

# A LÉGKÖRI AEROSZOL SZEREPE A GLOBÁLIS ÉGHAJLATVÁLTOZÁSBAN

Salma Imre

kémiai tudomány kandidátusa  
Eötvös Loránd Tudományegyetem Kémiai Intézet  
salma@para.chem.elte.hu

## *Bevezetés*

A levegő diszperz kolloid rendszer, amelyet gázok keveréke és a keverékben szuszpendált formában lévő cseppfolyós és/vagy szilárd részecskék alkotnak. A részecskék mérete néhány nanométertől néhány tíz mikrométerig terjedhet. Az ilyen rendszert aeroszoknak nevezzük. Az aeroszokok szerepe számos geológiai, optikai, biológiai, meteorológiai és kémiai folyamatban, légköri multifázisú vagy katalitikus reakcióban, valamint a biogeokémiai körfolyamatokban jól ismert. Elegendő talán csak a lósz képződésére, a pollennel történő beporzásra, a Tyndall-jelenségre, a Milliken-kísérletre, a Brown-mozgásra vagy az ózonlyuk kialakulására utalni. Az aeroszokokat tehát sikeresen felhasználták a tudományos megismerésben, illetve eredményesen alkalmazták gyakorlati célok megvalósítása során. Az elmúlt 10-15 évben jelentősen megnőtt a tudományos érdeklődés a légköri aeroszol iránt. Mindezt elsősorban az antropogén (emberi tevékenység) eredetű légköri aeroszol globális éghajlatváltozásban játszott szerepének a felismerése, valamint a környezetünkre, elsősorban az emberi egészségre kifejtett hatásának az előtérbe kerülése okozta.

## *Globális éghajlat*

Földünk egységnyi felületére  $342 \text{ W/m}^2$  energiasűrűség érkezik a Napból napfény formájában. A napsugárzás energiaeloszlásának ma-

ximuma a látható tartományban található, mintegy  $0,5 \mu\text{m}$  hullámhossznál. A napfény energiájának egy része (kb. 31 %-a) visszaverődik az űrbe elsősorban a felhőkről és a levegőből (planetáris albedó), másik része (kb. 20 %-a) elnyelődik a levegőben, a maradék (kb. 49 %) energia eléri a Föld felszínét és elnyelődik benne. Az elnyelt energia a Föld felszínét bizonyos hőmérsékleten tartja, aminek következtében a Föld mint adott hőmérsékletű szilárd test maga is elektromágneses sugárzást bocsát ki hősugárzás (infravörös sugárzás) formájában. Esugárzás energiaeloszlásának maximuma lényegesen nagyobb a napfény hullámhosszánál; mintegy  $10 \mu\text{m}$  körül található. A Föld felszínéről távozó hősugárzást a levegő bizonyos, általában nyomnyi mennyiségben lévő összetevői – a vízgőz, szén-dioxid, metán, dinitrogén-oxid, halogénezett szénhidrogének és az ózon – nagy (mintegy 90 %-os) valószínűséggel elnyelik. Ezen összetevőket nagyon szemléletesen üvegházhatású gázoknak nevezzük. A levegőben elnyelt energia (ami a napsugárzás és hősugárzás elnyeléséből, felhőképződéshez kapcsolódó látens hőből és a légáramlással közvetített, konvektív hőből tevődik össze) a felszín sugárzásánál kissé nagyobb hullámhosszú hősugárzás formájában emittálódik újra  $5\text{--}6 \text{ km}$  ekvivalens magasságból. A kisugárzott energia mintegy 62 %-a térbeli okok miatt visszajut a Föld felszínére, és ott elnyelődik, míg a maradék kb. 38 % ( $235 \text{ W/}$

