

VULKÁNKITÖRÉSEK KLÍMAVÁLTOZTATÓ HATÁSA: A KICSI IS SZÁMÍT!

Harangi Szabolcs

az MTA doktora, tanszékezetű egyetemi tanár, kutatócsoport-vezető,
MTA–ELTE Vulkanológiai Kutatócsoport, ELTE Közvetlen-Geokémiai Tanszék
szabolcs.harangi@geology.elte.hu

Bolygónk klímaváltozását egyedül az éghajlat állapotjelzőinek módosulásából, néhány légszennyező komponens, például a CO₂-koncentráció egyedi változása alapján nem érthetjük meg. Fontos, hogy mindezt a klímaváltozás – környezetváltozás – természeti folyamatok – társadalmi hatások összetett kölcsönhatása alapján értékeljük. A vulkáni működés a Föld kialakulása óta folyamatosan formálja bolygónkat, hat a környezetre és az ember megjelenése óta a társadalmakra is. Számos példa ismert arra, hogy a vulkánkitörések hogyan okoztak zavarokat az élővilágban (pl. Bond – Wignall, 2014) vagy játszottak szerepet az eljegesedések alakulásában (pl. Young et al., 2009) a földtörténet különböző időszakában. Az elmúlt fél évszázad jelentős globális hőmérséklet-emelkedését, a légköri CO₂-koncentráció növekedését nem kevesen írják a vulkáni kitörések számlájára, ezzel igyekezve csökkenteni az emberi tevékenység szerepét. Másrészt, sokan csupán az emberiséget okolják az éghajlatváltozásért, és nem veszik figyelembe azt, hogy a természeti folyamatoknak is megvan az ebbéli szerepük.

A vulkáni kitörések befolyásolják az éghajlatot, ezen keresztül az embereknek életlehetőséget adó környezetet. Ha a környezetváltozás

jelentős mértékű, az súlyos következménnyel járhat a társadalomra. Szükség van tehát a gondos elemzésre, hogy pontosabban és reálisan lássuk az éghajlat, a környezet és a társadalom kapcsolatát, és ebben fontos szerepet kapjon a természeti folyamatok befolyása is. E tanulmányban a vulkáni működés ebbéli szerepét tárgyaljuk, kiemelve azt, hogy nemcsak a nagy figyelmet kapó, jelentős vulkánkitöréseknek van éghajlat- és környezetmódosító szerepük, hanem akár a kevésbé ismert kis-közepes nagyságú vulkáni működésnek is. Ezek az ismeretek segítenek abban, hogy pontosabban értsük az éghajlatváltozás komplex rendszerét, az ezt befolyásoló komponenseket, továbbá előrenézzünk, és elemezhessük a jövőbeli extrém természeti folyamatok, például egy nagyobb vulkánkitörés környezeti és társadalmi hatását is.

Vulkánkitörések klimatikus hatása

A vulkáni működés éghajlatot befolyásoló okáról sokan úgy gondolják, hogy ez a légkörbe jutó jelentős mennyiségű vulkáni hamuanyaggal¹ magyarázható. Ezt a felvetést

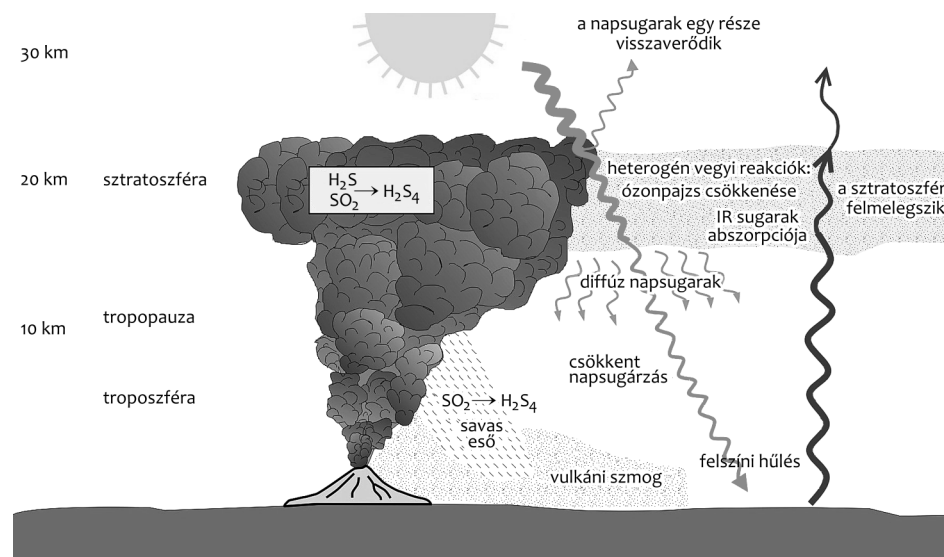
¹ Vulkáni hamunak nevezzük a robbanásos kitörés során felszínre kerülő 2 mm-nél kisebb szemcséket.

először William Jackson Humphreys fizikus fogalmazta meg, aki a 20. század legnagyobb vulkánkitörése (Katmai-Novarupta, Alaszka, 1912) után 1913 júniusában arról írt, hogy a vulkáni működés során a légkörbe jutó hamuszemcsék „inverz üvegházhatást” fejtenek ki, és ez lehűlést okoz. Felvetette azt is, hogy az 1810-es évek második felében tapasztalt anomálian hideg és csapadékos időjárásért a Tambora 1815-ös kitörése lehetett felelős.

