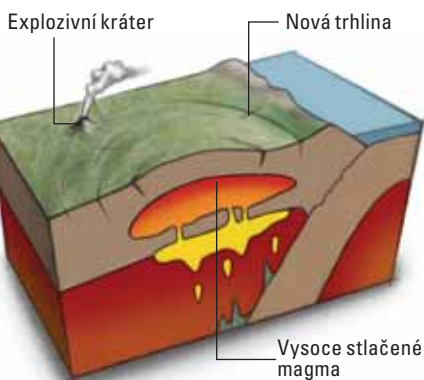
vé vymrštění superžhavých zpěněných plynů a popela, které vystoupají vysoko do stratosféry, až do výšky 50 kilometrů nad povrch. Jakmile se horninová klenba nad magmatickým krbem zhroutí, vyrazí z kaldery vodorovně na všechny strany obrovská tmavá mračna zvaná pyroklastické proudy. Jsou přechodným stadiem mezi lávou a popelem, takže se pohybují extrémně rychle – některé zdroje udávají až 400 kilometrů v hodině, takže automobily a dokonce ani menší letadla by neměly šanci uniknout. Tato mračna jsou velice žhavá – 600 až 700 °C – takže spálí a pohřbí úplně všechno do vzdálenosti desítek kilometrů od erupce.

Stejně nebezpečný jako pyroklastické proudy je však také vulkanický popel vymrštěný do atmosféry, jenž může mít dokonce mnohem závažnější a dlouhodobější následky pro Zemi. Ještě dny nebo i týdny bude stovky kilometrů od erupce padat na zem světle šedý popel jako sněhové vločky.

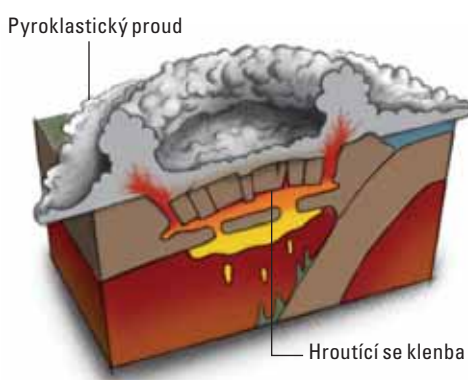
Do vzdálenosti 200 kilometrů od kaldery bude většina slunečního světla odstíněna částicemi v atmosféře, takže obloha

materiálu, vystupující konvekčním prouděním vzhůru) nebo nad subdukčními zónami (oblastmi, kde jedna tektonická deska zajiřdí pod druhou). V obou případech však gigantické vulkány sledují

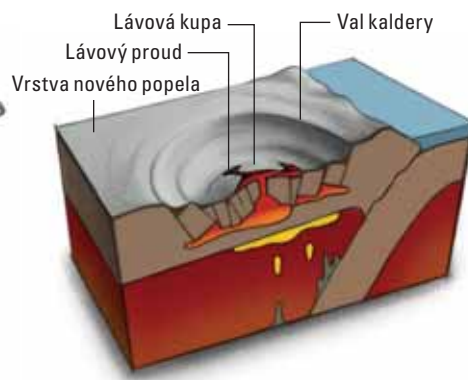
určitý erupční cyklus, kterému nyní začínáme rozumět lépe než kdykoli předtím. Zde uvádíme čtyři základní stadia cyklu od počátečního vytvoření magmatického krbu nad subdukční zónou:



2 Jak se horní magmatický krb zvětšuje, horninová klenba nad ním se vyklenuje a praská. Magma vzniklé tavením zemské kůry je velmi málo tekuté díky svému obohacení křemíkem a nízké teplotě vzhledem k plášťovým magmatům, takže voda a plyny jím pronikají jen velmi obtížně. Jakmile se tedy taková zátka ze značně viskózního magmatu nějakou vertikální trhlinou náhle propracuje k povrchu, silně stlačený materiál má tendenci spíše prudce explodovat, než pomalu vytékat.