m<sup>2</sup>) az űrbe távozik. Ez utóbbi érték megegyezik a beérkező napenergia elnyelt hányadával:  $342 \times (0,20 + 0,49)$ , így a Föld energiaegyensúlyban lévőknek tekinthető a környezetével. Az üvegházhatású gázok által elnyelt és visszajuttatott energia következtében a Föld felszínén a globális átlagos hőmérséklet +15 °C, szemben a –18 °C-kal, ami az említett gázok nélkül alakulna ki. A beérkező napenergia, az albedó és a hősugárzás is inhomogén eloszlásúak a Földön, ami az elnyelt energia konvektív újraelosztásához vezet a levegőben és óceánokban létrejövő, nagyléptékű körfolyamatok rendszere révén. Ezek közismert példája a Golf-áramlat vagy a passzátszelek. Mindezen jelenségek és folyamatok együttesen alakítják ki a Föld globális éghajlatát, amit a meteorológiai változók hosszú időtartamra (tipikusan harminc évre) vonatkoztatott átlagos értékeivel jellemezhetünk. A Föld éghajlata lassan, de folyamatosan változik. E természetes változás (fejlődés) elsősorban a Föld pályájának kismértékű módosulásával, a Nap kisugárzásának (napállandónak) a változásával, a planetáris albedó természetes átalakulásával és a légkör kémiai összetételének természetes változásával függ össze. A fejlődés során hidegebb időszakok (jégkorszakok) és melegebb (interglaciális) időszakok váltották egymást; amelyek között a globális átlagos hőmérséklet 6-8 °C-ot változott. Az interglaciális név arra utal, hogy a jégkorszakok általában hosszabb (nagyságrendileg 100 ezer évig), míg az interglaciális időszakok rövidebb ideig (átlagosan 10-12 ezer évig) tartottak. A jelenlegi időszakot Holocén Interglaciálisnak nevezzük, ami körülbelül 10 ezer évvel ezelőtt kezdődött. A globális éghajlat változása az elmúlt száz évben azonban nagyobb mértékű volt, mint amire az elmúlt hatszáz évben történt ingadozásából következtetni lehet. A globális éghajlat ilyen változását nagy valószínűséggel az emberi tevékenység okozza.

### *Az antropogén aeroszol okozta éghajlati kényszer*

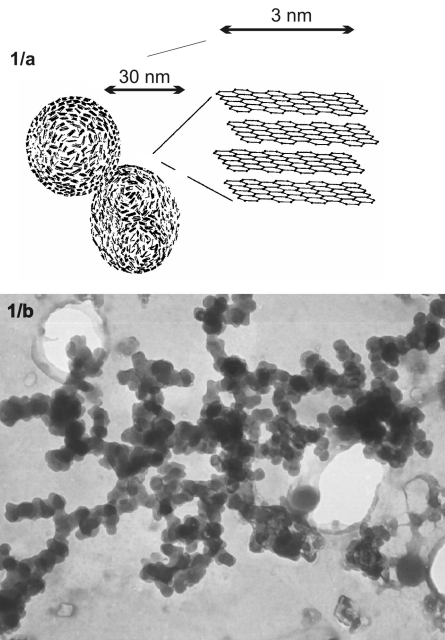
Az emberiség szükségleteinek és igényeinek kielégítése során üvegházhatású gázokat bocsát a levegőbe. Az emisszió olyan mértékű, hogy már a gázok globális koncentrációja is megnőtt. A szén-dioxid globális légköri koncentrációja az ipari forradalom óta 280 ppm-ről (milliomod részről) 375 ppm-re (34 %-kal) változott, ami összemérhető az előző jégkorszak és a jelenlegi interglaciális időszak átmenetekor bekövetkezett növekedéssel. (A hazai szén-dioxid-mérésekről lásd Haszpra – Barcza, 2005). A nagyobb koncentráció miatt a Föld felszínének hősugárzása nagyobb mértékben nyelődik el a levegőben, és kisebb mértékben jut az űrbe. A klímaváltozás egyik alapfogalma az éghajlati kényszer, amely kifejezi a Föld energiamérlegében szerepet játszó valamelyik összetevő (például CO<sub>2</sub>) változásának klimatikus hatását az energiamérleghez történő megváltozott járulékok formájában (egységnyi területű légerszlopba vonatkoztatva). Az üvegházhatású gázok jelenlegi „többlet”-koncentrációja a XVIII. század közepéhez viszonyítva a Föld energiamérlegét (lényegében 235 W/m<sup>2</sup> energiasűrűségű kicserélését)  $\Delta Q_c = +2,43 \text{ W/m}^2$  ( $\pm 10 \%$ ) globális átlagos éghajlati kényszerrel növelik meg (IPCC TAR, 2001). Más szóval, az üvegházhatású gázok átlagban fűtik a Föld felszínét. Ez azonban nem jelenti azt, hogy a felszín hőmérséklete mindenhol növekszik.

