

ÉGHAJLATVÁLTOZÁS ÉS EMBERI TEVÉKENYSÉG

Gelencsér András

az MTA doktora

MTA–Pannon Egyetem Levegőkémiai Kutatócsoport
gelencs@almos.uni-pannon.hu

A Föld éghajlatának alakításában meghatározó szerepet játszó földi szférák legkisebbike a légkör. A légkör alkotóinak egy része, az ún. *nyomgázok* közvetlenül is fontos szerepet töltenek be bolygónk éghajlatának szabályozásában. Annak az éghajlatnak, amelynek az elmúlt 11 ezer évben viszonylagos állandósága és kedvező volta bizonyítottan hozzájárult civilizációnk fejlődéséhez. Ebben az időszakban a légkör is lényegében változatlan összetételű volt, leszámítva az utolsó másfélszáz év történéseit. A változatlanág természetesen nem a véletlen műve, hanem annak az egyenes következménye, hogy a légköri nyomgázok koncentrációja hosszabb időskálán szoros összefüggésben együtt változik az éghajlattal. A kapcsolat kétirányú: fizikai megfontolások és jól ismert földtörténeti példák alapján mindkét tényező ok és okozat egyaránt lehet. Természetesen az éghajlatot számos más, köztük az emberi tevékenységtől független tényező és folyamat is befolyásolja. Ilyenek például a naptevékenység vagy a vulkánkitörések, az óceáni áramlások rendszere vagy a földfelszín sugárzás-visszaverő képessége (az ún. albedó). Az emberiség az elmúlt mindössze két évszázad alatt a légkör összetételét földtörténetileg is példátlan sebességgel változtatta meg. Az üvegházhatású gázok közül

a CO₂-koncentrációját 43, a metánét 250, a dinitrogén-oxidét 14%-kal növelte az elmúlt 11 ezer év közel állandó értékéhez képest, míg az ózonét 4%-kal csökkentette. Részben ennek hatására bizonyos éghajlati elemek eddigi változásai máris aggasztóak, a modellek előrejelzései még inkább. Nagy kérdés, hogy vajon a hatalmas és komplex Föld–légkör-rendszer a beavatkozásokra válaszul további kellemetlen meglepetésekkel szolgál-e a közeljövőben az emberiség számára.

A Föld–légkör-rendszer

A többi szférához képest rendkívül kis tömege, dinamikus jellege és a kölcsönhatások miatt a légkör gyakorlatilag nem tekinthető önálló földi szférának, hanem ún. *Föld–légkör-rendszert* alkot. A légkör ugyanis rendkívül intenzív energia- és anyagforgalmat bonyolít le a vele közvetlen kapcsolatban álló földi szférákkal: például energiáját közvetlenül a földfelszínről (és nem a napsugárzásból) nyeri, és részben vissza is sugározza a felszínre (üvegházhatás), a hőszállítással részt vesz a felszín hőmérsékletének vagy halmazállapotának megváltoztatásában. Közismert és hatalmas léptékű a víz körforgásában betöltött szerepe. A légkör és a felszín közötti anyagforgalom másik példája pedig a bioszférával

folytatott hatalmas léptékű gázcsere, a fotoszintézis és a légzés. Ezen intenzív kölcsönhatásokból az következik, hogy ha például a légkörben bármilyen változás történik (például az üvegházhatású gázok koncentrációjának növekedéséből adódó többlet energiaelnyelés), annak hatása nemcsak a légkört, hanem valamennyi, vele kapcsolatban álló földi szférát is érinti. Vagyis a légkört nem lehet a többi felszíni szférától elkülönített önálló rendszerként kezelni.

