

Série zemětřesení pod oceánským dnem prozrazují přítomnost aktivních podmořských vulkánů

Podmořská sopečná činnost patří k fascinujícím přírodním jevům, jež pro svou rozmanitost poutají pozornost jak zájemců o živou přírodu, tak těch, které přitahuje spíše geologie a procesy probíhající na naší planetě. V okolí aktivních podmořských sopek se díky soustavnému obohacování vody o nejrůznější minerály a chemické látky udržuje specifické prostředí, které je domovem unikátních ekosystémů a zdrojem cenných údajů mimo jiné pro výzkum vzniku života na Zemi a vývoje jeho rozmanitosti. Vulkanická činnost na dně oceánu představuje přibližně 75 % celosvětové produkce magmatu, což podtrhuje její význam pro vulkanologii, nezanedbatelná jsou i možná společenská rizika těchto vulkánů. Pokud podmořská erupce vyvolá sesuv, může dojít ke vzniku vln tsunami. Přes uvedené významné aspekty zůstává sopečná činnost pod mořem málo probádaným jevem ve srovnání s vulkanismem na kontinentech. Příčina je zřejmá – oceánské dno, z něhož sopky vystupují, se ukrývá pod kilometry vodního sloupce, takže jeho topografii známe méně detailně než topografii povrchu Marsu.

První povědomí o podmořském vulkanismu sahá do 50. a 60. let 20. stol., kdy pokrok v mapování a výzkumu mořského dna přispěl ke zformulování teorie deskové tektoniky. Tato teorie propojuje mnoho disciplín věd o Zemi včetně vulkanologie a seismologie a mimo jiné vysvětluje příčiny většiny zemětřesení a sopečné činnosti i jejich nepravidelné rozmístění na Zemi. K výraznému pokroku v poznávání podmořských vulkánů došlo v posledních desetiletích především podrobným skenováním mořského dna ze speciálních výzkumných plavidel. Přelomový byl v tomto smyslu r. 2006, kdy byla zaznamenána podmořská erupce v souostroví Mariany v sousedství známého Mariánského příkopu, nejhluběji položeného místa na Zemi. V současnosti se k přímému pozorování podmořských vulkánů v této oblasti používají dálkově ovládané ponorky. Fascinující záběry podmořských erupcí vulkánů West Mata, které zaznamenaly, lze zhlédnout na webových stránkách americké NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, www.noaa.gov), která se výzkumem podmořských vulkánů dlouhodobě systematicky zabývá. Jde o nesmírně nákladný výzkum a mohou si ho dovést provozovat jen nejlépe financované instituce, mezi něž právě NOAA patří.

Náš příspěvek k identifikaci a poznávání dosud neznámých aktivních podmořských vulkánů vychází z relativně skromných možností české vědy v této oblasti: je založen na využití veřejně přístupných dat z celého světa. Tato data jsou shromažďována v databázích, které obsahují mimo jiné údaje o času, místě vzniku (včetně hloubky pod zemským povrchem) a síle

(velikosti, hodnotě magnitudy – M) stovek tisíc zemětřesení, k nimž na Zemi došlo od 60. let 20. stol. dodnes. Tyto údaje – označujeme je souhrnně jako parametry zemětřesení – určují mezinárodní či některé národní seismologické agentury z měření tisíců seismických stanic rozmístěných po celém světě, včetně české národní sítě. K nejdůležitějším a nejspolehlivějším agenturám patří ISC – International Seismological Centre a NEIC USGS – National Earthquake Information Center of the US Geological Survey. Celosvětová síť seismických stanic je schopna identifikovat všechna zemětřesení od síly, tedy magnitudy 4 (pro srovnání – taková se čas od času vyskytují i na našem klidném území, naposledy v květnu a srpnu 2014 na Chebsku; nebývají nebezpečná a ročně jich na světě vznikne přibližně 12 tisíc).