Az emberi tevékenység a légköri aeroszolrészecskék globális koncentrációját is megnöveli. Az aeroszol pedig szintén befolyásolhatja a Föld energiamérlegét: közvetlenül a napfény és/vagy hősugárzás szórása és/vagy abszorpciója által, vagy közvetve a felhők optikai és mikrofizikai tulajdonságainak megváltoztatásán keresztül. Közvetlen éghajlati hatást elsősorban a szulfát aeroszol, a fosszilis tüzelőanyagok égetésével kelet-

kező szerves aeroszol (az aeroszol szerves-anyag-tartalma), a biomassza égetéséből származó aeroszol, az ásványi por aeroszol, illetve a fosszilis tüzelőanyagok égetésével keletkező korom aeroszol fejtenek ki optikai tulajdonságaiknak és méreteloszlásuknak köszönhetően. Ezen aeroszoltípusok emissziójának jelentős vagy túlnyomó része az emberi tevékenységhez kapcsolódik. A felsorolt aeroszokok okozta közvetlen éghajlati kényszer „legjobb becslésére” (és bizonytalansági tényezőjére) rendre a  $-0,40$  ( $2\times$ ),  $-0,10$  ( $3\times$ ),  $-0,20$  ( $3\times$ ),  $-0,60$ -tól  $+0,40$ -ig, illetve  $+0,20$  ( $2\times$ )  $W/m^2$  értékek adódnak (IPCC TAR, 2001). Az aeroszolrészecskék egymással keveredhetnek az „öregedés” folyamán, és a keveredési állapot befolyásolja az éghajlati kényszert (Jacobson, 2001). A korom aeroszol és szulfát aeroszol külső vagy belső keverékeket képezhet, illetve a két állapot közötti folytonos átmenetként létrejöhet olyan keverék, amelyben a korommagvat szulfátréteg veszi körül (burkolt mag). A felsorolt keverékekben a korom aeroszol éghajlati kényszerét rendre  $+0,27$ ,  $+0,78$  és  $+0,54$   $W/m^2$  értékűnek becsülik. A belső, homogén keverék a természetben nem realiztikus, mert a korom nem oldódik vízben, viszont az átmeneti állapot előfordulására utaló jelek léteznek. Fontos tudatosítani, hogy a burkolt korom aeroszol éghajlati kényszere meghaladja a második legfontosabb üvegházhatású gáz, a metán értékét (ami  $+0,48$   $W/m^2$ ). A korom aeroszolt grafit kristályrácsú apró lapkák alkotják, hagymahéjhoz hasonlóan felépülő  $30$ - $40$  nm átmérőjű gömböket hozva létre, amelyek láncszerű, majd később fűrészrű fraktálszerkezetté formálódnak. A korom aeroszol szerkezetét az 1. ábrán mutatom be.