A földi légkör összetételének jelentősége

A levegő alkotói és azok arányai rendkívül fontosak a légkör alapvető funkcióinak ellátásában: más összetételben ezek a funkciók maradéktalanul nem valósulhatnak meg, azaz a légkör nem lenne az élet fenntartására alkalmas. A földi élet fenntartásához nélkülözhetetlen légköri funkciók mindegyike a levegő egy vagy több kémiai összetevőjéhez kötődik. Tehát önmagában nem a légkör mint fizikai rendszer alkalmas a földi élet feltételeinek biztosítására, hanem a levegő bizonyos kémiai alkotói. A földi élet ma ismert formájának fennmaradását nemcsak a levegő fő alkotóinak, hanem a kis mennyiségben előforduló ún. *nyomgázok* jelenlétének is köszönhetjük. Ezek mennyisége – amint azt az elnevezésük is mutatja – lényegesen kisebb, mint a levegő fő alkotóié. A légkör a földi élet számára elengedhetetlenül fontos funkciói közül jelenlegi ismereteink szerint hat esetben érdeminek tekinthető az emberiség tevékenységének befolyása, mindössze kettő esetben nem mutatható ki ilyen hatás, egy tényezőre gyakorolt közvetett hatás mértéke pedig bizonytalan. A bizonyítható érdemi hatások az ózonréteget, az üvegházhatást, a víz körforgását, a CO₂ mennyiségét, az öntisztulás képességét és a tápanyagok szállítását

érintik. A felsőlégkör nagy energiájú sugárzást szűrő képességét, valamint a légköri oxigén koncentrációját az emberiség tevékenységeinek összessége sem képes érdemben befolyásolni. Az pedig jelenlegi ismereteink szintjén egyelőre bizonytalan, hogy globálisan a légköri hőszállítás eddig milyen módon és mértékben változott az emberi tevékenység hatására.

A légkör összetételének változása az emberi tevékenység hatására

Az 1. táblázat a levegőt alkotó gázok összes légköri mennyiségét mutatja, illetve azt, hogy ez milyen irányban és mennyit változott az elmúlt 250 évben, döntően a hatalmas léptékűvé vált emberi tevékenységek eredőjének következményeként (Gelencsér, 2015a).

Látható, hogy az emberi tevékenység a vízgőz kivételével valamennyi nyomgáz légköri mennyiségét számottevően megváltoztatta az ipari forradalom kezdete óta. Az ózon (és csekély mértékben az oxigén) mennyiségét csökkentette, a többi nyomgázét pedig esetenként igen jelentős mértékben megnövelte. Sőt olyan nyomgázokat is a légkörbe bocsátott (a freonokat és azok hidrogénezett származékait), amelyek a természetben korábban nem is léteztek, de az ózon bontásában és az üvegházhatásban módfelett aktívnak bizonyultak. Egyértelmű, hogy az elmúlt százötven évben a második legkisebb földi szféraként a légkör szenvedte el arányaiban a legnagyobb mértékű állapotváltozást: ennél nagyobb csak a bioszféra állapotán sikerült az emberiségnek változtatnia. A nyomgázok légköri jelentőségét illetően ez több mint aggasztó. Különösen azért, mert az emberi civilizáció kialakulását és fennmaradását biztosító többé-kevésbé állandó és módfelett kedvező éghajlati viszonyok fennmaradásához hozzájáruló, 11 ezer éve stabil összetételbe-

kémiai összetevő	teljes légköri mennyiség napjainkban (mrd tonna)	változás az ipari forradalom kezdete óta (%)
nitrogén	4 020 300	0
oxigén	1 233 700	-0,05
vízgőz	13 800	0
szén-dioxid	3240	+43
metán	5	+250
kén-dioxid*	12	+300
dinitrogén-oxid	2,6	+14
ózon	2,7	-4

1. táblázat • A légkör kémiai összetevőinek teljes légköri mennyisége (tömege) és annak változása az ipari forradalom kezdete óta (* Légköri koncentrációját a vulkáni tevékenység időnként jelentős mértékben befolyásolhatja.)

li állapotból sikerült kimozdítani a Föld-légkör-rendszert.

A földtörténeti múltban a légkör összetétele a mainál lényegesen lassabb ütemben változott (még az eljegesedések és köztes melegebb időszakok közötti, geológiai léptékkel rendkívül gyorsnak számító összetételbeli változások is negyvenszer lassabbak lehettek a mainál). Az is kétségszoros tény, hogy a földtörténeti múltban a légkör lényegesen eltérő nyomgáz-összetételéhez a Föld lényegesen különböző éghajlati állapotai tartoztak (Császár et al., 2008).