Výše uvedené databáze parametrů zemětřesení využíváme ke studiu sbíhavých (konvergentních) okrajů litosférických desek. Na takových rozhraních dochází k nejdramatičtějším procesům deskové tektoniky – k podsouvání (subdukci) jedné desky pod druhou nebo k jejich kolizi. Byly to právě tyto procesy, v jejichž důsledku došlo např. k ničivým zemětřesením u Sumatry v prosinci 2004, u Japonska v březnu 2011 nebo zatím naposledy v Nepálu v dubnu 2015, či k výbuchům sopek Tambora v r. 1815, Krakatau v r. 1883, St. Helens v r. 1980 nebo Pinatubo v r. 1991.

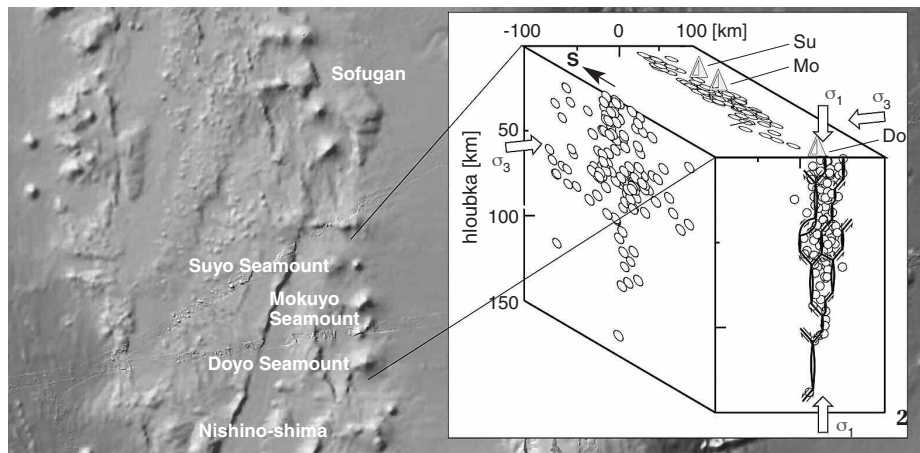
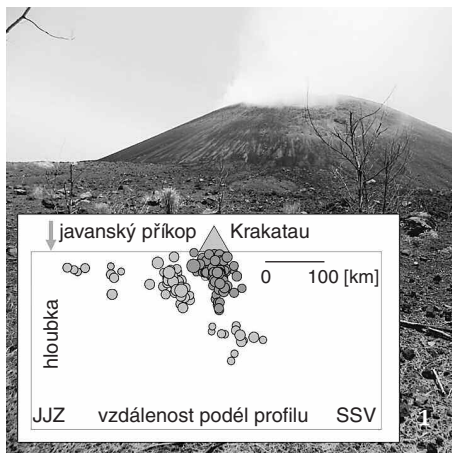
Drtivá většina zemětřesení se odehrává na zlomech v zemské kůře, což platí pro téměř všechny silné otřesy ($M > 5$). Jejich příčinou je postupný nárůst tektonického napětí, způsobený dlouhodobým vzájemným pohybem sousedních horninových

bloků, které zlom od sebe odděluje. Tření na zlomové ploše po nějaký čas brání pohybu sousedních horninových bloků v okolí zlomu, ale po určité době při narůstajícím tektonickém napětí dochází k překonání pevnosti zlomu, dojde k rychlému skluzu horninových bloků podél zlomu a uvolnění nahromaděného napětí – k zemětřesení. Ke spuštění může rovněž přispět pohyb magmatu v zemské kůře, a to několikerým způsobem: jednak snížením tření na zlomové ploše (pronikající magma od sebe oddálí sousední horninové bloky), nebo zvýšením napětí v horninovém prostředí v okolí zlomu; v neposlední řadě může průnik magmatu způsobit vznik nových trhlin v dosud neporušeném prostředí.