A Föld felszínének  $65$  %-át általában különböző felhők borítják. A felhők létrejöttéhez szükséges termodinamikai feltételek a troposzferikus aeroszolnak köszönhetően alakulnak ki a természetben. Az aeroszolrész-

ecskék felhőkondenzációs magvakként vagy jégkristálymagvakként szolgálnak. Műholdfelvételeken jól kivehető a légi és hajózási útvonalakon, sőt erdőirtások és biomassz-szaégetés közelében kialakuló rétegfelhők csóvája és reflektivitása. Először a szulfátrészecskéknek, majd később, az 1990-es évektől a szerves aeroszolnak ismerték fel a felhőképződést lehetővé tevő tulajdonságait (Mészáros, 1992). Az éghajlati hatás szempontjából a finom méretű ( $2$   $\mu m$ -nél kisebb átmérőjű) aeroszolrészecskéknek van leginkább szerepük. E részecskék tömegének  $(43\pm 10)$  %-át szerves vegyületek,  $(21\pm 11)$  %-át korom,  $(14\pm 4)$  %-át szulfát aeroszol és  $(13\pm 6)$  %-át felszíni kőzet eredetű aeroszol alkotják Budapesten (Salma et al., 2005). A szerves anyag vízzeloldható hányada – ami fővárosunkban átlagosan  $(36\pm 8)$  % – játszik szerepet a felhőképződésben. Több antropogén aeroszol általában nagyobb számszerinti koncent-



1. ábra • A korom aeroszol mikroszerkezetének rajza (a), és egy dízelmotorból származó, „fiatal” korom aeroszolrészec-

rációt jelent; a több részecske és adott mennyiségű vízgőz kölcsönhatásának következményeként viszont több és kisebb effektív átmérőjű felhőcsepp alakul ki. Ilyen felhők „fehérebbek” és több napfényt vernek vissza a világűrbe (ún. első közvetett hatás), ami megnöveli a planetáris albedót, és a felszín hűtését eredményezi (Twomey, 1974). Az ilyen típusú felhők élettartama ráadásul megnő, „meleg” csapadékot (esőt) hozó arányuk pedig csökken (ún. második közvetett hatás), mert az esőcseppek méretének mintegy 14  $\mu\text{m}$ -nél nagyobboknak kell lenniük ahhoz, hogy kihulljanak a levegőből. Ez utóbbi jelenség szintén a felszín hűtését eredményezi. A felszín hűlése, illetve a légoszlop melegedése kihat a hőmérséklet függőleges eloszlására is (ún. harmadik közvetett hatás), ami befolyásolja például a víz globális körforgását (Ramanathan et al., 2001) vagy más légköri összetevők és állapotjelzők (például légköri nyomanyagok vagy látens hő) vertikális transzportfolyamatait és dinamikáját. Az aeroszolrészecskék első közvetett hatásának éghajlati kényszere 0-tól  $-2,0 \text{ W/m}^2$  értékig terjedő intervallummal becsülhető (IPCC TAR, 2001). A teljes közvetett aeroszolatás mértéke azonban jelenlegi ismereteink szintjén sajnos nem számszerűsíthető.

### *Globális elhomályosodás, bizonytalanságok*

Az aeroszol közvetlen és közvetett módon kifejtett fűtő és hűtő hatásai összeadódnak a légkör tetejére vonatkoztatva, míg a Föld felszínén mindegyik aeroszoltípus csökkenti a napsugárzás fluxusát. Más szóval: az aeroszol elhomályosodást okoz a felszínen tiszta égbolt esetén is. Az elhomályosodás inhomogén eloszlású, de valószínűleg globális jelentőségű a Földön; globális átlagos mértékét 1-2 %-ra becsülik tízéves időtartamra vonatkozóan (Stanhill – Cohen, 2001). Az elhomályosodás ellentétes hatású a Föld felszínének globális felmelegedésével.

