

MERRE TOVÁBB, VULKANOLÓGIA? A 21. SZÁZAD KIHÍVÁSAI

Harangi Szabolcs

az MTA doktora, tanszékvezető egyetemi tanár
MTA–ELTE Vulkanológiai Kutatócsoport
ELTE Közettan-Geokémiai Tanszék
szabolcs.harangi@geology.elte.hu

A vulkanológia, azaz a vulkáni működés sokrétű kutatása az egyik legrégebbi (hiszen már Anaxagorász és Arisztotelész is behatóan foglalkozott vele mintegy 2500 évvel ezelőtt), és az egyik legújabb (hiszen az elmúlt néhány évtizedben hatalmas változáson ment keresztül) tudományterület. Jelentősége nem lebecsülendő, hiszen olyan természeti folyamatot kutat, amely a Föld kialakulása óta, azaz mintegy 4,6 milliárd éve formálja bolygónkat. A vulkáni kitörések közvetlen és szoros kölcsönhatásban vannak a környezettel, befolyásolják az élővilágot, átalakítják a felszíni formákat, módosítják a klímát, kihatnak társadalmi folyamatokra. Nincs kétség afelől, hogy ez a jövőben is így lesz.

Bevezetés

A kezdeti, majd évszázadokon keresztül megmaradó, a Föld belsejében fújó tüzes szelek elméletét csak a 18. században váltotta fel a földköpenyben történő magmaképződés modellje. A vulkanológia ezután sokáig csupán leíró jellegű tudomány maradt, a vulkán működésére és képződményeinek jellemzésére koncentrált. A 20. század nagy, és sajnos sok esetben tragikus kimenetelű vulkánkitörései (például a Mt. Pelée 1902-es, a Mt. St.

Helens 1980-as, a Nevado del Ruiz 1985-ös kitörése) azonban alapvető változásokat indítottak el. Részben ezeknek is köszönhető a vulkanológiai tudást az elmúlt évtizedekben jelentősen átalakító fejlődés. A jelenleg is formálódó új területek a társtudományok ismereteinek bevonásával erősödtek meg. A vulkáni kitörések mechanizmusát, a kitörés előtti magmakamra-folyamatokat többek között a fizika és a termodinamika törvényszerűségei alapján értelmezik. A magmakamra-folyamatok rekonstruálásában ma már nélkülözhetetlenek a nagy felbontású kőzettani és geokémiai vizsgálatok, ezek integrálása a termodinamikai ismeretekkel. Ugyancsak erős fizikai alapokon nyugszanak a vulkáni kitörési felhők mozgásának leírásai, azok terjedésének modellezései. A robbanásos kitörésekben kulcsszerepet játszó vulkáni gázok magmában való oldhatósága, abból való kiválása a kémiai tudástáron alapulva kap egyre finomabb magyarázatot. A vulkánkitörések előrejelzése ma már nagyon erős matematikai alapokon nyugszik. Természetesen nem hagyhatók ki az új kísérleti eredmények sem, amelyek igyekeznek a vulkánkitörések számos folyamatát szimulálni. Az orvostudománnyal együttműködve számos

vulkanológus dolgozik azon, hogy jobban megértsük a vulkánkitörések során az emberekre és más élőlényekre leselkedő egészségügyi veszélyforrásokat.

A 21. század elejére világossá vált, hogy a vulkáni működés megértése a forrástól, azaz a magmaképződés magyarázatától a felszíni folyamatokig, azaz magának a vulkáni működés lejátsszódásának, azok eseményeinek megfigyeléséig, közeli és távoli hatásainak felméréséig terjed. Azonban a vulkanológia nem csak ezt a hagyományos szerepet tölti be a modern társadalomban. Egyre inkább kibontakozik a tűzhányók és a vulkanológia újszerű, pénzt teremtő szerepe, a helyi gazdaságot vagy egy egész országot fellendítő képessége. Itt most már nemcsak a geotermikus energiáról, a termékeny talajról és a nyersanyagokról van szó, hanem maguk a vulkánok és működésük mint egyedi természeti értékek hasznosításáról. Mit ad a vulkanológia a 21. században? Mi a szerepe, és mik az új kihívások? Az izlandi Eyjafjallajökull 2010 tavaszi kitörése előtérbe helyezte a vulkanológiai tudás szükségességét és társadalmi fontosságát. Az alábbiakban összefoglaljuk, hogy merre halad e tudományterület, milyen új

lehetőségek nyílnak meg, amelyek hozzájárulhatnak a jobb társadalmi beágyazódáshoz.

Hasznot hozó vulkánok

Vulkánturizmus régen és ma • A vulkáni működés folyamata, a tűzhányók szépsége sokakat megfog, lenyűgöz. A hirtelen, tűzijáték-szerűen kirobbanó vagy a kürtőből szökőkút-ként kizúduló izzó lávafatagok vagy éppen háttorzongató dübörgéssel a tűzhányó fölé tornyosuló gomolygó hamufelhő, mind olyan élmények, amelyek egy életre nyomot hagynak az emberekben, és amelyek miatt évente sokan útra kelnek, hogy átéljék ezt az egyedi természeti eseményt. A tűzhányók emellett a maguk megjelenésével is vonzást gyakorolnak. Kevés olyan földfelszíni forma van, amely szabályosságával, monumentalitásával annyira megkapó, mint egy meredek oldalú, magasba tornyosuló, szabályos kúp alakú tűzhányó (*1a. ábra*). Legyen tehát akár kalandtúra a cél vagy békésebb, természetközeli élmény keresése, a vulkáni területek erre különleges lehetőséget nyújtanak. A vulkánturizmus ma már dollármilliókat hoz a helyi gazdaságoknak, és a globális turisztikai szolgáltatás integrált részévé vált (*1b. ábra*).



1. ábra • Balra: Kevés olyan földfelszíni forma van, amely szabályosságával, monumentalitásával annyira megkapó, mint egy meredek oldalú, magasba tornyosuló tűzhányó: Teide, Tenerife, Kanári-szigetek. • Jobbra: Turisták a Vezúv kráterperemén. Évente több tízmilliónyian kelnek útra, hogy meglátogassanak egy-egy aktív vagy szunnyadó vulkáni területet.

A vulkánturizmus nem új keletű, feltörő időszaka a 18. századra tehető, amikor a Vezúv egyik fontos látogatási célterületté vált, mégpedig az akkor igen népszerű, ún. *Grand Tour* keretében. Az 1600-as évek végén *I. Erzsébet* ösztönzésére egyre több ifjú brit nemes kelt útra, hogy világot látva növeljék tudásukat, és hazatérve udvari állásokat töltsenek be. Az egy-három évig tartó európai körutak kedvelt területei Franciaország és Itália voltak. 1764-től a Vezúv közel három évtizedig különösen aktív volt. Egymást követték a látványos kitörések, a hosszú lávafolyások, amit az akkori nápolyi angol követ, *William Hamilton* részletekbe menően dokumentált, és *Pietro Fabris* közreműködésével számos gyönyörű festményben örökített meg. A Vezúv a nagy körtúrák kihagyhatatlan pontja lett. *Goethe* az 1780-as években alig tudott elszakadni a Vezúvtól; művészek sokasága érkezett a tűzhányóhoz, és több száz festményt, rézkarcot és litográfiát készítettek. Az érdeklődés később sem lanyhult, a gazdag turistákat farudakból összerakott hordszékeken vitték fel a helyi legények, majd öszvéreken és samarakon hordták fel a Vezúv kráterébe betekinteni óhajtókat. 1878-ban a magyar *Oblieght Ernő* mérnök kezdeményezésére és kivitelező munkájának eredményeként megépült az első fogaskerekű kábelvasút aktív tűzhányón, ami két 15 személyes kabinban, naponta háromszáz utast szállított fel a csúcs közelébe. Az angol John Cook turistairoda folyamatosan biztosította az utánpótlást. Az újítás nagy népszerűségnek örvendett a helyiek körében is, megszületett a népszerű dal, a *Funiculi, Funicula*. Végül 1906-ban egy kitérés lerombolta az építményt, és helyére azóta sem épült újabb felvonó. Ma már buszok, autók százai kanyarognak felfelé a meredek aszfaltúton, a kráterperem alatt pedig jegyárusok szedik a

belépődíjat. A hegy lábánál folytatódhat a vulkáni emlékek látogatása: Pompeji és Herculaneum romjait ma már évente több mint 2,5 millió turista keresi fel.

A vulkánok és a vulkanológiai háttérismertet tehát nem lebecsülendő bevételt hoz a helyi gazdaságnak. A Vezúv mellett évente több mint egymillió látogató keresi fel a tenerifei Teide környékét, Yellowstone gejzírekkel tarkított kalderáját, a hawaii Kilauea vulkáni komplexumot, az új-zélandi Tongarirót, és több tízmillióra rúg a japán Fujit, valamint a Sikocu-Toja vulkáni területet felkeresők száma. Visszafogott becslések szerint is évente közel 150 millió ember látogat vulkáni területet. A közép-amerikai Nicaragua például a turisztikai szolgáltatás központjába állította a szunnyadó és működő vulkánjait. Az 1850-ben egy kukoricaföldön kinőtt, és azóta rendkívül aktív Cerro Negro laza bazaltsalakkal borított meredek oldalán például a turisták fadeszkákon csúszhatnak lefelé, elérve akár a 70 km/óra sebességet is. Az erősen megnőtt érdeklődésnek köszönhetően az Európai Unió 2012-ben nyolcmillió euró támogatást nyújtott az országnak kifejezetten a vulkánturizmushoz kapcsolódó infrastruktúra fejlesztésére.