A részletekbe menő tudományos magyarázatra azonban még jó fél évszázadot várni kellett. A történelmi időkben zajlott számos vulkánkitörés klimatikus hatását elemezve Hubert Lamb is úgy vélte, hogy a légkörbe került nagy mennyiségű vulkáni hamuanyag veri vissza a napsugarakat, és ez okoz hőmérséklet-visszaesést (Lamb, 1970). Fordulatot a mexikói El Chichon vulkán 1982-es kitörése hozott. Ekkor műszeres mérések (aeroszolk légi mintagyűjtése) során figyeltek fel arra, hogy a légkörbe jelentős mennyiségű SO₂-gáz

került, ami aztán vízzel reagálva kénsav-aeroszollá alakult (Sato et al., 1993). A számítások szerint 13 megatonna SO₂ került a légkörbe, és a hawaii Mauna Loa Observatóriumban zajló elemzések jelentős csökkenést tapasztaltak a közvetlenül felszínre érkező napsugárzás mértékében. Mindehhez azonban nem kapcsolódott jelentősebb lehűlés, mivel ezt kompenzálta az ekkor zajló El Niño-hatás.

Nem sokkal később, a Fülöp-szigeteki Pinatubo 1991-es hatalmas kitörése során már műholdas eszközökkel azonosították a kénsavas aeroszolfelhőt a magas légrétegekben, és mutatták ki a kitörést követő években a néhány tized fokos globális hőmérséklet-csökkenést (McCormick et al., 1995). Ezzel egyértelművé vált a vulkánkitörések során kikerülő SO₂-gázok alapvető szerepe az éghajlat módosításában (i. ábra). A SO₂ vízzel reagálva több lépcsőben végül kénsavcseppekké alakul, mégpedig szubmikron-mikron nagyságú aeroszolcseppekké. Ha ez a reakció a kis



i. ábra • Nagy robbanásos vulkánkitörések klimatikus hatásának egyszerűsített magyarázata (Alan Robock rajza alapján)

sűrűségű magas légrétegekben, a sztratoszférában történik, akkor a kénsav-aeroszol felhő akár évekig is megmaradhat, és kiterjedt réteget hoz létre, ami visszaveri a beeső rövidhullámú napsugarakat. Ez pedig csökkenti a felszíni hőmérsékletet.

Ezt követően felgyorsultak a kutatások, és mára körvonalazódik a vulkáni működés éghajlat-változtató szerepének receptje (Schmidt – Robock, 2015). Ehhez az szükséges, hogy a vulkánkitörést kénben gazdag magma táplálja, és az olyan erejű robbanással történjen, hogy a kitörési felhő anyaga feljusson a sztratoszférába. Ennek alsó határa a sarki területek közelében 10 km körül van, míg a trópusi területek felett 18 km magasan található. Leghatékonyabban a trópusi területen zajló vulkánkitörések okoznak klimatikus hatást, mivel a magaslégtörési futóselek ebben az esetben nagy területen terítik szét a kénsav-aeroszol felhőt. A számítások szerint legalább 1–5 megatonna SO_2 -nak kell a sztratoszférába jutnia, hogy mérhető hőmérséklet-csökkenést okozzon a felszínen, s ez a vulkánkitörés után egyhárom évig okoz érezhető hatást. Fontos megjegyezni azonban, hogy egymást követő több, nagy erejű vulkánkitörés esetében a klimatikus hatás akár egy évtizedig is elhúzódhat (Toohey et al., 2016). A Tambora 1815-ös kitörése során 55 megatonna (millió tonna) SO_2 került a légkörbe, aminek nyomán több mint 100 millió tonna kénsav-aeroszol anyag terült szét a sztratoszférában (Self et al., 2004). Ez kb. 1 °C-kal csökkentette a földi átlaghőmérsékletet (Kandlbauer et al., 2013). Összehasonlításképpen, a Föld globális SO_2 -kibocsátása a 2006-os igen magas szennyezési időszakban sem érte el a 33 millió tonnát! Nyugodtabb időszakokban azonban a vulkánok éves globális kénkibocsátása nem több mint 14%-a a troposzférába jutó összes kén-

mennyiségnek. A kénsav-aeroszol felhő emellett elnyeli a földfelszínről visszaverődő infravörös sugarakat, ami miatt a sztratoszféra felmelegszik, és ez alapvető változásokat okoz a nagy léptékű légköri áramlási rendszerben. Ezzel magyarázható például, hogy nagy vulkánkitörések után elmaradhatnak a jelentős monszunesők (Oman et al., 2006). A monszunesőzések elmaradása jelentős környezeti változást okozhat, ami kihathat az élővilágra és a társadalmak életére is. A Tambora 1815. évi kitörése után a Gangesz öbléből kiinduló, több százezer emberéletet követelő kolerajárvány vélhetően ilyen változásra vezethető vissza (D’Arcy Wood, 2015). Az aeroszolfelhő elősegíti a magaslégtörési heterogén reakciókat is, ami az ózonpajzsra jelent veszélyt.

Össességében, a nagy robbanásos vulkánkitörések után kialakuló kénsav-aeroszol felhő összetett folyamatsort indít el, aminek számtalan következménye van. Ezért veszélyes ebben az esetben is csupán egyetlen hatást (például felszíni hőmérséklet-csökkenést) kiemelni, ami gyakran kerül elő például geomérnöki körökben. Közülük egyesek például azt szorgalmazzák, hogy a globális felmelegedés ellen technológiai eszközökkel védekezhetünk, amennyiben nagy mennyiségű kén-dioxidot juttatunk fel mesterségesen a magaslégtörésbe. Mindez azonban nagyon veszélyes további következménnyel is jár, amit nem lehet figyelmen kívül hagyni (Robock, 2008).