A légköri folyamatokkal kapcsolatos várakozások

Sajnos a mindent a végletekig egyszerűsítő emberi gondolkodásból adódik az a türelmetlen várakozás, hogy ha a légkörbe juttatunk valamit, akkor annak hatása is feltétlenül a légkörben és lehetőleg azonnal jelentkezzen: például ha több szén-dioxidot bocsátunk ki, akkor vele együtt azonnal nőjön a levegő hőmérséklete – ha nem nő azonnal, akkor ezt

annak bizonyítékeként vesszük, hogy a szén-dioxid nem is üvegházhatású gáz (Haszpra, 2004). Pedig ez a közvetlen (és egyedül belátható) ok-okozati összefüggés csak a helyi levegőszennyezés esetében (például London-típusú szmog) teljesül. Az ózonréteg vékonyodása, bár a magaslégtérben zajlott az emberiség által a levegőbe bocsátott gázok hatására, több évtizedes késleltetéssel következett be. Az éghajlatváltozás esetében pedig a leglátványosabb változásokat nem is légkör produkálja. Egyébként is, olyan hatalmas kiterjedésű, kaotikus rendszereknél, mint amilyen a Föld-légkör-rendszer, egyetlen tényező változásával egyenesen arányos változásokat nem is remélhetünk (Czelnai, 1997; Koppány, 2004).

A globális éghajlatváltozás tényezői

Éghajlatváltozás akkor következik be, amikor a Föld globális energiamérlegének nagyjából állandónak tekinthető (ún. *kvázistacionárius*) egyensúlyát valamilyen külső vagy belső tényező változása új egyensúlyi állapot felé

mozdítja. Ezeket a tényezőket az ún. *éghajlati kényszer* elemeinek nevezzük, utalva arra, hogy ezek befolyásolni tudják Földünk éghajlatát. Külső tényező lehet csillagászati, például a Föld Nap körüli pályájának periodikus változásai vagy a Nap sugárzási intenzitásának megváltozása. A legfontosabb belső tényezők az üvegházhatás mértékének megváltozása, a légkör összetételében, az üvegházhatású gázok koncentrációjában bekövetkező változások révén, illetve a Föld-légkör-rendszer napsugárzást visszaverő képességének (az ún. planetáris albedó) változása vulkánkitörések, a levegőszennyezés vagy az ember felszín alakító tevékenysége következtében. Fontos tényező lehet a hatalmas hőmennyiséget szállító óceáni áramlatok megváltozása is. Az éghajlati kényszer tényezőinek többsége az ember számára láthatatlan (például az üvegházhatás), és hatása többnyire igen lassú. Valamennyi tényező közül kétségtelenül a leglátványosabbak a nagy vulkánkitörések, amelyek éghajlatra gyakorolt hatása szinte azonnal jelentkezik (igaz, csak átmeneti időre).

Az emberi tevékenység hatása az éghajlatra

A földtörténeti múlt példáiból tudjuk, hogy az éghajlati rendszert többé-kevésbé stabil állapotából a fenti tényezők valamelyikének megváltozása képes kibillenteni, és geológiai időléptékben meglepően gyorsan új, a korábbiól jelentősen különböző állapotába juttatni (Gelencsér, 2015b). Az egyik a vulkánkitörések által képviselt globális léptékű levegőszennyezés, amely azonnali és jelentős – igaz, egyetlen kitörés esetén viszonylag rövid ideig tartó – hőmérséklet-csökkenést eredményez. A másik az üvegházhatású gázok koncentrációjának jelentős mértékű növekedése nyomán bekövetkező felmelegedés, amire a paleocén–eocén hőmérsékleti maximum szol-

gáltat földtörténeti példát. A harmadik pedig a sarkvidéken a besugárzás kismértékű – a Föld pályaelemeinek módosulása miatt bekövetkező – változása miatt meginduló, ön-erősítő folyamatokkal támogatott eljegesedések, illetve felmelegedések az elmúlt kétmillió évből. Amire a földtörténet során még nem akadt példa, napjainkban az emberi tevékenység egyidejűleg mindhárom – éghajlatváltozást külön-külön is előidézni képes – éghajlati tényező hatásához hasonló léptékű változásokat tud okozni (Gelencsér, 2004). Természetesen a Föld pályaelemeit az emberiség nem képes befolyásolni, de a sarkvidéken az elnyelt sugárzási energia mértékét akarátán kívül mégis módosítani tudja. A levegőszennyezésből származó koromrészecskékkel szennyezett hó- és jégfelszín napsugárzást visszaverő képessége ugyanis a korom koncentrációjától függően jelentősen lecsökken (Gelencsér, 2014).