Vulkánparkok és hazai lehetőségek • Vulkanizmust nem csak aktív vulkáni területen lehet elérni. A turisztikai szolgáltatások egyre több helyen épülnek a vulkáni örökségre, azaz egykor működött tűzhányók természeti szépségére és a vulkáni működés modern eszközökkel való bemutatására. Az Európai Geopark Hálózat egyik alapító tagja volt a németországi Vulkaneifel, ahol a vulkáni természeti értékekre alapozták a turisztikai fejlesztéseket. Az UNESCO világörökség-listáján harmincnégy olyan hely található, ahol a vulkáni örökségnek van elsődleges szerepe. A vul-

kánok iránti érdeklődés azonban új fejlesztéseket is gerjeszt, amelyekben a szakszerű vulkanológiai ismereteknek kiemelt fontosságuk van. Ilyenek például a vulkánhoz kapcsolódó múzeumok és a tartalmas, szórakozva ismereteket nyújtó interaktív kiállítási helyek.

2002. február 20-án, a franciaországi Clermont-Ferrand közelében nyílt meg a japán Unzen kitörése során áldozatul esett többek közt a könyveik és dokumentumfilmjeik révén híres Krafft házaspár, Katia és Maurice nagy álma, a Vulcania, a tűzhányók interaktív, a legmodernebb technikai eszközöket alkalmazó kiállítása, szórakoztató központja (2a. ábra). Az első évben több mint hatszáz-ezer látogató kereste fel ezt a különleges, innovatív fejlesztést. A minden évben újdonsággal előrukkoló park tíz év alatt négymillió látogatót vonzott. Ez pedig hatalmas lökést adott a környék gazdaságának. A vulkánpark évente 32–48 millió euróval járul hozzá Auvergne bevételeihez. Ennek köszönhetően Auvergne a huszonkét francia térség között a tizenötödikről a nyolcadik helyre jött fel. A turisták többsége ugyanis néhány napot még eltölt a környéken, ahol szálláshelyek és további turisztikai szolgáltatások várják őket. Sikertörténet ez a javából, és azt mutatja, hogy

egy újszerű ötlet, a szakszerű vulkanológiai ismeretekre épített, de a kor kívánalmait, igényeit is kielégítő beruházás egy csapásra megváltoztathatja egy kistérség lehetőségeit.

A Kárpát-medence szintén bővelkedik vulkanológiai természeti értékekben (Harangi, 2011), hiszen az elmúlt húszmillió év alatt változatos vulkáni tevékenység jellemezte térségünket. E terület vulkanológiai természeti laboratórium, nyitott képeskönyv szakembereknek és laikus érdeklődőknek egyaránt. Ezt felismerve kezdeményezte e sorok írója Kemenes Vulkánpark létrehozását a Celldömölk közeli Ság-hegy lábánál (2b. ábra). A részletesen kidolgozott terv sikeresen szerepelt 2008-ban egy EU-támogatású hazai turizmusfejlesztési pályázaton, és 2010 áprilisában megindulhatott a több mint félmilliárd forint összköltségű fejlesztés kivitelezése. A pénzügyi és marketingterv felvázolta a vulkánpark várható hatását a helyi gazdaságra, és bár méreteit tekintve Kemenes Vulkánpark elmarad a francia beruházástól, azonban regionális szinten jelentős hatást lehetett előre jelezni. A kivitelezés befejező szakaszában a megbízó önkormányzat hirtelen koncepcióváltással eltért az eredeti kiállítási tervtől, és egy másfajta kiállítást valósított meg. Ezzel a bemu-



2. ábra • Balra: vulkánturizmus Franciaországban. A Vulcania interaktív vulkanológiai szórakoztatóközpontja tíz év alatt négymillió látogatót fogadott. • Jobbra: vulkánturizmus Magyarországon. 2012 tavaszán nyílt meg a Kemenes Vulkánpark Vulkánösvénye a Ság-hegyen.

tatóval, amelynek fő attrakciója a Földön kívüli vulkáni működés lett, nyílt meg a vulkánpark Látogatóközpontja 2013 áprilisában. Vannak azonban más jó példák is! 2010-ben a Novohrad-Nógrád Geopark, 2012-ben pedig a Bakony-Balaton Geopark lett hivatalosan az UNESCO és az Európai Geopark Hálózat tagja, amihez komoly kritériumokat kellett teljesíteni. Mindkét esetben a vulkáni természeti értékek jelentették az elsődleges alapot a geoparki pályázathoz, amihez természetesen szervesen kapcsolódik a további változatos geológiai hagyatékek, továbbá a történelmi és kulturális értékek. A tihanyi Levendula-ház kiállításában szintén központi szerepet kapnak a vulkáni működés emlékei, azok szakmai háttérének bemutatása. Ezek a fejlesztések reményt adhatnak arra, hogy a vulkáni természeti értékek és a vulkanológiai tudásra alapozó fejlesztések hazánkban is komoly bevételi forrásokat generálhatnak.

Romboló vulkánkitörések

Anyagi veszteségek és emberáldozatok • A dollár- és eurómilliókat hozó tűzhányókkal és a vulkanológiai ismeretekkel szemben azonban az embereknek inkább a komoly anyagi veszteségek, a vagyoni kár és sokszor az emberéletekben esett áldozatok jutnak az eszükbe a vulkánok hallatán. 2010-ben az Eyjafjallajökull kitörése következtében egy hétre leállt Európa légiforgalma, ezzel kisebb káoszba sodorva egy technológiailag fejlett társadalmat. Egy nem túl nagy vulkánkitörés ezzel több mint ötmilliárd dollár veszteséget okozott, mégpedig nem közvetlen környezetben, hanem *több mint ezer kilométer távolságban*. Ez az eset kétségtelenül ráirányította a figyelmet arra, hogy a vulkáni működéseknek komoly következményekkel járó távoli hatásuk is van. Egy évvel később, 2011. június 4-én

a déli féltekén történt valami hasonló. Ott a chilei Puyehue-Cordon Caulle lépett működésbe. A vulkáni hamufelhőt keleti irányba térítette el az uralkodó szél, és a kibocsátott vulkáni anyag *többször* megkerülte a Földet. Argentína, Chile, Uruguay és Paraguay repereit számos alkalommal le kellett zárni, sőt a kitörés kezdete után tíz nappal Új-Zélandon és Ausztráliában is megzavarta a légiforgalmat, számos járat indulását kellett törölni a vulkántól több mint tízezer kilométer távolságban. A mintegy kétnapos leállítás több mint 32 millió dollár anyagi veszteséget okozott! Mindez teljesen új a vulkáni kitörések és a társadalmak viszonyában, és jelzi, hogy a technológiailag fejlett társadalmak meglehetősen sebezhetőek a természet erőivel szemben. Pedig ezek a kitörések nem is voltak igazán nagyok.

2010-ben az izlandi vulkánkitörés mellett azonban egy másik katasztrófális vulkáni működés is történt, mégpedig Indonéziában, ahol a Merapi olyan robbanásos kitöréssel kelt életre, amilyenre a vulkán amúgy kitörésekben gazdag elmúlt évszázados történetében nem volt példa. Csak a vulkáni veszély pontos és időben meghozott előrejelzésének köszönhető, hogy „mindössze” 353 áldozata volt a kitörésnek. Ugyanakkor több mint 350 ezer embert kellett kitelepíteni, az anyagi veszteséget pedig több mint *egymilliárd* dollárra becsülik.

Mennyire veszélyesek a vulkánkitörések, mekkora kárt okoznak a társadalomnak? Bár az előző példák világosan mutatják a társadalmak sebezhetőségét, sokan abból indulnak ki, hogy a vulkáni működés a természeti folyamatok között korántsem sorolható a legpusztítóbbak közé. Az elmúlt harminc év nagyobb vulkánkitöréseit számba véve összesen mintegy 13 milliárd USD (2007-es érté-

év	vulkán	ország	anyagi veszteség
2011	Puyehue-Cordon Caulle	Chile	100
2010	Eyjafjallajökull	Izland	5050
2010	Merapi	Indonézia	890
2010	Tungurahua	Ecuador	160
2010	Pacaya	Guatemala	59
2010	Bromo	Indonézia	5
2010	Stromboli	Olaszország	5
2010	Sinabung	Indonézia	3
2008	Chaitén	Chile	50
2006	Tungurahua	Ecuador	154
2002	Stromboli	Olaszország	1
2001	Etna	Olaszország	4
1997	Soufrière Hills	Montserrat	10
1996	Grimsvötn	Izland	21
1997	Rabaul/Tavarvur	Pápua Új-Guinea	531
1991	Pinatubo	Fülöp-szigetek	300
1985	Nevado del Ruiz	Kolumbia	1719
1983	Gamalama	Indonézia	275
1982	El Chichón	Mexikó	224
1982	Galunggung	Indonézia	306
1980	Mt. St. Helens	USA	3327
1973	Eldfell	Izland	93
Össz.			13 287

1. táblázat • Az elmúlt harminc év néhány jelentősebb vulkáni kitörése során becsült anyagi veszteség millió amerikai dollárban, 2007-es értékben

ken számolva) anyagi kár keletkezett (1. táblázat), ami a 2011-es japán Tohoku-földrengés okozta veszteség 5%-a. Az összehasonlítás azonban némileg sántít, mivel az utóbbi anomálian erős esemény volt a földrengések között, míg e vulkánkitörések nem számítanak a legnagyobbak közé, és ami fontos, egyiknek sem volt igazán globális hatása. A

gazdasági mutatók és hasonlóan ehhez, a vulkánkitörésekhez kapcsolódó áldozatok viszonylag alacsony száma tehát csökkentheti a vulkáni működések iránti figyelmet, a felkészülést, a társadalmi érzékenységet. A döntéshozók gondolhatják azt, hogy ez nem olyan kiemelt probléma, amivel foglalkozni kell. A 20. század vulkáni kitörésekhez kap-

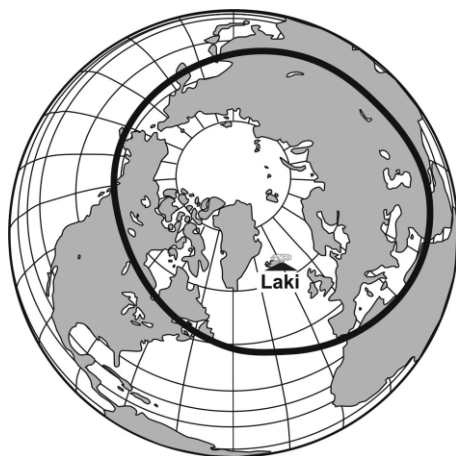
csolódo tragédiái, valamint 2010–2011 figyelmeztető jelzései azonban elgondolkodtatóak: vajon meg kell várni egy újabb nagyobb csapást, hogy megforduljon ez a vélekedés?

