

Vulkanismus: vnitřní energie Země



Akademie věd
České republiky



věda
kolem
nás
co to je...

118

Geologický ústav AV ČR, v. v. i., je výzkumná organizace multioborového zaměření provádějící výzkum v rozsáhlé škále věd o Zemi. Jeho odborná náplň se vyvíjela po celá desetiletí. Strukturní geologie, geologické studium terénů, studium platformního vývoje, magnetostratigrafie, geochemie endogenních a exogenních procesů, petrologie magmatických, metamorfovaných i sedimentárních hornin, vulkanologie, ložisková geologie, fytopaleontologie včetně mikrofytopaleontologie, zoopaleontologie obratlovců i bezobratlých a paleoekologie spolu s kvartérní geologií, geoarcheologií a environmentálním výzkumem reprezentují tradiční směry výzkumu v Geologickém ústavu. Ústav je rozčleněn do několika výzkumných oddělení a servisních laboratoří.

Oddělení geologických procesů se zabývá poznáním teplotních, tlakových a časových podmínek různých etap magmatických/vulkanických procesů v zemské kůře a svrchním plášti i souboru procesů hydrotermální a slabé i silné metamorfní přeměny. Vývoj sedimentárních pánví je studován s důrazem na procesy ovlivňující charakter sedimentace a diagenese i následné tektonické postižení pánevních výplní. Vedle využití klasického souboru geologických, petrografických a geochemických metod jsou vyvíjeny nové, progresivní laboratorní postupy. Oddělení geologických procesů disponuje tzv. čistou izotopovou laboratoří pro separaci chemických prvků a také TIMS laboratoří vybavenou hmotovým spektrometrem s termální ionizací, určeným k měření izotopových poměrů vybraných prvků.

Oddělení paleobiologie a paleoekologie se zaměřuje na výzkum životních podmínek, evoluci, dynamiku vývoje a na biostratigrafii fosilních bezobratlých (zejména skupin konodontů, korálů, brachiopodů, echinodermátů a graptolitů), na evoluci vybraných skupin obratlovců (ryb, obojživelníků, savců), palynologii karbonských, křídových a kenozoických sedimentů a na paleoichnologii v širokém stratigrafickém záběru od ordoviku po recent.

Oddělení environmentální geologie a geochemie integruje studium dynamiky chemických prvků v životním prostředí se studiem geologických procesů tak, jak jsou zaznamenány v sedimentech a půdách vzniklých během terciéru a kvartéru. Hlavní pozornost je věnována studiu složitých interakcí mezi neživou a živou složkou přírody, poznání klimatických oscilací a změn prostředí v nedávné geologické minulosti a vlivu člověka na přírodní procesy v současnosti. Výsledky výzkumu slouží nejenom k poznání obecných zákonitostí vývoje klimatu a prostředí, ale také jako podklad pro rozhodování o strategii a péči o současnou krajinu, půdní pokryv a životní prostředí jako celek.

Fotografie na obálce: Zrození sopky v islandském údolí Geldingadalir. Ze sopečného jícnu vyletují útržky žhavé čedičové lávy a vytvářejí spektakulární sopečný kužel. Část taveniny odtéká ve formě lávy typu pāhoehoe (foto Jaromír Stanczyk)

Země jako živá planeta díky sopečné činnosti

Přestože v minulosti na Marsu probíhala intenzivní sopečná činnost spojená se vznikem nejvyšší štítové sopky sluneční soustavy – Olympus Mons, dnes je z tohoto pohledu považován za prakticky mrtvé těleso. Naproti tomu Země je díky aktivní deskové tektonice a související sopečné činnosti mimořádně živou planetou. Vulkanismus je v podstatě činný cévní systém Země. Když ovšem dojde k jeho ucpání, může vyvstat velký problém v podobě erupce s katastrofálními následky. Sopky na naší planetě vznikají jako výsledek postupného uvolňování obrovské vnitřní energie Země, která pochází jak ze zbytkového tepla z primárního stadia vývoje naší planety, tak z radiogenního tepla vznikajícího v důsledku rozpadu radioaktivních izotopů prvků U, Th a K. Každý rok dochází na Zemi k desítkám erupcí. Na rozdíl od minulosti je dnes díky sociálním sítím možné sledovat projevy dynamického vulkanismu naší planety prakticky on-line. Fotografie a videa vybuchujících nebo lávu chrlících sopek se v médiích objevují čím dál častěji. Neznamená to však, že by k sopečné aktivitě docházelo oproti minulým rokům ve dramaticky zvýšené míře. Pouze je nyní vulkanismus lépe „vidět“. Například v letech 2021–2022 byly v médiích podrobně sledovány erupce sopky Geldingadalir na Islandu, sopky Cumbre Vieja na kanárském ostrově La Palma nebo mimořádně silná erupce podmořské sopky Hunga Tonga-Hunga Ha'apai v oblasti tichomořského souostroví Tonga. V souvislosti se zvýšeným zájmem o sopečnou činnost se lidé stále více zajímají o to, jaký dopad mají erupce na klima. Když totiž dojde k sopečné erupci, na povrch se nedostane pouze roztavená hornina, ale uvolní se i velké množství sopečných plynů, jako jsou vodní pára, oxid uhličitý nebo oxid siřičitý. Tyto plyny drolí lávu na popel, který v podobě erupčního mraku může ovlivnit sílu dopadajícího slunečního záření. Přesto dnes člověk ročně vypustí mnohonásobně více skleníkových plynů než všechny sopky za stejné období. Sopky navíc slouží k tomu, aby se do atmosféry dostaly zpět plyny, respektive chemické prvky, které se předtím uvnitř naší planety uložily. V dlouhodobém měřítku tak můžeme na sopky nahlížet jako na uhlíkově neutrální. Naopak člověk svou činností tento systém čím dál více vychyluje od přirozené rovnováhy.

Co je vulkanismus a jaké jsou jeho hlavní typy

Vulkanismus nebo také sopečná činnost je souhrn projevů energie uvězněné v nitru naší planety. Vulkanismus charakterizuje především pronikání **magmatu** (směs roztavených hornin a plynů) na zemský povrch, kde se následně označuje jako **láva**. Se sopečnou činností jsou rovněž spjaty výrony horkých plynů a par, prameny termálních vod a často i zemětřesení, která jsou způsobena pohyby magmatu v hloubce. Vulkanismus stejně jako **vulkanologie** (nauka o sopkách a sopečných jevech) nebo **vulkán** (sopka) mají název odvozený od pojmenování římského boha ohně a kovářství – Vulkána, který dle legendy sídlil ve své kovářské dílně přímo pod sopkou Etna. Bezprostředně pod sopkou se nachází **sopouch**, tedy přírodní dráha vulkanického materiálu (obr. 1a). Sopouch ústí do **magmatického krbu** představujícího velký podzemní prostor, kde se hromadí magma (obr. 1b). V případě vyprázdnění magmatického krbu po sopečné erupci vzniká pod sopkou dutina,



Obr. 1a Pohled přírodní dráhou do ústí islandské sopky Thrihnukagigur (Þríhnúkagígur). Tato sopka, která byla naposledy aktivní zhruba před 3500 let, je jediným místem na světě, kde lze relativně bezpečně sestoupit sopouchem přímo do jejího zachovalého nitra (foto L. Krmíček)

Obr. 1b Pohled na vyprázdněnou svrchní část magmatického krbu sopky Thrihnukagigur (Þríhnúkagígur). Červeno-černé zbarvení útvar vystupující napravo od autora brožury představuje zbytek magmatické žíly (foto N. Chalcarzová)



do které může celý vulkanický systém zkolabovat. Tento destruktivní tvar vulkánu v podobě kónické deprese kolem původního kráteru bývá označován termínem **kaldera**, odvozeným ze španělského označení kotlovité prohlubně na ostrově La Palma na Kanárských ostrovech.

Styl sopečné činnosti zásadně ovlivňuje celkové chemické složení zdrojového magmatu (zejména obsah oxidu křemičitého), přítomnost vody, se kterou může magma interagovat, a také obsahy sopečných plynů v magmatu rozpuštěných. Tyto faktory mají rovněž vliv na viskozitu (tekutost) láv, pro jejichž dva velmi rozšířené typy se vžil termíny vycházející z havajského lidového pojmenování. Hladká nebo různě zprohýbaná a zřasená nízkoviskózní láva se nazývá **pāhoehoe**, zatímco termínem **'a'a** (z citoslovce „au, au“) je označována ostrá a škvárovitá láva s vysokou viskozitou (obr. 2a). Pokud se láva dostane do kontaktu s ledem či vodou, dochází k jejímu prudkému zchlazení a vzniká **sopečné sklo** (mezi nejznámější typy skel patří obsidián a tachylit), popřípadě sklovitá (hyaloklastická) brekie (obr. 2b). Při výlevech pod vodní hladinou se láva nemůže volně rozlévat do stran, ale vrší se na sebe v podobě různě velkých bochníkovitých útvarů. Tímto způsobem vznikají polštářové lávy (anglicky *pillow lavas*).

Samotné typy sopečných erupcí můžeme klasifikovat do několika kategorií pojmenovaných podle typových oblastí či sopek. Pro klasifikaci jsou důležité zejména dva parametry – stupeň fragmentace pyroklastického/vulkanoklastického materiálu (produkty sopečných explozí tvořené kusy krystalů, vulkanického skla a hornin) vyvrhovaného z jícnu sopky a plocha uložení sopečného materiálu (obr. 3).