3 Jak se po obvodu magmatického krbu vytvářejí stále další a další explozivní krátery, napínající se klenba z hornin nad krbem nakonec praskne a zhroutí se. Roztříštěné kousky spadnou do magmatického krbu, a tím vytlačí další magma po obvodu prstence vzhůru. Díky náhlému uvolnění se magma promění na gigantická žhavá mračna z popela, plynů a hornin, zvaná pyroklastický proud, který zničí krajinu do vzdálenosti desítek kilometrů na všech stranách od erupce.



4 Po erupci zůstane nad místem magmatického krbu obrovská kráterovitá proláklina zvaná kaldera. V průběhu času se zhroucené horniny tvořící dno kaldery začnou teplem magmatického krbu znovu tavit. Vytékající láva spolu s dalšími silami vytvoří uprostřed kaldery kupu. Pomalu se pohybující láva může v oblasti ještě mnohokrát uniknout, než dojde v magmatickém krbu k jejímu dostatečnému nahromadění na další supererupci.



ROZSÁHLÉ VULKANICKÉ SEDIMENTY vytváří strmá úbočí Yucca Mountain v Nevadě. Jde o zbytky proudů žhavého popela ze dvou supererupcí, které zasáhly okolí přibližně před 12,8 milióny let (*spodní vrstva*) a před 12,7 milióny let (*horní vrstva*)

v poledne bude vypadat stále jako za soumraku. Domy, lidé a zvířata, to vše bude pohřbeno nebo dokonce rozdrceno pod sopečnými nánosy. Ještě 300 kilometrů od erupce bude všude ležet vrstva popela silná půl metru. Po smíchání s dešťovou vodou to bohatě postačí na zhroutilí střech domů. Dokonce i slabší vrstva popela bude stačit na vyřazení elektráren a relových stanic. Pouhá jednomilimetrová vrstvička popela, která by mohla napadat na polovině zeměkoule, může vyřadit letiště a dramaticky narušit zemědělskou výrobu.

Jen pomalu a postupně budou deště (tvořené kyselinou z vulkanických plynů)

smývat silnou pokrývku popela. A protože vulkanické horniny a popel na vodě plavou, došlo by k ucpání hlavních vodních komunikací. Doprava po velkých řekách může úplně zkolabovat. Nedávné naftové vrty v Mexickém zálivu skutečně narazily na překvapivě silnou vrstvu vulkanických úlomků v blízkosti mississippské delty - více než 1600 kilometrů od Yellowstone. Jediné možné vysvětlení, jak se vulkanické horniny mohly nahromadit v takovém množství tak daleko od Yellowstonekého supervulkánu je, že připlavaly po řece a spojily se s běžnými sedimenty, s nimiž pak klesly na oceánské dno.



MOHUTNÁ STĚNA z šedé skály v západní Nebrasce vznikla z nahromadění popela po neznámé supererupci před 28 milióny let. Částičky v popelu napovídají, že takovéto exploze mohou měnit i chemické složení zemské atmosféry.

Dlouhodobý dopad

BADATELÉ MAJÍ DŮVODY věřit, že vymřetí tak obrovského množství škodlivých plynů do horních partií atmosféry může mít i další negativní a velmi dlouhodobé důsledky. Nové práce naznačují, že některé z nich by nemusely být tak špatné, jak jsme se kdysi obávali, avšak jiné mohou být ještě horší. Opět je velmi poučné studium složení malých meziproduktů z minulých explozí.

Z různých plynů, které jsou součástí každé vulkanické erupce, má nejhorší důsledky pro životní prostředí oxid siřičitý (SO_2), protože reaguje s kyslíkem a vodou za vzniku kyseliny sírové (H_2SO_4). Drobné kapičky této kyseliny zastíňující sluneční světlo budou hlavní příčinou prudkého ochlazení zemského klimatu bezprostředně po supererupci. Se znalostmi, že hydrologický cyklus planety by potřeboval měsíce až roky k úplnému vymytí kyselinových kapiček z atmosféry, mnozí badatelé docházeli k apokalyptickým předpovědím „vulkanické zimy“, která by na naší planetě zavládla po celá desetiletí, ne-li dokonce století. V poslední době však jiní vědci zase přišli s důkazy, které takovéto propočty podstatně redukují.