Üvegházhatás kontra levegőszennyezés

Könnyen kiszámítható, hogy az üvegházhatású gázok légköri többlete miatt mennyivel több sugárzási energia képes elnyelődni az alsó légkörben (Császár, 2009). Az elmúlt ötven évben az így számított integrált energia-többlet megfelel az emberiség 85 ezer évnyi teljes energiafelhasználásának (2008-as szinten). Ez idő alatt azonban a szén-dioxid-kibocsátással nagy léptékű levegőszennyezés is együtt járt: ennek révén hatalmas mennyiségű, a Naptól érkező sugárzási energia veszett el a Föld-légkör-rendszer számára (Gelencsér, 2004). A levegőszennyezés ugyanis a földfelszínre jutó napsugárzás energiáját akár 2%-kal is csökkentheti (Salma, 2006). Az elmúlt ötven év során a levegőszennyezés kompenzáló hatásának eredményeként a Föld-légkör-rendszerben az üvegházhatás növekedéséből

számítható elméleti teljesítménytöbblet mindössze 10%-a maradhatott. A légkörben és a felszíni hőmérsékletben megfigyelhető eddigi változásokról ezért merészség lenne azt állítani, hogy azok kizárólag a többlet üvegházhatásnak tulajdoníthatók. Az üvegházhatás jelentősége természetesen nem vitatható, de az előbbieken alapján teljességgel kizárható, hogy a szén-dioxid légköri koncentrációja és a globális átlaghőmérséklet között egyszerű függvénnyel leírható ok-okozati összefüggés legyen. A számítások szerint például a sarkvidéken tapasztalható, a globális átlagnál jelentősebb felmelegedést nem elsősorban az üvegházhatású gázok koncentrációjának növekedése okozza. A közvetlen levegőszennyezésből származó koromrészecskék szerepe legalább akkora, ha nem nagyobb, és egyre növekvő mértékben érvényesül a jégfelszín kiterjedésének zsugorodásához és más nagy léptékű kölcsönhatásokhoz köthető, részleteiben kevésbé ismert fizikai visszacsatolási folyamatok hatása is.

Várható kilátások

A legtöbb kutató egyetért abban, hogy a technológiai fejlődés eredményeként a 21. században a levegőszennyezés mértékének növekedése nem fog lépést tartani az üvegházhatású gázok koncentrációjának várható növekedésével. A lemaradás tulajdonképpen már az 1980-as években elkezdődött, amikor a fejlett országokban szigorú környezetvédelmi előírásokat léptettek életbe. A korszerű levegőtisztaság-védelmi berendezések szinte minden légszennyező anyag hatékony eltávolítására képesek, kivéve a szén-dioxidot (ami persze szigorúan véve nem is légszennyező anyag). A globális levegőszennyezést ma már inkább a fejlődő országok gyorsan növekvő népessége által nagy számban használt elavult

technológiájú járműveknek, illetve az általuk fűtés vagy főzés céljából elégetett biomassza égéstermékeinek, valamint a kiterjedt szavanna- és erdőégetések kontinensnyi léptékű füstjének tulajdoníthatjuk. A légszennyezettég mérséklődésének „mellékhatásaként” tehát a Föld–légkör-rendszerben halmozódó energiamennyiség valószínűleg egyre növekvő ütemben nőni fog, ahogyan azt 1971 óta folyamatosan teszi.