Nejklidnější projev explozivního vulkanismu představují **erupce havajského typu**, kdy malé množství plynu rozpuštěného v magmatu nemá dostatečnou energii k jeho roztrhání na příliš malé kousky. Při havajském typu erupce vznikají ploché sopky o velkém průměru, tvořené dobře tekoucími lávami charakterizovanými nízkým obsahem oxidu křemičitého. Pyroklastický materiál je vyvrhován do malých výšek a dopadá jen v bezprostředním okolí jícnu sopky. Žhavé úlomky lávy se po dopadu mohou opět spékat a vytvořit napečený/spečený kužel (anglicky *spatter cone* – viz foto na přebalu brožury).

Poněkud dramatictější průběh mají **erupce strombolského typu**, pojmenované podle italského sopečného ostrova Stromboli. Při této erupci vylétají z jícnu sopky útržky strusky (silně porézní sklovitý pyroklastický materiál o nejčastější velikosti úlomků mezi 0,2 až 6 cm), které vytvářejí typický struskový kužel (anglicky *cinder cone*). Mezi útržky strusek dojde občas k vyvržení většího fragmentu lávy, který v podobě sopečné bomby následně dopadá mezi okolní strusky (obr. 4a, b). Jejich aerodynamický tvar nejčastěji připomíná kapky, bochníky či větena. Pyroklastika erupcí strombolského typu pokrývají plochu do 5 km² a jsou vyvrhována do výšek jen asi 100 až 500 m.

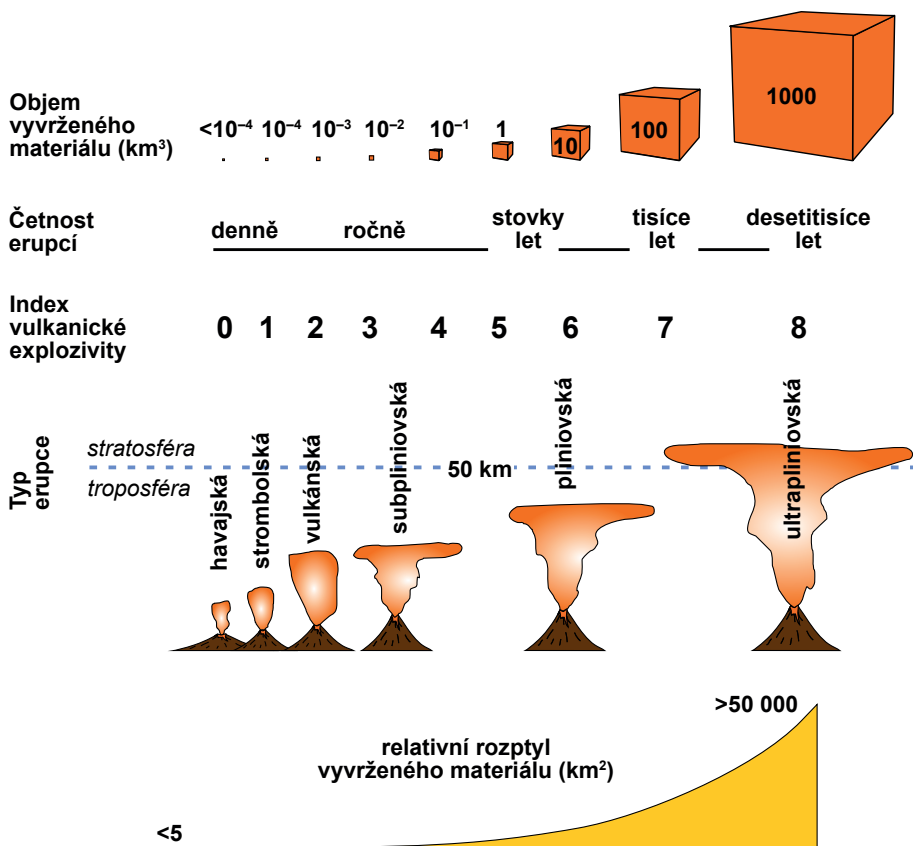
Pliniovské erupce jsou silně explozivní. Vysoký obsah plynů při tomto typu erupce má za následek velmi efektivní fragmentaci sopečného materiálu, kdy velikost úlomků nejčastěji odpovídá prachu nebo jemnému písku, který může pokrýt území od 500 km² až po 50 000 km². Plyn unikající vysokou rychlostí z jícnu sopky vynáší vysoko do atmosféry jemný materiál, který se ve výšce mezi 10 až 55 km přestává šířit vzhůru a je následně rozprostírán do stran za vzniku erupčního mraku. Lávy pliniovské erupce jsou charakterizované zvýšeným obsahem oxidu



Obr. 2a Tuhnoucí láva dokáže na svém povrchu vytvořit nejrůznější tvary. Je-li vrstva lávy typu páhoehoe pod tuhoucím povrchem ještě pohyblivá, může na povrchu dojít k jejímu nařasení a zprohýbání, které připomíná lana a provazy. Ukázka provazové lávy je součástí výlevů třetihorních platů bazaltů vystupujících u obce Viðareiði na Faerských ostrovech (foto L. Krmiček)

Obr. 2b V interakci s vodou či ledem může prudce zchlazená láva „explodovat“ do formy hyaloklastické brekcie. Ukázka hyaloklastické brekcie s viditelnými ostrohrannými fragmenty utuhlé lávy, vystupující v severní části ostrova Jamese Rosse v Antarktidě (foto L. Krmiček)





Obr. 3 Grafické znázornění vztahu mezi objemem vyvrženého sopečného materiálu, frekvencí jednotlivých erupcí, indexem vulkanické explozivnosti, hlavními typy sopečných erupcí a plošným rozptylem vyvrženého materiálu

křemičitého. Poprvé tento typ erupce popsal Plinius mladší v dopise během erupce sopky Vesuv v roce 79, při níž zahynul jeho strýc Plinius starší a byla zničena města Pompeje, Herculaneum, Stabie, Oplontis a Boscoreale.

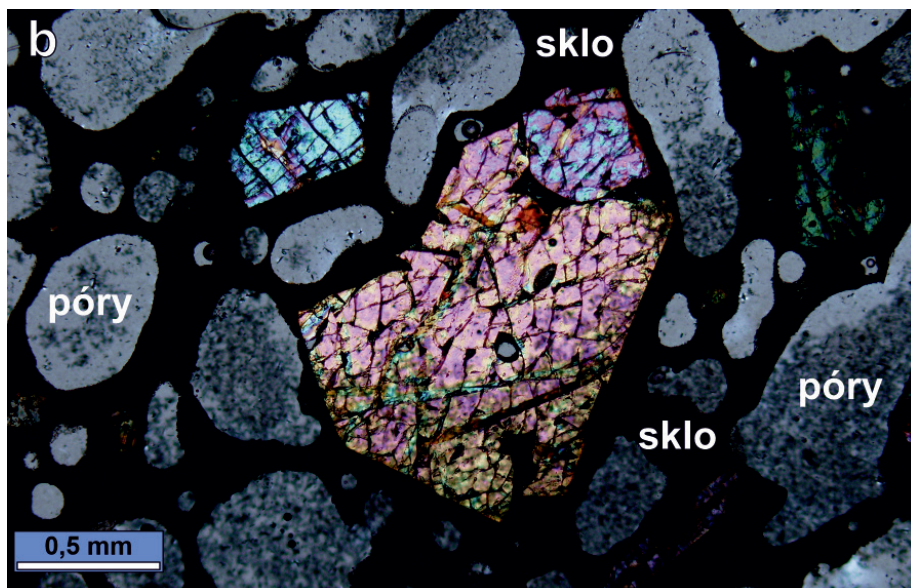
Výše uvedené tři základní typy sopečných erupcí jsou dominantně řízeny obsahem plynů, které jsou rozpuštěny přímo v tavenině. Mimoto však existují rovněž erupce, při nichž se účinek sopečného plynu mísí s energií páry generované na kontaktu taveniny s vodou. Tyto erupce bývají označovány jako **freatomagmatické** a lze je rozdělit na slabší surtseyské a silnější vulkánské.

Surtseyská erupce je typ sopečné erupce, která probíhá v mělkých mořích či jezerech. Název dostala podle ostrova Surtsey u jižního pobřeží Islandu, jenž v letech 1961 až 1963 vznikl právě tímto specifickým druhem erupce.