Zemětřesení, na jejichž vzniku se průniky magmatu podílejí, nebývají zpravidla příliš silná, většinou do hodnoty magnitudy 2 až 3, a k jejich zaznamenání tudíž světová síť seismických stanic nestačí. Proto se do bezprostřední blízkosti aktivních vulkánů rozmísťují seismické stanice schopné zaznamenat i mikrozemětřesení o záporném magnitudu. Tyto údaje napomáhají odhadnout okamžik, kdy se magma k zemskému povrchu blíží a vznik erupce je vysoce pravděpodobný. Pro zemětřesnou činnost doprovázející pohyb magmatu je charakteristický výskyt tzv. zemětřesných rojů. Tímto termínem označujeme sérii většího počtu zemětřesení – zpravidla desítky až stovky jevů, následujících rychle po sobě po dobu několika dnů až týdnů (některé však mohou trvat i déle než rok), a dochází k nim na malé ploše či v malém objemu. Velikost nejsilnějšího zemětřesení v rámci roje nepřevyšuje výrazně velikost dalších silných rojových jevů. Velmi často bývá pozorován uspořádaný průběh zemětřesných rojů – zemětřesná činnost se během trvání roje postupně stěhuje, migruje, což potvrzuje předpoklad, že tuto specifickou seismickou aktivitu má na svědomí pohyb magmatu. Skvělou ilustrací souvislosti mezi výskytem zemětřesení a pohybem magmatu byla pozorování Islandského meteorologického úřadu při aktivitě vulkánů Eyjafjallajökull v r. 2010 či vulkánů Bárðarbunga v r. 2014. Zde je vhodné připomenout, že do jisté míry podobný charakter má i zemětřesná činnost na Chebsku v západních Čechách – zemětřesení se tu rovněž shlukují v čase i prostoru v rojích a zemětřesná činnost se během jednotlivých rojů přesouvá. To podporuje představa, že také západočeské zemětřesné roje vyvolává pohyb a tlak fluid odvozených z magmatu. Specifické chemické složení vod a plynů, pronikajících v západních Čechách na povrch, svědčí o tom, že fluida se zde do kůry dostávají až ze zemského pláště.

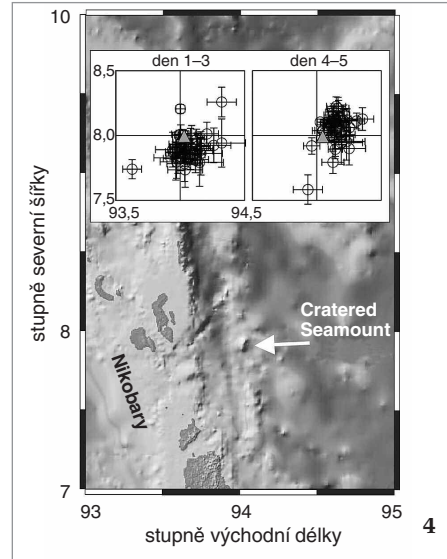
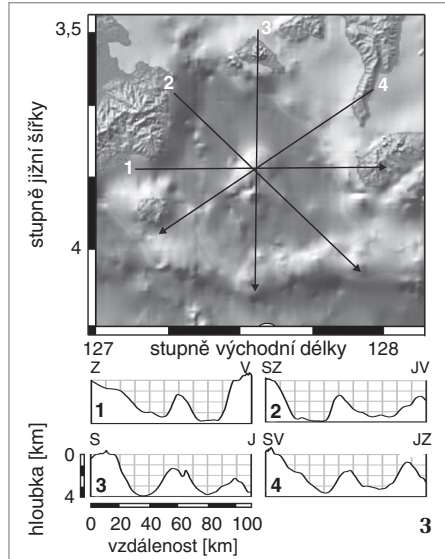
Výjimečný vulkán Krakatau

Naše zkoumání souvislostí mezi výskytem středně silných a silných zemětřesení a aktivitou vulkánů na konvergentních okrajích litosférických desek začalo v Indonésii – lépe řečeno u stolu naší kanceláře v Geofyzikálním ústavu v Praze 4 na Spořilově prohledáváním údajů z této oblasti. Pod proslulým vulkánem Krakatau v sundské úžině mezi Sumatrou a Jávou jsme odhalili skupinu 50 zemětřesení o síle