Záró gondolatok

Mivel az emberiség az éghajlati rendszer több meghatározó elemét is lényegesen megváltoztatta, ezzel természetesen magát a rendszert (az éghajlatot) is befolyásolja. Tehát az emberiség éghajlati rendszerbe avatkozásának ténye nem lehet kérdés. Az ennek hatására bekövetkező éghajlatváltozás mértéke és üteme annál inkább, különösen a jövőre vonatkoztatva, hiszen ismereteink hiányosak, és a földtörténeti példák mindegyike a maihoz képest jóval lassabb változásokra kalibrált (Götz, 2005). Szerencsés esetben elvileg előfordulhatna, hogy a Föld–légkör-rendszerben a változásokat hatalmas természeti folyamatok fékeznek vagy kompenzálnák (ún. negatív visszacsatolások), azaz az éghajlati rendszer állapota egyes elemeinek jelentős megváltozása esetén is többé-kevésbé változatlan maradna. Más szóval működne egy gigantikus és nagy pontosságú földi termosztát. Ilyenről azonban sajnos nincs tudomásunk, ugyanis ha létezne, a földtörténeti közelmúltban aligha követhették volna egymást gyors egymásutánban a nagy eljegesedések és a köztes melegebb időszakok (az ún. *interglaciálisok*). Sőt a közelmúlt megfigyelései alapján inkább olybá tűnik, hogy az előidézett kezdeti változásokra hatalmas és kontrollálhatatlan természeti folyamatok (ún. pozitív visszacsatolások)

erősítenek rá (Geresdi – Ács, 2004). Ilyen például az Arktiszon a tengeri jég nyári gyors zsugorodása, vagy Grönland gleccsereinek

¹ Az Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) – Éghajlatváltozási Kormányközi Testület 1988-ban alakult szervezet, amelynek létrehozását az ENSZ Környezetvédelmi Programja (UNEP) és a Meteorológiai Világszervezet (WMO) kezdeményezte, és az ENSZ Közgyűlése az éghajlatváltozással foglalkozó határozatában megerősítette.

IRODALOM

- Czelnai Rudolf (1997): Kellemtelen meglepetések az üvegházban. *Természet Világa*, 12, 531–533. <http://www.termeszetvilaga.hu/tv9712/uevghaz.html>
- Császár Attila (2009): A földi üvegházhatás. *Természet Világa*, 2, 60–64. • <http://www.termeszetvilaga.hu/szamok/tv2009/tv0902/csaszar.html>
- Császár Géza – Haas János – Nádor Annamária (2008): A földtörténet klímaváltozásai és azok tanulságai. *Magyar Tudomány*, 169, 6, 663–687. • <http://www.matud.iif.hu/08jun/03.html>
- Gelencsér András (2004): Aeroszol részecskék a légkörben. Hűtő hatás? *Természet Világa*, II. különszám 25–28.
- Gelencsér András (2014): Koromrészecskék a légkörben – a kipufogócsőtől az éghajlatmódosításig. *Magyar Tudomány*, 185, 11, 1366–1374. • <http://www.matud.iif.hu/2014/11/12.htm>

példátlanul gyors fogyása. A legnagyobb kérdés, hogy vajon a folyamatok még visszafordíthatók-e. A politika és a tudományos *mainstream* szerint még néhány évig igen, de sokak szerint – ideértve jelen cikk szerzőjét is – ezzel már bizony elkéstünk. *Alea iacta est*.

Kulcsszavak: *éghajlatváltozás, légkör összetétele, üvegházhatású gázok, levegőszennyezés, szén-dioxid, Föld–légkör-rendszer, visszacsatolások*

- Gelencsér András (2015a): *Füstbe ment bolygó*. Veszprém: Pannon Egyetemi Kiadó
- Gelencsér András (2015b): Az emberiség mint éghajlatalkító tényező. *Magyar Tudomány*, 5, 515–521. • <http://www.matud.iif.hu/2015/05/02.htm>
- Geresdi István – Ács Ferenc (2004): Nevezetes visszacsatolások: A lényeg a részletekben. *Természet Világa*, II. különszám 37–40.
- Götz Gusztáv (2005): Létezik-e az éghajlati rendszerünknek Achilles-sarka? *Természet Világa*, 11, 482–485. • <http://tinyurl.com/ly7cg6x>
- Haszpra László (2004): Üvegházhatás, üvegházgázok. *Természet Világa*, II. különszám, 21–25.
- Koppány György (2004): A Föld–légkör rendszer sebezhetősége. *Természet Világa*, II. különszám, 54–56.
- Salma Imre (2006): A légköri aeroszol szerepe a globális éghajlatváltozásban. *Magyar Tudomány*, 167, 2, 205–211. • <http://www.matud.iif.hu/06feb/13.html>