Obr. 4a Učebnicový příklad průřezu pyroklastického materiálu (řez sopečnou bombou obklopenou okolní struskou), který je součástí erozní trosky struskového kužele malého vulkánu strombolského typu na lokalitě Uhlířský vrch u Bruntálu (foto L. Krmiček)

Obr. 4b Mikroskopický pohled na výplň sopečné bomby z obr. 4a, která je tvořena směsí úlomků krystalů a skla společně s viditelnými póry (foto L. Krmiček)



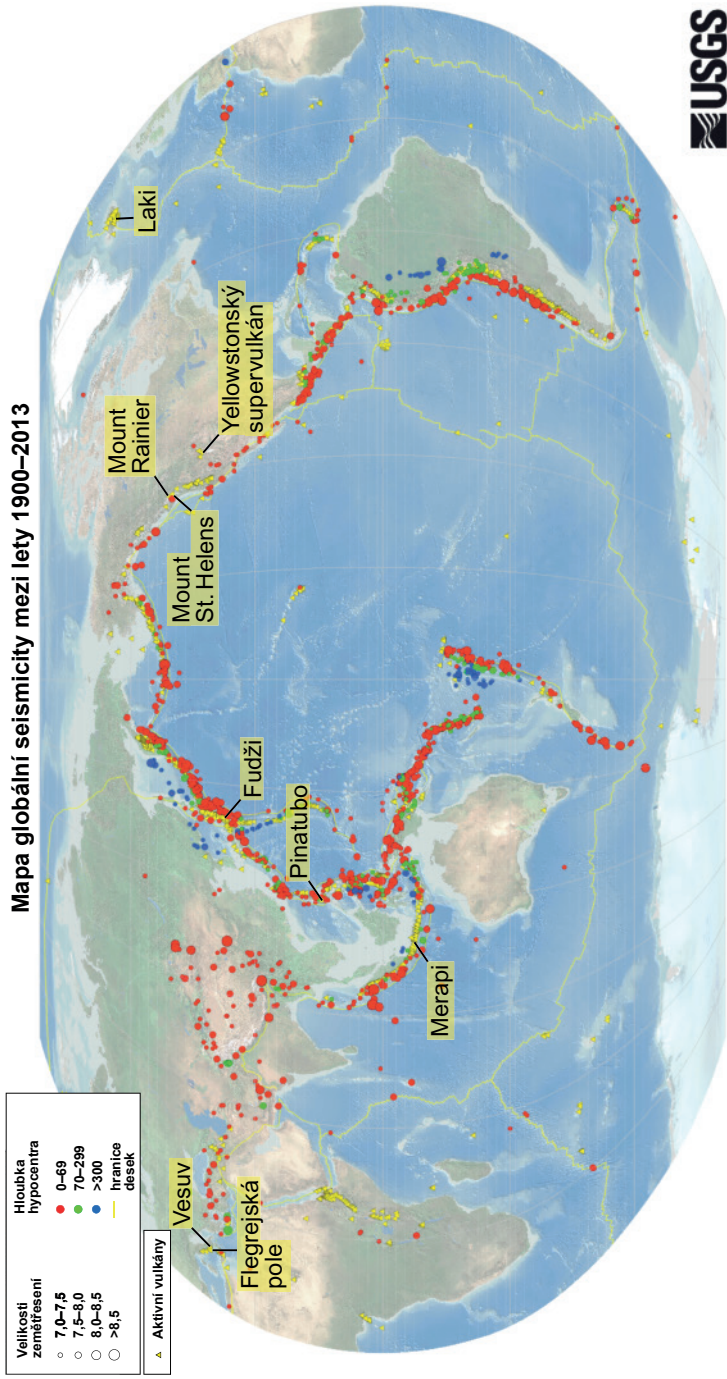
Vulkánské erupce (podle názvu sopky Vulcano v Liparském souostroví) jsou charakteristické explozemi v krátkých intervalech (minuty až hodiny). Lávy těchto erupcí mívají zpravidla vyšší stupeň explozivitu, jenž je dán kontaktem s podzemní vodou.

Sílu sopečných erupcí lze číselně ohodnotit pomocí tzv. **VEI indexu**, tj. indexu vulkanické explozivitu (z anglického *Volcanic Explosivity Index*). Velikost tohoto indexu se pohybuje od nejslabšího stupně VEI 0 až po nejsilnější VEI 8, který je charakteristický pro tzv. supervulkány. Obecně se jako hlavní údaj pro stanovení daného indexu využívá uvažovaný objem sopečného materiálu vyprodukovaného v průběhu erupce. Vztah mezi indexem vulkanické explozivitu, typy jednotlivých sopečných erupcí a jejich četností je graficky naznačen na obr. 3. Například jednou z největších sopečných erupcí 20. století, ke které došlo v roce 1991, byl výbuch filipínského vulkánu Pinatubo. Při této erupci, která na několik let ovlivnila globální teploty na naší planetě, došlo k vyvržení okolo 10 km³ sopečného materiálu, což na indexu vulkanické explozivitu odpovídá stupni VEI 6.

Oblasti s aktivním vulkanismem

Sopky na Zemi nejsou rozmístěny náhodně. Zemská kůra (nejsvrchnější pevný obal Země) společně s horní částí svrchního pláště jsou rozčleněny na 7 velkých a 12 malých litosférických desek, které se pohybují po plastické vrstvě zemského pláště označované jako astenosféra. Průměrná rychlost pohybu dosahuje 5 až 10 cm za rok. Desky se na některých místech navzájem vzdalují, jinde se naopak srážejí, lámou nebo podsouvají jedna pod druhou. Všechny tyto procesy mohou vést ke vzniku sopečné činnosti na okrajích litosférických desek. Místo kolize dvou desek, z nichž jedna se zasouvá pod druhou, se označuje jako subdukční zóna a samotný proces podsouvání jako **subdukce**. Nejčastěji se tak děje v oblastech, kde se tenčí oceánská kůra zasouvá pod mnohem mocnější kontinentální kůru. A právě v takových místech se nejčastěji vyskytují oblasti s velmi silnou vulkanickou a zemětřesnou aktivitou. Nejlépe viditelná subdukční rozhraní se nacházejí v pásmu lemujícím okraje pacifické oceánské litosférické desky, označovaném jako **ohnivý kruh** (anglicky *Pacific Ring of Fire*). V tomto přibližně 40 000 km dlouhém pásmu se nachází více než 450 sopek a odehrávají se zde tři čtvrtiny všech zemětřesení na naší planetě (obr. 5). Vyskytuje se zde také většina potenciálně nebezpečných vulkánů (viz kapitolu Nejnebezpečnější sopky světa).

Vulkanismus neprobíhá pouze na okrajích litosférických desek, ale také v oblastech, které se nacházejí nad **horkými skvrnami** (anglicky *hot spots*). Jako horké skvrny bývají označována místa situovaná pod litosférickými deskami hluboko v zemském plášti. V oblastech nad horkými skvrnami může docházet k mohutným výlevům čedičových láv označovaných jako **plató bazalty**. Když dojde k posunu desky nad horkou skvrnou, přichází sopka o svůj zdroj magmatu a stává se vyhaslou. Postupně tak vzniká celý řetězec sopek a podle polohy jednotlivých sopek je možné určit směr pohybu litosférické desky. Havajské ostrovy jsou výbornou ukázkou sopečného řetězce vzniklého nad horkou skvrnou. Magma horkých skvrn má bazické (deficitní na oxid křemičitý) složení a díky malé viskozitě lávy vznikají sopky charakteristické velkou šířkou základny a menším sklonem svahů, tzv. štítové



Obr. 5 Mapa globální seismicity za více než jedno století společně s vyznačením pozice aktivních vulkánů. Z mapy je dobře patrná vazba mezi výskytem zemětřesení vázaných zejména na hranice jednotlivých litosférických desek a souvisejícím vulkanismem. V mapě je vyznačena lokalizace vybraných nejnebezpečnějších sopek světa (mapový podklad: USGS – United States Geological Survey, volné dílo)

vulkány, které morfologicky připomínají štíty dávných válečníků. Spektakulárním příkladem štítové sopky je Mauna Kea, která je nejvyšší horou Havajských ostrovů. Nad hladinu oceánu ční do výšky 4205 m, ale i s podmořskou částí je vysoká přes 10 200 m, což z ní de facto činí nejvyšší horu na Zemi.

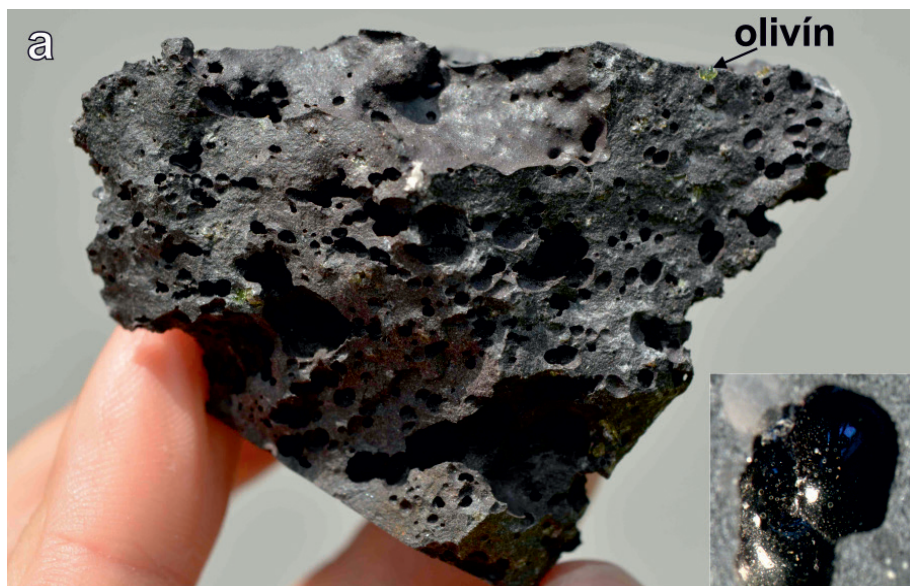
V rámci oblastí s aktivním vulkanismem zaujímá zvláštní postavení Island, neboť je unikátním příkladem kombinace vulkanismu nad horkou skvrnou a nad rozhraním litosférických desek. To z něj činí doslova vulkanologický ráj. Například v roce 2021 zde bylo možné prakticky v přímém přenosu sledovat zrod nového vulkánu v údolí Geldingadalir (viz foto na přebalu brožury). Autor této brožury měl možnost studovat vulkanický materiál, a to včetně jeho minerálu olivínu, z této nové sopky (obr. 6a, b). Předběžné výsledky ukazují, že zdejší lávy, i ve srovnání s jinými lávami z Islandu, jsou neobyčejně geochemicky „primitivní“ (nediferencované) a odpovídají čistým **MORB** bazaltům (z anglického *Mid-Ocean Ridge Basalt*), tedy bazaltům, které můžeme primárně najít na oceánském dně v rámci tzv. středooceánských hřbetů.