Vulkánkitörések és az ózon

Az ultraibolya sugarak hatásától védő és ezért az élet szempontjából kiemelkedően fontos magaslégtörési földi ózonréteg vastagságát jelentős mértékben befolyásolják az emberiség által kibocsátott halogének, például a klór, a fluor és a bróm. Ezek a sztratoszférába kerülve bontják az ózont, különösen a téli, hide-

gebb időszakokban (Solomon, 1999). Az ózonréteg drámai csökkenése miatt született a Montreali és Kiotói Egyezmény, amelyben az aláíró országok vállalták, hogy csökkentik az ózonréteget romboló kémiai anyagok kibocsátását. Ennek pozitív hatásait már a 21. század elején jelezték, majd Susan Solomon és munkatársai (2016) munkája egyértelműen alátámasztotta a gyógyulást, az ózonréteg vastagságának lassú helyreállítását. Vannak azonban természeti folyamatok is, amelyek csökkentik az ózonréteget, és ezzel szintén foglalkozni kell, hogy megfelelő képet kapjunk a változások irányáról és okáról.

A vulkáni gázok közül a hidrogén-klór és hidrogén-fluorid befolyásoló szerepe csekély, mivel ezek vízben könnyen oldhatók, és az esővel gyorsan kimosódnak a légkörből, még mielőtt a magasba jutnának. A vulkánkitörések ózonvastagság-csökkentő hatását először a Pinatubo 1991-es kitörése után figyelték meg (Hofman – Oltmans, 1993). A több mint 30 km magasba jutó kitörési felhő gázanyaga bekerült a sztratoszférába, azonban a mérések nem mutattak ki jelentékeny klórnövekedést. Az ózonpusztulás oka a SO_2 -gázok és a sztratoszférában ennek révén kialakult kénsav-aeroszol felhő volt. Az aeroszolszemcsék ugyanis hatékony felületet adnak heterogén reakciókra, ami az ózon csökkenéséhez vezet. Az újabb kutatások (pl. Kutterolf et al., 2013) azonban arra is rámutattak, hogy a vulkáni gázok között jelentékeny mennyiségű bróm is lehet, ami az ózont tízszer hatékonyabban bontja, mint a klór, és ezzel is számolni kell a vulkáni működés ózonmennyiségét befolyásoló szerepének értékelése során.

Természetesen ez esetben is fontos a kitörő vulkán földrajzi elhelyezkedése. A sarkokhoz közeli területen lévő tűzhányóknak közvetlen és jelentősebb ózoncsökkentő hatásuk

van egy erősebb kitörés esetén, ám ahogy azt a Pinatubo esete is mutatta, ez a hatás kimutatható a trópusi területeken történő vulkánkitörések esetében is. Solomon és munkatársai (2016) az elmúlt évtizedben történt vulkánkitörések ózonpajzsra gyakorolt hatását vizsgálták. A 21. században számos közepes nagyságú vulkánkitörés történt, ami a globális átlaghőmérsékletet is befolyásolta (Solomon et al., 2011; Santer et al., 2014), és úgy tűnik, ez a szerep az ózonvastagságra is érvényes. A sztratoszférában kialakuló kénsav-aeroszol felhő, különösen a kis nyomású, hidegebb, azaz magasabb légrétegekben fejt ki csökkentő hatást az ózonra. A vastagság 30%-kal (a Puyehue-Cordon Caulle kitörése 2011-ben Chilében), illetve 55%-kal csökkent (a Calbuco kitörése 2015-ben, szintén Chilében) a korábbi évhez képest! Ez azt jelenti, hogy az adott évek szeptemberében 1 millió, illetve 4,4 millió km^2 -rel nőtt az ózonlyuk.

A vulkánkitörések tehát csökkenthetik az ózonréteg vastagságát, és ez a modern analitikai eszközökkel mérve, ill. modellszámításokkal egyértelműen kimutatható (Solomon et al., 2016). Ugyanakkor azt is látni kell, hogy ez a hatás összességében általában nem több, mint 1–5%, míg egyéb természeti folyamatok 15–20%-ban járulnak hozzá az ózonbomláshoz. A fennmaradó 75–85% csökkenés emberi tevékenység következménye. A Montreali és Kiotói Egyezmény következtében sikerült ez utóbbi hatást csökkenteni, ami az ózonseb nagymértékű javulását idézte elő. Egyedi nagy vulkánkitöréseknek azonban lehet erőteljes, rövid idejű, néhány évig tartó hatásuk. A Pinatubo kitörése például 25–33%-os ózoncsökkenést okozott a kitörést megelőző évhez képest, Susan Solomon és munkatársai (2016) tanulmánya pedig azt is kimutatta, hogy közepes méretű, de a sarkokhoz közelebbi vul-

kánkitörések is képesek ilyen vagy ennél nagyobb mértékű rombolásra. Steffen Kuttrolf és munkatársai (2013) ugyanakkor arra hívják fel a figyelmet, hogy a múltban ennél komolyabb ózonszökkenéssel járó vulkánkitörések is lehettek, s ebben nem csupán a SO₂-nak, hanem közvetlenül a halogéneknak is jelentős szerepük lehetett. Az elmúlt 70 ezer év nicaraguai vulkánkitöréseit vizsgálva azt találták, hogy egyes esetekben a jelenlegi emberi évi halogénkibocsátás 2–300 szorosa is a légkörbe juthatott. Az Apoyo 25 ezer évvel ezelőtti kitörése során például 120 megatonna klór és 600 kilotonna bróm kerülhetett a sztratoszférába a konzervatív becslések szerint, ami jelentős ózonbomláshoz vezetett. Egy ilyen esemény mai bekövetkezése tehát beláthatatlan következményekkel járna. Ez bizonyosan megnyitja a kutatást abba az irányba, hogy jobban megismerjük a vulkánkitörések során légkörbe jutó halogének mennyiségét és szerepüket a magaslégtörési folyamatokban.