Legújabb elképzelések szerint azonban az elhomályosodás az 1960-as évektől az 1990-es évekig valóban növekvő tendenciát mutatott, míg napjainkban inkább már globális „kifényesedés” történik, különösen az északi féltekén az aeroszolkibocsátás csökkentése miatt (Wild et al., 2005). Az éghajlatváltozás összefügg számos igen fontos biogeokémiai körforgással (például a szén-ciklussal), további paraméterekkel és eloszlásokkal, valamint több önerősítő/öngyengítő visszacsatolással és komplex másodrendű kölcsönhatásokkal, amelyek mind befolyásolják vagy módosítják a jelenséget. Az egyes aeroszoltípusok járulékanak bizonytalansága messze meghaladja az üvegházhatású gázok összesített bizonytalanságát; különlegesen nagy a közvetett aeroszolatások bizonytalansága. Mindez részben az aeroszol térbeli és időbeli inhomogenitásából adódik, részben az aeroszol kémiai és fizikai tulajdonságai, valamint a felhők mikrofizika folyamatai közötti komplex kapcsolatrendszer eredménye. Mindenesetre az aeroszolhoz kapcsolódó ismereteink hiányosságai járulnak hozzá legnagyobban mértékben a globális éghajlati modellek szolgáltatta eredmények bizonytalanságához.

Az antropogén tevékenységhez kapcsolódó globális klímaváltozásban mind az üvegházhatású gázok, mind a légköri aeroszol fontos szerepet játszanak. Előbbi a globális átlagos felszíni hőmérséklet növekedését eredményezi jól meghatározott mértékben; utóbbi a hőmérséklet csökkenését okozza, amelynek számszerűsítése jelenleg bizonytalan, de igen jelentős is lehet. Kissé leegyszerűsítve: két, egymással ellentétes hatású jelenség: a globális felmelegedés és a globális elhomályosodás alakítja a Föld éghajlatát, és az egymást többé-kevésbé kioltó hatással magyarázható, hogy a Föld felmelegedése az elmúlt, valamivel több mint száz évben csupán  $(0,7 \pm 0,2)^\circ\text{C}$  mértékű volt a korábbi, (az aeroszolt elhanyagoló)  $1,5\text{--}2^\circ\text{C}$  nagyságú előrejelzésekkel szemben. Ebből

a szempontból sokkal adekvátabb globális éghajlatváltozásról beszélni a globális felmelegedés helyett. Az antropogén tevékenységhez kapcsolódó légköri aeroszol éghajlati hatásának jelentőségét és kvantifikálását az INDOEX kísérletben tanulmányozták célirányosan (Krishnan – Ramanathan, 2002). Az eredményekből arra következtetünk, hogy az aeroszol éghajlati jelentősége meghaladja (akár tízszeresen is) az eddigi modellszámítások becsléseit. A 2001. szeptember 11-i, USA-beli terrortámadás után elrendelt repülési tilalom négy napjára vonatkozó meteorológia adatok korábbi adatsorokkal történő összehasonlítása is arra utal, hogy az antropogén aeroszolhatás igen jelentős (Travis et al., 2002). Ezek következtében azonban a gázok melegítő hatása eredőjének is intenzívebbnek kell lennie, hiszen a Föld globális átlagos hőmérséklete csak kismértékben változott az elmúlt évszázadban. A két, elmentéses éghajlati hatás tehát valószínűleg intenzív, és bizonyos szélsőséges meteorológiai helyzeteket okozhat aszerint, hogy térben és/vagy időben esetleg az egyik vagy másik dominanciája alakul ki. Tudatosítani kell azonban, hogy az éghajlat nagyon összetett és szövevényes rendszer, amelynek valamilyen szempontból történő egyszerűsítése könnyen hibás következtetésekhez vezethet. A média (tömegtájékoztató), a közvélemény és a politikusok is gyakran és könnyedén okolják az éghajlatváltozást a természeti csapásokért vagy katasztrófáikért. A köztük lévő közvetlen kapcsolat azonban nem mindig igazolható tudományosan, és gyakran még a kutatói társadalmat is megosztja. Mindez a tudásunk, ismereteink és adataink hiányából is fakad. A Katrina hurrikán pusztítása kapcsán előtérbe került összehasonlító vizsgálatok például azt mutatják, hogy a trópusi ciklonok gyakorisága igazából nem nőtt, de intenzitásuk és időtartamuk jelentősen nagyobb lett az elmúlt 30-35 év alatt (Emanuel, 2005; Scheimeier, 2005).