(magnitudu) od 4,0 do 6,5. K těmto zemětřesením docházelo v období uplynulých 50 let víceméně pravidelně přibližně jedenkrát ročně v hloubkách od několika kilometrů do několika desítek kilometrů pod povrchem (obr. 1). Čas jejich vzniku se ani v jednom případě neshodoval s okamžikem erupce Krakatau, kterých za uvedené období bylo pozorováno 19. Index vulkanické explozivnosti (VEI) nepřevyšil ani u jedné erupce hodnotu 2, šlo tedy o poměrně slabou sopečnou činnost. Zjištění velkého množství středně silných zemětřesení bezprostředně pod aktivním vulkánem je překvapivé hned z několika důvodů. Zaprvé proto, že se takto silná zemětřesení pod vulkány – s výjimkou zemětřesení, která bezprostředně doprovázejí silné sopečné výbuchy – zpravidla nevyskytují. Zadruhé pro neobvykle pravidelný průběh zemětřesné činnosti bez náznaku soustředění jevů v krátkém časovém úseku. Zatřetí proto, že pravidelný výskyt středně silných zemětřesení v hloubkách do 50–60 km svědčí o umístění objemných zdrojů magmatu až pod touto hloubkovou úrovní; pokud by se v hloubkách odpovídajících hloubkám zemětřesných ohnisek vyskytovaly natavené horniny ve velkém objemu, zemětřesení – obzvláště ta silnější – by v takovém prostředí vznikat nemohla.

Po zjištění soustavné zemětřesné činnosti pod Krakatau jsme prověřili chování několika desítek aktivních sopek na všech kontinentech a zjistili jsme, že k zemětřesením o podobné síle jako pod Krakatau (o magnitudu 5–6) docházelo také pod několika dalšími vulkány – např. pod vulkánem Arenal ve Střední Americe nebo pod vulkanickým ostrovem Nisyros v řecké části Egejského moře. Naopak pod řadou jiných aktivních vulkánů nebylo za posledních 50 let zaznamenáno světovou sítí seismických stanic jediné zemětřesení – např. pod v současnosti neaktivnějším indonéským vulkánem Merapi nebo pod vulkánem Mt. Pelée na ostrově Martinik v karibské oblasti, známým ničivou erupcí z r. 1902. Odezva horninového prostředí pod jednotlivými vulkány na magmatické procesy je tedy různá. Příčina spočívá patrně ve velké variabilitě jak vnitřní stavby magmatických struktur, tak procesů probíhajících v litosféře. Tato skutečnost velmi komplikuje zobecnění mnoha poznatků ve vědách o Zemi (např. využití interpretace změn některých fyzikálních veličin k předpovídání zemětřesení).



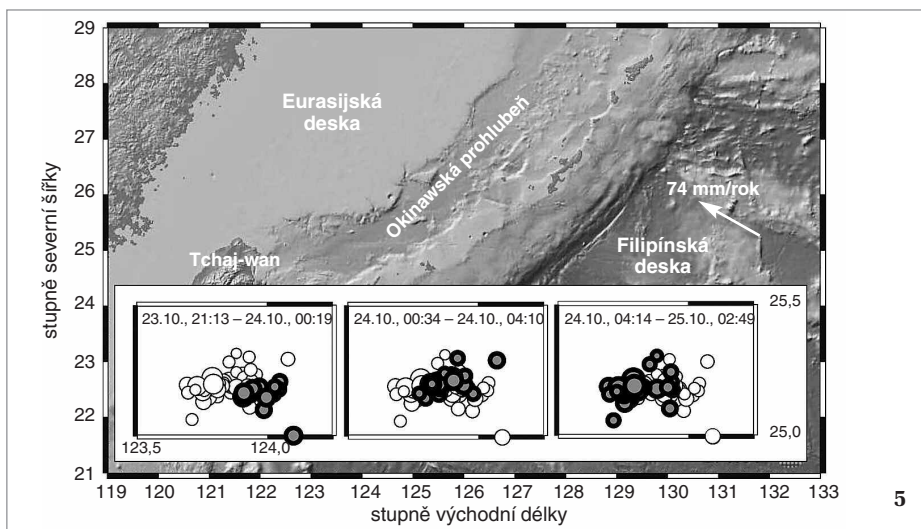
Zemětřesné roje jako sonda do oceánské kůry