A kicsi is számít

Az éghajlatváltozást modellező előrejelzések az 1990-es évek végén meredek hőmérséklet-emelkedést jósoltak a 21. századra. Mindez azonban eddig nem következett be, a század első 15 évében az éves átlagos felszíni hőmérséklet viszonylag állandó maradt, jóllehet a légköri CO₂ koncentrációja továbbra is meredeken nőtt. A felmelegedési hiányra számos magyarázat született, például az óceánok növekvő hőelnyelése, a csökkenő napbesugárzás, az emberi és vulkáni tevékenység során légkörbe került aeroszol mennyiségének növekedése (Schmidt et al., 2014). A vulkáni működés klimatikus hatásának esetében sokáig az volt az álláspont, hogy csak a nagy robbanásos kitörések képesek érezhetően csökkenteni a globális átlaghőmérsékletet, amint azt

a Pinatubo 1991-es kitörése után is tapasztalták (Robock, 2002). 2010-től azonban az új műszeres megfigyelések hatására megváltozott ez a nézet (Solomon et al., 2011; Santer et al., 2014; Andersson et al., 2015).

A modern, műholdas módszerekkel már korábban is mérték a sztratoszférában lévő kénsav-aeroszol mennyiségét, azonban ezek a vizsgálatok csak a 15 km feletti magasságra korlátozódtak. A sarkokhoz közeli területek felett azonban már 10 km magasságban kezdődik a sztratoszféra, és ennek alsó feléről ezért hiányoztak az információk. Az újabb felszíni, lidar- és léggömbös mérések pótolták ezt a hiányt, és ezzel pontosabb képet lehetett kapni a magaslégtörési aeroszol-koncentrációról. Susan Solomon és munkatársai mutatták ki először (Solomon et al., 2011), hogy a 21. század elején zajlott kis és közepes erősségű vulkánkitörések által légkörbe bocsátott kén-dioxid mennyisége is már elegendő volt ahhoz, hogy érezhető hőmérséklet-csökkenést okozzon. A későbbi mérések pontosították ezt a hatást, miszerint a 2000 és 2013 közötti vulkánkitörések 0,05–0,12 °C globális hűlést okoztak (Santer et al., 2014). A vulkáni működés éghajlat-befolyásoló szerepe első alkalommal került be a klímamodell-számításokba, amivel igazolni lehetett, hogy a vulkáni eredetű magaslégtörési aeroszol mennyisége és a felszínre érkező napsugárzás mértéke között korreláció mutatható ki. A több mint tucatnyi, jelentős SO₂-ot felszínre bocsátó vulkánkitörés (1. táblázat) közül kiemelkedett az aleuti Kasatochi 2008-as, a Kuril-szigeteki Szaricsev 2009-es és az eritreai Nabro 2011-es működése, amelyek egyenként több mint 1 millió tonna SO₂-gázt juttattak a légkörbe.

Ezek az új kutatási eredmények világosan rámutatnak arra, hogy a Föld éghajlati rendszerét számos tényező befolyásolja, és ezek

vulkán	helye	kitörés éve	SO ₂ (Tg)
Ulawun	Pápua Új-Guinea	2000	n. a.
Sheveluch	Kamcsatka, Oroszország	2001	n. a.
Ruang	Indonézia	2002	0,03
Reventador	Ecuador	2002	0,07
Anatahan	Mariana-szigetek	2003	0,03
Manam	Pápua Új-Guinea	2005	0,09
Sierra Negra	Galápagos, Ecuador	2005	n. a.
Soufrière	Montserrat, Karibi-szigetek	2006	0,2
Rabaul	Pápua Új-Guinea	2006	0,2
Jebel at Tair	Vörös-tenger	2007	0,08
Chaitén	Chile	2008	0,01
Okmok	Aleuti-szigetek, Alaszka	2008	0,1
Kasatochi	Aleuti-szigetek, Alaszka	2008	1,7
Redoubt	Alaszka	2009	0,01
Sarychev	Kurili-szigetek	2009	1,2
Eyjafjallajöküll	Izland	2010	n. a.
Merapi	Indonézia	2010	0,4
Gromsvötn	Izland	2011	0,4
Puyehue-Cordón Caulle	Chile	2011	0,3
Nabro	Eritrea	2011	1,5
Calbuco	Chile	2015	0,4
Holuhraun-Bárdarbunga	Izland	2014–2015	11*

1. táblázat • Az elmúlt tizenöt év kis és közepes erősségű vulkánkitörései és a légkörbe juttatott kén-dioxid mennyisége (Andersson et al., 2015 nyomán). (* A Holuhraun-Bárdarbunga lávaöntő-kitörés hat hónapja alatt, ami jórészt az alacsony légrétegekben maradt.)

közül nem hanyagolhatók el a vulkáni működés okozta hatások. A korábbi felfogással ellentétben figyelembe kell venni a kis és közepes erősségű vulkánkitöréseket is, fontos mérni a légkörbe jutó vulkáni gázok mennyiségét, összetételét és elterjedését. Ezt a tényezőt nem építették be a korábbi IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)

jelentésekbe és klímamodellekbe. Ennek korrigálása segíthet jobban megérteni a múlt- és jövőbeli éghajlatváltozás okait, és pontosítani ebben az emberiség szerepét is.