### Az éghajlat érzékenysége

Az antropogén aeroszol okozta éghajlati kényszer nagyfokú bizonytalansága befolyásolja a globális éghajlatváltozás előrejelzését is. Az éghajlat érzékenysége kifejezi, hogy egy adott perturbáció milyen mértékű éghajlatváltozást eredményez, amit gyakran a szén-dioxid koncentrációjának megduplázódása által kiváltott globális átlagos felszíni hőmérséklet egyensúlyi növekedésével ( $\Delta T_{2\times\text{CO}_2}$ ) fejezünk ki. A fentieknek megfelelően az éghajlat érzékenysége a következő alakban definiálható:

$$\Delta T_{2\times\text{CO}_2} = \frac{1}{\lambda} \Delta Q_{2\times\text{CO}_2} \quad (1)$$

Az antropogén aeroszol okozta éghajlati kényszer nagyfokú bizonytalansága befolyásolja a globális éghajlatváltozás előrejelzését is. Az éghajlat érzékenysége kifejezi, hogy egy adott perturbáció milyen mértékű éghajlatváltozást eredményez, amit gyakran a szén-dioxid koncentrációjának megduplázódása által kiváltott globális átlagos felszíni hőmérséklet egyensúlyi növekedésével ( $\Delta T_{2\times\text{CO}_2}$ ) fejezünk ki. A fentieknek megfelelően az éghajlat érzékenysége a következő alakban definiálható:

$$c \frac{d(\Delta T)}{dt} = \Delta Q - \lambda \Delta T, \quad (2)$$

ahol  $c$  a rendszer hőkapacitása (ami első közelítésben az óceánok hőfelvételéből becsülhető),  $t$  az idő és  $\Delta T$  a globális átlagos hőmérséklet változása, amit a  $\Delta Q$  éghajlati kényszer változása okoz. Ez utóbbi a természetes és antropogén járulékokat is tartalmazza. Az (1) és (2) egyenletek kombinálása lehetővé teszi az éghajlat érzékenységének kifejezését:

$$\Delta T_{2\times\text{CO}_2} = \Delta Q_{2\times\text{CO}_2} \frac{\Delta T}{\Delta Q - c \frac{d(\Delta T)}{dt}} \quad (3)$$

A (3) számú egyenletben a  $\Delta Q = \Delta Q_G + \Delta Q_A$  a viszonylag jól ismert, üvegházhatású gázok okozta éghajlati kényszeret, valamint az aeroszol okozta, nagyon bizonytalan, de potenciálisan jelentős éghajlati kényszeret tartalmazza. A (3) számú egyenlet azt mutatja, hogy ha az aeroszol hűtő hatása viszonylag nagy, akkor az éghajlat sokkal érzékenyebben reagál a jövőbeli, valószínűsíthető változásokra. Az éghajlat érzékenysége az aeroszol éghajlati hatás elhanyagolásakor csupán  $\Delta T_{2\times CO_2} = +1,3^\circ C$ , míg  $-1.7 W/m^2$  aeroszol éghajlati kényszer esetén (amelyik mindegyik közvetlen és közvetett aeroszolhatást magába foglalja) az éghajlat érzékenysége eléria  $\Delta T_{2\times CO_2} = +10^\circ C$ -ot (Andreae et al., 2005). Az utóbbi, egyensúlyi érték meglehetősen nagyra tűnik. Ráadásul a hőmérsékletnövekedés 50-70 %-a rövid időn belül jelentkezik. Az aeroszol éghajlati kényszerre vonatkozó legfrissebb adatok tartományában ( $-1$  és  $-2 W/m^2$  között) az éghajlat érzékenysége meredeken nő és bizonytalanra válik. Ilyen óriási növekedés (pontosabban érzékenység), meghaladja a jégkorszak és interglaciális időszak közötti hőmérsékletváltozást, és kívül esik eddigi tapasztalataink körén. Rendkívül nehéz előrejelezni bármilyen következményt is; a számszerűsítés és a bizonytalanság csökkentése pedig több, átfogó és interdiszciplináris alap kutatás és modellfejlesztés nélkül nehezen képzelhető. Egy adott térségben történő éghajlatváltozást és ennek lehetséges következményeit még problematikusabb megbecsülni, és egyéb, szakmai háttérismeretekre és empirikus kapcsolatterezésre is támaszkodnak általában ilyenkor. A hazai változásokkal több dolgozat foglalkozott a közelmúltban (például Mika, 2004; Bartholy – Mika, 2005); a magyarországi éghajlati jelenségekre adandó lehetséges társadalmi válaszokat pedig a VAHAVA projekt keretében tanulmányozzák szisztematikus és összefogó módon (URL: <http://www.vahava.hu>).