A karibi Mt. Pelée 1902-es, egy teljes város és harmincezer lakosának megsemmisülésével járó kitörése megdöbbentette a világot, és számos tudós életét változtatta meg. Egyértelművé vált, hogy szükségesek a közvetlen vulkánmegfigyelő létesítmények, és ennek nyomán több vulkánobszervatórium létesült. 1980. május 18-án a Mt. St. Helens hosszú szünet után hatalmas erővel tört ki. Bár az amerikai vulkanológusok előre jelezték a veszélyt, mégis ötvenheten haltak meg, az anyagi kár 3,3 milliárd USD volt. Az amerikai kormány rádöbbsent, hogy nagyobb támogatást kell nyújtani a vulkanológiai megfigyelésnek és munkának, ezt követően több mint tizenkétszeresére emelte a szakterület évi anyagi támogatását. Később ezt tovább növelte az alaszakai Redoubt 1989-es kitörését követően. Közben azonban egy másik esemény is történt, mégpedig Kolumbiában, 1985 novemberében. A Nevado del Ruiz nem túl jelentős kitörését követően, beváltva a vulkanológusok pontos veszély-előrejelzését, sebesen lezúduló, mindent elsöprő iszapárak (*laharok*) indultak el a folyó völgyekben. Mintegy 40 kilométerre a tűzhányótól, Armero városa teljesen elpusztult, több mint huszonkétezer ember esett áldozatul. Általános volt a megdöbbenés, hogyan történhetett ez? Ennek hatására az amerikai kormány is lépett, és létrehozott egy bárhol bevethető vulkanológiai csoportot (*Volcano Disaster Assistance Program*, VDAP). 1987 óta már több tucatszor nyújtott segítséget a tapasztalt vulkanológusokból álló csapat, többek között ennek köszönhető, hogy nem következett be nagyobb tragédia a Fülöp-szigeteki Pinatubo

1991-es, majd a kolumbiai Nevado del Huila 2008-as kitörése nyomán. A VDAP szintén nagy szerepet játszott a Merapi 2010-es kitörésének sikeres előrejelzésében. Ezek a példák egyértelműen alátámasztják, hogy a megfelelő felkészülés, az anyagi ráfordítás emberek tízezreinek életét óvhatja meg. Leselkednek azonban ennél nagyobb veszélyek is!

Vulkánkitörések társadalmi hatásai

Az Eyjafjallajökull 2010-es kitörése ráirányította a figyelmet arra, hogy a vulkánkitöréseknek komoly távoli hatásuk is lehet, és nem feltétlenül csak a tűzhányó közvetlen környezetére kell koncentrálni és a veszélyhelyzetet felmérni. Sőt a Pinatubo 1991-es kitörése során mérésekkel is sikerült alátámasztani azt, hogy egyes vulkánkitörések globális mértékben befolyásolhatják a klímát. Ekkor csupán néhány tized fokkal esett vissza az északi félteke évi átlaghőmérséklete, azonban a múltban



3. ábra • Az izlandi Laki 1783-as kitörését követő hónapban száraz, fojtó szmog lepte el az északi félteke jelentős részét, beleértve teljes Európát. Egy hasonló kitörésnek ma több mint 150 ezer áldozata lenne kontinensünkön!

ennél jóval jelentősebb események is zajlottak (de Boer – Sanders, 2004; Harangi, 2010; Oppenheimer, 2011).

Izland déli részén 1783 nyarán a történelmi idők második legnagyobb lávaöntő kitörése kezdődött el, és nyolc hónapra keresztül tartott. A Laki kitörését követően nem sokkal egész Európára sűrű, fojtó köd telepedett (3. ábra), és ez az akkori igen forró nyárral tetézve több tízezer ember halálát okozta. Kihatással volt még a globális éghajlatra is: az elmaradó monszunesők miatt ugyanis anomálishan alacsony vízállása volt a Nílusnak és a Nigernek. Az éltető víz hiánya miatt Egyiptomban nem érett be a termés, és több ezren haltak éhen. Nem sokkal később újabb csapás érkezett. 1815. április elején az indonéziai Tambora tűzhányó több mint négyezer év szunnyadás után éledt fel, és a néhány napig tartó ismétlődő, nagy erejű kitörések, a kapcsolódó járványok és éhezés a vulkán közvetlen környezetében közel százezer halálos áldozatot szedett. A hatás azonban jóval túlnyúlt Indonézián (Harangi, 2010). 1816-ot a történelemkönyvek nyár nélküli évként tartják számon. Júniustól augusztusig Európában és Észak-Amerikában is számos alkalommal tomboltak hóviharak, a termést fagyok pusztították el. A következmények drámaiak voltak. Éhséglázadások törtek ki Európában, Indiában kolerajárvány indult ki a Gangesz völgyéből, Kínában hatalmas áradások okoztak károkat. Mintegy hetven évvel később ezt megközelítő hatással járt a Krakatau kitörése is. Vajon milyen következményekkel járna egy ilyen erejű vulkánkitörés a modern társadalmakra? Anja Schmidt és munkatársai (2011) egy esetleges Laki-típusú vulkáni működés mai hatását vizsgálták. Modellszámításokkal kimutatták, hogy Európában mintegy 150 ezer emberáldozattal járna egy ilyen vulkánkitöréshez

kapcsolódó légszennyezés. Ez a szám csak a szív- és tüdőbetegségeket és az ezekkel kapcsolatos halálozási eseteket fedi, és nem szerepelnek benne a további lehetséges járulékos veszélyforrások. A megnövekedő halálozási szám egész Európát érintené, és ezen belül a Kárpát-medence is különösen érintve lehet, mivel itt a szennyezett levegő hosszabb ideig is megülhet. Ezek után a kérdés az, hogy milyen esély van egy ilyen globális kihatású vulkánkitörésre.

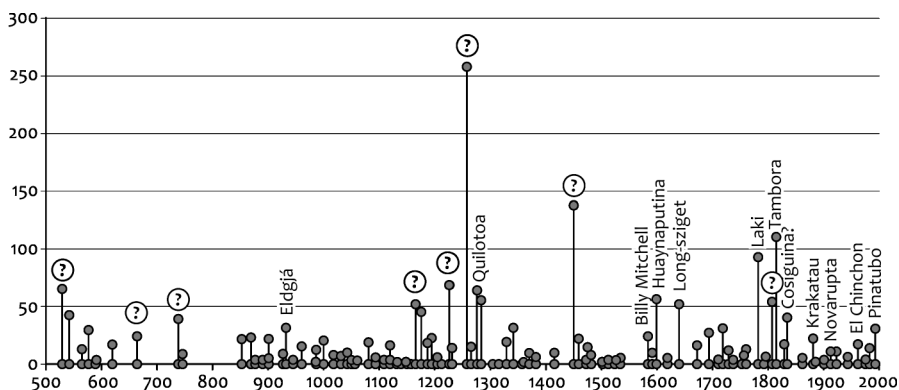
A globális kihatású kitörések gyakoriságára ma már egyre pontosabb becslést adhatunk a grönlandi és antarktiszi jégfuratminták nagy felbontású vizsgálatán (Gao et al., 2008) keresztül, amit kiegészítenek a történelmi idők írásos dokumentumai (de Boer – Sanders, 2004; Oppenheimer, 2011). Mindezekből kitűnik, hogy az elmúlt kétezer évben több mint ötven ilyen vulkánkitörés történt, azaz évszázadonként átlagosan egy-két esemény (4. ábra). Figyelemre méltó, hogy a 21. században ilyen még nem történt, utoljára huszonkét éve dokumentáltak globális kihatású vulkánkitörést. Ehhez az szükséges, hogy nagy kéntartalmú magma törjön a felszínre, és a kitörési felhő bejusson a sztratoszférába. Ez többnyire legalább VEI=5 (VEI – Volcanic Explosivity Index; ezen a 0–8 fokozatú skálán mérik a robbanásos vulkáni kitörések nagyságát) nagyságú kitörés esetén valósul meg, bár nem minden ekkora erősségű kitörés globális hatású. A 20. században tizenegy VEI≥5 kitörést számoltak, a 21. században még egyet sem. A statisztikai adatok tehát arra utalnak, hogy a következő évtizedekben bizonyára szembe kell nézni ilyen nagyságú kitörésekkel is, melyeknek akár globális hatásuk is lehet. Több kutató az elmúlt tízezer év vulkánkitöréseit számba véve arra a következtetésre jutott, hogy a Tambora 1815-ös

kitöréséhez hasonló nagyságú vulkánkitörés 21. századbeli bekövetkezésének valószínűsége 20–25%!