Jégbe zárt vulkáni kitörési archívum

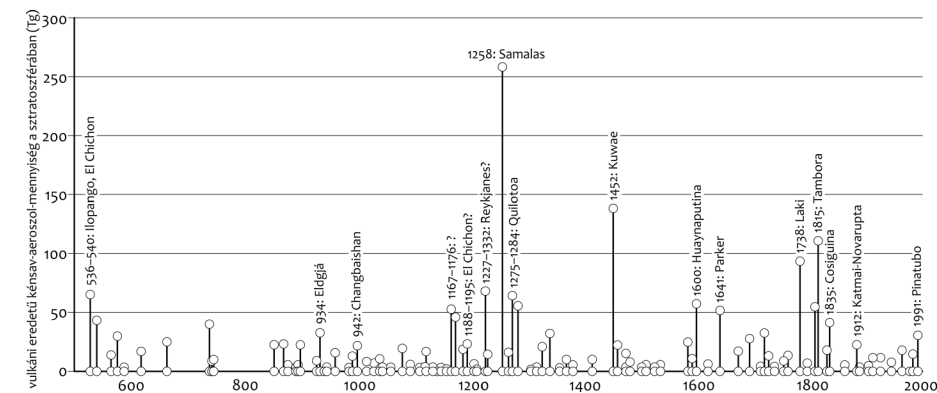
A vulkáni kitörések korábban is befolyásolták az éghajlatot. Kulcskérdés, hogy minél pon-

tosabban lássuk ennek dinamikáját, trendjét, a jelentősebb események ismétlődési gyakoriságát. Mindehhez ismernünk kell, hogy a vulkáni kitörések során mennyi SO₂ került a légkörbe. Ennek becslésére az egyik lehetőség az ún. kőzettani vizsgálat (Scaillet et al., 2004), amelynek során a kristályok üvegzárványai, valamint a kőzetek üveges alanyaga kémiai összetételének elemzésével számolhatjuk ki többek között a magmából kikerülő gázok mennyiségét. A másik lehetőség a jégfuratminták elemzése, különös tekintettel a kénsav-koncentráció változására (Gao et al., 2008; Sigl et al., 2015). Az elmúlt évtizedekben Grönland és az Antarktisz vastag jégtakaróján számos kutatófúrás mélyítették, amelyek több mint tízezer év alatt keletkezett jéganyagát hozták a felszínre (Zielinski et al., 1996). A jégfuratminták elemzése által kapott új ismereteknek óriási a jelentősége a környezetváltozás megértésében. Fontos, eddig nem ismert adatokat tudtunk meg többek között a múlt vulkánkitöréseiről is.

A jég minden évben újabb réteggel gyarapszik, a ráeső hó vékony jéggréteggé tömörö-

dik. Közben a jég magába zár piciny levegőbuborékokat, amelyek tartalmazzák az adott kor légköri szennyezőanyagait is, például különböző vegyületeket és port. Nagy vulkánkitörések esetében a légkörbe vulkáni hamanyag és vulkáni gázok kerülnek, amelyek szintén csapadózhatnak a jég keletkezése során. A vulkáni gázok, például a kén-dioxid, illetve a belőle keletkező szulfát aeroszolok a csapadékkal, hópolyhekkkel kerülnek a jégmezőkre. A jégfuratokban pontosan visszszámolható a jéggréteg éves gyarodása, azaz éves pontossággal fedhetők fel az akkori légkör jellemzői, így például a vulkáni szennyezés. A jéggrétegek szulfáttartalma nagy pontossággal mérhető. A koncentrációsúcsokhoz hozzárendelhető a jégfuratrétegekből kiszámolt képződési év, és mindezek után már csak az a feladat, hogy az adatokat értelmezve megfejtjük a koncentrációnövekedés okát.

Az élesen kiemelkedő szulfátkoncentráció-anomáliák csakis vulkáni működéssel magyarázhatók. Ezzel egy nagy felbontású vulkánkitörési archívumhoz jutunk, mégpedig olyan vulkánkitörések idősorához, amelyek jelentős



2. ábra • Az elmúlt 1500 év nagy vulkánkitörései, amelyek nyomot hagytak a grönlandi vagy antarktisi jégtakaróban. A jégfuratmintákban mért szulfátkoncentráció alapján becsülhető a sztratoszférába adott évben bekerült vulkáni kén-dioxid-gázokból keletkezett kénsav-aeroszol mennyisége (adatok Gao et al., 2008 és Global Volcanism Program alapján).

mennyiségű kén-dioxidot juttattak a légkörbe, és ezzel potenciálisan módosíthatták az éghajlatot (2. ábra). Ma már több mint tízezer évre visszamenően ismerjük ezeket az adatokat, az elmúlt két évezredre éves pontossággal (Sigl et al., 2015)! A kiemelkedő szulfátsúcsok nagy része esetében sikerült azonosítani a vulkánkitörés helyét, ám vannak még kérdéses események, amikor nem tudjuk, melyik vulkánkitörés okozta a jégfuratmintákban megjelenő szennyezést. Ez magyarázható azzal, hogy az évszázadokkal ezelőtti vulkáni működésekről nincs feljegyzés, nem sikerült még azonosítani pontos kormeghatározással az adott évben zajlott vulkáni működés anyagát, vagy éppen a vulkánkitörés tengeri környezetben történt, azaz maga a vulkáni képződés sem látható.