Nejnebezpečnější sopky světa

Na Zemi existuje mnoho aktivních sopek, obecně jsou však považovány za nejrizikovější ty, které leží v blízkosti hustě osídlených oblastí. Mnohdy se mezi ně řadí i sopky, které nebyly již delší čas aktivní. Když totiž sopky dlouho nevybuchují, obzvláště ty, které jsou spojeny s vulkanickými systémy produkujícími špatně tekoucí magma, narůstá v nich tlak, který může vést k o to ničivější erupci. Opravdu nebezpečných sopek jsou na světě desítky. Zpravidla se jedná o tzv. **stratovulkány**, tedy sopky, u kterých dochází ke střídání výlevných a explozivních fází jejich sopečné činnosti. Tato kapitola přináší stručný výběr některých z nich (viz obr. 5). V rámci jejich popisu jsou vysvětleny některé důležité fenomény spojené s nebezpečnými erupcemi.

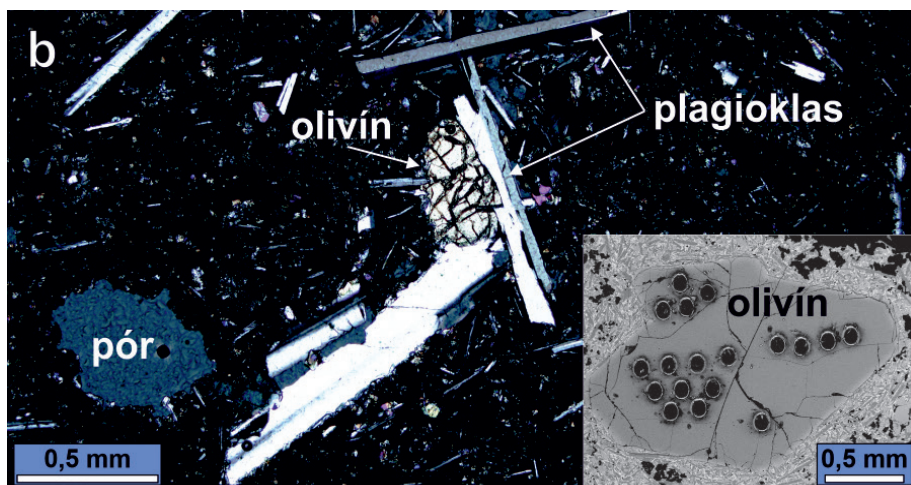
Vesuv

Pravděpodobně nejslavnější vulkán antického světa je italský Vesuv. V hustě zalidněném okolí Vesuvu dnes žije přes 3 miliony lidí. Vesuv je hrozbou od chvíle, kdy jeho erupce v roce 79 doslova pohřbila Pompeje a přilehlé okolí. Při erupci Vesuvu si nejvíc obětí vyžádaly **pyroklastické přívaly** a **pyroklastické proudy**, tedy turbulentně se pohybující žhavé směsi popela, kusů hornin a sopečných plynů. V okolí kráteru se jejich teplota pohybovala okolo 850 °C a ještě přibližně 10 km od zdroje to bylo asi 250 °C. Celkový počet obětí této erupce je těžké přesně kvantifikovat. Při archeologickém průzkumu bylo objeveno přibližně 1500 těl zakonzervovaných pod nánosy sopečného materiálu. Ačkoli všichni obyvatelé zasažených měst při katastrofě určitě nezemřeli, počet obětí byl jistě mnohonásobně vyšší. Katastrofická erupce také zcela změnila vzhled Vesuvu. Dnes je Vesuv součástí vulkanického komplexu zvaného Somma–Vesuv a celé jeho okolí je pod pečlivým dohledem seismologů a vulkanologů. První vulkanická observatoř, která byla vůbec nejstarší observatoří tohoto typu na světě, zde vyrostla již ve čtyřicátých letech 19. století. Naposledy dal o sobě Vesuv výrazněji vědět v roce 1944, kdy chrlil lávu celých jedenáct dní a dvacet šest lidí připravil o život.



Obr. 6a Foto vezikulární (pórovité) čedičové lávy čerstvě utužené po erupci islandské sopky Geldingadalir. Na lávě jsou patrně zeleně zbarvené krystaly olivínu. Detail vpravo dole zobrazuje rychle zchlazený vnější obal póru tvořený čedičovým sklem – tachylitem. Vzorek odebrala v dubnu 2021 M. Brzková (foto L. Krmiček)

Obr. 6b Mikroskopický snímek čedičové lávy sopky Geldingadalir s vyrostlicemi olivínu a plagioklasu obklopenými hemikrystalickou základní hmotou (foto L. Krmiček). Na detailu vpravo dole je zobrazen krystal olivínu výše popsaného vzorku s patrnými ablačními krátery po studiu jeho složení pomocí metody LA-ICP-MS, tj. laserové ablace s hmotnostní spektrometrií indukčně vázaného plazmatu (fotografie z elektronového mikroskopu Z. Dolníček)



Flegrejská pole

Vesuv je sice hrozbou pro jih Apeninského poloostrova, ale nedaleko od něj se nachází hrozba globálního měřítka. Campi Flegrei neboli Flegrejská pole je název vulkanické kaldery o průměru 13 kilometrů, nacházející se západně od Neapole nad Neapolským zálivem. Vulkanismus ve zdejší oblasti probíhal v několika velmi intenzivních etapách. Když Flegrejská pole vznikala, tedy asi před 39 tisíci let, tak nejspíš šlo o jednu z nejmohutnějších erupcí na planetě za posledních několik set tisíc let, při které bylo vyvrženo více než 150 km³ pyroklastického materiálu. Při erupci vznikaly pyroklastické proudy, které dle dochovaného horninového záznamu putovaly na vzdálenost více než 50 km. Vulkán je však aktivní více či méně neustále. Nadmořská výška kaldery a okolního území se v průběhu let mění – kaldera se často zdvihá nebo klesá. Například v roce 1538 bylo vyzdvižení následováno erupcí, při které se vytvořil vulkán Monte Nuovo. Naproti tomu vyzdvižení v sedmdesátých a osmdesátých letech 20. století doprovázeno erupcí nebylo. Pod kalderou tak může docházet k hromadění energie, aniž by se dostatečně rozptýlila. Všechna vulkanická aktivita je v současnosti omezena na emise plynů s vyššími obsahy sulfanu a jejich oxidaci na elementární síru v rámci kráteru Solfatara, který se zformoval před 4000 let a dal jméno tomuto typu vulkanické aktivity.

Mount St. Helens

Erupce sopky Mount St. Helens v severní části Kaskádového pohoří ve státě Washington byla nejničivější sopečnou událostí v soudobé historii USA, během níž došlo ke skokovému uvolnění velkého množství energie akumulované uvnitř hory. Průběh hlavní erupce z 18. května 1980 je jednou z nejlépe zdokumentovaných erupcí v historii. V 08:32 místního času došlo přímo pod severní zasněženou stěnou Mount St. Helens k silnému zemětřesení. Po několika sekundách následně zkolabovalo celé severní úbočí sopky a došlo ke gigantickému sesuvu. Ten dosáhl rychlosti až 250 km/h a pokryl oblast o ploše přesahující 60 km². Když masa hornin dorazila k jezeru Spirit Lake (8 km severně od sopky), vytvořila se na něm obrovská vlna tsunami vysoká až 260 m. Sesuv úbočí sopky zapříčinil výrazné snížení tlaku, který do té doby působil na nahromaděné a plynem nasycené magma uložené pod severním svahem. Několik sekund po zkolabování hory magma prorazilo při své expanzi na povrch v podobě silné **laterální** (bočně orientované) **erupce** (obr. 7). Vznikl žhavý pyroklastický proud o teplotě okolo 350 °C, který se vějířovitě šířil severním úpatím. Zpočátku se pohyboval rychlostí 350 km/h, ale brzy zrychlil až na rychlost přes 1000 km/h. Pyroklastický proud během několika minut zničil území o rozloze okolo 600 km². Několik minut po sesuvu a laterální erupci došlo k erupci pliniovského typu, která již byla směřována vertikálně. Její vrcholná aktivita nastala mezi 15. a 17. hodinou odpolední a za celý den se do atmosféry dostalo 520 milionů tun pyroklastického materiálu. Díky včasné evakuaci dosáhl celkový počet obětí „pouhých“ 57. S ohledem na historii zdejších erupcí je pravděpodobné její opakování i v budoucnosti, a proto je tato sopka pečlivě monitorována.

Mount Rainier

Sopka Mount Rainier je považována za jednu z nejnebezpečnějších ve Spojených státech. K její zatím poslední erupci došlo v roce 1894. Nachází se necelých 90 km

Obr. 7 Pohled na sopku Mount St. Helens tak, jak byla vidět z vesmíru v červnu 2000. Pozůstatky po katastrofické laterální erupci z 18. května 1980 jsou jasně zřetelné (foto NASA, volné dílo)





jihovýchodně od města Seattle ve státě Washington. Jedná se o impozantní vulkán, jehož zasněžený vrchol je v nadmořské výšce téměř 4400 m. Kvůli obrovskému množství vody, která je vázána v místních ledovcích, může případná erupce uvolnit masivní **lahary**, tedy velmi rychle tekoucí směs sopečného popela, úlomků ztuhlé lávy a velkého množství vody. Výška hory přes čtyři kilometry znamená, že případný lahar může nabrat vysokou rychlost a zasáhnout tak okolní obydlené oblasti. Zde by mohl přímo ohrozit více než 150 000 lidí žijících na uloženinách starších laharů.