Új kihívások, új előrejelzési lehetőségek

Vulkánkitörések és klímaváltozás • A vulkáni működés bolygónk életének szerves része, e folyamat jobb megértése egyre inkább kulcskérdéssé válik a jövő szempontjából is. Ahhoz, hogy a jövőbeli események bekövetkezésének valószínűségét előre lehessen jelezni, számba kell venni az elmúlt időszakok rövid, közép- és hosszú távú eseményeinek sorát. Ma már a jégfuratminták, a fák évvégűrűinek elemzése alapján és a történelmi dokumentumoknak köszönhetően egyre pontosabban ismerjük nemcsak a nagy vulkánkitörések számát, ismétlődésük gyakoriságát, hanem azok hatását is. Steffen Kutterolf és munkatársai (2012) tanulmánya rávilágított arra, hogy voltak időszakok, amikor gyakoribbak voltak a

vulkánkitörések, máskor pedig ritkábbak, és ez ok-okozati összefüggésben állhat a Milankovič-ciklussal, a globális éghajlatváltozással és ezzel kapcsolatosan a litoszférában történő nyomás- és feszültségváltozással. A vulkanológia egyik fontos új kihívása e kapcsolat jobb megértése, a kitörések gyakoriságának pontosabb előrejelzése. Ehhez nagy segítséget jelentenek az egyre bővülő adatbázisok, amelyek már nemcsak az elmúlt tízezer év adatait szedik össze, hanem az elmúlt mintegy kétmillió éves időszakra is kitekintenek. Ez azonban nem elégséges a vulkáni működés hatásának pontos ismeretéhez. Ezek az adatbázisok ugyanis nem tekinthetők teljesnek, több nagy erejű, globális hatású vulkánkitörést nem tartalmaznak. Ennek oka az, hogy ezekről nincsen vulkanológiai ismeret, nincs adat. Ugyanakkor a jégfuratminták éves felbontású adatai egyértelműen jelzik, hogy több nagy vulkánkitörés történt az elmúlt évezredekben, mint amennyit vulkanológiai



4. ábra • Az elmúlt 1500 év nagy vulkánkitörései, amelyek nyomot hagytak a grönlandi vagy antarktisi jégtakaróban. A jégfuratmintákban mért savkoncentráció alapján becsülhető a sztratoszférába adott évben bekerült vulkáni kén-dioxid-gázokból keletkezett kénsav aeroszolmennyisége. Az anomális kénsavmennyiséghez köthető vulkáni kitörés vulkanológiai adatok hiányában sok esetben még nem ismert. A jégfuratminták ezért pontosabban dokumentálják a nagy vulkánkitörések számát (adatok Gao et al., 2008 alapján).

adatok alapján ismerünk (4. ábra). A vulkáni működés hatásának, a vulkánkitörések gyakoriságának értékelésében a jégfuratminták adatai tehát rendkívül fontos szerepet tölthetnek be.

A klímaváltozás és a vulkáni működés kapcsolata mindkét irányban lényeges: milyen módon és milyen mértékben hatnak a vulkánkitörések a globális éghajlatra (Robock, 2000) és fordítva, a klímaváltozás hogyan hat a vulkáni kitörések gyakoriságára, nagyságára és a kapcsolódó veszélyekre (Tuffen, 2010)? Az előbbiről egyre tisztább a kép, az elmúlt évek megfigyelései azonban új kérdéseket vetnek fel. Mindaddig az volt az általános vélekedés, hogy csak a nagy erejű vulkánkitöréseknek van klimatikus hatásuk. Ryan Neely és munkatársai (2013) tanulmánya felveti, hogy a kis és közepes erősségű vulkánkitöréseknek is fontos szerepük lehet az éghajlati viszonyokra. Az elmúlt bő évtizedben például nem növekedett olyan mértékben a globális átlaghőmérséklet, ahogy ezt az előrejelzések mutatták. Ennek egyik oka lehet az, hogy 2000 és 2010 között több olyan, kis-közepes erősségű vulkánkitörés is volt, amelyek elegendő kén-dioxidot juttattak be a sztratoszférába ahhoz, hogy ott a kialakuló és megvastagodó kén-sav aeroszol felhő visszaverje a beérkező napsugarak egy részét, és ezzel kismértékben csökkentse a földfelszínközeli hőmérsékletet. A jövőben tehát nagyobb figyelmet kell fordítani a vulkáni működések éghajlati hatásának jobb megértésére, a múltbeli és a jövőbeli hatások értékelésére. Elkerülhetetlen, hogy mindezek fontos szerepet kapjanak a klímaváltozás jövőbeli folyamatainak elemzésében, azaz az emberi hatások mellett egyre pontosabb képet kapjunk a valós természetes változások irányokról is. Ebből a szempontból is fontos lehet az 1850

előtti vulkáni események értelmezése, amely időszakban világosabban, az emberi ipari hatás nélkül vizsgálhatók a klímaváltozást befolyásoló természeti hajtóerők, amelyekből következtethetünk a jelen folyamataira is. A rendelkezésre álló adatok többek között azt jelzik, hogy a középkori melegkorszak (800-1200 között) során kevesebb klimatikus kihatású vulkánkitörés történt, míg a kis jégkorszak (1400-1900) idején megnőtt a nagy erejű vulkánkitörések száma. E trendek értelmezésében segíthet a nagyobb időléptékekre, akár a teljes holocén időszakra kiterjedő, most már egyre pontosabb adatsorok (vulkáni működés és globális hőmérséklet-változás) összehasonlító vizsgálata.

A vulkanizmus-klíma kapcsolat azonban a másik irányban is működik. A vulkáni működés gyakorisága az utolsó eljegesedést követően kiugró volt, és nagyobb időtávlatban is korreláció mutatkozik a vulkáni működés intenzitása és az eljegesedéseket követő felmelegedési időszakok között (Kutterolf et al., 2012). Kulcskérdés annak ismerete, hogy a jelenleg tapasztalható felmelegedés és a kapcsolódó jégolvadás vajon befolyásolja-e a vulkánkitörések jövőbeli gyakoriságát. A litoszférában e nyomán jelentkező nyomáscsökkenés hogyan hat a magmaképződés mértékére, illetve a magmakamra-folyamatokra, és ez milyen időeltolódással okozhat szaporább vulkáni működést? Ez különösen Izland, valamint az Andok hófödte tűzhányóinak működését befolyásolhatja. A hótakaró eltűnével viszont csökkenhet is a fenyegető veszély, mivel visszaszorulhatnak a mindent elsöprő laharok, az izlandi jeges iszapáradatok (*jökulhlaupt*).

A vulkáni működés társadalmi hatásai • A vulkánkitörések hatásainak elemzésében kulcskérdés a vulkáni működés társadalmi

hatásainak jobb megértése (de Boer – Sanders, 2004). Ezen a területen a kutatások éppen csak elindultak, itt a vulkanológia szakembereinek az éghajlatkutatás, a környezet- és történelemtudományok kutatóival szükséges együttműködniük (például: Harangi, 2010; Oppenheimer, 2011; Schmidt et al., 2011). A múlt eseményeinek feltárása során világossá vált, hogy a nagy vulkánkitöréseknek akár történelemformáló szerepük is lehetett (például: 530-as évek, 1450-es évek), azaz a társadalmak érzékenyen reagáltak a nagy vulkánkitörések okozta környezeti változásokra. Fontos kérdés annak vizsgálata, hogy a jelenlegi, technológiailag fejlett, de éppen ezért sebezhető társadalmak hogyan válaszolnának egy-egy ilyen eseményre. Például, ha a Tokiótól mintegy 100 km-re lévő Fuji több mint háromszáz éves szunnyadás után kitör, vajon milyen hatással lesz ez a Föld egyik gazdasági központjának életére? Az esetleges zavarok az elektromos- és ivóvízellátásban milyen módon hatnak nemcsak az ott élő lakosokra, hanem akár például a tokiói tőzsdére, aminek viszont már világgazdasági szerepe és hatása van. E kérdések vizsgálata, elemzése, modellszámítások végzése még bizony gyerekcipőben jár, pedig a felkészülés fontos eszközei lehetnek.