Vulkánkitörés, éghajlatváltozás, társadalmi zavarok

Az éghajlatváltozás okozta környezeti változások nyilvánvalóan hatnak a társadalmak életére. Ez érvényes a vulkánkitörések okozta klímaváltozás eseteire is. A jégfuratmintákból származó információk, az éghajlat-változtató vulkánkitörések idejének azonosítása, a történelmi dokumentumokkal való összevetése lehetőséget ad, hogy jobban megértsük azt is, hogy a társadalom hogyan reagált egy-egy ilyen anomális eseményre. Az interdiszciplináris kutatások rámutattak arra, hogy többek között milyen társadalmi átrendeződések történtek a 6. század közepén, amikor egymás után két, jelentős mennyiségű kén-dioxidot a légkörbe juttató vulkánkitörés is történt (Toohey et al., 2016) vagy a Laki 1783-as kitörése után (Stothers, 1996), illetve a Tambora 1815-ös kitörését követően (Oppenheimer, 2003). Ez utóbbi erősen érintette a Kárpát-medence térségét is, Európában talán a leg-

súlyosabban (Harangi, 2015). Mindezekből fontos tanulságok vonhatók le, mivel hasonló vulkáni események a jövőben is lesznek, akár ebben az évszázadban is. A jégfuratminták nagy felbontású elemzése alapján tudjuk, hogy az elmúlt kétezer évben legalább ötven, globális éghajlatváltozással járó vulkánkitörés történt (Gao et al., 2008), ezek közül előfordultak időben (egy évtizeden belül) egymáshoz közel eső, dupla kitörések is, ami a környezeti hatások felerősödését okozta (Toohey et al., 2016). Ez utóbbiak átlagos ismétlődési gyakorisága százötven év, és legutóbb 1831-ben és 1835-ben volt ilyen esemény (Harangi, 2015). Fontos tehát, hogy jobban megismerjük e korábban elhanyagolt „dupla kitörések” környezeti hatását is, mert a történelmi időkben látjuk súlyos következményeiket, és ilyen akár a közeljövőben is bekövetkezhet.

A vulkánkitörések éghajlatváltozást okozó hatása jelentős környezeti változásokkal jár, amire a társadalmaknak reagálniuk kell. A történelmi példákban látjuk, hogy ez sokszor népcsoportok területi átrendeződését is maga után vonja. Ma már szűkül a tér, ahová nagy tömegek érkehetnek, jelenleg már hétmilliárdan élünk a Földön, azaz az élettér csökken, és ezért egy ilyen reakciónak beláthatatlan következményei lehetnek. A társadalom jelentősen változott az elmúlt évtizedekben, rohamos a technológiai fejlődés, ami sok esetben magabiztosságot okoz. Sokan úgy gondolják, hogy a modern társadalom mindent meg tud oldani, akár a természeti folyamatokat, változásokat is befolyásolhatja. Az izlandi Eyjafjallajökull 2010. tavaszi, viszonylag szerény méretű kitörésének Európát megrázó hatása azonban figyelmeztet, hogy a modern társadalom jóval törékenyebb, érzékenyebb a természeti változásokra, mint azt sokan gondolják. Mindezek, ezen belül a nagy, globális

kihatású vulkáni kitörések felmérése, interdiszciplináris tudományos elemzése létkérdés az emberiség jövője szempontjából.

Záró gondolatok

A vulkánkitörések éghajlat-módosító hatásáról, annak fizikai okairól, környezeti és társadalmi következményeiről egyre többet tudunk, és ezek az ismeretek az elmúlt években rohamosan növekedtek. A Tambora 1815. évi kitörése és az azt követő súlyos globális környezeti következmények 200. évfordulója további jó alkalmat teremtett, hogy a vulkanológusok, a klimatológusok, a légkörfizikusok és klímamodellzők összefogjanak, és egyesítsék tudásukat azért, hogy jobban megértsük az éghajlatot befolyásoló komplex természeti folyamatokat. A történelmi dokumentumokból kiolvasható események és ezek kapcsolata a környezetváltozással, ezen belül a vulkánkitörések által okozott globális válto-

zásokkal, segít jobban megismerni azt, hogy a társadalom miképpen reagál az ilyen váratlan történésekre. Ez a tudás létfontosságú a jövőben nyilvánvalóan bekövetkező hasonló, akár extrém hatású eseményekre való felkészülésben. Fontos hangsúlyozni azt is, hogy az éghajlatváltozást sok összetevő, természeti és emberi hatás egyaránt befolyásolja. Nem becsülhető le egyetlen komponens szerepe sem, így például a vulkáni kitöréseké sem. Számítanak az akár a kisebb méretű kitörések is, ezeket figyelembe kell venni a klímamodellekben és előrejelzésekben. Fontos azonban azt is látni, hogy a vulkánkitörések egyedül nem okolhatók az éghajlat módosulásért, amint azt egyesek felvetik, az emberiség szerepe a környezetváltozásban nyilvánvaló.