Stopy kyseliny sírové z velkých vulkanických erupcí, které dopadnou do oblastí s věčným sněhem a ledem, v něm téměř vždy zůstanou natrvalo uvězněny jako záznam minulých událostí. Badatelé, kteří v roce 1996 zkoumali složení ledu z Grónska a Antarktidy, v něm našli maximum koncentrace kyseliny sírové po supererupci Toba před 74 000 lety. Tato erupce vymrštila do atmosféry 2800 krychlových kilometrů lávy a popela a snížila průměrnou globální teplotu na Zemi o 5 až 15°C.



ZVÍŘECÍ KOSTRY pohřbené v popelu z katastrofické erupce v Idahu před 12 milióny let jsou nyní vystaveny ve Státním historickém parku „Ashfall Fossil Beds“ v severovýchodní Nebrasce. Většina z těchto zvířat pravděpodobně umírala pomalu a trýznivě, když jim padající vulkanický popel (což je v podstatě práškové sklo) zaplnil plíce a obrousil zuby. Jedovaté chemikálie z popela mohly také otrávit pitnou vodu.

Následky takového ochlazení byly nepo-
chybně hroznivé, ale netrvaly tak dlouho, jak
jsme si kdysi mysleli. Kyselinové kapičky vy-
mizely z ledového záznamu už po šesti le-
tech a někteří výzkumníci tvrdí, že dokonce
ještě rychleji.

Že by vulkanická zima netrvala tak
dlouho, jak se dříve předpokládalo, je dobrá
zpráva. Avšak nové, teprve v posledních pěti
letech vyvinuté metody studia složení kyslí-
kových atomů ve vulkanických kyselých
deštích, nám signalizují nebezpečí úplně ji-
ných dlouhodobých následků působení oxida-
tu siřičitého v atmosféře. Aby se oxid siřičí-
tý (SO_2) v atmosféře přeměnil na kyselinu
sírovou (H_2SO_4), musí se oxidovat - jinými
slovy, musí přijmout dva atomy kyslíku od
jiné sloučeniny, která se v atmosféře již na-
chází. Která sloučenina hraje tuto klíčovou
roli, je tématem vášnivých debat ve vědecké
komunitě, takže když jsem začal spolupra-
covat s Johnem M. Eilerem jako člen vědec-
kého týmu na Kalifornském technologickém
institutu, hledali jsme odpověď v mých
vzorcích popela z prehistorických erupcí
v Yellowstone a Long Valley.

Zaměřili jsme své analýzy na jeden zvlá-
ště účinný oxidant - ozón. Ozón je molekula
plynu tvořená třemi kyslíkovými atomy.
Nejznámější je jeho působení v horních vrst-
vách atmosféry, kde stíní Zemi před nebez-
pečnými ultrafialovými paprsky ze Slunce.
Díky vzácným chemickým přeměnám, kte-
ré jisté plyny prodělávají v přítomnosti velmi
intenzivního slunečního záření, je ozón cha-
rakterizován určitou anomálií ve své takzva-
né „hmotnostně nezávislé kyslíko-izotopové
značce“, která se jednoduše dá popsat jako
nadbytek izotopu kyslíku 17.

Když ozón (nebo kterákoli jiná molekula
bohatá kyslíkem) reaguje ve stratosféře s
 SO_2 , předá svou kyslíko-izotopovou značku
také výsledné kyselině, takže i v nové kysel-
ině je anomálie nadbytku kyslíku 17. V roce
2003 geochemici z Kalifornské Univerzity v
San Diegu našli první důkaz o tom, že tato
izotopová značka je přítomná v kyslíkových
atomech kyseliny, která později spadla na
zem jako kyselý déšť, a také v síranech, které
vznikly jako výsledek reakce této kyseliny s
popelom na zemi.