### Diszkusszió

Az üvegházhatású gázok és légköri aeroszol éghajlati szerepének összehasonlításakor tudatosítani kell azonban néhány alapvető különbséget. 1.: a finom méretfrakciójú aeroszolrészecskék átlagos troposzférikus tartózkodási ideje maximum egy-két hét, ellentétben az üvegházhatású gázok több tíz, esetenként száz évet is meghaladó tartózkodási idejével. Az aeroszol hatása tehát elsősorban rövid időskálán jelentkezik. 2.: az aeroszol forrásainak és nyelőinek elhelyezkedése és intenzitása, valamint troposzférikus tartózkodási ideje miatt időnként az emberi egészségre káros légköri koncentrációban fordul elő, ellentétben az üvegházhatású gázokkal, amelyek egészségkárosító hatása a népességre nem jelentős. Az aeroszol-levegőszennyezettség csökkentése világszerte nagy prioritású feladat. Az egészségügyi hatások és az antropogén perturbáció általában forgalmas nagyvárosok vagy iparvidékek szennyezett levegőjében és levegőcsóvjában jelentősek. A városi agglomerációt egyben nagyszámú lakos és gyakran értékes épített környezet is jellemzik, így az esetleges káros hatások jelentős populációt és kulturális örökséget érintenek. Az aeroszol koncentrációjának csökkentését az éghajlati és egészségügyi okokon kívül a közvetlen érzékszervi tapasztalás (például látótávolság észlelése) is motiválja és mozgatja. Ennek megfelelően, a világ fejlettebb területei (köztük az EU is) az aeroszol kibocsátásának csökkentését (úgy tűnik, sikeresen és növekvő ütemben) el is kezdték, ami a koncentrációszint csökkenését eredményezi rövid időn belül a kis tartózkodási idő miatt. Az emissziós szcenáriók alapján ezt a trendet a növekvő népesség és a fejlődő világ iparosodása sem módosítja lényegesen. Ezzel szemben az üvegházhatású gázok emisszióját egyelőre nem sikerült csökkenteni (a *Kiotói Jegyzőkönyv* ellenére sem), sőt további növekedés prognosztizált,

és így további légszennyezés akkumuláció várható a nagy tartózkodási idők miatt. A globális éghajlatot várhatóan háromszoros antropogén hatás alakítja majd a XXI. században: az üvegházhatású gázok okozta növekvő fűtés, a légszennyezés okozta csökkenő hűtés, valamint a szén biogeokémiai körforgásának pozitív visszacsatolása (a talaj széntartalmának járuléka a légszennyezés-dioxidhoz). Az aeroszol „védő” szerepe tehát csökken a jövőben, ami a Föld globális éghajlatát érzékenyebbé és bizonytalanabbá teszi az elképzelt változásokkal szemben.