Při výběru oblastí vhodné pro náš způsob analýzy seismologických dat jsme byli inspirováni komplexním projektem americké grantové agentury NSF (National Science Foundation) s názvem MARGINS („rozhraní litosférických desek“; dnes, ve druhé dekádě své existence se projekt jmenuje GEOPRISMS – „klín litosféry“ nad subdukcí deskou). Tento projekt si za cíl výzkumu zvolil několik exkluzivních lokalit, mezi nimi i vulkanické souostroví Izu-Bonin-Mariana, které tvoří součást známého ohnivého kruhu („Ring of Fire“) obklopujícího Tichý oceán, a rozprostírá se v délce přes 3 000 km od jihovýchodního pobřeží japonského ostrova Honšú směrem na jih. V jeho severní části, přibližně pod 300 km dlouhým podmořským úsekem vulkanického oblouku mezi vulkány Sofugan a Nishino-shima, jsme identifikovali sérii 150 středně silných zemětřesení (M 4,3 až 5,8), k nimž došlo v jinak seismicky klidné oblasti během 18 měsíců od března 1985 do září 1986. Epicentra se nacházela v blízkosti podmořských hor („seamounts“) Suio a Mokuyo, které byly v průběhu naší práce na tomto tématu označeny japonskou meteorologickou agenturou jako aktivní podmořské vulkány, ovšem s neznámou eruptivní historií. K jejich zařazení mezi aktivní vulkány došlo na základě opakovaného pozorování výrazně zbarvené mořské vody plavidly, která nad těmito podmořskými horami proplouvala. V uvedeném období 1985–86 se pod zdejšímořským

1 Rozložení ohnisek zemětřesení 1964–2014 ve svislém řezu podél profilu přes vulkán Krakatau. Azimut profilu 30°, délka profilu 600 km, šířka profilu 25 km. Světlejší symboly – ohniska zemětřesení v podsouvající se indo-australské desce, tmavší symboly – ohniska v litosférickém klínu eurasijské desky pod vulkánem Krakatau. Na pozadí Anak Krakatau, září 2014. Foto A. Špičák

2 Reliéf oceánské dna v okolí souostroví Izu-Bonin mezi 27° a 30° severní šířky (vlevo) a naše interpretace svislého uspořádání ohnisek zemětřesení během silného roje zemětřesení 1985–86: magma vystupuje vzhůru podél existujícího systému trhlin a způsobuje slabá až středně silná zemětřesení. σ_1 , σ_2 , σ_3 – osy hlavních napětí; v zobrazeném případě jde o poklesovou tektoniku, obvyklou v oblastech vulkanických řetězců nad podsouvajícími se deskami. Su – podmořská hora Suyo Seamount, Mo – Mokuyo Seamount, Do – Doyo Seamount

3 Podmořská pánev Manipa na východě Indonésie. Výškové profily ve spodní části obrázku dokumentují velké převýšení centrálního horského masivu. **4** K zemětřesnému roji došlo pod Cratered Seamount (zvýrazněný trojúhelník v horních obr. a šipka) v oblasti souostroví Nikobary ve dnech 26. ledna – 5. února 2005, tedy 30 dnů po velmi silném ničivém zemětřesení u Sumatry (26. prosince 2004) o magnitudu 9,1. Epicentrální mapy v horní části obrázku znázorňují přesun zemětřesné činnosti během roje



v prvních pěti dnech jeho trvání o přibližně 25 km směrem k severovýchodu.