Yellowstonská kaldera

Yellowstonská kaldera je sopka v národním parku Yellowstone rozkládajícím se na severozápadě státu Wyoming (USA). Hlavní rozměry gigantické kaldery jsou asi 50 × 70 km. Yellowstonská kaldera je **supervulkán**, což je sopka schopná v průběhu erupce vyprodukovat pyroklastický materiál s celkovým objemem větším než 1000 km³. To je tisíckrát více než většina historických erupcí. Zatímco ostatní sopky by ničily lidské životy, erupce tohoto supervulkánu by mohla ovlivnit celou civilizaci, neboť enormní množství vyvrženého materiálu by mohlo v konečném důsledku zapříčinit dlouhodobé globální ochlazení. Obrovská Yellowstonská kaldera vznikla prostřednictvím tří supererupcí, které proběhly před 2,1 milionu let, dále před 1,3 milionu let a zatím k poslední došlo přibližně před 630 000 let. Ty nám dávají jistou představu o frekvenci, se kterou vybuchuje. Yellowstonský supervulkán stále disponuje velkým magmatickým krbem a jeho další velkou erupci v budoucnu nelze vyloučit, avšak kdy by k ní mohlo dojít, dnes nedokáže nikdo spolehlivě určit.

Fudži

Sopka Fudži je nejvyšší horou Japonska. Posledním zaznamenaným výbuchem sopky Fudži byla její erupce roku 1707, kterou pravděpodobně iniciovalo silné zemětřesení. Při této erupci bylo město Edo (předchůdce dnešního Tokia), které je od sopky vzdálené přibližně 100 km, pokryto vrstvou popela. Od poslední erupce Fudži se populace Japonska prudce zvýšila, takže pokud by v blízké budoucnosti znovu došlo k jejímu výbuchu, mohl by spad pyroklastického materiálu podle různých odhadů zasáhnout až 25 milionů lidí. Ovšem zcela bez fatálního rizika není ani její aktivnější a geologicky mladší japonská sousednice Sakuradžima, která leží u šestisetisícového města Kagošima a asi jen 50 km od jaderné elektrárny Sendai.

Pinatubo

Pinatubo je aktivní sopečná hora v hustě obydlené oblasti Filipín, nacházející se na jihozápadě ostrova Luzon. Název sopky odkazuje v místním jazyce na místo pro pěstování plodin, neboť právě půda obohacená sopečným popelem je velice úrodná. V roce 1991 způsobil tento vulkán jednu z největších sopečných erupcí 20. století a zároveň poslední erupci s klasifikací VEI 6. Při erupci z roku 1991 zemřelo více než 800 lidí, a to především kvůli kolapsu střech, které nebyly schopné unést těžkou vrstvu sopečného popela. Erupce vulkánu Pinatubo však neměla dopad pouze na jeho nejbližší okolí, ale také na celý svět. Přítomnost aerosolu kyseliny sírové vysoko v atmosféře vedla ke snížení množství slunečního záření až o 10 %. Mezi lety 1991–1993 následně došlo k poklesu globální teploty přibližně o 0,5 °C. Erupce

měla také značný vliv na ozónovou vrstvu a přispěla k jejímu dočasnému oslabení. Dnes žije do vzdálenosti 40 km od kráteru asi 500 000 obyvatel a vzhledem k opakované aktivitě v minulosti je pouze otázkou času, kdy se tato nebezpečná sopka opět probudí k životu.

Merapi

Mnohé indonéské sopky, jako jsou například Krakatoa, Tambora či Toba, ukázaly v nedávné i geologicky vzdálenější minulosti svůj mimořádně ničivý potenciál (viz kapitolu Vulkanismus jako globální hrozba). V současnosti je jednou z nejaktivnějších indonéských sopek Merapi (v překladu Ohňová hora), která nepřetržitě vybuchuje již po staletí. Například při výraznější aktivitě v roce 2021 se po jejím svahu rozlil lávový proud v délce 1500 metrů. Sopka představuje pro své okolí, kde žijí tisíce obyvatel, značnou hrozbu. Její vulkanismus bývá doprovázen nebezpečnými pyroklastickými proudy, které si v minulosti vyžádaly již řadu obětí. V blízkosti Merapi se rovněž nachází město Yogyakarta, čítající více než 400 000 obyvatel.

Laki

Islandské sopky mohou být značně nebezpečné. Dobře to ilustruje níže popsany příběh sopky Laki, jejíž erupce z roku 1783 zapříčinila jednu z největších klimatických událostí minulého tisíciletí. Dne 8. června 1783 došlo k otevření dlouhé trhliny doprovázenému sérií freatomagmatických erupcí. Postupně se vytvořilo na 130 kráterů, ze kterých začalo unikat čedičové magma. Během několika dní došlo ke změně typu erupce od původně explozivního charakteru přes erupci strombolského typu až po výlevný havajský styl, kdy láva bez explozí vytékala ve velkém objemu a velkou rychlostí na povrch. Celkem zalilo horké magma plochu 600 km². Během erupce došlo k extrémnímu uvolnění sopečných plynů, zejména v podobě sloučenin síry. Na samotném ostrově jedovaté látky zapříčinily smrt až čtvrtiny tehdejšího obyvatelstva. Následkem erupce Laki nastalo v roce 1783 ve Velké Británii tzv. „písečné léto“, charakterizované velkým množstvím spadu sopečného materiálu. Ochlazení spojené s erupcí Laki mělo za následek extrémní zimu téhož roku a v následujících rocích přišla chladná léta, což zapříčinilo značnou neúrodu po celé Evropě. Léto v roce 1783 bylo dokonce nejchladnějším létem za posledních 500 let. Erupce Laki také nepřímo ovlivnila dějiny na evropském kontinentu, neboť nedostatek potravy spojený se značnou neúrodou přispěl v roce 1789 k začátku Velké francouzské revoluce.

Mladý vulkanismus na našem území – Český masiv

Území České republiky tvoří dva základní geologické celky – Český masiv a Západní Karpaty. Na oba dva celky jsou vázány výskyty **neovulkanitů**, tedy geologicky mladých vulkanických hornin. Tato kapitola je věnována vulkanismu v rámci nepochybně většího a staršího celku Českého masivu.

Mimo neovulkanitů se v rámci Českého masivu nachází také staré vulkanity (paleovulkanity), představující produkty prvohorního a staršího vulkanismu. Tyto se zachovaly v podobě reliktních podmořských či suchozemských vulkanitů na řadě míst. Často však byly vlivem pozdějších horotvorných procesů zvrátněny a metamorfovány. Například nejstarší produkty podmořského vulkanismu na našem území

vystupují v podobě reliktů polštářových láv, které jsou dnes též součástí metabazitové zóny brněnského masivu. Stáří této zóny je dle nejnovějších výsledků datování neuvěřitelných 740 milionů let. Na takto starých lávách dnes stojí dominanty Brna, jako je hrad Špilberk a katedrála sv. Petra a Pavla. Mementem dramatického prvohorního vulkanismu je teplicko-altenberská kaldera (18 × 35 km) na česko-německém pohraničí, která byla aktivní před více než 310 miliony let. Během explozivní erupce, která vytvořila samotnou kalderu, bylo vyvrženo obrovské množství pyroklastického materiálu, odpovídající stupni 7 na škále indexu vulkanické explozivnosti, a sopka tak byla ve své době celosvětově významná. Vznik teplicko-altenberské kalдеры byl podmíněn variskými horotvornými procesy, které nakonec vedly k výrazné modifikaci zemského pláště pod Českým masivem. Informace o těchto horotvorných procesech zůstala v plášti „zakonzervována“ po dobu stovek milionů let a dnes ji lze dešifrovat například z izotopového složení mladých vulkanitů.