Az semmiképpen sem tűnik helyes megoldásnak, hogy a légszennyezés koncentrációját nem csökkentjük, vagy ezt éghajlati okokra hivatkozva elhanyagoljuk. Bizonyos fokú megoldást a *Kiotói Jegyzőkönyv* (2005. februártól érvényes, teljes szöveg magyarul és angolul az URL: [http://www.kvvm.hu/szakmai/klima/dokumentum/pdf/kp\\_hun.pdf](http://www.kvvm.hu/szakmai/klima/dokumentum/pdf/kp_hun.pdf) címen) megvalósítása és az általa képví-

selt elgondolások követése jelenthet, valamint az emberiségnek/közvéleménynek egyébként sem nagyon marad más választása, mint hogy minimalizálja és elfogadja a nukleáris energiatermelés kockázatait, illetve hogy komolyan foglalkozzon a mezőgazdaságra vagy fotoszintézisre épülő vegyipar és energiatermelés lehetőségeivel. Az éghajlatváltozás bizonyos következményei és hatásai az emberiség életkörülményeire és az ökoszisztémákra ennek ellenére elkerülhetetlennek tűnnek jelenleg, ezért nagyon fontos a társadalom korrekt tájékoztatása, felkészítése és felkészülése a várható jövőre világszerte és hazánkban is. E folyamatban a tudományos társaságoknak és döntéshozóknak is feladatuk és felelősségük van.

Kulcsszavak: *éghajlati kényszer, éghajlat érzékenysége, globális felmelegedés, globális elhomályosodás, korom aeroszol, szerves aeroszol*

## IRODALOM

- Andreae, Meinrat O. – Jones, Ch. D. – Cox, P. M. (2005): Strong Present-Day Aerosol Cooling Implies a Hot Future. *Nature*. 435, 1187–1190.
- Bartholy Judit – Mika János (2005): Időjárás és éghajlat – cseppben a tenger? *Magyar Tudomány*. 7, 789–796.
- Emanuel, Kerry (2005): Increasing Destructiveness of Tropical Cyclones over the Past 30 Years. *Nature* 436, 686–688.
- Haszpra László – Barcza Zoltán (2005): Légszennyezés-dioxidmérések Magyarországon. *Magyar Tudomány*. 1, 104–112.
- IPCC TAR (Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change) (2001): *Climate Change 2001. The Scientific Basis*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, New York.
- Jacobson, Mark Z. (2001): Strong Radiative Heating Due to the Mixing State of Black Carbon in Atmospheric Aerosols. *Nature* 409, 695–697.
- Krishnan, R. – Ramanathan, Veerabhadran (2002): Evidence of Surface Cooling from Absorbing Aerosol. *Geophysical Research Letters*. 29, Doi: 10.1029/2002GL014687.
- Mészáros Ernő (1992): Structure of Continental Clouds before the Industrial Era: A Mystery to Be Solved. *Atmospheric Environment*. 26A, 2469–2470.
- Mika János (ed.) (2004): Klímaváltozás, hazai hatások. *Természet Világa*. 135, II. Különszám.
- Ramanathan, Veerabhadran – Crutzen, P. J. – Kiehl, J. T. – Rosenfeld, D. (2001): Aerosols, Climate, and Hydrological Cycles. *Science*. 294, 2119–2124.
- Salma Imre – Ocskay R. – Raes, N. – Maenhaut, W. (2005): Fine Structure of Mass Size Distributions in an Urban Environment. *Atmospheric Environment*. 39, 5363–5374.
- Schiermeier, Quirin (2005): Trouble Brews over Contested Trend in Hurricanes. *Nature*. 435, 1008–1009.
- Stanhill, Gerald – Cohen, Shabtai (2001): Global Dimming: A Review of the Evidence for Widespread and Significant Reduction in Global Radiation with Discussion of Its Probable Causes and Possible Agricultural Consequences. *Agricultural and Forest Meteorology*. 107, 255–278.
- Travis, David J. – Carleton, A. M. – Lauritsen, R. G. (2002): Contrails Reduce Daily Temperature Range. *Nature*. 418, 601.
- Twomey, Sean A. (1974): Pollution and the Planetary Albedo. *Atmospheric Environment*. 8, 1251–1256.
- Wild, Martin – Gilgen, H. – Roesch, A. – Ohmura, A. (2005): From Dimming to Brightening: Decadal Changes in Solar Radiation at the Earth's Surface. *Science*. 308, 847–850.