5 Jižní část souostroví Rjúkjú. Epicentrální mapy ve spodní části obrázku ukazují tři fáze zemětřeseného roje, který vznikl pod okinawskou prohlubeň. Kružnice znázorňují polohy všech zemětřesení tohoto roje, tučně orámované kružnice vyplněné šedou barvou pouze ta zemětřesení, která vznikla během příslušné fáze vývoje roje. Aktivita roje se přesunula z východu na západ přibližně o 25 km za 30 hodin. Všechny orig. A. Špičák

dnem zemětřesná činnost soustředila do několika časových intervalů, během nichž se ohniska zemětřesení řadila do vertikálních linií, sahajících od hloubek několika desítek kilometrů až po mělké partie blízko pod zemským povrchem (obr. 2). Výše uvedená tři pozorování – seismická aktivita ve formě výrazného zemětřeseného roje, svislé linie zemětřesených ohnisek během jednotlivých fází vývoje zemětřeseného roje a přítomnost výrazných podmořských hor vulkanického charakteru nad shluky ohnisek zemětřesení – nás přiměla interpretovat zemětřesný roj 1985/86 v oblasti souostroví Izu-Bonin jako důsledek výstupu magmatu či z magmatu odvozených fluid, majících původ v podsouvání pacifické desky západním směrem pod desku filipínskou. Při práci s údaji o zemětřesném roji pod souostrovím Izu-Bonin jsme si uvědomili, že vyhledávání zemětřesených rojů pod podmořskými, nedostatečně probádanými úseky ostrovních oblouků v subdukčních zónách a detailní analýza příslušných údajů by mohly být cestou k identifikaci oblastí, kde v nedávné minulosti došlo k průniku magmatu pod či na oceánské dno, nebo kde by k tomuto jevu mohlo dojít v blízké budoucnosti.

Další oblastí, kde jsme se vyhledávání zemětřesených rojů věnovali systematicky, bylo Bandské moře na východě Indonésie. Jeho současný geologický vývoj je mimořádný – podsouvání litosféry, tvořící dno Indického oceánu, pod eurasijskou desku zde směrem na východ postupně přechází v kolizi australské desky s Eurasií, připomínající počátek kolize indické desky a Eurasie přibližně před 50 miliony let. Jedním z výsledků naší analýzy zemětřesené činnosti v této oblasti bylo nalezení

několika zemětřesených rojů pod podmořskou páneví Manipa jihozápadně od ostrova Seram. Tato podmořská deprese má kruhový půdorys a v jejím středu se ze dna zdvihá hora, která převyšuje okolní mořské dno o více než 2 km (obr. 3). Průměr pánevní deprese činí zhruba 60 km. Podle naší interpretace, opírající se o zjištění opakovaného výskytu zemětřesených rojů pod pávní Manipa, je tato oblast reliktem výrazné sopečné činnosti v minulosti – tzv. kalderou, pod níž i v současné době dochází k migraci magmatu.

Zemětřesné roje pod ostrovním obloukem s četnými málo probádanými podmořskými úseky jsme našli posléze i v oblasti souostroví Andamany a Nikobary severně od Sumatry. Několik zdejších rojů bylo navíc výjimečných v tom, že vznikly jen několik dnů až týdnů po extrémně silných zemětřeseních, k nimž v uplynulém dekadě v jihovýchodní Asii došlo – po ničivém zemětřesení u Sumatry (26. prosince 2004, magnitudo 9,1 – třetí nejsilnější zemětřesení v epoše instrumentální seismologie, tedy od konce 19. stol.), vzdáleném od místa zemětřesených rojů přibližně 200 km, a po dvojici zemětřesení z 11. dubna 2012 (magnitudo 8,6 a 8,2 – nejsilnější dvojice bezprostředně po sobě následujících zemětřesení v historii), vzdálené přibližně 700 km. Podle naší interpretace, na níž jsme se shodli se zahraničními kolegy, způsobily seismické vlny šířící se z ohnisek výše uvedených silných zemětřesení aktivaci rezervoárů magmatu pod ostrovním obloukem Andamany-Nikobary, kterou si zjednodušeně můžeme představit jako chování sodovky v lahvi, jíž zatřepeme. Tato aktivace vedla mimo jiné k přemísťování magmatu horninovým prostředím. Pohyb magmatu měl za následek zvýšení tektonického napětí a z toho plynoucí vznik zemětřesených rojů. Naše podrobná analýza vývoje nejsilnějšího z uvedených rojů z ledna 2005 (obr. 4) navíc umožnila odhadnout rychlost, jakou se zemětřesná činnost během trvání roje přesouvala. Protože známe časový vývoj zemětřeseného roje a z rozložení epicenter jednotlivých zemětřesení roje můžeme určit, o jakou vzdálenost se během trvání roje zemětřesná činnost posunula, máme všechny údaje potřebné k výpočtu rychlosti migrace seismické aktivity – činila přibližně 250 m/h. Za předpokladu, že migrace zemětřesených