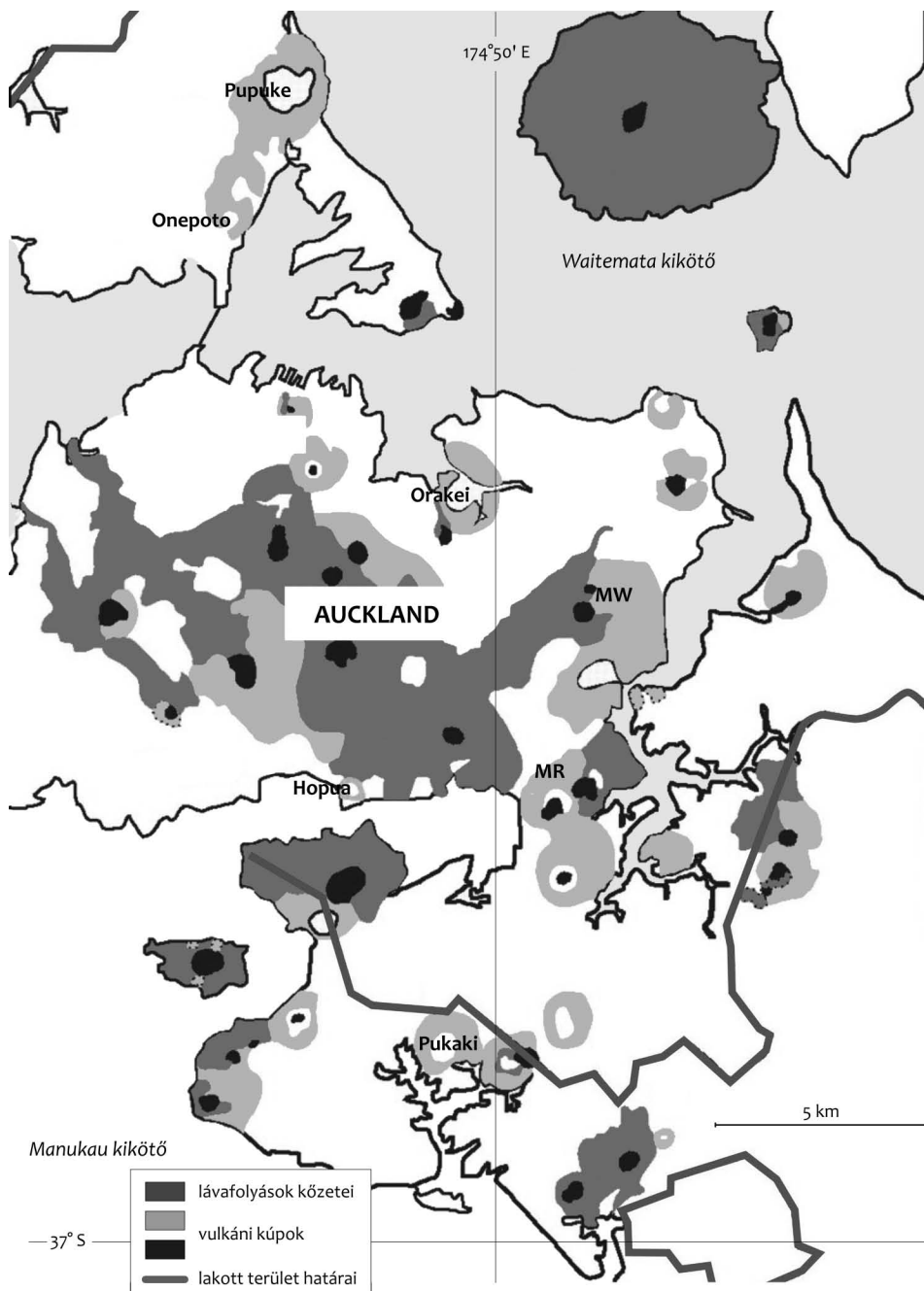
A vulkánok és az ember kapcsolata egészen a kezdeti időkig, a kelet-afrikai hasadékkrendszer környékén megtelepedő eleinkig nyomozható vissza. Ma már drámaian megváltozott a helyzet: jelenleg a Föld lakosságának mintegy 10%-a, azaz közel hatszázmillió ember él közvetlenül olyan vulkán szomszédságában, amelynek a történelmi időkben volt nagy kitörése, és potenciálisan a jövőben is működhet. Olyanra még nem volt példa a történelemben, hogy egy nagy népsűrűségű területen tört volna ki hatalmas erővel egy

tűzhányó. Elpusztult településekre tucatnyi példa akad még a 20. századból is, de mi történik akkor, ha például a Vezúv lép újra működésbe, vagy éppen a Salvador 2,5 millió lakosú fővárosa mellett található San Salvador (Quetzaltepec-) vulkán vagy az 536 körüli jelentős környezeti és társadalmi változásokért feltehetően felelős Ilopango-kaldera aktivizálódik, vagy a sűrűn lakott perui Arequipa közeli El Místi ébred fel. Vajon hogyan kezelhető egy pliniusi kitörés milliós népsűrűség mellett? Sokak szerint azonban egy esetleges társadalmi káoszhoz nem feltétlenül szükséges egy különlegesen nagy vulkánkitörés. Egyes kutatók szerint nagyobb az esélye annak, hogy a Nápolyi-öböl északi részén lévő Campi Flegrei-kalderában történik egy vulkánkitörés (a legutóbbi kitörés 1538-ban volt), amelynek potenciális helye Pozzuoli térségében lehet. Itt, e nagy népsűrűségű területen akár egy, a Monte Nuovo kitöréséhez hasonló méretű, alapvetően szerény erejű vulkánkitörésnek is beláthatatlan következményei lennének. Pedig korábban ennél jóval nagyobb kitörések is voltak itt, például a paleolitik kultúrát is befolyásoló campaniai kitörés 39 ezer éve, majd a tizenötezer évvel ezelőtti nápolyi sárga tufa kitörés. A kaldera jelenlegi viselkedése mindenesetre nem biztató. A felszín erőteljesen (2012 végén, 2013 elején átlagosan havi 1 cm-rel) emelkedik, a kiáramló gázok hőmérséklete növekszik, a gázösszetételben pedig egyértelműen egyre nagyobb a magmás eredetű gázok aránya. Új kihívás, hogy ezekből az adatokból hatékonyabban lehessen modellezni a mélybeli folyamatokat, de nem kerülhető el annak számbavétele sem, hogy milyen reakciót válthat ki egy akár váratlanul is bekövetkező kitörés. Bolygónk túlnépesedése tehát a vulkáni veszély előrejelzésében és a veszélykezelésben is új feladatokat ad.

Mekkora esélye van annak, hogy egy város központjában indul meg egy vulkánkitörés? Ez ma már nemcsak a mozivásznakra kívánczó elképzelés! Pontosan harminc évvel ezelőtt, 1973. január 23-án egy kis izlandi sziget, Heimaey 4500 lakosú kikötői települése mellett nyílt meg a föld, és több tízezer éves szünet után izzó lávacafatok törtek fel, majd láva ömlött a felszínre. A lávaömlés a település egyharmadát borította be, házak sokasága került több mint húsz méter vastag lávatarak alá. Ma a legnagyobb ilyen veszély az új-zélandi metropolisz, a több százezer lakosú Auckland városára leselkedik. A város egy bazaltvulkáni mező közepére telepedett (5. ábra). A betelepülőknél nem volt tudomásuk arról, hogy ez egy vulkanológiai potenciálisan aktív terület, hiszen a legutóbbi kitörés az 1300-as évek végén történt (Rangitoto-pajzsvulkán). Az elmúlt években azonban egyre komolyabban veszik, most már nemcsak a vulkanológusok, hanem a döntéshozók is, hogy foglalkozni kell a kérdéssel. Ezzel e terület a bazaltvulkáni mezők vulkánveszély-kutatásának mintaterületévé vált (Ashenden et al., 2011). A monogenetikus vulkáni mezők a tűzhányók egy különleges csoportját képezik. Itt nagy területen elszórva jelennek meg a kitörési központok, azaz az egyedi vulkáni felépítmények. Jelentős különbség a magasba emelkedő, szabályos kúp alakú összetett vulkánok működésével szemben, hogy e területeken akár több millió éven keresztül is folyhatnak a kitörések, azonban előfordul, hogy két kitörés vagy kitörési fázis között akár több százezer év is eltelik. Ez jelentős időtartam, amelybe az emberi történelem bőven belefér, tehát az adott terület akár inaktív is tűnhet. Számtalan ilyen vulkáni mező van a Földön, és nem tudni bizonyossággal, hogy egy hosszú szunnyadó

szakaszban vagyunk, vagy már végleg befejeződtek a kitörések. Továbbá, egy másik fontos bizonytalansági tényező, hogy a bazaltvulkáni mezők esetében nem lehet megjósolni, hol lesz a következő kitörés helyszíne. Sem a hely, sem az idő! - ez nem ad sok bízakodásra okot, főleg az aucklandiek számára. Nagy kihívás, hogy a vulkanológusok közelebb jussanak e vulkáni területek működésének megértéséhez és különösen ahhoz, hogy milyen jelek várhatók egy vulkáni kitörés előtt. Ezt nem segíti, hogy nincs sok gyakorlati tapasztalat, közvetlen megfigyelés egy ilyen vulkáni eseményre. Nicaraguában a Cerro Negro, Mexikóban a Paricutín váratlanul, ugyanúgy egy kukoricamező kellok közepén nőtt ki, az előbbi 1850-ben, az utóbbi 1943-ban. A vulkáni kitörésről vannak dokumentumok, de kevesebbet tudunk az előzményekről. A leírásokból úgy tűnik ki, hogy a lakosok nem igazán észleltek komoly előjeleket. Ebből a szempontból különleges lehetőséget ad a 2011–2012-es El Hierro (Kanári-szigetek) vulkáni működés, amely esetében felbecsülhetetlen értékű adatok állnak rendelkezésre a szeizmikus tevékenységről, a felszindeformációról, a gázkiáramlásról és a felszínre jutó magma összetételéről is. Az előzetes értékelések azt jelzik, hogy bár az előkészítési idő egy-két hónap volt, a magma feláramlása és felszínre törése egy-két napon belül, azaz rettentő gyorsan megtörtént. A vulkáni veszély előrejelzése kiemelt feladata ennek idejének és várható jeleinek jobb megismerése.

E téren a hazai vulkanológiai kutatások is hozhatnak új eredményeket, és nem kerülhető meg annak felvetése sem, hogy vajon a Persány-hegység keleti oldalában létrejött monogenetikus bazaltvulkáni mező befejezte-e működését. Itt 1,3 millió évvel ezelőtt



5. ábra • Az új-zélandi Auckland városa egy bazaltvulkáni mező kellős közepére települt. A legutóbbi vulkánkitörés az 1300-as években volt, és bármikor bekövetkezhet egy újabb vulkáni működés. A kérdés az, hogy hol, mikor, és előre lehet-e majd jelezni.

kezdődtek a kitörések, majd hatszázezer éve volt egy újabb aktív fázis. Nincs kizárva, hogy ez a hosszú szunnyadási időszakkal tagolt kitörési sor még folytatódjon, amely felvetést megerősíti, hogy román geofizikusok a közelmúltban esetlegesen magma jelenlétére utaló szeizmikus anomáliát mutattak ki a terület alatt (Popa et al., 2012). Eddigi vizsgálataink alapján itt a bazaltos magmák néhány nap alatt átszelték a földkérget, azaz előkészületre nem sok idő lesz, ha egy újabb aktív fázis köszöntene be.