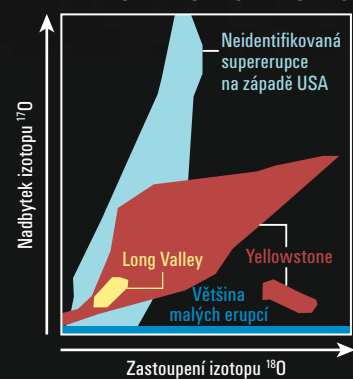
Nadbytek kyslíku 17 plus další chemické
trendy, které jsme objevili v síranech ze
vzorků popela z Yellowstone a Long Valley,
tak naznačují, že při reakcích s plyny vy-

DESTRUKCE OZÓNU



Nebezpečné plyny vyvržené filipínskou sopkou Mount Pinatubo v roce 1991 vypadají na satelitním snímku vrchní části zemské atmosféry jako barevné plochy (obrázek na pozadí textu). Nové důkazy naznačují, že takové plyny emitované z budoucích supervulkánů by mohly ještě předtím, než spadnou v podobě kyselého deště a reagují s popelem na sírany, vážně narušit ochrannou ozónovou vrstvu naší planety. Vzorky sulfátů z uloženin supervulkánů se vyznačují neobvyklým nadbytkem izotopu kyslíku 17 (nepravidelně zbarvené plochy v grafu představují soubory měření). Takováto anomálie se objevuje pouze u sloučenin, které získaly vzácné atomy při reakcích se zvláštními plyny (nejpravděpodobněji s ozónem) v horních vrstvách zemské atmosféry. Materiály, které vznikly na Zemi a zůstaly tam, jako například produkty většiny malých vulkanických erupcí, tuto anomálii nevykazují (modrá linka).

ANALÝZY SÍRANOVÝCH VZORKŮ



mřtěními ze supervulkánů bylo spotřebo-
váno významné množství stratosférického
ozónu. Jiní badatelé studující kyselý dešť
v Antarktidě také dokázali, že také tyto
události pravděpodobně narušily ozónovou
vrstvu Země. Začínáme si myslet, že super-
vulkány by mohly svými plynnými emisemi
„vyhlodat“ díry v ozónové vrstvě Země do-
konce na delší dobu, než by dokázaly ochla-
dit její klima.

Ztráta ochranné ozónové vrstvy by měla
za následek nárůst intenzity ultrafialového
záření dopadajícího na zemský povrch,
a tím větší genetické poškození buněk.
Rozsah a délka potenciální destrukce ozónu
je stále předmětem diskusí. Pozorování
z vesmíru odhalilo tři- až osmiprocentní
úbytek ozónové vrstvy po erupci filipínské

sopky Mount Pinatubo v roce 1991. Co by
se však stalo, pokud by erupce byla stokrát
větší? Jednoduchá aritmetika nám zde ne-
může dát odpověď, protože atmosférické
oxidační reakce jsou velmi složité a dosud ne
zcela prozkoumané procesy.

Vědecké metody studia a monitorování
vulkánů všech velikostí se vyvíjí s nejvyšší
možnou rychlostí. Avšak bez ohledu na to,
kolik se toho naučíme, nedokážeme erupci
zabránit. A co dokážeme říct o následcích
těchto katastrofických událostí, je stále jen
přínejlepším spekulace. Dobrá zpráva však
je, že vědci nyní mají dostatek poznatků
o místech pravděpodobných erupcí na to,
aby mohli se slušnou pravděpodobností
předpovědět, že v nejbližší budoucnosti nás
žádná taková katastrofa nečeká.

➔ CHCETE-LI VĚDĚT VÍCE:

Low- $\delta^{18}\text{O}$ Rhyolites from Yellowstone: Magmatic Evolution Based on Analyses of Zircons and Individual Phenocrysts. Ilya N. Bindeman and John W. Valley in *Journal of Petrology*, díl 42, strany 1491–1517; 2001.

Sulfate Oxygen-17 Anomaly in an Oligocene Ash Bed in Mid-North America: Was It the Dry Fogs? Bao Huiming, Mark H. Thiemens, David B. Loope and Xun-Lai Yuan in *Geophysical Research Letters*, díl 30, strany 1843–1848; 2003.

Rare Sulfur and Triple-Oxygen Isotope Geochemistry of Volcanogenic Sulfate Aerosols. Ilya N. Bindeman, John M. Eiler, Boswell Wing and James Farquhar in *Earth and Planetary Science Letters*.