Kulcsszavak: *vulkánkitörés, klímaváltozás, kén-dioxid, kénsav-aeroszol, ózon, jégfuratok, társadalmi változások*

IRODALOM

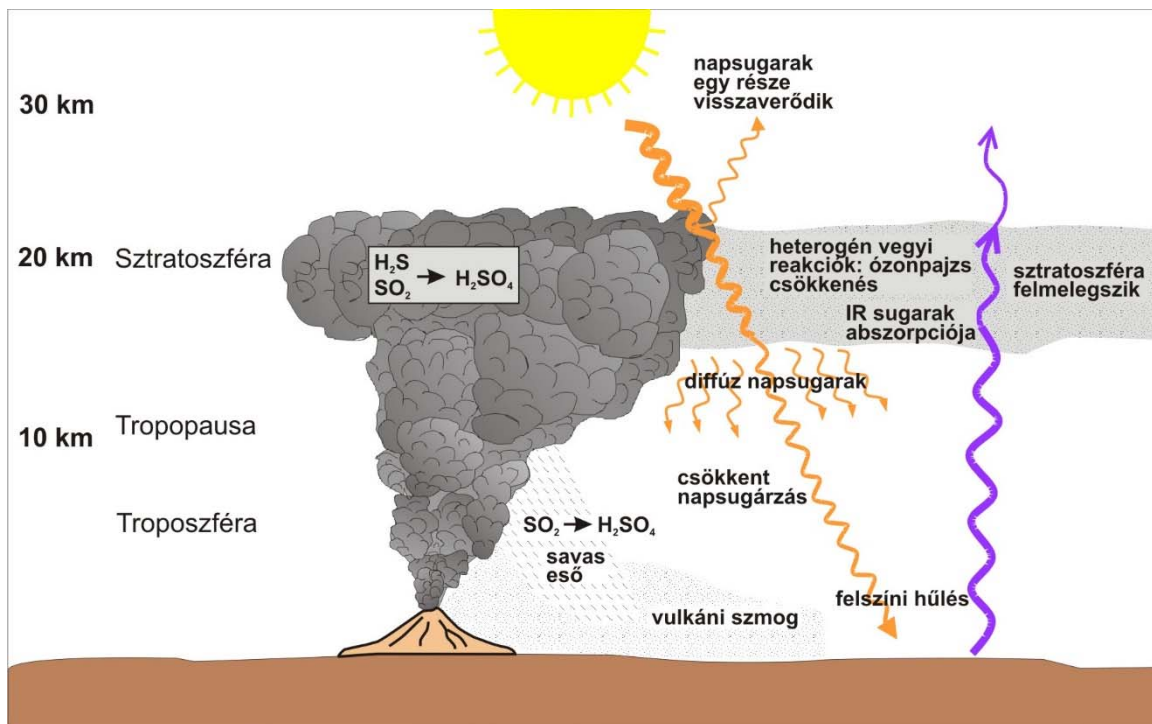
- Andersson, Sandra M. – Martinsson, Bengt G. – Vernier, Jean-Paul et al. (2015): Significant Radiative Impact of Volcanic Aerosol in the Lowermost Stratosphere. *Nature Communications*. 6, Art. 7692 DOI: 10.1038/ncomms8692 • <http://tinyurl.com/l5my8zk>
- Bond, David P. G. – Wignall, Paul B. (2014): Large Igneous Provinces and Mass Extinctions: An Update. *The Geological Society of America, Special Paper* 505., 29–55., DOI: 10.1130/2014.2505(02) • <http://tinyurl.com/lalgd68>
- D’Arcy Wood, Gillen (2015): *Tambora: The Eruption That Changed the World*. Princeton University Press
- Gao, Chaochao – Robock, Alan – Ammann, Caspar (2008): Volcanic Forcing of Climate over the Past 1500 Years: An Improved Ice-core-based Index for Climate Models. *Journal of Geophysical Research*. 113, D23111 DOI:10.1029/2008JD010239 • <http://climate.envsci.rutgers.edu/pdf/Gao2008JD010239.pdf>
- Harangi Szabolcs (2015): Egy vulkán, amely megrengette a világot. 200 éve tört ki a Tambora. *Magyar Tudomány*. 176, 7, 875–883. • <http://www.matud.iif.hu/2015/07/18.htm>

- Hofmann, David J. – Oltmans, Samuel J. (1993): Anomalous Antarctic Ozone during 1992: Evidence for Pinatubo Volcanic Aerosol Effects. *Journal of Geophysical Research*. 98, 18555–18561. DOI: 10.1029/93JD02092
- Kandlbauer, Jessica – Hopcroft, Peter O. – Valdes, Paul J. – Sparks, R. Stephen J. (2013): Climate and Carbon Cycle Response to the 1815 Tambora Volcanic Eruption. *Journal of Geophysical Research*. 118, 12497–12507. DOI: 10.1002/2013JD019767
- Kutterolf, Steffen – Hansteen, Thor H. – Appel, Karen et al. (2013): Combined Bromine and Chlorine Release from Large Explosive Volcanic Eruptions: A Threat to Stratospheric Ozone? *Geology*. 41, 707–710. DOI: 10.1130/G34044.1
- Lamb, Hubert (1970): Volcanic Dust in the Atmosphere; With a Chronology and Assessment of Its Meteorological Significance. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*. 266, 425–533. DOI: 10.1098/rsta.1970.0010
- McCormick, M. Patrick – Thomason, Larry W. – Trepte, Charles R. (1995): Atmospheric Effects of