Új előrejelzési lehetőség az úrból

Vulkánkitörést pontosan előre jelezni nem lehet, hasonlóan a földrengésekhez. Ez azt jelenti, hogy nem lehet megmondani, hogy pontosan mikor, hol és milyen nagy kitörés fog történni. A hatékony előrejelzéshez mindhárom kérdést ugyanolyan pontosan kell megválaszolni. Ha az egyikben tévedés történik, akkor már felkészületlenül érheti a lakosságot a természeti csapás. A földrengésekkel szemben azonban a vulkáni veszély előrejelzése jóval eredményesebb. Ha nem is adható a fenti kulcskérdésekre pontos válasz, mégis megvannak arra az eszközök, hogy a vulkáni kitörés bekövetkezését, annak várható nagyságát meg lehessen becsülni, és ez alapján meg lehessen hozni a szükséges intézkedéseket. A vulkáni kitörések előtt ugyanis a magma feláramlásához kapcsolódnak olyan jelek, amelyeket adott esetben észlelni lehet. Ilyenek többek között a földrengések, a felszín deformáció, a vulkáni gázok, hőmérsékleti anomália megjelenése. Azonban a kulcskérdés az, hogy mennyivel a kitörés előtt jönnek a jelek, és vannak-e a jelek vételére alkalmas kitelepített eszközök. Egy, a közelmúltban elvégzett felmérés szerint (Aspinall et al., 2011) tizenhat fejlődő országban lévő

441 aktív tűzhányó közül 384 esetében nincs, vagy nem megfelelő szintű a műszeres megfigyelés, és ezek közül hatvanöt olyan vulkán van, amely különösen nagy veszélyt jelent a közeli több százeres lakosságra nézve! A lista pedig közel sem teljes, és nem csak a fejlődő országok tűzhányói vannak hasonló helyzetben. A több mint háromszáz éve szunnyadó Fuji esetében például a japán kormány csak a 2000 októberében kipattant, magmamozgásra utaló földrengésrajok után szánta el magát, és különített el tízmillió dollárt a folyamatos műszeres megfigyelésre, valamint a tűzhányó korábbi működésének jobb megismerésére. A chilei Chaitén-tűzhányó 2008. május 3-án úgy tört ki, hogy napokig nem lehetett tudni még azt sem, hogy melyik vulkán lépett működésbe. A Chaitént ugyanis már inaktívnak gondolták, ezért nem irányult rá semmilyen műszeres megfigyelés. Nem elegendő tehát a vulkánmegfigyelési eszközök tökéletesítése, azoknak a megfelelő helyen és időben működniük is kell. Ez pedig természetesen anyagi kérdés is, azaz függ az érintett kormányok támogatásától.

A technológiai fejlődés azonban most egy új lehetőséget kínál egy vulkán mozgolódásának észlelésére. Ez pedig a műholdas radarképek feldolgozása (Pritchard – Simons, 2004). A műholdradar-interferometria, azaz InSAR (*Interferometric synthetic aperture radar*) lehetővé teszi, hogy nehezen megközelíthető helyen lévő vagy akár inaktívnak gondolt, és ezért a közvetlen megfigyelésből kieső vulkánok esetében is ki lehessen mutatni azt, hogy a jövőben kitörhetnek. Ennek alapja pedig a vertikális felszínmozgás nagy pontosságú (akár tízedmilliméter/év) mérése, ami különböző időkben készült radarképek összehasonlításával történik. A feltörő magma nyomóerejének következtében ugyanis megemel-

kedhet a vulkán felszíne, és ennek mértéke összhangban van a földkéregbe kerülő magmatömeg térfogatával. Radarfelvételek 1992-ig visszamenően állnak rendelkezésre. Előny, hogy felhővel borított területekre is pontos adatok kaphatók, hátrány lehet viszont a növénytakaró. A már inaktívknak vélt kenyai Longonot-tűzhányó esetében két év alatt 9 cm emelkedést tapasztaltak, amit a sekély mélységbe érkező friss magmával magyaráztak. A Santorini-kaldera belsejében 2011 januárja és 2012 vége között 8–14 cm felszínemelkedést mutattak ki, ami megfelel 4–5 kilométer mélységbe nyomuló mintegy 10–20 millió köbméter térfogatú magma nyomásának.

Ennél figyelemre méltóbb eredmények jöttek azonban az Andok térségéből. Itt az elmúlt tízmillió évben legalább tíz hatalmas, kalderaformáló vulkánkitörés történt, ezért sokan úgy gondolják, hogy e területen lehet potenciálisan a következő nagy szupervulkáni vagy ahhoz közeli nagyságú kitörés. Az InSAR-technikával a szakemberek itt kilenc vulkáni területen azonosítottak koncentrikus felpúposodást, köztük a bolíviai Uturuncu- és a chilei–argentín határon lévő Lazufre-területeken (Pritchard – Simons, 2004). Az Uturuncu felszíne átlagosan évi 1–2 centiméterrel emelkedik, azonban, ami figyelemre méltó, az a felboltozódás hosszú időn keresztül (legalább 1992 óta) tartó folyamatossága (ami már közel fél méter emelkedést jelent) és a viszonylag nagy területi kiterjedése (több mint 50 km átmérő). Mindez a kalderaformáló vulkánokra jellemző, amelyek hatalmas erejű vulkánkitörésekre képesek, főleg hosszú szunnyadási idő után. Az Uturuncu pedig 270 ezer éve tört ki utoljára. A számítások szerint az eddigi felszínemelkedés mintegy 40 köbkilométer térfogatú magmatömeg

földkéregbe való nyomulását jelenti. A Lazufre-terület emelkedése 1998 óta tart, és igen gyors, évente átlagosan 3,5 cm. Az Andok déli vulkáni zónájában a Laguna del Maule felszínemelkedése méltó figyelemre. A mintegy százharminc kitörési központot tartalmazó, és az elmúlt néhány százezer évben számos hatalmas kitörést produkáló vulkáni terület nyugati része 2007 óta nagyon gyorsan, koncentrikusan évi 18 centiméterrel emelkedik. Ráadásul 2012 áprilisa óta a felboltozódás sebessége közel kétszeresére nőtt, és ez a leggyorsabb felszínfelboltozódás, amit szunnyadó vulkánon bárhol is mértek. Mindez a kb. 5 km mélységben lévő magmatározó viszonylag gyors térfogat-növekedésével, mintegy 60 millió köbméter friss magmabenyomulással magyarázható. Mindegyik esetben a fő kérdés, hogy csupán feltöltődés zajlik, vagy mindez vulkánkitöréshez vezet majd? Utóbbi esetben jelentős nagyságú kitörésre lehet számítani.

Az InSAR-adatok az elmúlt bő évtizedben új megvilágításba helyezték a vulkáni veszély előrejelzését. A következő években az európai GMES-program (*Global Monitoring for Environment and Security*) keretében felbocsátott új Sentinel műholdakkal felgyorsul majd az információszerzés. A vulkanológia számára új kihívás ezeknek az adatoknak az értelmezése és összekötése a vulkáni veszély előrejelzésével. Melyik vulkán fog kitörni, melyiknek lesz esetleg globális kihatása, melyik kitörése lesz mondjuk a Tambora 1815-ös kitöréséhez mérhető? A „tettes” nem feltétlenül a jelenleg aktív tűzhányók között keresendő, hanem lehet, hogy a több tízezer éve szunnyadó, alapvetően inaktívknak tartott vulkánok között lapul (2. táblázat). A pontos vulkanológiai előrejelző munka azonban nem elegendő, a hatékonysághoz szükséges a megfelelő kommunikáció is a döntéshozó szervekkel. Ez a

kapcsolat nem volt tökéletes 1985-ben, a Nevado del Ruiz kitörése előtt, és botladozott 2011-ben az El Hierro-kitörés esetében is, azonban sikertörténet a Pinatubo 1991-es, a Nevado del Huila 2008-as és a Merapi 2010-es kitörésének előrejelzése és az ezekhez kapcsolódó kitelepítési intézkedések meghozatala.

*Kristályok üzenete a mélyből:
kőzettani vulkanológia*

Hogyan zajlik le egy vulkáni kitörés? Robban vagy ömlik a magma? Mennyi idő telik el a magmatározó friss magmával való feltöltődése és a vulkánkitörés között, milyen gyorsan emelkedik fel a magma? Ezek alapvető

év	vulkán	ország	halálos áldozatok becsült száma	globális klimatikus hatás	volt-e a tűzhányónak kitörése a történelmi időkben?
1815	Tambora	Indonézia	> 90 000	igen	nem
1822	Galunggung	Indonézia	4011		nem
1835	Cosigüina	Nicaragua	10	(igen)	igen
1854	Sivelucs	Kamcsatka, Oroszország	0		nem
1875	Askja	Izland	0		nem
1883	Krakatau	Indonézia	36 000	igen	nem
1886	Tarawera	Új-Zéland	150		nem
1902	Santa Maria	Guatemala	> 5000	(igen)	nem
1907	Kszudacs	Kamcsatka/Oroszország	0		nem
1912	Novarupta	Alaszka/USA	2	igen	nem
1932	Cerro Azul/Quizapu	Chile	0		igen
1956	Bezimjannij	Kamcsatka, Oroszország	0		nem
1980	Mt. St. Helens	USA	57	(igen)	igen
1982	El Chichón	Mexikó	> 2000	igen	nem
1991	Pinatubo	Fülöp-szigetek	740	igen	nem
1991	Cerro Hudson	Chile	0		igen

2. táblázat • Az elmúlt 200 év legpusztítóbb vulkánkitörései és a becsült halálos áldozatok száma. 5 esetben a vulkáni működésnek kimutatható globális klimatikus hatása volt, további 3 kitörés kismértékben befolyásolta az éghajlatot. Figyelemre méltó: a 16 közül 12 esetben nem volt a tűzhányónak történelmi időkben kitörése; nem volt közvetlen tapasztalat aktivitásra.

megválaszolandó kérdései a vulkáni veszély előrejelzésének. A választ a vulkáni kőzetek, a bennük lévő kristályok hordozzák, amelyek oly mértékben tartalmazzák a képződési körülményekről az információkat, mint a fák évgyűrűi a környezeti változásokról (6. ábra). Az ásványok kémiai összetétele, az összetétel egyetlen kristályon belüli változása, azaz az összetételbeli zónásság, annak megjelenése hűen tükrözi a magmakamrában zajló folyamatokat, a hőmérsékletben, a nyomásban és az oxidációs viszonyokban megnyilvánuló változásokat, csakúgy, mint a magmaösszetételbeli jellemzőket. A vulkanológiai munka itt összekapcsolódik a hagyományos kőzetani és geokémiai vizsgálatokkal, amit kiegészítenek a kísérleti kőzetan ásványok stabilitására vonatkozó ismeretei és a termodinamikai törvényszerűségek számbavétele. Egy adott vulkán korábbi működése során keletkezett képződményei fontos tanúi a mélyben zajló eseményeknek, és vallatásukkal képet kaphatunk a jövőben esetleg várható eseményekről, illetve általánosan is következtethetünk a vulkáni működés okaira.