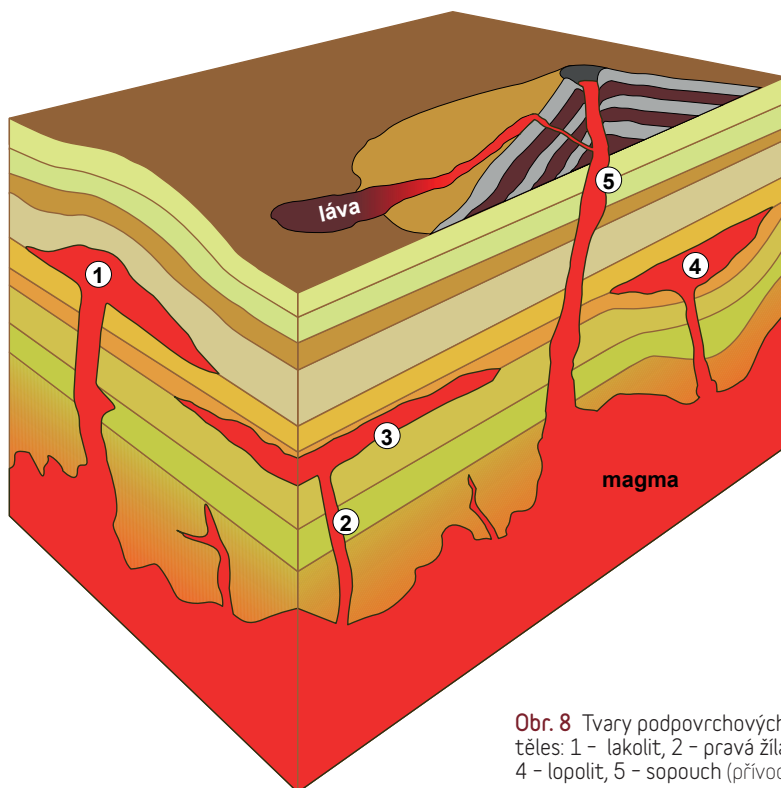
K projevům mladého (neodního) vulkanismu, který je odpovědí na alpské horotvorné procesy odehrávající se v alpsko-karpatské oblasti, docházelo na našem území v posledních přibližně 80 milionech let. Úvodní (též předriftová) fáze vulkanické aktivity Českého masivu proběhla mezi 80 až 49 miliony let a její produkty jsou zachovány především v Ralské pahorkatině. Hlavní (synriftová) fáze započala podle nejnovějších výsledků radiometrického datování před asi 44 miliony let a skončila před 16 miliony let. Během této fáze vznikala hlavní vulkanická centra Českého středohoří a Doupovských hor nebo také rozptýlené sopky české křídové pánve, jako jsou Říp, Slánská hora nebo Vinařická hora. Na hlavní fázi navázala před 16 miliony let závěrečná (pozdně riftová) fáze, která skončila před 300 000 let, tedy v geologicky nedávné době. Nejmladší produkty závěrečné fáze Českého masivu můžeme najít jak na Bruntálsku (např. Velký a Malý Roudný, Uhlířský vrch, Venušina sopka), tak na Chebsku (Komorní a Železná hůrka).

Z kompozičního hlediska mají neovulkanity Českého masivu alkalický charakter s převahou čedičových hornin (alkalický bazalt, pikrit, tefrit, bazanit, nefelinit) nad kyselejšími typy (trachyt, fonolit). Kvůli erozi se do současnosti z většiny někdejších vulkánů zachovala pouze jejich torza, včetně reliktů povrchových produktů, nebo ještě častěji jen erozí odkryté původně podpovrchové části, jako jsou nejrůznější lakolity, pravé a ložní žíly nebo sopouchy (obr. 8).

Nejvýznamnější tektono-vulkanickou strukturou v Českém masivu je ohárecký (též oherský) rift. Název doslal podle řeky Ohře, která jím protéká. Jedná se o rozsáhlou asymetrický tektonický příkop orientovaný ve směru ZJZ–VSV s odhadovanou délkou 180 km a maximální šířkou 25 až 30 km v jeho centrální části. Ohárecký rift je okrajovou částí rozsáhlého evropského riftového systému, který se táhne od Španělska až po Český masiv. Pod oháreckým riftem prochází hranice dvou starých bloků Českého masivu a právě tato hranice představuje určité místo oslabení, podél kterého následně vyvěřely největší neovulkanické komplexy Českého masivu – České středohoří a Doupovské hory. V místě křížení oháreckého riftu a tachovského zlomu, který je významnou součástí chebsko-domažlického příkopu, můžeme nalézt nejmladší povrchové sopky Českého masivu – Komorní a Železnou hůrku. Další důležitou tektono-vulkanickou strukturou v Českém masivu je labská zóna směru SZ–JV, která je mezi Turnovem a saskou Míšní omezena významnou strukturou lužického zlomu. Na tuto strukturu je vázána velká část rozptýlených sopečných

center na území české křídové pánve včetně vulkanického centra u Kozákova, v rámci kterého můžeme najít krásné ukázky hornin zemského pláště, vynesené vulkanickou aktivitou na povrch (obr. 9a).

Ralská pahorkatina je pohoří sestávající z mnoha izolovaných vulkánů uprostřed české křídové pánve. Na rozdíl od Českého středohoří zde nejstarší vulkanická aktivita nesouvisí s třetihorním riftingem, ale jedná se o produkty předriftového vnitrodeskového vulkanismu, který započal již na konci druhohor, zhruba před 80 miliony let. V okolí strážského zlomu, který je okrajovým zlomem oháreckého riftu orientovaným ve směru JZ–SV, se koncentrují četné, několik kilometrů dlouhé žíly tmavých hornin – **lampprofyrů**. Petrograficky se jedná převážně o **polzenity**, což jsou v Českém masivu unikátní horniny s exotickým minerálním složením (olivín, melilit, nefelín, flogopit, haüyn, monticellit, kalcit, perovskit, spinel a apatit) pocházející z velkých hloubek v zemském plášti. Jejich název je odvozen z německého názvu řeky Ploučnice (*der Polzen*), jejíž horní tok tvoří erozní bázi Ralské pahorkatiny. Výskyty polzenitů jsou geneticky vázány na centrální intruzivní těleso označované jako **osečenský komplex**. Příbuzné horniny o složení olivinického nefelinitu až melilititu, tvořící ukázkově vypreparovaná žilná tělesa mezi obcemi Osečná a Český Dub, jsou historicky označovány jako Západní, Malá a Velká Čertova zeď.



Obr. 8 Tvary podpovrchových magmatických těles: 1 - lakolit, 2 - pravá žíla, 3 - ložní žíla, 4 - lopolit, 5 - sopouch (přírodní dráha)



Obr. 9a Ukázka peridotitového xenolitu, tedy z pohledu složení okolní čedičové lávy cizorodé horniny pocházející původně ze zemského pláště. S ohledem na zaoblený tvar xenolitů a jejich převažující minerál bývají rovněž označovány jako tzv. olivínové koule. Vzorek pochází z lávového výlevu kozákovského vulkanického komplexu, který je těžen v lomu Smrčí u Železného Brodu (foto L. Krmíček)

Obr. 9b Uložení lahary s kruhovou dutinou po vyhnílém kmeni třetihorního stromu přístupná v rámci národní přírodní památky Skalky skřítků (foto L. Krmíček)



Doupovské hory jsou sopečným pohořím vzniklým na křížení zlomů oháreckého riftu s jáchymovským hlubinným zlomem. Komplex Doupovských hor byl zformován během několika dílčích vulkanických fází. V první fázi měl vulkanismus spíše explozivní charakter a vyznačoval se erupcemi strombolského a freatického typu. V dalších etapách převládaly výlevy lávových proudů, které dosáhly celkové mocnosti až 500 m. Tyto erupce, které byly generovány z mohutných štítových sopek, měly ráz převážně havajského typu. V závěrečných fázích vývoje Doupovských hor vznikaly malé vulkány strombolského typu s krátkými lávovými proudy (např. Jelení vrch u Kadaně) a žilné struktury vyplněné čedičem (lokalita Boč) či fonolitem (lokality Andělská hora a Šemnická skála). Pro naše území unikátní jev v podobě pseudokrasových dutin vytvořených v uloženinách laharů se zachoval u obce Dubina, ležící v západní části doupovského vulkanického komplexu. Národní přírodní památka Skalky skřítků je tvořena nevytříděnými hrubozrnnými sopečnými sedimenty obsahujícími částečně opracované fragmenty různých typů láv z oblasti doupovského komplexu. Sopečné úlomky jsou tmeleny jemnější hmotou, kterou lze nejlépe popsat jako ztvrdlé vulkanické bahno. Uložení obsahují několik desítek dutin kruhového profilu s délkou až 5 m, které připomínají malé jeskyně. Ve skutečnosti se však s největší pravděpodobností jedná o dutiny po vyhnílych třetihorních stromech, které byly strženy bahenním proudem v průběhu sopečné erupce (obr. 9b).

České středohoří o rozloze přes 1200 km² je pohořím s nejmohutnějším projevem neoidního vulkanismu v Česku. Úvodní etapy složitého vývoje Českého středohoří charakterizuje sopečná činnost drobných vulkánů. Později došlo ke vzniku mohutného stratovulkánu, jehož centrum se předpokládá severně od Ústí nad Labem v rámci tzv. **roztocké kaldery**. Typickým fenoménem Českého středohoří jsou kuželovité suky připomínající primární sopečné tvary. Královnou Českého středohoří je jeho nejvyšší hora Mílešovka (837 m), která je krásnou ukázkou trachytového lakolitu (obr. 10a). Za esteticky nejkrásnější vypreparované vulkanické těleso Českého středohoří bývá považován vrch Bořeň u Bíliny. Podle nedávných výzkumů se jedná o erozní zbytek znělcového dómu tvaru obrácené hrušky, který se vmístil do výplně freatomagmatického kráteru – maaru (obr. 10b). České středohoří je rovněž dobře známé čedičovými vulkanity se **sloupcovitou odlučností**. Lidově bývají označovány jako čedičové či kamenné varhany. Ikonická je Panská skála u Kamenického Šenova, která se nachází v nejvýchodnějším výběžku Českého středohoří. Panská skála je nejdéle chráněnou geologickou památkou v Čechách, a to již od roku 1895. Starý lom zde odkryl průřez lávovým proudem čediče – bazanitu, který spočívá na křídovém podloží s nerovným povrchem. Nejčastěji hexagonální (šestiboké) sloupce, které zaujímají vzhledem ke svému objemu nejmenší plochy puklin a k jejichž vzniku je potřeba nejméně energie, mohou mít na této lokalitě délku až 15 m (obr. 10c). Další pěknou ukázkou sloupcovité odlučnosti lze nalézt na vrchu Radobýl, který tvoří významnou dominantu nad městem Litoměřice. Typickou siluetu vrch získal odtěžením velké části západní strany. Zde dvouetážový lom odkryl komplikovanou stavbu vulkanického tělesa s komplexem bazanitových sloupců orientovaných do několika směrů (obr. 10d). Radobýl pravděpodobně představuje vypreparovanou přípovrchovou část přírodní dráhy sopky. Jiné pozoruhodné zbytky hlubších částí přírodních drah představují **diatrémy** – nálevkovitá výbuchová hrdla vzniklá podzemní explozí vulkanických plynů a vodních par, která směrem

k povrchu přecházejí v explozivní kráter – **maar**. Na lokalitách Granátový vrch a Nová Trubka u Měronic či Linhorka u Třebívlic můžeme ve výplni diatrém nalézt unikátní uzavřeniny granátonosných peridotitů a eklogitů. Tyto jsou primárním zdrojem nejznámějšího drahého kamene Českého středohoří – českého granátu. Nezaměnitelnou kulisou Českého středohoří je zřícenina kdysi nedobytného gotického hradu Hazmburk, která je společně se zříceninou hradu Trosky v Českém ráji jednou z nejlepších ukázek středověkého využití obnažených těles neovulkanitů pro výstavbu hradů (obr. 10e, f).