- the Mt Pinatubo Eruption. *Nature*. 373, 399–404. DOI:10.1038/373399a0
- Oman, Luke – Robock, Alan – Stenchikov, Georgiy L. – Thorndarson, Thorvaldur (2006): High-latitude Eruptions Cast Shadow over the African Monsoon and the Flow of the Nile. *Geophysical Research Letters*. 33, L18711, DOI:10.1029/2006GL027665 • <http://tinyurl.com/mpdr53w>
- Oppenheimer, Clive (2003): Climatic, Environmental and Human Consequences of the Largest Known Historic Eruption: Tambora Volcano (Indonesia) 1815. *Progress in Physical Geography*, 27, 230–259. DOI: 10.1191/0309133303pp3799a
- Robock, Alan (2002): Pinatubo Eruption: The Climatic Aftermath. *Science*, 295, 1242–1244. • <http://tinyurl.com/kkectyv>
- Robock, Alan (2008): 20 Reasons Why Geoengineering May Be a Bad Idea. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 64, 2, 14–18. 9 DOI: 10.2968/064002006 • <http://tinyurl.com/km809jp>
- Santer, Benjamin D. – Solomon, Susan – Bonfils, Céline et al. (2014): Observed Multivariable Signals of Late 20th and Early 21st Century Volcanic Activity. *Geophysical Research Letters*. 42, 500–509. DOI: 10.1002/2014GL062366 • <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2014GL062366/full>
- Sato, Makiko – Hansen, James E. – McCormick, M. Patrick – Pollack, James B. (1993): Stratospheric Aerosol Optical Depths, 1850–1990. *Journal of Geophysical Research*. 98(D12), 22987–22994. DOI: 10.1029/93JD02553 • https://pubs.giss.nasa.gov/docs/1993/1993_Sato_sao8000d.pdf
- Scaillet, Bruno – Luhr, James F. – Carroll, Michael R. (2004): Petrological and Volcanological Constraints on Volcanic Sulfur Emissions to the Atmosphere. In: Robock, Alan – Oppenheimer, Clive (eds.): *Volcanism and the Earth’s Atmosphere*. Washington, DC: American Geophysical Union, DOI: 10.1029/139GM02
- Schmidt, Anja – Robock, Alan (2015): Volcanism, the Atmosphere and Climate through Time. In: Schmidt, Anja – Fristad, Kirsten E. – Elkins-Tanton, Linda T. (eds.): *Volcanism and Global Environmental Change*. Cambridge University Press, 195–207. • <http://tinyurl.com/l8len26>

- Schmidt, Gavin A. – Shindell, Drew T. – Tsigaridis, Kostas (2014): Reconciling Warming Trends. *Nature Geosciences*. 7, 158–160. • <http://tinyurl.com/phgvyjk>
- Self, Stephen – Gertisser, Ralf – Thorndarson, Thorvaldur et al. (2004): Magma Volume, Volatile Emissions, and Stratospheric Aerosols from the 1815 Eruption of Tambora. *Geophysical Research Letters*. 31, L20608, DOI:10.1029/2004GL020925 • <http://tinyurl.com/mtw4em4>
- Sigl, M. – Winstrup, M. – McConnell, J. R. et al. (2015): Timing and Climate Forcing of Volcanic Eruptions for the Past 2,500 Years. *Nature*. 523, 543–549. DOI: 10.1038/nature14565
- Solomon, Susan (1999): Stratospheric Ozone Depletion: A Review of Concepts and History. *Reviews of Geophysics*. 37, 275–316. • <http://tinyurl.com/m2tlt0x>
- Solomon, Susan – Daniel, J. S. – Neely, III Ryan R. et al. (2011): The Persistently Variable “Background” Stratospheric Aerosol Layer and Global Climate Change. *Science*. 333, 866–70. DOI: 10.1126/science.1206027
- Solomon, Susan – Ivy, Diane J. – Kinnison, Douglas et al. (2016): Emergence of Healing in the Antarctic Ozone Layer. *Science*. 30 Jun 2016. aae0061 DOI: 10.1126/science.aae0061 • <http://tinyurl.com/kwmf2q>
- Stothers, Richard B. (1996): The Great Dry Fog of 1783. *Climatic Change*. 32, 79–89. doi:10.1007/BF00141279
- Toohey, Matthew – Krüger, Kirstin – Sigl, Michael et al. (2016): Climatic and Societal Impacts of a Volcanic Double Event at the Dawn of the Middle Ages. *Climatic Change*, 136, 401. DOI:10.1007/s10584-016-1648-7 • <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-016-1648-7>
- Young, Seth A. – Saltzman, Matthew Ross – Foland, Kenneth A. et al. (2009): A Major Drop in Seawater ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr during the Middle Ordovician (Darriwilian): Links to Volcanism and Climate? *Geology*. 37, 10, 951–954. DOI: 10.1130/G30152A.1 • <http://tinyurl.com/lx8yyze>
- Zielinski, Gregory A. – Mayewski, Paul A. – Meeker, L. David et al. (1996): A 110,000-Yr Record of Explosive Volcanism from the GISP2 (Greenland) Ice Core. *Quaternary Research*. 45, 109–118. DOI: 10.1006/qres.1996.0013 • <http://tinyurl.com/lqk08bh>

Az 1. ábra hibásan jelent meg a nyomtatott cikkben. Alább az eredeti, a kéziratban szereplő ábra:



1. ábra • Nagy robbanásos vulkánkitörések klimatikus hatásának egyszerűsített magyarázata (Alan Robock rajza alapján)