A vulkánok alatti magmakamráról az elmúlt bő évtizedben jelentősen átalakultak a nézetek. A számos tankönyvben, ismeretterjesztő kiadványban illusztrációként még mindig megjelenő hatalmas, izzó olvadékkal kitöltött üreg képét a vizsgálatok nem támasztották alá. Ehelyett, a geofizikai adatok arra utalnak, hogy a mélyben kristályokkal változó mértékben telített olvadék, egyfajta kristálypép helyezkedik el akár több szintben is. Az aktív tűzhányók alatt a szeizmikus tomográfia eszközével ma már kimutatható a földképenyből a földkéregbe vezető magmás csatorna, esetenként a földkéreg alsó részén vagy a földkéreg alatt létrejövő magmatározók, amelyek utánpótlást biztosítanak a sekély

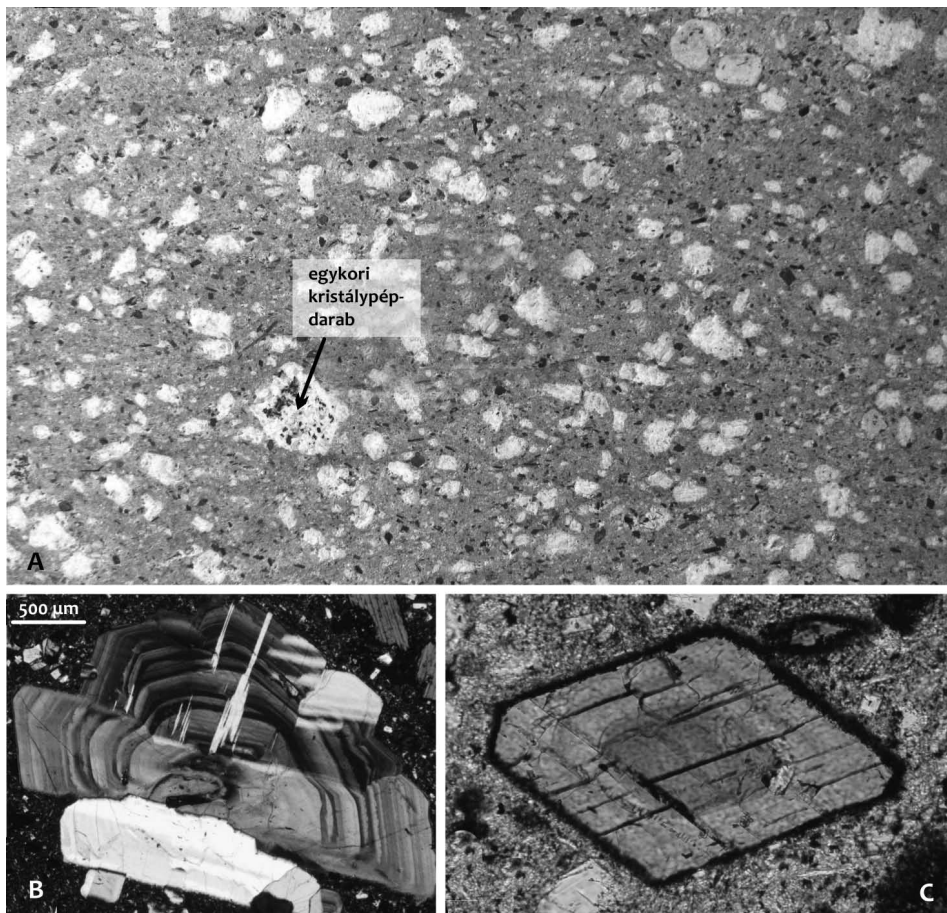
(4–15 km mélységközben levő) magmakamráknak. Ilyet jeleztek román geofizikusok a Kárpát-medence legfiatalabb vulkánja, a Csomád alatt is (Popa et al., 2012), azaz nem kizárt, hogy lesznek itt még újabb vulkánkitörések. A friss magmával való feltöltődés, amint arról az előző fejezetben írtunk, műszerekkel észlelhető. Egy vulkán életében ez jóval gyakoribb esemény, mint maga a vulkáni működés, azaz a pánikot, illetve költséges kitelepítést elkerülendő fontos megkülönböztetni ezt a környezetre veszélyt még nem jelentő folyamatot attól, ami valóban a kitörés közvetlen előjele lehet.

A sekély mélységben létrejövő magmakamra a friss feltöltődésekkel egyre növekszik. A friss kőzetolvadék keveredik a kisebb hőmérsékletű, kristályokkal telített magmával, a megváltozó hőmérséklet és összetétel bizonyos ásványok visszaolvadását eredményezheti, mások némileg eltérő kémiai összetételben növekszenek tovább. A technikai feltételek most már lehetővé teszik, hogy a kormeghatározásban kulcsszerepet kapó ellenálló ásvány, a cirkon vizsgálata során pontmérésekkel akár néhány ezer évre visszamenően meghatározzuk a képződési kort. Ezek a kutatások feltárták, hogy a cirkon kristályosodása több tíz-, esetenként néhány százezer évvel is megelőzheti a vulkáni kitörés idejét, ami a magmakamra kitörés előtti fennállásának idejére utal. Ennyi idő alatt a kristálypép már olyan fizikai állapotba kerül, hogy kitörésre nem képes, azonban kis mennyiségben még tartalmaz kőzetolvadékot. A forró, gázokban gazdag bazaltos magma azonban képes remobilizálni egy ilyen kihűlőben lévő kristálypépet, és ez akár katasztrofális kitöréshez is vezethet.

A kristályfelbontású kőzetani-geokémiai és vulkanológiai kutatások, amit kőzetani vulkanológiának nevezhetünk, az elmúlt

években feltűnést keltő eredményeket hoztak. Ezek ugyanis azt mutatják, hogy egy-egy nagyobb vulkánkitörés előtt a hosszú szunynyadási időszakhoz képest nagyon rövid idő,

akár néhány évtized alatt is kialakulhat a magmakamrában kitörésre alkalmas magmaanyag, azaz reaktiválódik a több tízezer évig fennálló kristálypép (Burgisser – Bergantz,



6. ábra • Következtetések a vulkáni kitörés előtti folyamatokra: az információk a vulkáni kőzetekben vannak! A csomádi dácitban található kristályok megjelenése, kémiai összetétele tükrözi azokat a magmakamra-folyamatokat, amelyek közvetlenül megelőzték, elindították a vulkáni működést. A nagyobb méretű kristálycsomók a részben felolvasztott kristálypép darabkái (A). A kristályok évgyűrűhöz hasonló összetételi zónássága utal a magmakamrában megváltozó körülményekre (B), ezek nagy felbontású elemzésével akár az is becsülhető, hogy mikor történt a kristálypép vulkánkitörést megelőző felolvasztása. Az amfibolkristályok körüli sötét zóna (C) vastagsága utal a magma felemelkedésének sebességére, ami esetünkben nem több mint két hét! Ennek a kutatások frontvonalában lévő tudományos detektív munkának az eredményei fontos adatokat jelentenek a vulkáni veszély előrejelzésében.

2011). Ilyen folyamatot rekonstruáltak többek között az El Chichón 1982-es, a Pinatubo 1991-es és a montserrati Soufrière Hills-vulkán 1995-ös, sok áldozattal járó és jelentős anyagi kárt okozó feléledései esetében. A kutatások szerint a Santorini 3600 évvel ezelőtti katasztrofális kitörését mindössze néhány évtizeddel előzte meg a magmatározó friss kőzetolvadékkal való feltöltődése, hasonlóan a Vezúv 79-es kitöréséhez. A vulkáni kőzetekben lévő kristályok, valamint a hirtelen megdermedt olvadékot képviselő kőzetüvegek elemzése választ adott arra is, hogy például miért változott meg a 2010-es Eyjafjallajökull-kitörés jellege, miért vált a kezdeti, inkább turistacsalogató látványos kitörés robbanásosabbá, az európai légteret vulkáni hamuval elárasztó és a repülést megakasztó kitöréssé. A kezdeti kitöréseket okozó bazaltos magma ugyanis mintegy két hét után a tűzhányó alatt már hosszú időn keresztül meglévő szilíciumgazdag magmás kristálypépbe nyomult, azt részben felolvasztotta, keveredett vele, és ezzel hevesebb, robbanásos kitörésre hajlamosabb magma alakult ki. Jelentős előrelépést jelent Kate Saunders és munkatársai (2012) tanulmánya. A kutatók a Mt. St. Helens alatti magmatározóban zajló magma-benyomulási időszakokat rekonstruálták a kristályok összetételbeli zónássága alapján, és ezt összhangba tudták hozni a rendelkezésre álló szeizmikus adatokkal, azaz bizonyos szeizmikus jeleket meg tudtak feleltetni magma-felnyomulási eseményeknek. Mindez perspektívát ad arra vonatkozólag, hogy a kőzetani és geofizikai adatok ötvözésével előre lehessen lépni a vulkánkitörések hatékonyabb előrejelzéséért.