Obr. 10 Výběr z nejkrásnějších dominant v třetihorních neovulkanitech Českého masivu: a – silueta Milešovky představující erozí vypreparovaný trachytový lakolit, b – zbytek znělcového domu tvořící skalnatý vrch Bořeň u Biliny, c – Panská skála s odkrytými průřezy čedičovými sloupci připomínajícími zkamenělé píšťaly varhan, d – Radobýl s odkrytým komplexem čedičových sloupců orientovaných do různých směrů, e – obnažená čedičová žíla se zříceninou hradu Hazmburk, f – relikty sopouchů čedičových vulkánů se zříceninou hradu Trosky (foto L. Krmiček)



Mladý vulkanismus se v Českém masivu výrazněji projevil také na jeho severovýchodním okraji. Efektivní jsou především sopky vystupující na pomezí Moravy a Slezska v okolí Bruntálu v Nížkém Jeseníku. Sopky **bruntálského vulkanického pole** vznikaly přibližně před 3,5 až 1 milionem let, tedy na přelomu třetihor a čtvrthor. Jsou vázané na křížení zlomů směru SZ–JV a VSV–ZZJ. Vulkanismus nejvýznamnějších lokalit (Velký Roudný, Venušina sopka, Uhlířský vrch) měl převážně strombolský charakter a vytvářely se při něm efektní struskové kužely doplněné o výlevy lávových proudů. Pravděpodobně nejkrásnější ukázky sopečných bomb lze najít v pyroklastickém materiálu na Uhlířském vrchu (viz obr. 4a). Autor využil materiál z tohoto vulkánu k mezinárodní srovnávací studii zaměřené na obsahy rtuti (Hg) v sopečných horninách z různých geotektonických prostředí. Uhlířský vrch charakterizují velice nízké koncentrace Hg (0,5 µg/kg) přímo srovnatelné s obsahy Hg v zemském plášti.

Ve čtvrthorách vznikly na Chebsku naše nejmladší povrchové vulkány – Komorná a Železná hůrka. Oba vulkány je možné označit jako malé sopky typu struskového kužele. Je zřejmé, a potvrzují to i aktuálně zjištěné hodnoty radiometrických dat autora a jeho německých spolupracovníků, že stáří Železné hůrky musí být o něco menší a pohybuje se zhruba mezi 400 až 300 tisíci let. Vulkanická činnost na Chebsku byla doprovázena vznikem několika maarů. Vulkanické produkty této sopečné činnosti však na povrch prakticky nevystupují a na jejich přítomnost v hloubce lze usuzovat nepřímo pomocí geofyzikálních měření. V nedávné době byly popsány maary u obce Mýtina, u bavorských lázní Neualbenreuth a prozatím posledním objevem je dvojice maarů identifikovaná u obce Libá, přibližně 10 km severozápadně od Komorní hůrky. Dozvuky nedávné vulkanické aktivity se na Chebsku projevují i v současnosti v podobě častých zemětřesených rojů, četných vývěrů horkých pramenů a CO₂ v **bahenních sopkách** (místa, kde vyvěrající plyny v jílovité půdě vytváří kužel připomínající sopku).

Vulkanismus Železné hůrky probíhal ve dvou oddělených fázích. Nejprve se uložila jemnozrnná načervenalá pyroklastika freatomagmatických erupcí. Přibližně o sto tisíc let později se erupční styl změnil na strombolský a sopka začala chrlít černé hrubozrnné strusky (obr. 11).

Z pohledu historie světové vulkanologie je ovšem významnější starší **Komorní hůrka** u Františkových Lázní. Jedná se o reliktní struskového kužele malého vulkánu, ze kterého vytekl boční lávový proud. O světový věhlas této hůrky se zasloužil německý básník a znalec přírody Johann Wolfgang Goethe. Když na počátku 19. století vyvrcholil spor mezi tzv. plutonisty a neptunisty o původu čedičových hornin, navrhl Goethe nechat do Komorní hůrky vyrazit štolu a spor tak rozhodnout. **Neptunisté** (pojmenování je odvozeno od římského boha moří Neptuna) předpokládali, že všechny horniny vznikly jako usazeniny na mořském dně a vznik čedičů vysvětlovali hořením uhelných slojí v podzemí. **Plutonisté** (pojmenování je odvozeno od římského boha podsvětí Pluta) zastávali názor, že vznik čedičových hornin souvisí se „zemským ohněm“, tedy se sopečnou činností. Štola v Komorní hůrce (její konečná délka dosáhla úctyhodných 225 m), která byla nakonec dokončena až v roce 1837, tedy pět let po Goethově smrti, celý spor jednoznačně rozhodla ve prospěch zastánců teorie plutonismu.



Obr. 11 Zbytek struskového kužele Železné hůrky tvořený dvěma barevně odlišnými typy strusek. Na fotografii vpravo dole je detailní pohled na tmavou slídu – flogopit, jejíž radiometrické datování potvrdilo status Železné hůrky jako nejmladší povrchové sopky ČR (foto L. Krmíček)

Obr. 12 Přírodní památka Hrádek v obci Bánov odkrývající průřez vulkanickou brekcií ve výplni přírodní dráhy třetihorního vulkánu (foto L. Krmíček)



Mladý vulkanismus na našem území - Vnější Západní Karpaty

Paralelně se závěrečnou fází vulkanismu Českého masivu vyvěřely i třetihorní neovulkanity jihovýchodní Moravy, které jsou geologicky vázané na příkrovy Vnějších Západních Karpat. Odhady jejich stáří se nejčastěji pohybují v rozpětí 15 až 11 milionů let. Neovulkanity mají přechodný alkalický až alkalicko-vápenatý charakter a petrograficky odpovídají bazaltům až trachytům. Tělesa neovulkanických hornin vystupují východně od Uherského Brodu, kde vytváří pruh ve směru SV–JZ od Bánova přes Komňu až k Bojkovicím. Jedná se o řadu drobných výskytů, které mají nejčastěji povahu pravých či ložních žil. Nejvýrazněji jsou odkryty lomem na vrchu Bučník u obce Komňa. Zde seskupení pravých a ložních žil připomíná rozvětvený strom a odborně se označuje jako **lakolit cedrového typu**. Klenotem třetihorního vulkanismu jihovýchodní Moravy je přírodní památka Hrádek. Jedná se o návrší v intravilánu obce Bánov, jehož vrcholové části dominují tři dřevěné kříže (obr. 12). Návrší bylo v minulosti částečně odtěženo andezitovým lomem, který zde odkryl zajímavou vulkanickou brekcií ve výplni přírodní dráhy třetihorního vulkánu.

Vulkanismus jako globální hrozba

Když v roce 1815 vybuchla indonéská sopka Tambora, došlo k vyvržení výrazně přes 100 km³ pyroklastického materiálu. Tato sopečná erupce, která si v konečném důsledku vyžádala na 100 000 obětí, je považována za největší erupci v moderní historii lidstva. Sopečné plyny a popel se rozptýlily nad severní polokoulí a způsobily v Evropě tzv. „rok bez léta“, kdy došlo k velkému hladomoru i masové migraci – to vše navíc bylo umocněno koncem napoleonských válek. V Evropě byla situace natolik zoufalá, že lidé, aby přežili, museli ve velkém porážet i své koně, tedy hlavní dopravní prostředek tehdejší doby. Naproti tomu erupce islandské sopky Eyjafjallajökull z roku 2010 vedla k vyvržení „pouze“ 0,3 km³ sopečného materiálu, tedy 300× méně než při výbuchu Tambory! Přesto měla tato erupce za následek týdenní výpadek letecké dopravy nad velkou částí Evropy, vedla ke zrušení na 95 000 letů (výluka zasáhla téměř třetinu celosvětové letecké dopravy) a zapříčinila velké finanční ztráty. Výše uvedené srovnání odkrývá, jak je naše společnost s rostoucí globalizací zranitelnější a v podstatě nepřipravená na podobné události.