ohnisek odráží migraci magmatu, podařilo se nám určit parametr, který se ve vulkanologii obtížně stanovuje.

Interpretaci přemísťování ohnisek během zemětřeseného roje jako odezvy na migraci magmatu pod zemským povrchem potvrdila naše analýza zemětřesné činnosti v jižní části ostrovního oblouku Rjúkjú východně od Tchaj-wanu. Také zde se v linii ostrovního oblouku v jeho podmořských úsecích vyskytují zemětřesné roje, z jejichž vývoje v prostoru a čase lze určit rychlost migrace zemětřesených ohnisek. To se nám podařilo hned u pěti zdejších zemětřesených rojů, přičemž nejlépe je tento proces patrný u roje z r. 2002 (obr. 5). Během 30 hodin trvání roje se seismická aktivita postupně přesunula laterálně (tedy v horizontálním směru) o 25 km, takže rychlost migrace zde činila ca 850 m/h. Tato hodnota přibližně odpovídá rychlosti laterálního přesunu magmatu, kterou pomocí detailních seismických a geodetických pozorování určili pracovníci Islandského meteorologického úřadu během erupce vulkánu Bárðarbunga na Islandu v létě r. 2014 – měnila se od několika set metrů za hodinu do 1 km/h. Také v případě jižní části ostrovního oblouku Rjúkjú interpretujeme rychlost migrace zemětřesených ohnisek jako rychlost migrujícího magmatu.

Chvála volně dostupným datům

Výsledky naší dlouhodobé práce s dostupnými daty mezinárodních a národních datových center, založenými na záznamech seismických stanic umístěných po celém světě, potvrzují vysokou přesnost těchto údajů. Jejich velkou předností je navíc relativně dlouhý interval pozorování, více než 50 let v případě mezinárodního seismologického centra ISC – tedy nesrovnatelně déle než doba fungování kterékoli regionální či lokální sítě seismických stanic. Dostatečně dlouhé spojitě pozorování je přítom ve vědách o Zemi zásadní. Výhodou práce s těmito globálními daty jsou téměř zanedbatelné náklady – lze je získat bezplatně a k práci s nimi postačuje běžná výpočetní a grafická technika. Kromě seismických dat pak využíváme volně přístupných údajů o jednotlivých vulkánech a historii jejich eruptivní činnosti (web Volcanoes of the World, provozovaný Smithsonian Institution ve Washingtonu), odborné literatury věnované příslušným geologickým oblastem, a v neposlední řadě volně přístupný mapový a datový nástroj GeoMapApp, vyvinutý a spravovaný na Lamont-Doherty Earth Observatory při Kolumbijské univerzitě ve státě New York, obsahující např. detailní topografii zemského povrchu včetně oceánské dna.

I přes náš trvalý zájem o práci s dostupnými celosvětovými seismologickými daty bychom v budoucnu rádi využili našich zkušeností se vztahy mezi zemětřesnou a sopečnou činností k detailnímu studiu zdrojů magmatu, jeho výstupu a migrace pod některým z významných světových pozemních vulkánů pomocí vlastních seismických stanic. Míra pochopení a povědomí o procesech, které v současnosti pod jednotlivými vulkány probíhají, je totiž u mnoha z nich překvapivě nízká, přestože se často nacházejí v hustě osídlených oblastech.