A kutatások e frontvonalában lévő kérdések megválaszolásához a hazai vulkanológiai vizsgálatok is jelentékeny módon hozzá tud-

nak járulni. Térségünk legfiatalabb vulkánja, a legutóbb mintegy harmincezer éve működött Csomád kutatása során olyan kőzeteket sikerült találni, amelyekben megvannak egy hosszú időn keresztül fennálló szilíciumgazdag kristálypép darabkái (6A. ábra) és az abba benyomuló bazaltos magma kristályai is. A nagy felbontású kőzetani-geokémiai elemzések során sikerült rekonstruálni mindkét magma fejlődését, a különböző mélységekben lévő magmatározókban zajló folyamatokat, továbbá a két magma keveredését, az eközben zajló reakciófolyamatokat és a hőmérséklet-változást. A kristályok összetételbeli zónássága arra utal, hogy ebben az esetben is meglehetősen gyors lehetett a reaktíválás folyamata, az amfibolkristályok körül kialakult lebomlási reakciózóna vastagságából pedig arra is következtetni lehetett, hogy a kialakult dácitos magma igen gyorsan, kevesebb mint két hét alatt a felszínre tört (6C. ábra). Ez azt jelenti, hogy egy esetleges magma-felnyomulásra figyelmeztető jelek után nem sok idő áll rendelkezésre a megfelelő intézkedések meghozatalára és végrehajtására. Mindehhez pedig az is szükséges, hogy a legapróbb jelzéseket is érzékeljék a műszerek. Ha pedig ezek nincsenek telepítve, akkor előfordulhat, hogy olyan váratlanul történik egy vulkánkitörés, mint például 2008. május 3-án a chilei Chaitén esetében.

Záró gondolatok

E tanulmány írása idején bolygónk tűzhányói viszonylag csendesek, csupán a szicíliai Etna és a kamsatkai Tolbacsik látványos kitörései irányították a figyelmet a vulkánok világára. Látnunk kell azonban azt is, hogy e vulkáni kitörések mellett ott lapul a kis valószínűségű, kiszámíthatatlan időben bekövetkező, nagy, akár globális hatású vagy kisebb, de sűrűn

lakott területeket közvetlenül érintő vulkánkitörések lehetőségére is. A következő évtizedekben nincs kizárva, hogy szembe kell nézni ilyen eseménnyel is. Lehet-e majd előre jelezni, egyáltalán tudjuk majd, melyik vulkán kitörése rengeti meg a világot? Ezekre a kérdésekre jelenleg nem lehet egyértelműen válaszolni. Egy olyan kitörés azonban, mint amely 1783-ban Izlandon, vagy 1815-ben és 1883-ban Indonéziában történt, ma már egy teljesen más világot érintene. Egyelőre éppen csak megindultak a vulkánkitörések társadalmi hatását vizsgáló kutatások. A korábbiakhoz képest most egy technológiailag fejlettebb, de éppen ezért sebezhetőbb társadalmi berendezkedést érinthetnek a vulkánkitörések, aminek következményei egyelőre még beláthatatlanok. A geoparkok, vulkánmúzeumok segítenek jobban megérteni a vulkáni működés folyamatát úgy, hogy közben pénzt hoznak a lokális gazdaságnak. A szakemberek mindeközben tudományos munkával, újabb fejlesztésű eszközökkel igyekeznek jobban megérteni a tűzhányók természetét. A természeti veszélyre az egyetlen valódi előkészület a tudástár növelése, a lehetséges hatások elemzése. Sok munka vár a vulkanológiára a 21. században, amely most már számos tudományterülettel karöltve dolgozik azon, hogy megtanítsa együtt élni a természeti folyamatokkal, legyenek azok akár vonzóak és

szemet gyönyörködtetőek, akár veszélyesek, rombolóak.

A vulkanológia előtt álló kihívások fontos feladatot adnak a térségünkben dolgozó szakembereknek is. E kivételes szépségben megőrződött vulkáni hagyatékkal teli területen hozzájárulhatnak a vulkáni tudáson alapuló gazdaságélénkítéshez, tudományos munkájuk eredményei beépülhetnek a vulkáni működés jobb megértését segítő tudástárba, és akár hasznosíthatják a vulkáni veszélyt előrejelző tevékenységet is. Egyelőre nem kell tartanunk attól, hogy a Kárpát-medencében is szembe kelljen nézni vulkáni kitörés veszélyével, de ennek lehetőségét egyértelműen nem zárhatjuk ki.

A mai világ egyik kiemelt problémájának tekintett klímaváltozás kérdésében is elkerülhetetlen a természeti folyamatok, többek között a vulkáni működés hatásainak figyelembevétele, mert csak így kaphatunk korrekta és megnyugtató képet arról, hogy milyen jövőnk lesz. Ez természetesen nem menti fel az emberiséget az alól, hogy csökkentse természetromboló tevékenységét, sőt csak a természet folyamatait megértve, azzal együtt élve van valódi jövőnk.

Kulcsszavak: *vulkanológia, turizmus, veszélyelőrejelzés, geofizika, közettan, geokémia, Kárpát-Pannon-térség*

IRODALOM

- Ashenden, Caroline L. – Lindsay, J. M. – Sherburn, S. – Smith, I. E. M. – Miller, C. A. – Malin, P. E. (2011): Some Challenges of Monitoring a Potentially Active Volcanic Field in an Urban Area: The Auckland Volcanic Field, New Zealand. *Natural Hazards*, 59, 1, 507–528. DOI: 10.1007/s11069-011-9773-0
- Aspinall, Willy – Auker, M. – Hincks, T. – Mahony, S. – Nadim, F. – Pooley, J. – Sparks, R. S. J. – Syre, E. (2011): *Volcano Hazard and Exposure in GDRFF Priority Countries and Risk Mitigation Measures—*

- GFDRR Volcano Risk Study*. Bristol University Cabot Institute and NGI Norway for the World Bank, Washington DC, *NGI Report* 20100806
- Burgisser, Alain – Bergantz, George W. (2011): A Rapid Mechanism to Remobilize and Homogenize Highly Crystalline Magma Bodies. *Nature*, 471, 212–215. DOI:10.1038/nature09799
- de Boer, Jelle Zeilinga – Sanders, Donald Theodore (2004): *Volcanoes in Human History: The Far-Reaching Effects of Major Eruptions*. Princeton University Press

- Gao, Chaochao – Robock, A. – Ammann, C. (2008): Volcanic Forcing of Climate over the Past 1500 Years: An Improved Ice Core-based Index for Climate Models. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 113, D23111, DOI:10.1029/2008JD010239
- Harangi Szabolcs (2010): Történelemformáló nagy vulkánkitörések. – Az emberiség és a vulkánok az évszázadokban. *História*, 32, 10–20. • <http://www.historia.hu/userfiles/files/2010-04/Harangi.pdf>
- Harangi Szabolcs (2011): *Vulkánok. A Kárpát-Pannon térség tűzhányói*. GeoLitera, Szeged
- Kutterolf, Steffen – Jegen, M. – Mitrovica, J. X. – Kwasnitschka, T. – Freundt, A. – Huybers, P. J. (2012): A Detection of Milankovitch Frequencies in Global Volcanic Activity. *Geology*. G33419.1, DOI:10.1130/G33419.1
- Neely, Ryan – Toon, B. – Solomon, S. – Vernier, J. P. – Alvarez, C. – English, J. M. – Rosenlof, K. H. – Mills, M. J. – Bardeen, C. G. – Daniel, J. S. – Thayer, J. P. (2013): Recent anthropogenic Increases in SO₂ from Asia Have Minimal Impact on Stratospheric Aerosol. *Geophysical Research Letters*. DOI: 10.1002/grl.120263
- Oppenheimer, Clive (2011): *Eruptions that Shook the World*. Cambridge University Press • <http://books.google.hu>
- Popa, Mihaela – Radulian, M. – Szakács, A. – Seghedi, I. – Zaharia, B. (2012): New Seismic and Tomography Data in the Southern Part of the Harghita Mountains (Romania, Southeastern Carpathians): Connection with Recent Volcanic Activity. *Pure and Applied Geophysics*. 169, 1557–1573. DOI 10.1007/s00024-011-0428-6
- Pritchard, Simon – Simons, Mark (2004): An InSAR-based Survey of Volcanic Deformation in the Central Andes. *Geochemistry Geophysics Geosystems*. 5, Q02002, DOI:10.1029/2003GC000610
- Robock, Alan (2000): Volcanic Eruptions and Climate. *Reviews of Geophysics*. 38, 191–219. • <http://climate.envsci.rutgers.edu/pdf/ROG2000.pdf>
- Saunders, Kate – Blundy, J. – Dohmen, R. – Cashman, K. (2012): Linking Petrology and Seismology at an Active Volcano. *Science*. 336, 1023–1027. DOI:10.1126/science.1220066 • <http://211.144.68.84:9998/91keshi/Public/File/41/336-6084/pdf/1023.full.pdf>
- Schmidt, Anja – Ostro, B. – Carslaw, K. S. – Wilson, M. – Thordarson, T. – Mann, G. W. – Simmons, A. J. (2011): Excess Mortality in Europe Following a Future Laki-style Icelandic Eruption. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*. 108, 38, 15710–15715. DOI:10.1073/pnas.1108569108
- Tuffen, Hugh (2010): How Will Melting of Ice Affect Volcanic Hazards in the Twenty-first Century? *Philosophical Transactions of the Royal Society A*. 368, 2535–2558. DOI:10.1098/rsta.2010.0063 • <http://rsta.royalsocietypublishing.org/content/368/1919/2535.full>