Erupce Tambory v roce 1815 byla velká, ale zdaleka ne extrémní. Její sílu lze podle indexu vulkanické explozivity klasifikovat stupněm VEI 7 (viz obr. 3). Více než 800 milionů lidí na Zemi dnes žije v okruhu 100 km od aktivní sopky, avšak erupce supervulkánu o síle VEI 8 by mohla být katastrofou s globálním dopadem na celé lidstvo. V posledních 100 000 let, tedy v geologicky nedávné době, na naší planetě došlo ke čtyřem supererupcím. Erupce indonéského supervulkánu Toba (před 75 000 let) měla podle některých badatelů potenciál způsobit zkázu globálních rozměrů. Vývoj klimatu na naší planetě byl rovněž ovlivněn před asi 26 000 let výbuchem dalšího supervulkánu na Novém Zélandu, což vedlo k opětovnému ochlazení a pravděpodobnému prodloužení posledního glaciálu (doba ledová) do doby před 12 000 let.

Z výše uvedeného vyplývá, že otázkou není jestli, ale spíše kdy na Zemi dojde k další ničivé erupci s globálním dopadem. Jaká je pravděpodobnost, že to nastane

v blízké budoucnosti? Podíváme-li se na to optikou dostupného horninového záznamu po již proběhlých velkých erupcích, tak tato pravděpodobnost rozhodně nemusí být zanedbatelná. Odhaduje se, že během následujících 100 let je pravděpodobnost vzniku erupce srovnatelné s erupcí supervulkánu Toba přibližně 0,1 % a tato pravděpodobnost narůstá až k 4 % pro erupce o velikosti srovnatelné s erupcí sopky Tambora. Do budoucna tak bude pro lidstvo nezbytné vyvinout takové strategie, které zajistí ochranu kritických prvků naší civilizace před ničivými dopady projevů mohutné vnitřní energie naší planety v podobě vulkanismu.

Výběr z literatury

Carlino, S. *Neapolitan Volcanoes. A Trip Around Vesuvius, Campi Flegrei and Ischia*. Springer International Publishing 2019; Coufalík, P., Krmíček, L., Zvěřina, O., Meszarosová, N., Hladil, J., Komárek, J. Model of mercury flux associated with volcanic activity. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* **101**, 2018, s. 549–553; Janoška, M. *Sopky a sopečné vrchy České republiky*. Academia 2013; Krmíček, L., Timmerman, M. J., Ziemann, M. A., Sudo, M., Ulrych, J. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ step-heating dating of phlogopite and kaersutite megacrysts from the Železná hůrka (Eisenbühl) Pleistocene scoria cone, Czech Republic. *Geologica Carpathica* **71**, 2020, s. 382–387; Krmíček, L., Ulrych, J., Jelínek, E., Skála, R., Krmíčková, S., Korbelová, Z., Balogh, K. Petrogenesis of Cenozoic high-Mg (picritic) volcanic rocks in the České středohoří Mts. (Bohemian Massif, Czech Republic). *Mineralogy and Petrology* **115**, 2021, s. 193–211; Krmíček, L., Ulrych, J., Šišková, P., Krmíčková, S., Špaček, P., Křížová, Š. Geochemistry and Sr–Nd–Pb isotope characteristics of Miocene basalt–trachyte rock association in transitional zone between the Outer Western Carpathians and Bohemian Massif. *Geologica Carpathica* **71**, 2020, s. 462–482; Krmíčková, S., Krmíček, L., Romer, R. L., Ulrych, J. Lead isotope evolution of the Central European upper mantle: constraints from the Bohemian Massif. *Geoscience Frontiers* **11**, 2020, s. 925–942; Newhall, C. G., Self, S. The volcanic explosivity index (VEI) an estimate of explosive magnitude for historical volcanism. *Journal of Geophysical Research* **87**, 1982, s. 1231–1238; Newhall, C., Self, S., Robock, A. Anticipating future Volcanic Explosivity Index (VEI) 7 eruptions and their chilling impacts. *Geosphere* **14**, 2018, s. 572–603; Papale, P., Marzocchi, W. Volcanic threats to global society. *Science* **363**, 2019, s. 1275–1276; Rapprich, V. *Za sopkami po Čechách*. Grada Publishing, a. s., 2012; Schmincke, H. U. *Volcanism*. Springer-Verlag 2004; Sigurdsson, H., Houghton, B., McNutt, S., Rymer, H., Stix, J. *The encyclopedia of volcanoes*. Elsevier 2015; Ulrych, J., Krmíček, L., Adamovič, J., Krmíčková, S. The story of post-Variscan lamprophyres of the Bohemian Massif: from ultramafic (Upper Cretaceous–Paleocene) to alkaline (Eocene–Oligocene) types. *Geological Society, London, Special Publications* **513**, 2022, s. 237–269; Ulrych, J., Krmíček, L., Teschner, C., Řanda, Z., Skála, R., Jonášová, Š., Fediuk, F., Adamovič, J., Pokorný, R. Tachylite in Cenozoic basaltic lavas from the Czech Republic and Iceland: contrasting compositional trends. *Mineralogy and Petrology* **111**, 2017, s. 761–775; Ulrych, J., Krmíček, L., Teschner, C., Skála, R., Adamovič, J., Ďurišová, J., Křížová, Š., Kuboušková, S., Radoň, M. Chemistry and Sr–Nd isotope signature of amphiboles of the magnesio-hastingsite–pargasite–kaersutite series in Cenozoic volcanic rocks: Insight into lithospheric mantle beneath the Bohemian Massif. *Lithos* **312**, 2018, s. 308–321; Ulrych, J., Krmíček, L., Tomek, Č., Lloyd, F. E., Ladenberger, A., Ackerman, L., Balogh, K. Petrogenesis of Miocene alkaline volcanic suites from western Bohemia: whole rock geochemistry and Sr–Nd–Pb isotopic signatures. *Geochemistry* **76**, 2016, s. 77–93.

Oddělení paleomagnetismu se zabývá studiem paleomagnetismu, magnetostratigrafie, magnetomineralogie, geologickými aplikacemi získaných dat a vývojem laboratorních postupů. Interpretace dat zahrnují geotektonické, stratigrafické a paleogeografické syntézy, včetně paleoenvironmentálních rekonstrukcí. Výzkum se zaměřuje jak na stanovení paleomagnetických a základních magnetických charakteristik hornin Českého masivu, tak na magnetostratigrafii s vysokou rozlišovací schopností v rámci horninových profilů na různých evropských lokalitách. Oddělení také řeší problematiku magnetomineralogie na kosmicky zvětralých materiálech obsahujících superparamagnetická zrna, dále studuje efekty pulzu vysokých magnetických polí na biologický materiál a výsledky aplikuje v oblasti medicíny.

Oddělení fyzikálních vlastností hornin se zaměřuje na studium fyzikálně-mechanických vlastností hornin, jejich odezvy na mechanické namáhání, zákonitosti porušování hornin a také na rozvoj a zdokonalování experimentálních metod. Horniny jsou zkoumány při různém způsobu namáhání (jednoosý a víceosý tlak) a při různém časovém režimu. Výsledky, zejména reologických vlastností, jsou významné při ocenění stability podzemních děl. Studovány jsou především horniny z oblastí potenciálních lokalit Českého masivu pro hlubinné ukládání radioaktivních odpadů a dále horniny reprezentující spodní zemskou kůru a svrchní plášť.

Oddělení analytických metod provádí vědecký analytický servis v oblastech elektronové mikroskopie a mikroanalýzy a rentgenové difrakční analýzy mikrostruktury minerálů a syntetických pevných fází. Pro identifikaci a určení molekulární struktury krystalických i amorfních fází jsou využívány metody Ramanovy a infračervené spektroskopie. Oddělení se dále zaměřuje na rozvoj analytických postupů pro jednotlivé analytické přístroje, jimiž disponuje.

Geologický ústav AV ČR, v. v. i., je výzkumná organizace multioborového zaměření, jejímž hlavním cílem je získávat, interpretovat a integrovat znalost zemského systému a jeho geologické i biologické minulosti. Bez tohoto komplexního přístupu by nebylo možné dostatečně přesně porozumět současnému přírodnímu prostředí. Zemský systém je chápán jako výsledek interakce vnitřních a vnějších geologických procesů, vývoje bioty a vlivu člověka. Samotná sopečná činnost, které je věnována tato brožura, se výše uvedenými aspekty široce prolíná. V brožuře jsou postupně představeny hlavní typy sopečné činnosti, oblasti s aktivním vulkanismem, nejnebezpečnější sopky světa, sopky na našem území a v závěru je uveden komentář k vulkanismu jako globální hrozbě.

V EDICI VĚDA KOLEM NÁS PŘIPRAVUJEME:

Eduard Kejnovský: **Dvanáct milníků genetiky**

Jan Hasil: **Odhalování minulosti Letenské pláně**

Štefan Pilát: **Církevněslovanská kultura v Rumunsku**

V EDICI DOSUD VYŠLO:

Václav Cílek: **Klima a budoucnost našich lesů**

Václav Cílek: **Zadržování vody v krajině od pravěku do dneška**

Petr Zacharov: **Měření oblačnosti na Milešovce**

Edice Věda kolem nás | Co to je...

Vulkanismus: vnitřní energie Země | Lukáš Krmíček

Vydalo Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., Nakladatelství Academia. Grafická úprava dle osnovy Jakuba Krče a sazba Serifa. Odpovědná redaktorka Petra Královcová. Vydání 1., 2022. Ediční číslo 12935. Tisk **SERIFA**®, s. r. o., Jinonická 80, 158 00 Praha 5.

ISSN 2464-6245

Evidováno MK ČR pod e. č. E 22344

Další svazky získáte na:

www.vedakolemnas.cz | www.academia.cz